

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
Кафедра химии и биотехнологии

ФИЗИЧЕСКАЯ И КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

*Методические указания и контрольные задания
для студентов заочной формы обучения
по направлению «Нефтегазовое дело»*

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2017

Составители: Е.А. Тиньгаева, О.И. Бахирева, Л.С. Пан

УДК 541.18 (075.8)

Ф50

Рецензент

канд. хим. наук, доцент *М.М. Соколова*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Физическая и коллоидная химия : метод. указания и
Ф50 контр. задания для студентов заочной формы обучения по на-
правлению «Нефтегазовое дело» / сост. Е.А. Тиньгаева [и др.]. –
Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 64 с.

Приведены программа курса физической и коллоидной химии, многовариантные задания по основным темам курса, примеры решения типовых задач, а также справочные материалы, необходимые для расчетов.

Издание предназначено для студентов заочного обучения по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

УДК 541.18 (075.8)

© ПНИПУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	4
МОДУЛЬ 1. Химическая термодинамика и кинетика	8
Задание 1.1. Определение возможности протекания химической реакции	8
Задание 1.2. Химическая кинетика	10
МОДУЛЬ 2. Фазовое равновесие и явления на границе раздела фаз.....	26
Задание 2.1. Адсорбция	27
Задание 2.2. Коагуляция и адсорбция ПАВ.....	31
Задание 2.3. Формула мицеллы	35
Задание 2.4. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем	37
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	50
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	51
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	63

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Физическая и коллоидная химия» относится к вариативной части цикла математических и естественно-научных дисциплин и является необходимой при освоении основной образовательной программы по направлению 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Цель изучения дисциплины – развитие и углубление знания законов физической и коллоидной химии, что является составной частью подготовки студентов по фундаментальным наукам; изучение методов физической и коллоидной химии и приобретение умения применять их к анализу систем, процессов и явлений, имеющих место при строительстве, ремонте, эксплуатации скважин различного назначения.

Предметом изучения в данной дисциплине являются следующие объекты:

- вещество, его строение, свойства, идентификация и анализ физико-химическими методами;
- нефтегазовые дисперсные системы и их параметры;
- физико-химические процессы и явления.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

• **знать:**

- основные законы и теории физической и коллоидной химии,
- свойства и закономерности поведения дисперсных систем,
- физико-химические методы анализа,
- методы теоретического и экспериментального исследования пород, технологических жидкостей, дисперсных систем и основных производственных процессов,
- законы и положения физической и коллоидной химии, которые используются в основных технологиях нефтегазового производства,
- термодинамические и кинетические условия протекания химических реакций,

– факторы, влияющие на равновесие в гомогенных и гетерогенных системах,

– реологические свойства растворов высокомолекулярных соединений;

• **уметь:**

– использовать основные законы и теории физической и коллоидной химии при осуществлении технологических процессов,

– применять знания о составах и свойствах нефти и газа в соответствующих расчетах,

– прогнозировать влияние различных физико-химических факторов на проведение технологического процесса,

– использовать принципы классификации нефтегазовых систем,

– использовать основные законы термодинамики, кинетики, фазового равновесия для анализа качества производственной деятельности нефтегазовых предприятий,

– использовать законы физической и коллоидной химии при решении проблем профессиональной деятельности,

– выполнять физико-химический эксперимент и проводить обобщение его результатов,

– определять термодинамические характеристики дисперсных систем и равновесные концентрации их компонентов,

– рассчитывать скорость реакции и оценивать влияние различных факторов на нее;

• **владеть:**

– навыками практического применения законов и теорий физической и коллоидной химии в профессиональной деятельности,

– физико-химическими методами анализа многокомпонентных дисперсных систем,

– навыками выполнения физико-химического эксперимента и основных лабораторных операций,

– методами анализа содержательной интерпретации результатов физико-химического эксперимента,

– навыками проведения теоретических расчетов, связанных с определением возможности, полноты и скорости протекания химических процессов,

– методами изучения физико-химических и механических свойств горных пород на воздухе и в контакте с различными жидкостями.

Основной вид учебных занятий студентов заочного обучения – самостоятельная работа над учебным материалом.

Предлагается следующий порядок изучения данного курса: изучение материала по учебникам и учебным пособиям; выполнение контрольных заданий и лабораторного практикума; индивидуальные консультации; посещение лекций; сдача зачета по всему курсу.

Студентам необходимо выполнить контрольную работу, включающую два модуля (по физической и коллоидной химии). В начале каждого модуля приведена программа для подготовки к зачету. Далее помещены задания с общим для всех вариантов условием и конкретными данными для каждого варианта. Необходимая для расчетов справочная информация дана в приложениях. В конце каждого модуля рассматриваются примеры решения задач. Решения задач и ответы на теоретические вопросы должны быть краткими и отражать суть вопроса. При решении задач нужно приводить все математические преобразования, избирая простейший путь решения.

В контрольной работе номера и условия задач следует переписывать в том порядке, в котором они указаны в задании. Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге. Вариант контрольной работы указывает преподаватель. Задание, выполненное не по своему варианту, преподавателем не рецензируется и не зачитывается. Работа должна быть представлена в рукописном виде. Набранные на компьютере или сканированные работы не принимаются.

Контрольная работа выполняется в тетради школьного типа, на лицевой стороне которой приводятся следующие сведения:

ФИЗИЧЕСКАЯ И КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

Контрольная работа
студента ПНИПУ группы _____

(фамилия, имя, отчество)

Вариант _____ Домашний адрес _____
E-mail _____

В конце работы должны быть указаны дата ее окончания и подпись лица, выполнившего работу.

Модуль 1

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА

Основы химической термодинамики. Внутренняя энергия, теплота, работа. Первый закон термодинамики. Закон Гесса. Методы расчета тепловых эффектов химических реакций. Теплоемкость. Уравнение Кирхгофа. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Термодинамические функции. Энергия Гиббса. Энергия Гельмгольца. Уравнение Гиббса–Гельмгольца. Постулат Планка. Химический потенциал вещества и общие условия равновесия систем. Химическое равновесие, константа равновесия. Закон действующих масс. Уравнение изотермы Вант-Гоффа. Зависимость константы равновесия от температуры. Уравнение изобары и изохоры. Равновесие в гетерогенных системах.

Формальная кинетика. Скорость химической реакции, молекулярность, порядок. Кинетические уравнения реакций 0, 1, 2 и 3-го порядков. Период полуреакции. Способы определения порядка реакции. Зависимость скорости реакции от температуры. Энергия активации. Особенности кинетики гетерогенных процессов. Законы Фика. **Гомогенный и гетерогенный катализ.** Теории катализа.

Задание 1.1. Определение возможности протекания химической реакции

Для реакций, соответствующих вашему варианту (табл. 1), выполните следующие задания (справочные величины, необходимые для расчетов, возьмите в прил. 1):

1. Рассчитайте тепловой эффект реакции в стандартных условиях ΔH_{298}^0 . Укажите, выделяется или поглощается теплота при протекании этой реакции. Каким будет тепловой эффект реакции, если в ней расходуется 1 кг одного из исходных веществ?

2. По уравнению реакции и агрегатным состояниям веществ качественно оцените изменение энтропии реакции ($\Delta S > 0$, $\Delta S < 0$ или $\Delta S \approx 0$). Объясните полученный результат.

Таблица 1

Номер варианта	Реакция	T_2 , К
1	$\text{CaCO}_{3(\text{т})} = \text{CaO}_{(\text{т})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$	1000
2	$4\text{FeS}_{2(\text{т})} + 11\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{т})} + 8\text{SO}_{2(\text{г})}$	400
3	$2\text{H}_2\text{S}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} + 2\text{S}_{(\text{т})}$	300
4	$\text{FeO}_{(\text{т})} + \text{H}_2_{(\text{г})} = \text{Fe}_{(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	650
5	$\text{CaO}_{(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} = \text{Ca}(\text{OH})_{2(\text{т})}$	400
6	$\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{т})} + 3\text{SO}_{3(\text{г})} = \text{Al}_2(\text{SO}_4)_{3(\text{т})}$	700
7	$2\text{NO}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{NO}_{2(\text{г})}$	600
8	$2\text{KOH}_{(\text{т})} + \text{CO}_{2(\text{г})} = \text{K}_2\text{CO}_{3(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	800
9	$\text{SnO}_{2(\text{т})} + 2\text{H}_{2(\text{г})} = \text{Sn}_{(\text{т})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	500
10	$\text{PbO}_{(\text{т})} + \text{SO}_{3(\text{г})} = \text{PbSO}_{4(\text{т})}$	900
11	$4\text{NH}_{3(\text{г})} + 5\text{O}_{2(\text{г})} = 4\text{NO}_{(\text{г})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	650
12	$4\text{HCl}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{Cl}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	400
13	$\text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{т})} = \text{MgO}_{(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	500
14	$2\text{NaHCO}_{3(\text{т})} = \text{Na}_2\text{CO}_{3(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$	400
15	$2\text{CuS}_{(\text{т})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{CuO}_{(\text{т})} + 2\text{SO}_{2(\text{г})}$	250
16	$\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{т})} + 4\text{H}_{2(\text{г})} = 3\text{Fe}_{(\text{т})} + 4\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	500
17	$2\text{H}_2\text{S}_{(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{SO}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	300
18	$\text{Ca}(\text{OH})_{2(\text{т})} + \text{CO}_{2(\text{г})} = \text{CaCO}_{3(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	500
19	$\text{CS}_{2(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = \text{CO}_{2(\text{г})} + 2\text{SO}_{2(\text{г})}$	800
20	$\text{MgCO}_{3(\text{т})} = \text{MgO}_{(\text{т})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$	900
21	$\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{т})} + 3\text{H}_{2(\text{г})} = 2\text{Fe}_{(\text{т})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	700
22	$2\text{KHCO}_{3(\text{т})} = \text{K}_2\text{CO}_{3(\text{т})} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{г})} + \text{CO}_{2(\text{г})}$	500
23	$\text{BaO}_{(\text{т})} + \text{CO}_{2(\text{г})} = \text{BaCO}_{3(\text{т})}$	500
24	$4\text{HBr}_{(\text{г})} + \text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{Br}_{2(\text{г})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	700
25	$4\text{NH}_{3(\text{г})} + 3\text{O}_{2(\text{г})} = 2\text{N}_{2(\text{г})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}$	750

3. Рассчитайте изменение энтропии реакции в стандартных условиях ΔS_{298}^0 по значениям стандартных энтропий участников реакции S_{298}^0 .

4. Качественно оцените возможность самопроизвольного протекания реакции при высоких и низких температурах.

5. Рассчитайте изменение энергии Гиббса ΔG_T^0 реакции, протекающей при стандартном давлении и температурах $T_1 = 298$ К и T_2 , допуская, что ΔH_{298}^0 и ΔS_{298}^0 не зависят от температуры.

6. Постройте график зависимости ΔG_T^0 от температуры. Укажите, как влияет температура на возможность самопроизвольного протекания реакции в прямом направлении.

7. Выразите константу равновесия реакции K_p через парциальные давления участников реакции. Рассчитайте термодинамическую константу равновесия реакции, протекающей при $T_1 = 298$ К и T_2 . Укажите, при какой из этих температур равновесная смесь богаче продуктами реакции.

8. Определите температуру, при которой изменяется направление реакции. Укажите, в каком направлении будет протекать реакция при температуре, которая выше найденной.

Задание 1.2. Химическая кинетика

Для реакции (табл. 2) определите порядок и константу скорости всеми возможными способами, используя данные о ходе процесса во времени t .

Таблица 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
1	$Rn \rightarrow Po + He$; a – объем газа Rn, м ³	0	a 0,102
		70	0,062
		110	0,044
		140	0,033
		165	0,025
		200	0,019

Продолжение табл. 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
2	$2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2\text{Br}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + 4\text{HBr}$; спирт в большом избытке; C – концентрация брома, ммоль/дм ³	0	C 4,24
		4	3,14
		6	2,49
		10	2,24
		15	1,78
		0	8,14
		4	6,10
		10	4,45
		15	3,73
3	$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; в водном растворе; a – объем 0,015 М раствора KMnO_4 , израсходованного на титрование 2 см ³ пробы, см ³	0	a 23,6
		10	14,8
		20	9,4
		30	5,8
		40	3,7
4	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 + 2\text{KI} \rightarrow 2\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{I}_2$; a – объем 0,01 н. раствора $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, израсходованного на титрование йода в 25 см ³ пробы, см ³	9	a 4,5
		16	7,8
		32	14,2
		∞	20,0
5	Раствор N_2O_5 в CCl_4 разлагается с выделением O_2 : $2\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{NO}_2 + \text{N}_2\text{O}_4 + \text{O}_2$; a – объем O_2 , см ³	20	a 11,4
		40	19,9
		60	23,9
		80	27,2
		100	29,5
		∞	34,8
6	H_2O_2 в присутствии коллоидной платины разлагается с выделением O_2 : $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; a – объем O_2 , см ³	10	a 3,3
		30	8,1
		∞	15,6

Продолжение табл. 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
7	$2C_4H_6 \rightarrow C_8H_{12}$; P – общее давление системы, кПа; $V = \text{const}$	0	P 84
		10	79
		21	74
		29	71
		50	66
		61	64
		90	60
8	$C_{12}H_{22}N_{11} + H_2O = C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$; C – концентрация сахара в данный момент, моль/дм ³ ; C_0 – начальная концентрация сахара, моль/дм ³ , $C_0 = 0,65$ моль/дм ³	0	$\frac{C_0}{C}$ 1,000
		1435	1,081
		4315	1,266
		7070	1,464
		11360	1,830
		14170	2,117
		16935	2,466
		19815	2,857
		29925	4,962
		∞	–
9	$CH_3COOC_2H_5 + NaOH \rightarrow CH_3COONa + C_2H_5OH$; a – объем 0,02 н. раствора HCl, израсходованного на титрование 5 см ³ пробы, см ³	0	a 62,2
		4,9	50,6
		10,4	42,4
		28,2	29,4
10	$N_2O_5 \rightarrow N_2O_4 + 0,5O_2$; C – концентрация N_2O_5 , моль/дм ³	0	C 2,33
		184	2,08
		319	1,91
		526	1,67
		867	1,36
		1198	1,11
		1877	0,72
		2315	0,55
3144	0,34		

Продолжение табл. 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
11	$2\text{AsH}_{3(\text{г})} \rightarrow 2\text{As}_{(\text{т})} + 3\text{H}_{2(\text{г})}$; P – общее давление системы, кПа; $V = \text{const}$	0	P 97,8
		330	107,4
		390	109,1
		480	111,4
12	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3 + \text{NaOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COONa} + \text{CH}_3\text{OH}$; C – концентрация NaOH, ммоль/дм ³	0	C 10,0
		3	7,4
		5	6,3
		7	5,5
		10	4,6
		15	3,6
		25	2,5
13	$\text{CO} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{COCl}_2$; P – общее давление системы, кПа; $V = \text{const}$	0	P 96,5
		5	90,0
		10	82,9
		15	77,9
		21	73,5
14	$\text{CH}_2\text{ClCOOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2(\text{OH})\text{COOH} + \text{HCl}$; a – объем 0,1 н. раствора NaOH, израсходованного на титрование 25 см ³ пробы, см ³	0	a 12,9
		600	15,8
		780	16,4
		2070	20,5
15	$2\text{FeCl}_3 + \text{SnCl}_2 \rightarrow 2\text{FeCl}_2 + \text{SnCl}_4$; C – концентрация FeCl ₂ , моль/дм ³ ; C_0 – исходная концентрация FeCl ₃ , моль/дм ³ , $C_0 = 0,0625$ моль/дм ³	1,2	C 0,01434
		3,0	0,02586
		7,2	0,03612
		16,8	0,04502
		40,2	0,05058

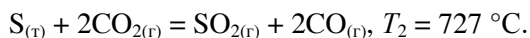
Продолжение табл. 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
16	$S_2O_8^{2-} + 2[Mo(CN)_8]^{4-} \rightarrow 2SO_4^{2-} + 2[Mo(CN)_8]^{3-}$; C – концентрация оставшегося $[Mo(CN)_8]^{4-}$, моль/дм ³ ; C_0 – исходная концентрация $[Mo(CN)_8]^{4-}$, моль/дм ³ , $C_0 = 0,02$ моль/дм ³	26	C 0,01562
		45	0,01336
		75	0,01103
		98	0,00961
		142	0,00770
		239	0,00546
17	$CH_3COCH_3 \rightarrow C_2H_4 + H_2 + CO$; P – общее давление системы, Па; $V = const$	0	P 41589,6
		6,5	54386,4
		13,0	65050,4
		19,9	74914,6
18	$C_2H_5OH + HCOOH \rightarrow HCOOC_2H_5 + H_2O$; a – объем 0,1 н. раствора $Ba(OH)_2$, израсходованного на титрование 5 см ³ пробы, см ³	0	a 43,5
		50	40,4
		100	37,8
		160	35,1
		220	31,1
19	$2C_6H_{11}NH_2 + C_3H_5Br \rightarrow C_6H_{11}NHC_3H_5 + C_6H_{11}NH_3Br$; x – количество превратившегося циклогексиламина, %	4,2	x 26,31
		7,8	44,82
		12,0	59,43
		16,2	66,25
20	$Cu + (NH_4)_2S_2O_8 \rightarrow CuSO_4 + (NH_4)_2SO_4$; C – концентрация $CuSO_4$, моль/дм ³ ; C_0 – исходная концентрация $(NH_4)_2S_2O_8$, моль/дм ³ , $C_0 = 0,22$ моль/дм ³	4,8	C 0,0100
		10,2	0,0200
		15	0,0298
		25,2	0,0480
21	$K_2S_2O_8 + 2KI \rightarrow 2K_2SO_4 + I_2$; C – концентрация I_2 , моль/дм ³	16	C 0,813
		32	0,921
		45	0,975
		64	1,019
		∞	1,050

Окончание табл. 2

Номер варианта	Реакция, параметры и условия протекания	t , мин	Результат контроля за ходом реакции
22	$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$; a – объем 0,1 н. раствора KMnO_4 , израсходованного на титрование 25 см^3 раствора H_2O_2 , см^3	0	a 22,8
		10,2	13,8
		19,8	8,3
23	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{HBr}$; C – концентрация $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$, моль/ дм^3	0	C 8,49
		3,3	7,96
		6,7	7,46
		26,7	5,05
		40	3,89
		60	2,63
24	$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$; P – повышение давления системы, Па; P_0 – начальное давление, мм рт. ст., $P_0 = 250$ мм рт. ст.	1,7	P 1466
		3,3	2946
		6,7	5865
		10,0	8838
		13,3	11717
		16,7	14663
25	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}$; P – общее давление системы, кПа; $V = \text{const}$	0	P 15,5
		4	16,3
		7	16,8
		9	17,2
		12	17,8
		18	18,8

Пример 1.1. Выполните задание 1.1 для следующей реакции:



Решение. Стандартные энтальпии образования и энтропии веществ, участвующих в химической реакции, берем из прил. 1:

Вещество	S _(т)	CO _{2(г)}	SO _{2(г)}	CO _(г)
ΔH_{298}^0 , кДж/моль	0	-393,51	-296,9	-110,5
S_{298}^0 , Дж/(моль·К)	31,88	213,6	248,1	197,4

1. Согласно следствию из закона Гесса тепловой эффект химической реакции равен разности между суммой стандартных энтальпий образования продуктов реакции $\Delta H_{298(\text{прод.})}^0$ и суммой стандартных энтальпий образования исходных веществ $\Delta H_{298(\text{исх.})}^0$ с учетом стехиометрических коэффициентов n , m :

$$\Delta H_{298}^0 = \sum n \Delta H_{f,298(\text{прод.})}^0 - \sum m \Delta H_{f,298(\text{исх.})}^0 ;$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^0 &= \Delta H_{f,298}^0 (\text{SO}_2) + 2 \Delta H_{f,298}^0 (\text{CO}) - \Delta H_{f,298}^0 (\text{S}) - \\ &- 2 \Delta H_{f,298}^0 (\text{CO}_2) = -296,9 + 2(-110,5) - 0 - 2(-393,51) = 269,12 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Таким образом, при прохождении реакции теплота поглощается, т.е. реакция эндотермическая ($-Q$).

Рассчитаем теперь, сколько теплоты поглотится, если в реакции израсходуется 1 кг серы.

Находим количество вещества серы:

$$n_{(\text{S})} = m_{(\text{S})}/M_{(\text{S})},$$

где $m_{(\text{S})}$ – масса серы, г, $m_{(\text{S})} = 1000$ г; $M_{(\text{S})}$ – молярная масса серы, г/моль, $M_{(\text{S})} = 32$ г/моль.

Отсюда

$$n_{(\text{S})} = 1000/32 = 31,25 \text{ моль.}$$

Поскольку при взаимодействии с углекислым газом 1 моль серы поглощается 269,12 кДж, то при использовании серы в количестве $n_{(\text{S})}$ поглощается следующее количество теплоты:

$$-Q = \Delta H_{298}^0 = 31,25 \cdot 269,12 = 8410 \text{ кДж.}$$

2. Изменение энтропии в химической реакции определяет степень беспорядка в системе. В нашем примере ΔS возрастает, так как образуется большее число газообразных молекул ($\Delta S > 0$).

3. Изменение энтропии в химической реакции определяем по формуле:

$$\Delta S_{298}^0 = \sum n S_{298(\text{прод.})}^0 - \sum m S_{298(\text{исх.})}^0,$$

где $S_{298(\text{прод.})}^0$, $S_{298(\text{исх.})}^0$ – стандартные энтропии продуктов реакции и исходных веществ соответственно.

Получим:

$$\begin{aligned} \Delta S_{298}^0 &= S_{298}^0(\text{SO}_2) + 2 S_{298}^0(\text{CO}) - S_{298}^0(\text{S}) - 2 S_{298}^0(\text{CO}_2) = \\ &= 248,1 + 2 \cdot 197,4 - 31,88 - 2 \cdot 213,6 = 183,82 \text{ Дж/К}. \end{aligned}$$

4. Направление протекания реакции определяем по изменению энергии Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

При высоких температурах, т.е. при $T \rightarrow \infty$, величиной ΔH в уравнении можно пренебречь, значит, $\Delta G \approx -T\Delta S$. Для нашей реакции $\Delta S > 0$, следовательно, $\Delta G < 0$. Уменьшение величины энергии Гиббса свидетельствует о возможности протекания реакции в прямом направлении.

При низких температурах, т.е. при $T \rightarrow 0$, можно пренебречь величиной $T\Delta S$ и тогда $\Delta G \approx \Delta H$.

В нашем примере $\Delta H > 0$, следовательно, $\Delta G > 0$, и протекание реакции в прямом направлении является маловероятным.

5. Вычислим изменение энергии Гиббса в химической реакции при стандартных условиях ($T_1 = 298 \text{ К}$):

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - T_1 \Delta S_{298}^0;$$

$$\Delta G_{298}^0 = 269,12 - 298 \cdot 183,82 \cdot 10^{-3} = 214,34 \text{ кДж}.$$

Изменение энергии Гиббса в химической реакции при T_2 ($T_2 = 727\text{ }^\circ\text{C} + 273 = 1000\text{ K}$) определяем по уравнению Улиха:

$$\Delta G_{T_2} = \Delta H_{298}^0 - T_2 \Delta S_{298}^0 ;$$

$$\Delta G_{1000} = 269,12 - 1000 \cdot 183,82 \cdot 10^{-3} = 85,30 \text{ кДж.}$$

6. График зависимости $\Delta G_T^0 = f(T)$ строим по двум точкам (рис. 1). При увеличении температуры величина энергии Гиббса уменьшается, а вероятность протекания прямой реакции возрастает.

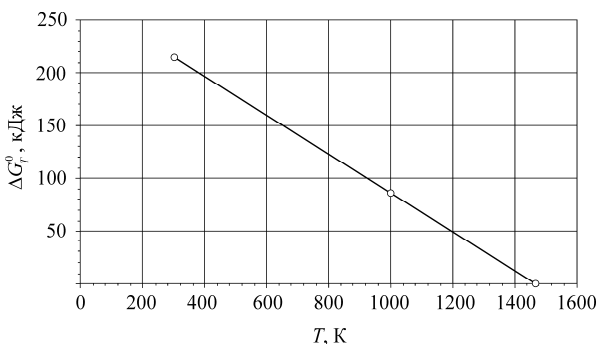


Рис. 1. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры

7. Выражение константы равновесия реакции K_P через парциальные давления P имеет вид:

$$K_P = \frac{P_{\text{SO}_2} \cdot P_{\text{CO}}^2}{P_{\text{CO}_2}^2}.$$

Взаимосвязь ΔG_T^0 и K_P представим уравнением:

$$\Delta G_T^0 = -RT \ln K_P.$$

Отсюда

$$\ln K_P = -\frac{\Delta G_T^0}{RT}.$$

При $T_1 = 298 \text{ K}$

$$\ln K_p = -\frac{214,34 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 298} = -86,6 \text{ и } K_{p(298)} = e^{-86,6}.$$

При $T_2 = 1000 \text{ K}$

$$\ln K_p = -\frac{85,30 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 1000} = -10,2 \text{ и } K_{p(1000)} = e^{-10,2}.$$

При обеих температурах равновесие смещено в сторону обратной реакции и продукты реакции в системе отсутствуют.

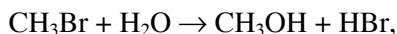
8. Реакция меняет направление, если $\Delta G = 0$. Из выражения $\Delta H - T\Delta S = 0$ можно определить температуру, при которой возникает состояние равновесия:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0} = \frac{269,12}{183,82 \cdot 10^{-3}} = 1464 \text{ K}.$$

При нагревании выше 1464 K реакция будет протекать в прямом направлении.

Если расчеты сделаны верно, график зависимости изменения энергии Гиббса от температуры в точке 1464 K пересекает ось температур.

Пример 1.2. Определите любым способом порядок следующей реакции:



и вычислите среднее значение константы скорости, если в ходе протекания реакции были получены следующие экспериментальные данные:

$t, \text{ ч}$	4,8	8,3	15,0	23,3	33,3	50,0	∞
$C_{\text{CH}_3\text{OH}}, \text{ ммоль/дм}^3$	12,0	18,7	28,9	37,9	45,0	51,6	57,2

Решение. Обозначим убыль концентрации CH_3Br к текущему моменту времени через x (ммоль/дм³). По уравнению величина x

равна концентрации полученного CH_3OH . Тогда к моменту времени t концентрацию CH_3Br вычислим по уравнению $C_{\text{CH}_3\text{Br}} = C_0 - x$, где C_0 – исходная концентрация CH_3Br .

Величина C_0 соответствует полному превращению бромистого метила в метиловый спирт ($C_0 = C_\infty$).

Получим следующие результаты:

$t, \text{ч}$	0	4,8	8,3	15,0	23,3	33,3	50,0
$C_{\text{CH}_3\text{Br}}, \text{ммоль/дм}^3$	57,2	45,2	38,5	28,3	19,3	12,2	5,6

Для определения порядка реакции используем метод подстановки. Метод подстановки заключается в определении того, какое уравнение кинетики реакции (первого, второго или третьего порядка) при подстановке в него экспериментальных данных при решении дает наиболее близкие значения констант скорости реакции. Именно это уравнение и определяет порядок исследуемой реакции.

Эти уравнения имеют вид:

– для реакции первого порядка $k_1 = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C}$;

– для реакции второго порядка $k_2 = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right)$;

– для реакции третьего порядка $k_3 = \frac{1}{2t} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{1}{C_0^2} \right)$,

где C_0 – начальная концентрация исходных веществ; C – концентрация исходных веществ к данному моменту времени t .

Подставим экспериментальные данные в уравнения для расчета констант скоростей реакции, получим:

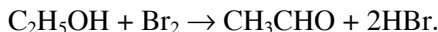
$t, \text{ч}$	4,8	8,3	15,0	23,3	33,3	50,0
$k_1, \text{ч}^{-1}$	0,0491	0,0477	0,0469	0,0466	0,0464	0,0465
$k_2, \text{дм}^3 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$	0,967	1,020	1,180	1,470	1,940	3,220
$k_3 \cdot 10^3, (\text{дм}^3)^2 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{моль}^{-2}$	0,0191	0,0222	0,0314	0,0510	0,0963	0,3158

Наиболее близкие значения констант скоростей получены для первого уравнения. Следовательно, рассматриваемая реакция имеет первый порядок.

Подсчитав их среднее значение, получим:

$$k_{\text{cp}} = 0,0472 \text{ ч}^{-1}.$$

Пример 1.3. Определите порядок реакции взаимодействия брома и этилового спирта:



Были получены следующие данные в двух опытах:

t , мин	0	4
C_{01} , моль/дм ³	0,00407	0,00305
C_{02} , моль/дм ³	0,00212	0,00157

Решение. Определяем порядок реакции по методу Вант-Гоффа:

$$n = \frac{\lg \frac{\Delta C_{01}}{\Delta t_{01}} - \lg \frac{\Delta C_{02}}{\Delta t_{02}}}{\lg \bar{C}_{01} - \lg \bar{C}_{02}},$$

где C_{01} , C_{02} – концентрация Br_2 в первом и втором опытах, моль/дм³.

Поскольку $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ – это средняя скорость реакции ν , то концентрации Br_2 также необходимо взять средние, рассчитаем их:

$$\bar{C}_{01} = \frac{0,00407 + 0,00305}{2} = 0,00356 \text{ моль/дм}^3;$$

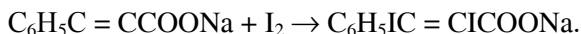
$$\bar{C}_{02} = \frac{0,00212 + 0,00157}{2} = 0,001845 \text{ моль/дм}^3.$$

Подставляем данные в формулу Вант-Гоффа:

$$n = \frac{\lg \frac{0,00407 - 0,00305}{4} - \lg \frac{0,00212 - 0,00157}{4}}{\lg 0,00356 - \lg 0,001845} = 0,94 \approx 1.$$

Следовательно, изучаемая реакция является реакцией первого порядка.

Пример 1.4. Определите порядок реакции, протекающей по уравнению



В данной реакции участвуют эквивалентные количества йода и натриевой соли фенолпропиоловой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_5\text{C} = \text{CCOONa}$). Об изменении концентрации йода судили по объему a раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование 25 см^3 пробы реагирующей смеси.

Для определения порядка реакции было проведено два опыта и получены следующие данные:

Опыт	Время t , ч	Объем a , см^3
1	0	24,96
	29	8,32
2	0	21,00
	34,5	7,00

Решение. Поскольку реакция происходила между эквивалентными концентрациями исходных веществ и к концу обоих опытов, как легко заметить, концентрация йода уменьшилась ровно в 3 раза, порядок этой реакции проще всего определить по методу Оствальда–Нойеса:

$$n = \frac{\lg \frac{t_{02}}{t_{01}}}{\lg \frac{a_{01}}{a_{02}}} + 1,$$

где t_{01} , t_{02} – время проведения 1-го и 2-го опытов соответственно, ч;
 a_{01} , a_{02} – объем раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование 25 см^3 пробы в первом и втором опытах соответственно, см^3 .

Подставляя значения, находим:

$$n = \frac{\lg \frac{34,5}{29}}{\lg \frac{24,96}{21,00}} + 1 = \frac{0,0754}{0,0751} + 1 \approx 2.$$

Таким образом, реакция между йодом и натриевой солью фенилпропиоловой кислоты имеет второй порядок.

Пример 1.5. Определите графическим способом порядок реакции разложения N_2O_5 при температуре 298 К ($V = \text{const}$). В ходе протекания реакции $\text{N}_2\text{O}_{5(r)} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_{4(r)} + 0,5\text{O}_{2(r)}$ общее давление изменялось следующим образом:

t , ч	0,33	0,50	0,67	0,83	1,67	2,33
P , Па	44665,5	45925,0	47078,0	48144,4	52476,3	54862,2

Начальное давление в системе $P_0 = 41\,080$ Па.

Решение. Концентрации исходного вещества можно заменить его парциальными давлениями, так как давление газа пропорционально его концентрации при $T = \text{const}$.

Выразим парциальное давление исходного вещества через общее давление системы. Пусть к моменту времени t убыль парциального давления N_2O_5 будет равна x . Тогда по уравнению реакции $P_{\text{N}_2\text{O}_4} = x$; $P_{\text{O}_2} = \frac{1}{2}x$. Парциальное давление N_2O_5 в момент времени t

$$P_{\text{N}_2\text{O}_5} = P_0 - x,$$

где P_0 – начальное давление N_2O_5 .

Общее давление системы в момент времени t

$$P = P_0 - x + x + \frac{1}{2}x = P + \frac{1}{2}x.$$

Отсюда $x = 2 \cdot (P - P_0)$. Тогда

$$P_{N_2O_5} = P_0 - x = 3P_0 - 2P.$$

Рассчитаем $P_{N_2O_5}$ в момент времени t :

$t, \text{ ч}$	0,33	0,50	0,67	0,83	1,67	2,33
$P_{N_2O_5}, \text{ Па}$	33909,0	31390,0	29084,0	26951,2	18287,4	13515,6

Построим графики следующих зависимостей (рис. 2–5):

1) $P_{N_2O_5} = f(t)$; 2) $\ln P_{N_2O_5} = f(t)$; 3) $1/P_{N_2O_5} = f(t)$; 4) $1/P_{N_2O_5}^2 = f(t)$.

Для построения графиков используем следующие данные:

$t, \text{ ч}$	0	0,33	0,50	0,67	0,83	1,67	2,33
$P_{N_2O_5}, \text{ Па}$	41080	33909,0	31390,0	29084,0	26951,2	18287,4	13515,6
$\ln P_{N_2O_5}$	10,623	10,431	10,354	10,278	10,202	9,814	9,512
$(1/P_{N_2O_5}) \cdot 10^5, \text{ Па}^{-1}$	2,43	2,95	3,19	3,44	3,71	5,47	7,40
$(1/P_{N_2O_5}^2) \cdot 10^{10}, \text{ Па}^{-2}$	5,93	8,70	10,15	11,82	13,77	29,90	54,74

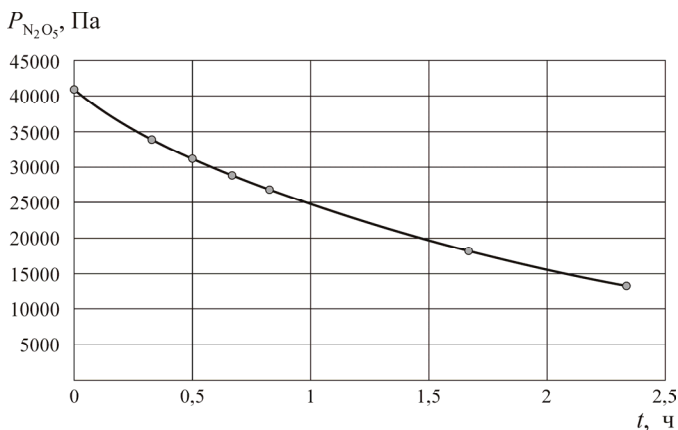


Рис. 2. Зависимость $P_{N_2O_5} = f(t)$

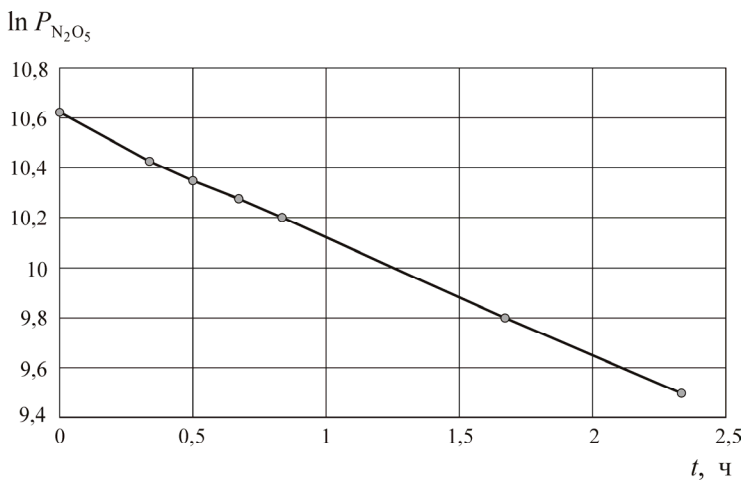


Рис. 3. Зависимость $\ln P_{N_2O_5} = f(t)$

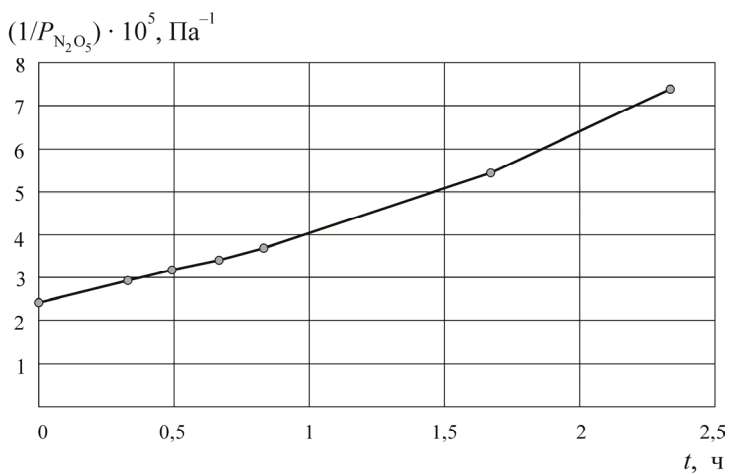


Рис. 4. Зависимость $1/P_{N_2O_5} = f(t)$

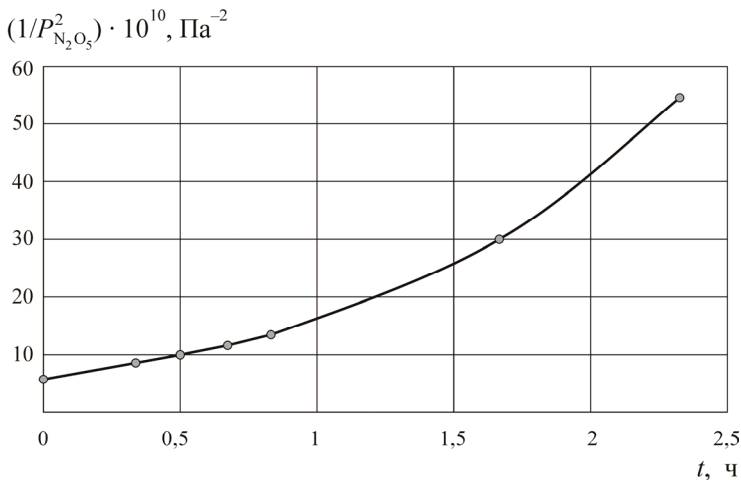


Рис. 5. Зависимость $1/P_{N_2O_5}^2 = f(t)$

Линейная зависимость получается на рис. 3, следовательно, данная реакция является реакцией первого порядка.

Модуль 2

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ И ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

Фазовое равновесие. Термодинамика фазовых переходов. Основные понятия. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Правило фаз Гиббса. Физико-химический анализ. Его принципы. Равновесие в однокомпонентных системах. Диаграмма состояния воды. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем, равновесие в трехкомпонентных системах.

Растворы. Общая характеристика, способы выражения концентрации растворов. Свойства растворов. Давление пара компонента над раствором. Закон Рауля. Уравнение Генри. Растворы летучих жидкостей. Законы Коновалова. Азеотропы. Диаграммы

состояния раствор – пар в координатах: общее давление – состав, температура кипения – состав, состав раствора – состав пара. Правило рычага. Перегонка. Распределение растворенного вещества между двумя несмешивающимися конденсированными растворителями (фазами). Экстракция.

Поверхностные явления в гетерогенных системах. Поверхностное натяжение жидкости. Адгезия и когезия. Адсорбция компонента раствора на границе раздела фаз жидкость – газ, жидкость – жидкость. Уравнение Гиббса. Адсорбция на поверхности твердого тела. Теория адсорбции Ленгмюра. Полимолекулярная адсорбция. Экспериментальные методы определения адсорбции и нахождения констант адсорбционного равновесия.

Основные признаки и свойства дисперсных систем. Получение коллоидных систем. Оптические явления в дисперсных системах. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем. Седиментационный анализ. Электрические свойства коллоидных систем. Электрокинетические явления. Мицеллообразование. Формула мицеллы. Устойчивость и коагуляция дисперсных систем. Теория Смолуховского. Микрогетерогенные и грубодисперсные системы. Структурообразование в коллоидных системах. Реологические свойства растворов ВМС.

Задание 2.1. Адсорбция

Используя зависимости массы адсорбата A (мг), поглощенного 1 г адсорбента при температуре 298 К, от равновесного парциального давления P , выполните следующие задания:

1. Постройте изотерму адсорбции $A = f(P)$.
2. Постройте полученную изотерму в координатах уравнения Ленгмюра, определите константы в уравнении графическим методом.

Необходимые данные для расчета возьмите в табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта	Адсорбент	Адсорбат	$P \cdot 10^{-3}$, Па	A , мг/г
1	Цеолит	CO ₂	0,1	35,0
			1,0	112,0
			7,5	174,0
			20,0	188,0
2	Активированный уголь (АУ)	CO ₂	1,0	32,3
			4,48	66,7
			14,4	117,2
			25,0	145,0
3	Силикагель	Пары воды	0,30	79,2
			0,77	166,0
			1,17	210,0
			1,40	238,0
4	АУ	CO ₂	1,78	268,0
			0,99	32,0
			4,97	70,0
			9,98	91,0
5	АУ	Пары бензола	20,0	102,0
			29,7	107,3
			0,05	136,5
			0,085	163,8
6	АУ	CO ₂	0,149	183,3
			0,849	214,5
			1,599	280,8
			4,2	12,7
7	АУ	СО	8,1	21,2
			11,7	26,4
			16,5	32,3
			24,0	38,6
7	АУ	СО	9,8	2,53
			24,2	5,57
			41,3	8,43
			60,0	11,2
7	АУ	СО	72,5	12,85

Продолжение табл. 3

Номер варианта	Адсорбент	Адсорбат	$P \cdot 10^{-3}$, Па	A , мг/г
8	АУ	NH_3	15,5	64,4
			26,6	94,3
			47,7	119,7
			70,6	132,0
			90,2	137,4
9	Цеолит	H_2S	5,2	25,0
			7,9	30,0
			21,0	48,0
			31,6	53,0
			65,8	66,0
10	Цеолит	H_2S	7,9	78,0
			18,4	100,0
			34,2	110,0
			65,8	120,0
			100,0	128,0
11	АУ	Метан	25,6	25,2
			36,7	29,1
			47,8	32,3
			60,5	35,3
			77,0	38,4
12	АУ	СО	4,00	15,8
			5,34	19,0
			9,65	27,7
			16,65	34,1
			19,8	39,9
13	АУ	Этилен	9,35	39,5
			12,4	42,8
			22,5	49,9
			42,6	56,5
			82,5	64,5
14	АУ	Этилен	2,0	10,4
			4,27	20,8
			10,57	30,5
			29,5	42,4
			91,5	55,2

Продолжение табл. 3

Номер варианта	Адсорбент	Адсорбат	$P \cdot 10^{-3}$, Па	A , мг/г
15	АУ	Пары этанола	0,813	150,0
			1,214	160,0
			1,981	170,0
			2,744	180,0
			3,914	190,0
16	АУ	Пары бензола	0,399	200,0
			0,799	230,0
			1,33	250,0
			2,264	270,0
			5,328	290,0
17	Цеолит	СО	5,18	9,8
			16,0	30,4
			45,3	50,8
			74,2	70,4
			82,1	100,31
18	Цеолит	Оксиды азота	3,53	3,17
			4,65	3,70
			6,7	4,40
			8,55	5,09
			12,5	6,14
19	Алюмогель	СО	11,3	2,04
			24,4	3,72
			44,5	5,30
			61,00	6,34
			82,5	7,3
20	Уголь	Метан	7,51	18,1
			11,15	24,0
			17,3	30,1
			23,9	37,3
			33,9	42,4
21	Цеолит	Оксиды азота	17,3	6,7
			18,6	7,35
			30,3	8,48
			35,3	9,07
			47,3	9,92

Номер варианта	Адсорбент	Адсорбат	$P \cdot 10^{-3}$, Па	A , мг/г
22	Силикагель	Азот	4,8	108,2
			11,9	133,9
			20,6	171,7
			41,0	176,0
			98,0	188,9
23	Слюда	СО	7,5	10,82
			13,9	13,39
			60,0	17,17
			72,7	17,60
			105,0	18,90
24	Силикагель	Пары воды	13,5	3,0
			26,3	5,5
			39,8	7,6
			53,0	9,4
25	Уголь	Пары толуола	0,1	163,2
			0,17	196,56
			0,30	219,96
			1,70	257,4
			3,2	336,96

Задание 2.2. Коагуляция и адсорбция ПАВ

В соответствии со своим вариантом выполните задания, в которых использованы следующие обозначения: t – время коагуляции; n – общее число частиц в 1 м^3 раствора; σ – поверхностное натяжение раствора; C – концентрация раствора; T – температура.

1. Рассчитайте время половинной коагуляции суспензии каолина по следующим данным:

t , с	0	105	180	255	335	420
$n \cdot 10^{-14}$	5,0	3,90	3,18	2,92	2,52	2,00

2. Рассчитайте время половинной коагуляции золя золота по следующим данным:

t, c	0	30	60	120	240	480
$n \cdot 10^{-14}$	20,20	14,70	10,80	8,25	4,89	3,03

3. Рассчитайте время половинной коагуляции золя серы раствором хлорида алюминия по следующим данным:

t, c	0	1	2	4	10
$n \cdot 10^{-17}$	16,0	1,78	0,99	0,50	0,20

4. Рассчитайте время половинной коагуляции золя золота раствором хлорида натрия по следующим данным:

t, c	0	120	240	420	600	900
$n \cdot 10^{-14}$	2,69	2,25	2,02	1,69	1,47	1,36

5. Рассчитайте время половинной коагуляции золя золота раствором NaCl по следующим данным:

t, c	0	60	120	420	900
$n \cdot 10^{-14}$	5,22	4,35	3,63	2,31	1,48

6. Рассчитайте время половинной коагуляции золя золота при действии хлорида натрия по следующим данным:

t, c	0	60	120	180	300	420	600
$n \cdot 10^{-14}$	20,12	11,00	7,92	6,30	4,82	3,73	2,86

7. Проверьте, применима ли теория Смолуховского к коагуляции золя селена раствором KCl. Определите время половинной коагуляции по следующим данным:

t, c	0	5	10	15	20	25	51
$n \cdot 10^{-15}$	31,3	24,1	19,3	15,4	12,7	10,1	3,7

8. Проверьте, применима ли теория Смолуховского к коагуляции золя селена хлоридом натрия. Определите время половинной коагуляции по следующим данным:

t, c	0	32,4	288	595	908	1190
$n \cdot 10^{-15}$	3,22	2,52	1,33	0,98	0,67	0,53

9. Проверьте, применима ли теория Смолуховского к коагуляции золя селена КСl. Определите время половинной коагуляции по следующим данным:

t, c	0	0,66	4,25	19,0	43,0	73,0	167,0
$n \cdot 10^{-14}$	29,7	20,90	19,1	14,4	10,7	7,70	6,45

10. Проверьте, применима ли теория Смолуховского к коагуляции золя золота хлоридом натрия. Определите время половинной коагуляции по следующим данным:

t, c	0	0,5	1	2	3	5
$n \cdot 10^{-14}$	4,35	4,01	3,74	3,32	3,28	3,33

11. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 14,4 \cdot 10^{-3}$, $b = 6,6$), вычислите поверхностное натяжение водного раствора пропилового спирта с концентрацией 1 кмоль/м^3 при $T = 293 \text{ К}$. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,49 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

12. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 14,72 \cdot 10^{-3}$, $b = 10,4$), рассчитайте концентрацию водного раствора валериановой кислоты при $T = 283 \text{ К}$, при которой поверхностное натяжение раствора будет составлять $52,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,49 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

13. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 17,7 \cdot 10^{-3}$, $b = 19,72$), вычислите поверхностное натяжение водного раствора валериановой кислоты с концентрацией $0,05 \text{ кмоль/м}^3$ при $T = 353 \text{ К}$. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 72,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

14. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 16,7 \cdot 10^{-3}$, $b = 21,5$), рассчитайте поверхностное натяжение водного раствора масляной кислоты с концентрацией $0,1 \text{ кмоль/м}^3$ при $T = 283 \text{ К}$. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,62 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

15. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 12,6 \cdot 10^{-3}$, $b = 21,5$), рассчитайте поверхностное натяжение водных растворов масляной кислоты при $T = 283 \text{ К}$ для следующих концентраций (кмоль/м^3): $0,007$; $0,021$; $0,05$; $0,104$. Постройте зависимость $\sigma = f(C)$. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

16. Вычислите адсорбцию масляной кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 273 \text{ К}$ и концентрации $0,05 \text{ кмоль/м}^3$, если зависимость поверхностного натяжения от концентрации описывается уравнением:

$$\sigma = 75,49 \cdot 10^{-3} - 12,6 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 21C).$$

17. Вычислите адсорбцию масляной кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 273 \text{ К}$ и концентрации $0,104 \text{ кмоль/м}^3$, используя следующие данные:

$C, \text{ кмоль/м}^3$	0	0,021	0,050	0,104	0,246	0,489
$\sigma \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	74,01	69,51	64,30	59,85	51,09	44,00

18. Вычислите адсорбцию *n*-валериановой кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 293 \text{ К}$ и концентрации $0,0206 \text{ кмоль/м}^3$, используя следующие данные:

$C, \text{ кмоль/м}^3$	0	0,0103	0,0206	0,0683	0,204
$\sigma \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	72,53	65,45	59,78	49,31	35,2

19. Определите адсорбцию валериановой кислоты на границе водный раствор – воздух при концентрации раствора кислоты $0,05 \text{ кмоль/м}^3$ и $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, если зависимость поверхностного натяжения от концентрации валериановой кислоты выражается уравнением:

$$\sigma = 62,6 \cdot 10^{-3} - 17,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 19,72 C).$$

20. Вычислите адсорбцию масляной кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 283$ К и концентрации $0,1$ кмоль/м³, если зависимость поверхностного натяжения от концентрации выражена уравнением:

$$\sigma = 75,62 \cdot 10^{-3} - 16,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 21,5 C).$$

21. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 12 \cdot 10^{-3}$, $b = 20$), определите концентрацию раствора *n*-валериановой кислоты при $T = 293$ К, если поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м, поверхностное натяжение раствора $59,78 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

22. Вычислите адсорбцию масляной кислоты при $T = 353$ К и концентрации $0,01$ кмоль/м³ на границе водный раствор – воздух, если зависимость поверхностного натяжения от концентрации выражена уравнением:

$$\sigma = 75,5 \cdot 10^{-3} - 17,7 \cdot 10^{-3} \ln(1 + 19,7 C).$$

23. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 12,6 \cdot 10^{-3}$, $b = 21,5$), рассчитайте поверхностное натяжение водного раствора масляной кислоты при $T = 298$ К и концентрации $0,05$ кмоль/м³. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,62 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

24. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 12,6 \cdot 10^{-3}$, $b = 21,5$), вычислите поверхностное натяжение водного раствора масляной кислоты при $T = 278$ К и концентрации $0,021$ кмоль/м³. Поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 75,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

25. Используя константы уравнения Шишковского ($a = 15,0 \cdot 10^{-3}$, $b = 20,0$), определите концентрацию раствора масляной кислоты при $T = 25$ °С, если поверхностное натяжение воды $\sigma_0 = 72,53 \cdot 10^{-3}$ Н/м, поверхностное натяжение раствора $58,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Задание 2.3. Формула мицеллы

Для заданных веществ А и Б (табл. 4) выполните следующие задания.

При медленном введении вещества Б в разбавленный раствор вещества А, взятого в избытке, возможно образование гидрозольа

вещества В. Напишите уравнение реакции получения золя вещества В. Составьте формулу мицеллы и укажите знак электрического заряда коллоидных частиц этого золя.

Таблица 4

Номер варианта	А	Б	В
1	MgCl_2	NaOH	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
2	CaCl_2	H_2SO_4	CaSO_4
3	AlCl_3	NaOH	$\text{Al}(\text{OH})_3$
4	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KI	PbI_2
5	ZnCl_2	KOH	$\text{Zn}(\text{OH})_2$
6	CdCl_2	H_2S	CdS
7	AgNO_3	NaCl	AgCl
8	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	NaOH	$\text{Cu}(\text{OH})_2$
9	NiCl_2	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	NiS
10	BaCl_2	Na_2SO_4	BaSO_4
11	Na_2SiO_3	HCl	H_2SiO_3
12	FeCl_3	KOH	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
13	AsCl_3	H_2S	As_2S_3
14	AgNO_3	KBr	AgBr
15	ZnSO_4	$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	ZnS
16	NiCl_2	NaOH	$\text{Ni}(\text{OH})_2$
17	CuCl_2	Na_2S	CuS
18	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$	KOH	$\text{Cd}(\text{OH})_2$
19	CoCl_2	NaOH	$\text{Co}(\text{OH})_2$
20	CrCl_3	NaOH	$\text{Cr}(\text{OH})_3$
21	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Na_2S	PbS
22	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaOH	$\text{Pb}(\text{OH})_2$
23	FeCl_2	Na_2S	FeS
24	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Na_2SO_4	PbSO_4
25	$\text{Sn}(\text{NO}_3)_2$	Na_2S	SnS

Задание 2.4. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем

В соответствии со своим вариантом выполните задания, в которых использованы следующие обозначения: r – радиус частиц, η – вязкость среды, T – температура, D – коэффициент диффузии, t – время оседания, m – масса осадка, H – высота столба жидкости.

1. Вычислите коэффициент диффузии частиц геля сернистого мышьяка, используя следующие данные: $r = 20 \cdot 10^{-9}$ м, $\eta = 10^{-3}$ Па·с, $T = 288$ К.

2. Найдите коэффициент диффузии частиц высокодисперсной фракции суспензии глины в воде, используя следующие данные: $r = 10^{-7}$ м, $\eta = 10^{-4}$ Па·с, $T = 313$ К.

3. Вычислите коэффициент диффузии частиц дыма окиси цинка, используя следующие данные: $r = 2,0 \cdot 10^{-6}$ м, $\eta = 1,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $T = 283$ К.

4. Вычислите коэффициент диффузии частиц высокодисперсного аэрозоля, используя следующие данные: $r = 2 \cdot 10^{-8}$ м, $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T = 293$ К.

5. Рассчитайте коэффициент диффузии частиц коллоидного золота в воде, используя следующие данные: $r = 10^{-9}$ м, $T = 20$ °С, $\eta = 0,001$ Па·с.

6. Вычислите скорость оседания капель водяного тумана, если $r = 10^{-6}$ м, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, плотность воды 10^3 кг/м³. Величиной плотности воздуха пренебречь.

7. Вычислите скорость оседания частиц аэрозоля хлористого аммония, если его плотность $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $r = 5 \cdot 10^{-6}$ м, вязкость воздуха $\eta = 1,76 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Величиной плотности воздуха пренебречь.

8. Найдите скорость оседания частиц суспензии каолина в жидкости, если $r = 2 \cdot 10^{-6}$ м, плотность каолина $2,2 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность жидкости $1,1 \cdot 10^3$ кг/м³, вязкость жидкости $\eta = 1,14 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

9. Вычислите коэффициент диффузии частиц суспензии глины в воде, используя следующие данные: $r = 10^{-5}$ м, $\eta = 6,5 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T = 298$ К.

10. Вычислите коэффициент диффузии частиц высокодисперсного аэрозоля, используя следующие данные: $r = 2 \cdot 10^{-6}$ м, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T = 288$ К.

11. Определите радиус частиц золя иодида серебра, используя следующие данные: $D = 1,2 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $\eta = 1,1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $T = 25$ °С.

12. Вычислите скорость оседания капель водяного пара, если $r = 10^{-5}$ м, $\eta = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Па·с, плотность воды 10^3 кг/м³. Величиной плотности воздуха пренебречь.

13. Вычислите скорость оседания высокодисперсного аэрозоля, если его плотность $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $r = 2 \cdot 10^{-6}$ м, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Величиной плотности воздуха пренебречь.

14. Вычислите коэффициент диффузии частиц аэрозоля, используя следующие данные: $r = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T = 20$ °С.

15. Определите радиус частиц каолина, используя следующие данные: $D = 1,3 \cdot 10^{-9}$ м²/с, $\eta = 1 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T = 20$ °С.

16. Постройте кривую распределения по размерам частиц суспензии оксида цинка в ацетоне, пользуясь следующими экспериментальными данными:

t, c	60	180	300	600	900	1800	3600
$m, мг$	33,5	40,5	44,5	46,5	48,0	49,0	50,0

Плотность ZnO $5,66 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность ацетона $0,79 \cdot 10^3$ кг/м³, вязкость ацетона $\eta = 1 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $H = 10 \cdot 10^{-2}$ м.

17. Постройте кривую оседания и дифференциальную кривую распределения частиц по размерам, используя экспериментальные данные седиментации молотого вольского песка в воде:

t, c	60	90	120	180	300	600	900	1800
$m, мг$	33,5	40,5	44,5	46,5	48,0	49,0	50,0	100

Плотность песка $2,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность воды 10^3 кг/м^3 , вязкость воды $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $H = 11 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

18. Постройте кривую оседания суспензии вольского песка в трансформаторном масле, используя экспериментальные данные:

$t, \text{ с}$	60	180	300	600	900	1200
$m, \text{ мг}$	23,0	61,0	83,5	109,0	121,0	138,0

Плотность песка $2,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность масла 866 кг/м^3 , вязкость масла $\eta = 31,6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $H = 7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

19. Постройте кривую оседания песка в анилине, рассчитайте и построьте кривую распределения по размерам частиц суспензии, используя экспериментальные данные:

$t, \text{ с}$	60	180	300	600	900	1200
$m, \text{ мг}$	23,0	61,0	83,5	109,0	121,0	138,0

Плотность песка $2,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность анилина $1,02 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, вязкость анилина $\eta = 4,43 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $H = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

20. Постройте кривые оседания и распределения по размерам частиц суспензии двуокиси титана в бутилацетате, используя следующие экспериментальные данные:

$t, \text{ с}$	60	180	300	600	900	1800
$m, \text{ мг}$	16	60	75	87	92	100

Плотность двуокиси титана $3,82 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность бутилацетата $0,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, вязкость бутилацетата $\eta = 0,79 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $H = 11 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

21. Рассчитайте коэффициент диффузии золя двуокиси кремния в воде, используя следующие данные: $r = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\eta = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

22. Найдите скорость оседания частиц бентонита в жидкости, если $r = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, плотность бентонита $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность жидкости $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

23. Вычислите радиус частиц аэрозоля, используя следующие данные: $D = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, $\eta = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{С}$.

24. Вычислите коэффициент диффузии частиц каолина в воде, используя следующие данные: $r = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\eta = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $T = 300 \text{ К}$.

25. Рассчитайте радиус частиц золя сернистого мышьяка, используя следующие данные: $\eta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $D = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{С}$.

Пример 2.1. При адсорбции аммиака активированным углем (АУ) при температуре 273 К получены следующие результаты:

$P \cdot 10^{-3}, \text{ Па}$	10,5	21,6	42,7	65,6	85,2
$A, \text{ мг/г}$	60,4	90,3	115,7	127,0	132,4

Постройте изотерму адсорбции. Определите константы в уравнении Ленгмюра.

Решение. Адсорбция газа на поверхности твердых тел при температуре T , протекающая по мономолекулярному механизму, описывается уравнением Ленгмюра:

$$A = A_{\max} \cdot \frac{K \cdot P}{1 + K \cdot P},$$

где A – количество адсорбата, мг/г; A_{\max} – предельная адсорбция, мг/г; K – константа равновесия адсорбции; P – равновесное давление газа, Па.

Константы в уравнении Ленгмюра определяют графическими или аналитическими методами по соотношению:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{A_{\max} \cdot K} + \frac{1}{A_{\max}} \cdot P.$$

Сначала определяем отношение P/A , получим:

$P \cdot 10^{-3}$, Па	10,5	21,6	42,7	65,6	85,2
$P/A \cdot 10^{-3}$	0,17	0,24	0,37	0,52	0,64

По этим данным строим график зависимости P/A от P (рис. 6).

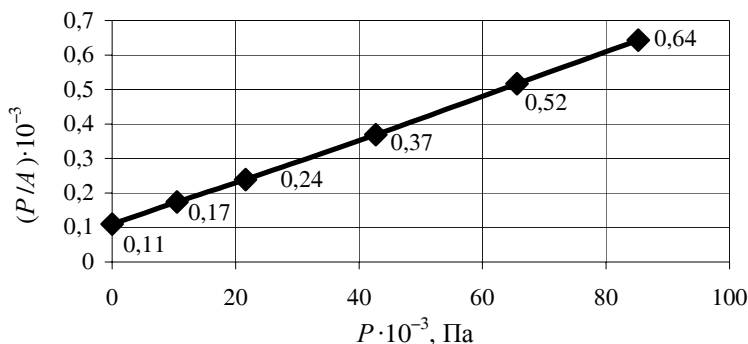


Рис. 6. Изотерма, построенная в координатах уравнения Ленгмюра

Рассчитываем тангенс угла α наклона полученной прямой:

$$\operatorname{tg} \alpha = (0,37 - 0,24) / (42,7 - 21,6) = 0,006.$$

По тангенсу угла α находим A_{\max} :

$$\operatorname{tg} \alpha = 1/A_{\max}, \quad A_{\max} = 1/\operatorname{tg} \alpha = 1/0,006 = 162,3 \text{ мг/г}.$$

Далее по отрезку, отсекаемому полученной прямой на оси ординат, определяем K . Отрезок равен 0,11. Отсюда:

$$K = \frac{1}{0,11 \cdot 10^3 \cdot A_{\max}} = \frac{1}{0,11 \cdot 162,3 \cdot 10^3} = 0,06 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, уравнение Ленгмюра имеет вид:

$$A = 162,3 \cdot \frac{0,06 \cdot 10^{-3} \cdot P}{1 + 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot P}.$$

Пример 2.2. Проверьте применимость теории Смолуховского к коагуляции золя селена раствором хлорида калия при 350 К по следующим данным:

t, c	0	0,66	4,25	19,0	43,0	73	167
$n \cdot 10^{-14}$	29,7	20,9	19,1	14,4	10,7	7,7	6,45

Решение. Проверка осуществляется линеаризацией уравнения кинетики коагуляции:

$$n = \frac{n_0}{1 + K_k n_0 t} \quad \text{или} \quad \frac{1}{n} = \frac{1 + K_k n_0 t}{n_0} = \frac{1}{n_0} + K_k t,$$

где n – общее число частиц к моменту времени t ; n_0 – частичная концентрация (число частиц в 1 м^3) исходного золя; K_k – константа скорости коагуляции.

Рассчитаем значения $\frac{1}{n}$ по данным задачи, получим:

t, c	0	0,66	4,25	19,0	43,0	73	167
$\frac{1}{n} \cdot 10^{14}$	0,034	0,048	0,052	0,070	0,093	0,130	0,155

По этим данным построим график зависимости $\frac{1}{n} = f(t)$ (рис. 7).

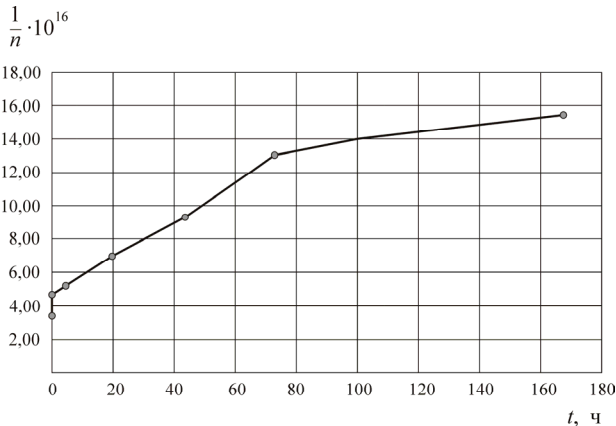


Рис. 7. Зависимость $1/n$ от времени коагуляции

Очевидно, что в данных координатах на участке от 0 до 73 с зависимость $1/n$ от времени коагуляции выражена прямой линией, т.е. теория Смолуховского применима для описания процесса коагуляции.

Пример 2.3. Рассчитайте время половинной коагуляции золя селена раствором КСl по следующим данным:

$t, \text{с}$	0	7	15	20	28	57	167
$n \cdot 10^{-15}$	32,2	24,1	19,9	16,7	14,2	10,1	4,3

Проверьте применимость теории Смолуховского в данном случае.

Решение. Время половинной коагуляции находим по формуле

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{t}{\frac{n_0}{n} - 1}.$$

Сделаем расчет для трех значений t :

$$\text{— для } t_1 = 7 \text{ с } t_{\frac{1}{2}} = \frac{7}{\frac{32,2}{24,1} - 1} = 20,8 \text{ с};$$

$$\text{— для } t_2 = 28 \text{ с } t_{\frac{1}{2}} = \frac{28}{\frac{32,2}{14,1} - 1} = 22,1 \text{ с};$$

$$\text{— для } t_3 = 167 \text{ с } t_{\frac{1}{2}} = \frac{167}{\frac{32,2}{4,3} - 1} = 25,7 \text{ с}.$$

Отсюда среднее значение времени половинной коагуляции $t_{\frac{1}{2}(\text{ср})} = 22,87 \text{ с}.$

Близость значений $t_{\frac{1}{2}}$ свидетельствует о применимости теории Смолуховского для описания процесса коагуляции.

Пример 2.4. Вычислите адсорбцию Γ пропионовой кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 273$ К и $C = 0,5$ кмоль/м³, используя следующие константы уравнения Шишковского: $a = 12,5 \cdot 10^{-3}$ и $b = 7,73$.

Решение. Адсорбция жидкости на поверхности раздела раствор – газ описывается уравнением Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC},$$

где Γ – гиббсовская адсорбция, кмоль/м²; C – концентрация раствора, кмоль/м³; σ – поверхностное натяжение раствора, Н/м.

Дифференцируем уравнение Шишковского:

$$\sigma = \sigma_0 - a \cdot \ln(1 + bC).$$

Отсюда
$$\frac{-d\sigma}{dC} = \frac{ba}{1+bC}.$$

Подставим эту величину в уравнение Гиббса, получим:

$$\begin{aligned} \Gamma &= -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC} = \frac{C}{RT} \cdot \frac{ba}{1+bC} = \frac{a}{RT} \cdot \frac{Cb}{1+bC} = \\ &= \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 10^3 \cdot 273} \cdot \frac{0,5 \cdot 7,73}{1+0,5 \cdot 7,73} = 4,38 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^2. \end{aligned}$$

Пример 2.5. Определите адсорбцию масляной кислоты на поверхности раздела водный раствор – воздух при $T = 293$ К и концентрации $0,05$ кмоль/м³, используя следующие данные:

C , кмоль/м ³	0	0,021	0,050	0,104	0,246
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	72,53	68,12	63,53	58,60	50,3

Решение. По экспериментальным данным строим график зависимости $\sigma = f(C)$ (рис. 8).

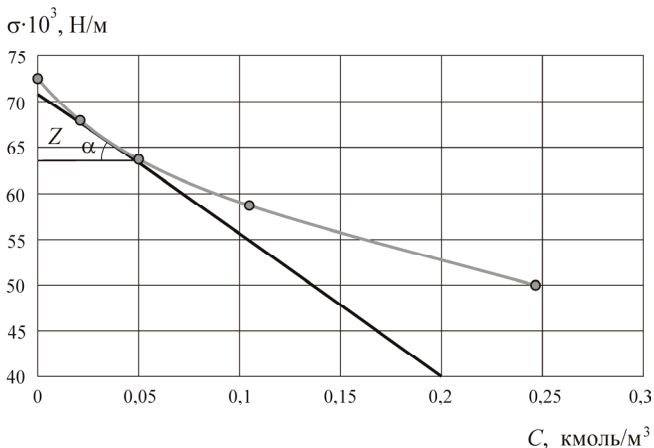


Рис. 8. Зависимость поверхностного натяжения раствора масляной кислоты от концентрации

Через точку $0,05 \text{ кмоль/м}^3$ проводим касательную до пересечения с осью ординат. Отрезок Z между ординатами этой точки и точки пересечения касательной с осью есть произведение $-C \cdot \lg \alpha$. Поскольку $\lg \alpha$ имеет смысл производной $\frac{d\sigma}{dC}$, то $Z = -C \left(\frac{d\sigma}{dC} \right)$. Подставим значение Z в уравнение Гиббса:

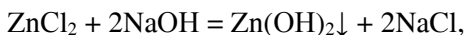
$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC} = \frac{Z}{RT}.$$

Получим значение адсорбции при данной концентрации:

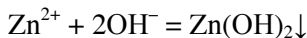
$$\Gamma = \frac{Z}{RT} = \frac{(71 - 63,53) \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 10^3 \cdot 293} = 3,08 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^3.$$

Пример 2.6. Напишите уравнение реакции получения золя гидроксида цинка путем взаимодействия растворов хлорида цинка и гидроксида натрия в эквимольном соотношении. Составьте формулу мицеллы гидрозоль гидроксида цинка, если в избытке взят раствор хлорида цинка. Определите заряд частиц (гранул) золя.

Решение. Уравнение данной реакции имеет вид:

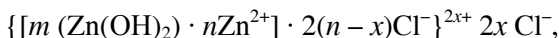


или в ионном виде:



Агрегат: $m(\text{Zn(OH)}_2)$; потенциалоопределяющими ионами служат ионы Zn^{2+} , так как ZnCl_2 в избытке.

Формула мицеллы гидроксида цинка:



где m – количество молекул Zn(OH)_2 (агрегат основного вещества); n – число потенциалоопределяющих ионов; $(n-x)$ – количество противоионов в адсорбционном слое; x – число противоионов в диффузионном слое. Заряд частицы золя равен $2x+$.

Пример 2.7. Найдите коэффициент диффузии частиц золя иодида серебра, используя следующие данные: радиус частиц $1,8 \cdot 10^{-9}$ м, вязкость среды 10^{-3} Па·с, температура 298 К.

Решение. Определяем коэффициент диффузии по формуле Эйнштейна:

$$D = \frac{k \cdot T}{B},$$

где k – константа Больцмана, $k = \frac{R}{N_A}$; B – коэффициент вязкого сопротивления среды.

Для сферических частиц выполняется формула Стокса:

$$B = 6\pi \cdot \eta \cdot r,$$

где η – вязкость среды, Па·с; r – радиус частицы, м.

С учетом приведенных выше формул получим:

$$D = \frac{RT}{N_A 6\pi\eta r},$$

где R – универсальная газовая постоянная; N_A – число Авогадро.

Отсюда

$$D = \frac{8,31 \cdot 298}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 63,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \cdot 10^{-9}} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Пример 2.8. Вычислите скорость оседания частиц бентонита в жидкости, если вязкость среды $2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, радиус частиц $1,4 \cdot 10^{-5}$ м, плотность бентонита $2 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность жидкости $1,1 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение. В случае крупных частиц броуновское движение незначительно, и при изучении оседания частиц под действием силы тяжести им пренебрегают.

Скорость оседания v сферических частиц зависит от вязкости среды η , радиуса частиц r и разности плотностей частиц ρ и среды ρ_0 и определяется по формуле:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho - \rho_0) \cdot r^2}{\eta} \cdot g,$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Получим:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(2 \cdot 10^3 - 1,1 \cdot 10^3)(1,4 \cdot 10^{-5})^2}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 9,8 = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Пример 2.9. Постройте кривую оседания оксида алюминия в воде, рассчитайте и постройте кривую распределения по размерам частиц суспензии, используя экспериментальные данные:

$t, \text{ с}$	5	10	15	20	25	30	35	40
$m, \text{ г}$	0,023	0,028	0,032	0,035	0,036	0,037	0,038	0,038

Плотность Al_2O_3 3900 кг/м^3 , плотность воды 10^3 кг/м^3 , вязкость воды 10^{-3} Па·с, высота столба жидкости $11,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение. По экспериментальным данным строим кривую седиментации (рис. 9), откладывая по оси ординат массу осадка m (г),

по оси абсцисс время оседания t (с). Кривую чертим в масштабе, удобном для дальнейшего графического расчета.

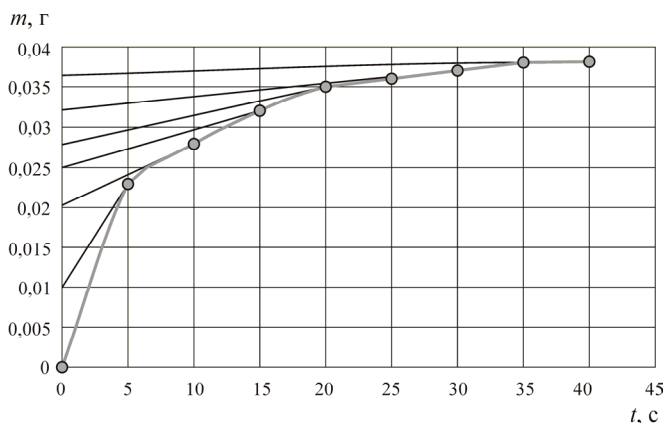


Рис. 9. Кривая седиментации частиц оксида алюминия

На кривой седиментации произвольно выберем несколько точек и проведем к ним касательные до пересечения с осью ординат. Отрезки на оси ординат между двумя соседними точками пересечения касательных с осью показывают массу частиц с определенным радиусом r_i , полностью выпавших в осадок ко времени t (массу фракции Δm_i).

Радиус частиц r_i (м) каждой фракции рассчитывают по формуле

$$r_i = \sqrt{\frac{9H \cdot \eta \cdot \Delta m_i}{2Q \cdot g \cdot (\rho - \rho_0) \cdot t_i}},$$

где H – высота столба жидкости, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 , $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; η – вязкость жидкости, Па·с, для воды $\eta = 10^{-3}$ Па·с; Δm_i – масса фракции, кг; Q – масса всего осадка, кг ($Q = m_{\text{max}}$); ρ , ρ_0 – плотность твердой и жидкой фаз соответственно, кг/м^3 ; t_i – время седиментации данной фракции, с.

Находим разность радиусов соседних фракций Δr_i , а также отношение массы фракции к разности радиусов частиц соседних фракций $\frac{\Delta m_i}{\Delta r_i}$. Результаты расчета заносим в табл. 5.

Таблица 5

№ п/п	Время седиментации t , с	Масса осадка, $m_i \cdot 10^6$, кг	Масса фракции $\Delta m_i \cdot 10^6$, кг	Средний радиус частиц фракции $r_i \cdot 10^5$, м	Разность радиусов соседних фракций $\Delta r_i \cdot 10^5$, м	Функция распределения $\Delta m_i / \Delta r_i$
1	5	23	10,0	3,09	3,09	0,324
2	10	28	10,0	2,19	0,90	1,111
3	15	32	5,0	1,26	0,93	0,537
4	20	35	3,0	0,85	0,41	0,731
5	25	36	4,0	0,88	0,03	13,333
6	30	37	1,5	0,49	0,39	0,385
7	35	38	4,0	0,74	0,25	1,600
8	40	38	4,0	0,69	0,05	8,000

Далее строим дифференциальную кривую распределения (рис. 10). На оси абсцисс откладываем значения радиусов, на оси ординат наносим отношение массы фракции к разности радиусов частиц соседних фракций $\Delta m_i / \Delta r_i$.

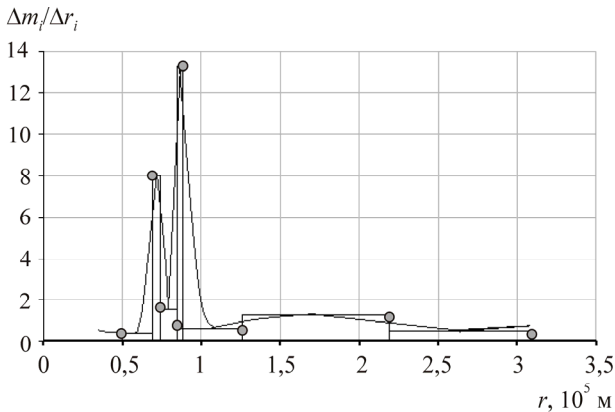


Рис. 10. Дифференциальная кривая распределения частиц Al₂O₃ по размерам

Построив на графике отдельные прямоугольники для каждой фракции (гистограмму) и соединив плавной кривой середины их верхних сторон, получим дифференциальную кривую распределения частиц по размерам.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стромберг А.Г., Семченко Г.П. Физическая химия: учебник. – М.: Высшая школа, 2009. – 527 с.
2. Малышева Ж.Н., Новаков И.А. Теоретическое и практическое руководство по дисциплине «Поверхностные явления и дисперсные системы»: учеб. пособие. – Волгоград: Политехник, 2007. – 343 с.
3. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2007. – 333 с.
4. Физическая и коллоидная химия. Поверхностные явления: учеб.-метод. пособие / сост. Г.А. Козлова, Е.А. Тиньгаева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 79 с.
5. Физическая и коллоидная химия. Дисперсные системы: учеб.-метод. пособие / сост. Е.А. Тиньгаева [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 90 с.
6. Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин: справочник. – М.: Аз-book, 2009. – 238 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Энтальпии образования некоторых веществ, стандартные энтропии

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$\text{Ag}_{(т)}$	0	42,69
$\text{AgNO}_3\text{-}\alpha_{(т)}$	-120,7	140,9
$\text{Ag}_2\text{O}_{(т)}$	-30,56	121,7
$\text{Ag}_2\text{S-}\alpha_{(т)}$	(-33,2)	(140,6)
$\text{Ag}_2\text{SO}_4_{(т)}$	-713,1	199,9
$\text{AgBr}_{(т)}$	-99,16	107,1
$\text{AgCl}_{(т)}$	-126,8	96,07
$\text{AgI-}\alpha_{(т)}$	(-64,2)	114,2
$\text{Ag}_3\text{PO}_4_{(т)}$	-990,0	258,2
$\text{Ag}_2\text{CO}_3_{(т)}$	-506,0	167,0
$\text{Al}_{(т)}$	0	28,31
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{корунд}$	-1675,0	50,94
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3_{(т)}$	-3434,0	239,2
$\text{AlF}_3_{(т)}$	-1488,0	66,48
$\text{AlCl}_3_{(т)}$	-697,4	167,0
$\text{AlBr}_3_{(т)}$	-526,2	184,0
$\text{AlI}_3_{(т)}$	-308,0	189,5
$\text{Al}(\text{OH})_3_{(т)}$	-1294,0	70,1
$\text{As}_{(т)}$	0	35,1
$\text{AsH}_3_{(г)}$	66,4	223,0
$\text{As}_2\text{O}_3_{(т)}$	(-656,8)	107,1
$\text{AsCl}_3_{(г)}$	-299,2	327,2
$\text{As}_2\text{O}_5_{(т)}$	-918,0	105,4
$\text{Au}_{(т)}$	0	47,45
$\text{AuCl}_3_{(т)}$	-118,4	164,4
$\text{Au}(\text{OH})_3_{(т)}$	-277,8	121,0

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$\text{BCl}_{3(\text{г})}$	-395,4	289,8
$\text{BF}_{3(\text{г})}$	-1110,0	254,2
$\text{B}_2\text{O}_3(\text{т})$	-1264,0	53,85
$\text{B}_2\text{H}_6(\text{г})$	38,5	231,8
$\text{Ba-}\alpha_{(\text{т})}$	0	(64,9)
$\text{BaCO}_{3(\text{т})}$	-1202,0	112,1
$\text{BaCl}_{2(\text{т})}$	-859,8	125,5
$\text{Ba(NO}_3)_2(\text{т})$	-991,6	213,7
$\text{BaO}_{(\text{т})}$	-556,6	70,3
$\text{Ba(OH)}_{2(\text{т})}$	-946,1	103,8
$\text{BaSO}_{4(\text{т})}$	-1465,0	131,8
$\text{Be}_{(\text{т})}$	0	9,54
$\text{BeO}_{(\text{т})}$	-609,0	13,8
$\text{BeCl}_{2(\text{т})}$	-496,0	75,8
$\text{Br}_2(\text{ж})$	0	152,3
$\text{Br}_2(\text{г})$	30,92	245,35
$\text{C}_{\text{графит}}(\text{т})$	0	5,74
$\text{C}_{\text{алмаз}}(\text{т})$	1,897	2,38
$\text{CO}_{(\text{г})}$	-110,5	197,4
$\text{CO}_2(\text{г})$	-393,51	213,6
$\text{COCl}_2(\text{г})$	-223,0	289,2
$\text{CS}_2(\text{ж})$	87,8	151,0
$\text{CS}_2(\text{г})$	115,3	237,8
$\text{Ca-}\alpha_{(\text{т})}$	0	41,62
$\text{CaH}_2(\text{т})$	-188,7	42,0
$\text{CaC}_2\text{-}\alpha_{(\text{т})}$	-62,7	70,3
$\text{CaCl}_2(\text{т})$	(-785,8)	113,8
$\text{CaF}_2\text{-}\alpha_{(\text{т})}$	-1214,0	68,87
$\text{Ca(NO}_3)_2(\text{т})$	-936,9	193,2
$\text{CaHPO}_4(\text{т})$	-1820,0	88,0

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2(\text{т})$	-3114,5	189,5
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2-\alpha(\text{т})$	-4125,0	240,9
$\text{CaS}(\text{т})$	-478,3	56,5
$\text{CaSO}_4(\text{т})$	-1424,0	106,7
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}(\text{т})$	-1578,9	130,0
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{т})$	-2024,8	194,0
$\text{CaSiO}_3(\text{т})$	-1636,0	81,98
$\text{CaO}_2(\text{т})$	-651,7	43,1
$\text{CaCO}_3(\text{т})$	-1206,0	92,9
$\text{CaO}(\text{т})$	-635,1	39,7
$\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{т})$	-986,2	(83,4)
$\text{Cd}-\alpha(\text{т})$	0	51,76
$\text{CdCl}_2(\text{т})$	-389,0	115,3
$\text{CdO}(\text{т})$	-256,1	54,8
$\text{CdS}(\text{т})$	-144,3	71,0
$\text{CdSO}_4(\text{т})$	-925,9	(123,1)
$\text{Cl}_2(\text{г})$	0	223,0
$\text{Cl}_2\text{O}(\text{г})$	75,7	266,3
$\text{ClO}_2(\text{г})$	104,6	251,3
$\text{Cl}_2\text{O}_7(\text{ж})$	-251,0	-
$\text{Cl}_2\text{O}_7(\text{г})$	-285,0	-
$\text{Co}-\alpha(\text{т})$	0	30,04
$\text{CoCl}_2(\text{т})$	-325,4	106,6
$\text{CoSO}_4(\text{т})$	-867,9	113,3
$\text{CoCO}_3(\text{т})$	-722,6	-
$\text{CoCl}_2(\text{т})$	-310,2	109,7
$\text{CoBr}_2(\text{т})$	-232,2	135,6
$\text{CoI}_2(\text{т})$	-102,1	158,2
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2(\text{т})$	-421,8	192,0
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{т})$	-1655,6	-
$\text{CoO}(\text{т})$	-239,7	52,8
$\text{Co}(\text{OH})_2(\text{т})$	-541,0	82,0

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$\text{Co(OH)}_{3(\text{т})}$	-726,0	100,0
$\text{CoS}_{(\text{т})}$	-84,5	-
$\text{Co}_3\text{O}_{4(\text{т})}$	-880,0	103,0
$\text{Cr}_{(\text{т})}$	0	23,76
$\text{CrO}_{3(\text{т})}$	-594,5	72,0
$\text{Cr}_2\text{O}_{3(\text{т})}$	-1141,0	81,1
$\text{CrCl}_{3(\text{т})}$	-554,8	122,9
$\text{CrCl}_{2(\text{т})}$	-395,7	115,7
$\text{CrO}_2\text{Cl}_{2(\text{ж})}$	-598,7	209,2
$\text{Cr(OH)}_{2(\text{т})}$	-669,0	81,2
$\text{Cr(OH)}_{3(\text{т})}$	-995,0	95,4
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_{3(\text{т})}$	-3308,0	287,9
$\text{Cr}_3\text{C}_{2(\text{т})}$	-79,5	85,4
$\text{CrS}_{(\text{т})}$	-176,0	65,0
$\text{Cu}_{(\text{т})}$	0	33,3
$\text{CuO}_{(\text{т})}$	(-165,3)	42,64
$\text{CuS}_{(\text{т})}$	-48,5	66,5
$\text{CuSO}_4_{(\text{т})}$	-771,1	113,3
$\text{Cu}_2\text{O}_{(\text{т})}$	-167,36	93,93
$\text{Cu(NO}_3)_2_{(\text{т})}$	-310,0	198,0
$\text{CuCl}_{(\text{т})}$	-134,7	91,6
$\text{CuCl}_{2(\text{т})}$	-205,9	113,0
$\text{Cu}_2\text{S}_{(\text{т})}$	-82,01	119,24
$\text{CuCO}_3_{(\text{т})}$	-595,4	88,0
$\text{CuI}_{(\text{т})}$	-68,0	96,7
$\text{Cu(OH)}_{2(\text{т})}$	-444,6	84,0
$(\text{CuOH})_2\text{CO}_3_{(\text{т})}$	-1051,0	211,6
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}_{(\text{т})}$	-2280,8	300,4
$\text{F}_{2(\text{т})}$	0	202,9
$\text{Fe-}\alpha_{(\text{т})}$	0	27,15
$\text{FeO}_{(\text{т})}$	-263,68	58,79

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
Fe ₂ O _{3(т)}	-821,32	89,96
Fe ₃ O _{4(т)}	-1117,71	151,46
FeS _(т)	-95,40	67,36
FeS _{2(т)}	-177,40	53,14
FeCO _{3(т)}	-747,68	92,88
FeSO _{4(т)}	-922,57	107,53
FeSO _{4 · 7H₂O(т)}	-3017,8	409,5
FeCl _{2(т)}	-341,98	118,1
FeCl _{3(т)}	-399,7	142,4
Fe(OH) _{2(т)}	-562,1	88,0
Fe(OH) _{3(т)}	-827,2	105,0
FeTiO _{3(т)}	-1235,5	105,9
Fe ₂ (SO ₄) _{3(т)}	-2582,0	283,0
Fe ₃ C _(т)	25,0	108,0
H _{2(г)}	0	130,6
HBr _(г)	-35,98	198,40
HCl _(г)	-92,30	186,70
HF _(г)	-268,61	173,51
HI _(г)	25,94	206,30
H ₂ O _(г)	-241,81	188,74
H ₂ O _(ж)	-285,84	69,96
H ₂ O _{2(ж)}	-187,02	105,86
H ₂ S _(г)	-20,15	205,64
HNO _{3(ж)}	-173,0	156,16
HNO _{3(г)}	-133,90	266,39
H ₂ SO _{4(ж)}	-811,30	156,90
H ₃ PO _{4(ж)}	(-1271,94)	200,83
H ₃ BO _{3(т)}	-1094,0	88,8
HClO _{4(ж)}	-34,5	188,4
H ₂ SiO _{3(т)}	-1189,1	-
H ₄ SiO _{4(т)}	-1480,0	-
H ₂ WO _{4(т)}	-1172,4	117,2

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$K_{(T)}$	0	64,35
$KAl(SO_4)_2(T)$	-2465,0	204,5
$KBr_{(T)}$	-392,04	96,65
$KI_{(T)}$	-327,61	104,35
$KOH_{(T)}$	-425,93	59,41
$K_2CrO_4(T)$	-1383,0	200,0
$K_2Cr_2O_7(T)$	-2033,0	291,21
$K_2SO_4(T)$	-1433,44	175,73
$K_2CO_3(T)$	-1153,0	155,5
$KCl_{(T)}$	-435,85	82,68
$KClO_3(T)$	-391,20	142,97
$KMnO_4(T)$	-813,37	171,71
$KNO_3-\alpha(T)$	-492,71	132,93
$KNO_2(T)$	-370,6	152,1
$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O_{(T)}$	-2946,0	-
$K_2O_{2(T)}$	-440,0	120,0
$K_2S_2O_8(T)$	-1918,0	278,7
$KClO_4(T)$	-427,2	151,0
$K_2SiO_3(T)$	-1590,0	146,1
$K_2S_{(T)}$	-387,0	113,0
$KO_{2(T)}$	-283,0	117,0
$K_2O_{(T)}$	-363,2	94,1
$K_3PO_4(T)$	-1988,0	212,0
$KF_{(T)}$	-566,0	66,5
$Li_{(T)}$	0	28,03
$Li_2O_{(T)}$	-595,8	37,87
$Li_2CO_3(T)$	-1215,0	90,2
$LiOH_{(T)}$	-484,9	42,8
$Li_2SO_4(T)$	-1437,2	114,0
$LiCl_{(T)}$	-408,4	59,3
$Mg_{(T)}$	0	32,55
$MgCO_3(T)$	-1096,21	65,69
$MgO_{(T)}$	-601,24	26,94

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$Mg(OH)_{2(r)}$	-924,66	63,14
$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	-3083,0	352,0
$MgCl_{2(r)}$	-641,83	89,54
$MgSO_{4(r)}$	-1287,4	91,5
$Mn_{(r)}$	0	31,76
$MnCO_{3(r)}$	-894,96	85,77
$MnO_{(r)}$	-384,93	60,25
$MnO_{2(r)}$	-519,65	53,14
$Mn_3O_{4(r)}$	-1386,58	148,53
$Mn_2O_{7(ж)}$	-726,0	-
$Mn_2O_{3(r)}$	-959,81	110,46
$MnS_{(r)}$	-205,02	78,23
$Mn(OH)_{2(r)}$	-700,0	95,0
$Mn_3C_{(r)}$	5,6	99,0
$MnSiO_{3(r)}$	-1321,0	89,0
$MnSO_{4(r)}$	-1066,7	112,0
$N_{2(r)}$	0	191,5
$NH_{3(r)}$	-46,19	192,50
$NH_4Cl-\beta_{(r)}$	-315,39	94,56
$NH_4NO_{3(r)}$	-365,10	150,60
$NH_4NO_{2(r)}$	-256,1	-
$NO_{(r)}$	90,37	210,62
$NO_{2(r)}$	33,89	240,45
$NOCl_{(r)}$	52,59	263,5
$NF_{3(r)}$	-124,3	260,1
$NOBr_{(r)}$	82,2	273,5
$NOF_{(r)}$	-66,5	247,9
$NOI_{(r)}$	100,0	282,8
$N_2H_{4(r)}$	95,40	238,36
$N_2H_{4(ж)}$	50,53	121,4
$N_2O_{(r)}$	81,55	220,0
$N_2O_{3(r)}$	83,3	307,3

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$N_2O_{4(r)}$	9,37	304,3
$N_2O_{5(r)}$	-12,0	356,0
$NH_4SCN_{(r)}$	-82,1	140,34
$NH_4ClO_{4(r)}$	-296,0	184,3
$NH_4HCO_{3(r)}$	-850,8	121,0
$(NH_4)_2CO_{3(r)}$	(-929,0)	-
$(NH_4)_2S_{(r)}$	(-167,0)	-
$(NH_4)_2SO_{4(r)}$	-1181,05	220,2
$(NH_4)_3PO_{4(r)}$	-1672,6	(258,83)
$NH_4VO_{3(r)}$	-1050,0	140,45
$NH_4Al(SO_4)_2_{(r)}$	-2347,0	216,2
$(NH_4)_2SO_{4(r)}$	-1179,3	220,3
$NH_4Cr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O_{(r)}$	-5562,0	712,0
$Ga_{(r)}$	0	41,09
$GaCl_{3(r)}$	-524,7	133,4
$Ga(OH)_{3(r)}$	-1014,6	84,9
$Ge_{(r)}$	0	42,38
$GeO_{2(r)}$	-554,7	55,27
$GeCl_{4(r)}$	-504,6	347,7
$Hg_{(жк)}$	0	76,1
$HgCl_{2(r)}$	-230,12	144,35
$Hg_2Cl_{2(r)}$	-264,85	195,81
$HgO_{(r)}$	-90,37	73,22
$HgS_{(r)}$	-58,16	81,59
$I_{2(r)}$	0	116,73
$I_{2(r)}$	62,24	260,58
$In_{(r)}$	0	(58,1)
$Na_{(r)}$	0	51,42
$NaAlO_{2(r)}$	-1133,0	70,71

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
NaCl _(т)	-410,9	72,36
NaF _(т)	-570,3	51,3
NaBr _(т)	-359,8	83,7
NaI _(т)	-287,9	91,2
NaNO ₃ -α _(т)	-466,5	116,3
NaOH-α _(т)	-426,6	64,18
Na ₂ S _(т)	-389,1	94,1
Na ₂ SO ₃ (т)	-1090,0	146,0
Na ₂ SO ₄ -α _(т)	-1384,0	149,4
Na ₂ SiO ₃ (т)	-1518,0	113,8
Na ₃ AlF ₆ -α _(т)	-3283,6	238,5
Na ₃ PO ₄ (т)	-192,5	224,7
NaHCO ₃ (т)	-947,4	102,1
Na ₂ CO ₃ -α _(т)	-1129,0	136,0
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O _(т)	-4077,0	2172,0
Na ₂ O _(т)	-430,6	71,7
Na ₂ O ₂ (т)	-510,9	93,3
Ni _(т)	0	29,86
NiO-α _(т)	-239,7	38,07
NiS _(т)	-92,88	67,36
NiSO ₄ · 7H ₂ O _(т)	-2977,0	378,9
NiSO ₄ (т)	-889,1	97,1
Ni(OH) ₂ (т)	-543,0	79,9
NiCO ₃ (т)	-694,0	86,2
Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O _(т)	-2215,0	511,0
NiCl ₂ (т)	-304,0	98,1
O ₂ (т)	0	205,03
O ₃ (т)	142,3	238,8
P _{бел.} (т)	0	44,35
P _{красн.} (т)	-18,41	22,8
P ₂ (т)	141,5	218,1
P ₄ O ₁₀ (т)	-3096,0	280,0

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$P_4O_{6(r)}$	-1569,0	-
$PH_{3(r)}$	5,44	210,1
$PCl_{3(r)}$	-277,0	311,7
$PCl_{5(r)}$	-369,45	362,9
$PF_{3(r)}$	-956,5	272,6
$PF_{5(r)}$	-1593,0	293,0
$Pb_{(r)}$	0	64,9
$PbO_{(r)}$	-217,86	67,4
$PbO_{2(r)}$	-276,6	76,44
$Pb_3O_{4(r)}$	-734,5	211,3
$PbBr_{2(r)}$	-277,0	161,4
$PbCl_{2(r)}$	-359,1	136,4
$PbI_{2(r)}$	-175,1	176,4
$PbSO_{4(r)}$	-918,1	147,28
$PbCO_{3(r)}$	-700,0	130,96
$Pb(NO_3)_{2(r)}$	-451,7	217,9
$PbSiO_{3(r)}$	-1137,2	110,0
$PbCrO_{4(r)}$	-925,0	167,0
$PbS_{(r)}$	-94,28	91,20
$Pt_{(r)}$	0	41,8
$PtCl_{2(r)}$	-118,0	130,0
$PtCl_{4(r)}$	-226,0	209,0
$S_{\text{домб.}(r)}$	0	31,88
$S_{\text{монокл.}(r)}$	0,30	32,55
$S_{2(r)}$	(129,1)	227,7
$SO_{2(r)}$	-296,9	248,1
$SOCl_{2(ж)}$	-247,0	278,6
$SO_2Cl_{2(ж)}$	-389,1	217,2
$SO_2Cl_{2(r)}$	-358,7	311,3
$SO_{3(r)}$	-395,2	256,23
$Sb_{(r)}$	0	(45,69)

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
$Sb_2O_3(г)$	-700,0	123,0
$Sb_2O_5(г)$	-880,0	125,1
$Sb_2S_3(г)$	-160,0	166,6
$Si(г)$	0	18,72
SiO_2 кварц- $\alpha(г)$	-859,3	42,09
$SiCl_4(ж)$	-671,4	239,7
$SiF_4(г)$	-1548,0	281,6
$SiH_4(г)$	30,6	204,7
$Si_2H_6(г)$	71,5	274,5
$Sn(г)$	0	51,4
$SnS(г)$	-101,8	77,0
$SnO(г)$	-286,0	56,74
$SnO_2(г)$	-580,8	52,34
$SnCl_2(г)$	-349,6	136,0
$SnCl_4(ж)$	-544,9	258,5
$SnH_4(г)$	16,3	228,7
$Sn(OH)_2(г)$	-506,3	87,7
$Sr(г)$	0	54,4
$SrO(г)$	-590,3	55,6
$SrSO_4(г)$	-1444,0	121,7
$Te(г)$	0	49,71
$TeO_2(г)$	-325,5	73,7
$Ti(г)$	0	30,66
$TiCl_4(г)$	-759,8	352,0
TiO_2 рутил(г)	-943,9	50,23
$Ti_2O_3(г)$	-1520,5	78,8
$Tl-\alpha(г)$	0	64,22
$Tl_2O(г)$	-167,4	161,1
$Tl_2O_3(г)$	-390,4	148,1

Вещество	$\Delta H_{f,298}^0$, кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/(моль · К)
TiCl _(т)	-204,97	111,2
V _(т)	0	28,9
VCl _{3(т)}	-582,4	131,0
VO _(т)	-418,0	38,9
V ₂ O _{3(т)}	-1238,0	98,3
V ₂ O _{5(т)}	-1573,0	130,96
W _(т)	0	32,76
WO _{3(т)}	-843,0	75,9
Zn _(т)	0	41,59
ZnO _(т)	-349,0	43,5
ZnS _(т)	-201,0	57,7
ZnCO _{3(т)}	-810,7	82,4
ZnSO _{4(т)}	-978,2	124,6
Zr-α _(т)	0	38,9
ZrCl _{4(т)}	-982,0	186,1
ZrO ₂ -α _(т)	-1094,0	50,32

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H 1						H 1,00794 водород	He 4,0026 гелий
2	Li 6,941 литий	Be 9,01218 бериллий	B 10,81 бор	C 12,011 углерод	N 14,0067 азот	O 15,9994 кислород	F 18,9984 фтор	Ne 20,179 неон
3	Na 22,98977 натрий	Mg 24,305 магний	Al 26,98154 алюминий	Si 28,0855 кремний	P 30,97376 фосфор	S 32,06 сера	Cl 35,453 хлор	Ar 39,948 аргон
4	K 39,0983 калий	Ca 40,08 кальций	Sc 44,9559 скандий	Ti 47,9 титан	V 50,9415 ванадий	Cr 51,996 хром	Mn 54,938 марганец	Fe 55,847 железо
5	Rb 85,467 рубидий	Sr 87,62 стронций	Y 88,9059 иттрий	Zr 91,22 цирконий	Nb 92,9064 ниобий	Mo 95,94 молибден	Tc 98,9062 технеций	Ru 101,07 рутений
6	Cs 132,9054 цезий	Ba 137,33 барий	La* 138,9055 лантан	Hf 178,49 гафний	Ta 180,9479 тантал	W 183,85 вольфрам	Re 186,207 рений	Os 190,2 осмий
7	Fr 223,023 франций	Ra 226,0254 радий	Ac** 227,028 актиний	Rf [261] резерфордий	Rf [262] руберфордий	Du [265] дуэний	Bh [267] борий	Hs [269] хассий
8	Ce 140,12 церий	Pr 140,9077 протактиний	Nd 144,24 неодимий	Sm 150,4 самарий	Eu 151,96 европий	Gd 157,25 гадолиний	Dy 162,5 дииспроезий	Ho 164,93 гольмий
9	Th 232,0381 торий	Pa 231,036 протактиний	U 238,029 уран	Np 237,0482 нептуний	Pu 244,064 плутоний	Am 243,06 амерций	Cm 247,07 курий	Bk 247,07 берклий
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								
46								
47								
48								
49								
50								
51								
52								
53								
54								
55								
56								
57								
58								
59								
60								
61								
62								
63								
64								
65								
66								
67								
68								
69								
70								
71								
72								
73								
74								
75								
76								
77								
78								
79								
80								
81								
82								
83								
84								
85								
86								
87								
88								
89								
90								
91								
92								
93								
94								
95								
96								
97								
98								
99								
100								
101								
102								
103								
104								
105								

*лантаноиды

**актиноиды

Учебное издание

ТИНЬГАЕВА Елена Александровна,
БАХИРЕВА Ольга Ивановна,
ПАН Лариса Сергеевна

ФИЗИЧЕСКАЯ И КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

Методические указания и контрольные задания
для студентов заочной формы обучения
по направлению «Нефтегазовое дело»

Редактор и корректор *Е.В. Копытина*

Подписано в печать 15.02.17. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ № 21/2017.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.