

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

Кафедра «Химические технологии нефтегазового комплекса»

**Методические указания**

к практическим и контрольным работам по дисциплине

«Коллоидная химия»

Ростов-на-Дону

2025

УДК 541.18

Составители: Дегтярь Л.А., Куц А.А.

Методические указания к практическим и контрольным работам по дисциплине «Коллоидная химия»/ сост.: Дегтярь Л.А., Куц А.А.– Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – 44 с.

В практикуме кратко изложены теоретические вопросы для успешного выполнения практических и контрольных работ.

Предназначено для обучающихся по направлениям 18.03.01 Химическая технология всех форм обучения.

УДК 541.18

Ответственный за выпуск зав. кафедрой Жукова Ирина Юрьевна

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

В печать \_\_\_\_\_\_\_\_\_

Формат 60×84/16. Объем \_\_\_\_\_\_\_ усл. п. л.

Тираж 50 экз. Заказ № \_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный

технический университет, 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Введение | | 4 |
| 1 | Количественные характеристики дисперсных систем | 5 |
|  | 1.1 Определение размера частиц и удельной поверхности | 5 |
|  | 1.2. Методы получения дисперсных систем | 6 |
|  | 1.3 Задачи для самостоятельного решения | 8 |
| 2 | Термодинамика межфазной поверхностности | 10 |
|  | [2.1. Природа поверхностной энергии](#_Toc127045) | 10 |
|  | [2.2. Факторы, влияющие на поверхностное натяжени](#_Toc127046)е | 10 |
|  | [2.3. Задачи для самостоятельного решени](#_Toc127047)я | 12 |
| 3 | [Кинетические свойства свободнодисперсных систем](#_Toc127048) | 14 |
|  | 3.1. Броуновское движение | 15 |
|  | 3.2. Диффузия | 15 |
|  | 3.3. Осмос | 16 |
|  | 3.4. Седиментация | 17 |
|  | 3.5. Задачи для самостоятельного решения | 19 |
| 4 | [Адсорбция](#_Toc127054) | 23 |
|  | [4.1. Классификация адсорбционных процессов](#_Toc127055) | 23 |
|  | [4.2. Изотермы адсорбции](#_Toc127056) | 23 |
|  | [4.3. Фундаментальное адсорбционное уравнение Гиббса](#_Toc127057) | 24 |
|  | [4.4. Теории адсорбции](#_Toc127058) | 24 |
|  | [4.5. Задачи для самостоятельного решения](#_Toc127059) | 27 |
| 5 | [Капиллярные явления, адгезия, смачивание, растекание](#_Toc127060) | 31 |
|  | [5.1. Капиллярное поднятие](#_Toc127061) | 31 |
|  | [5.2. Адгезия](#_Toc127062) | 32 |
|  | [5.3. Смачивание](#_Toc127063) | 32 |
|  | [5.4. Задачи для самостоятельного решения](#_Toc127064) | 33 |
| 6 | [Коагуляция лиофобных дисперсных систем](#_Toc127065) | 35 |
|  | [6.1. Характеристика процесса коагуляции](#_Toc127066) | 36 |
|  | [6.2. Кинетика коагуляции](#_Toc127067) | 37 |
|  | [6.3. Задачи для самостоятельного решения](#_Toc127068) | 38 |
| Перечень использованных информационных ресурсов | | 43 |
| [Варианты контрольной работы](#_Toc127070) | | 44 |

**ВВЕДЕНИЕ**

Коллоидная химия – это наука о физико-химических свойствах дисперсных систем и поверхностных явлениях. Вследствие исключительно большой роли коллоидных систем и коллоидно-химических процессов в различных областях техники и человеческой деятельности и благодаря накоплению теоретического и практического материала, она выделилась в самостоятельную научную дисциплину. Объектами ее изучения являются гетерофазные системы, в которых одна из фаз находится в высокодисперсном (раздробленном) состоянии.

Трудно назвать какую-либо сферу человеческой деятельности, в которой бы не использовались коллоидные системы или коллоидные процессы. Поверхностные явления (смачивание, адгезия, адсорбция, коагуляция, седиментация и др.) лежат в основе таких процессов химической технологии, как измельчение, гранулирование, сушка, фильтрация, флотация, спекание, склеивание, крашение. К наиболее распространенным дисперсным системам относят дымы и туманы, эмульсии, пены, суспензии, порошки, пыли, гели. Дисперсными системами являются продукты питания, лекарства, биологоческие ткани. В мире каждый год производится сотни миллионов тонн дисперсных веществ и материалов. Знание закономерностей, присущих дисперсным системам, необходимо не только для оптимизации технологических процессов, но и при получении материалов с заданными свойствами, а также при решении задач охраны окружающей среды.

Методическое указание предназначено для студентов направления 18.03.01 «Химическая технология», изучающих дисциплину «Коллоидная химия». Методическое указание состоит из 6 разделов, содержащих более 150 задач. В начале каждого раздела приведен краткий теоретический материал, в котором большое внимание уделяется вопросам, которые недостаточно полно описаны в учебниках, приведены основные формулы для расчетов, а также примеры решения типовых задач. Далее по каждой теме представлены задачи для самостоятельного решения студентами при выполнении ими домашних заданий.

## 

## 1 Количественные характеристики дисперсных систем

### 1.1 Определение размера частиц и удельной поверхности

Дисперсные системы являются всегда гетерогенными (гетерофазными). Они состоят из дисперсной фазы и дисперсионной среды. Объектам изучения коллоидной химии присущи два основных признака: 1) гетерогенность (качественный признак); 2) дисперсность (количественный признак).

Основные характеристики, используемые для описания дисперсных систем:

1. размер частиц – *a* [м], для сферических частиц это диаметр сферы *d*, для кубических – ребро куба *l*;
2. дисперсность (раздробленность) *D* – это величина, обратная наименьшему размеру частиц:

(1.1)

1. Удельная поверхность *S*уд – это межфазная поверхность (*S*1, 2), приходящаяся на единицу объема дисперсной фазы (*V*) или ее массы (*m*).

(1.2)



Если система состоит из n частиц, то удельная поверхность определяется:

для кубических частиц:

 (1.3)

для сферических:

 (1.4)

В общем виде:

 (1.5)

где k – коэффициент формы, тогда

(1.6)

Коэффициенты для сферических и кубических частиц k=6, для пленок k=2, для волокон k=4. С увеличением дисперсности или уменьшением размера частиц возрастает удельная поверхность.

### 1.2. Методы получения дисперсных систем

Дробление веществ до малых размеров частиц требует большой затраты энергии, так как поверхность раздела фаз в таких системах весьма велика. Однако с помощью механических методов даже в присутствии стабилизаторов практически невозможно получение частиц с размерами менее 100 нм.

*Диспергирование* – метод получения дисперсных систем путем измельчения или дробления конденсированного тела. В случае диспергирования одной жидкости в другой (несмешивающейся с первой) процесс называется *эмульгированием*. И в этом случае требуется почти обязательное присутствие в системе эмульгаторов, которые стабилизируют ее дисперсный состав (поверхностно-активных веществ, полимеров, порошков). Таким образом, обычно получают частицы радиусом не меньше 500 нм.

Более высокая дисперсность системы может быть достигнута при использовании методов, основанных на агрегации атомов и молекул, т.е. методов конденсации. *Конденсация* – метод получения дисперсных систем за счет объединения или агрегатирования молекул, или ионов вещества. Именно эти методы чаще всего используются для получения истинно-коллоидных растворов. Образование дисперсных систем при использовании конденсационных методов происходит в результате либо когда возникновение новой фазы осуществляется на уже имеющихся поверхностях (стенках сосуда, частицах посторонних веществ – ядрах конденсации), либо на поверхностях зародышей, возникающих самопроизвольно в гомогенной среде.

При этом зародыши могут возникать лишь при определенном критическом пересыщении раствора.

Степень пересыщения определяется:

 (1.7)

где Р – давление пересыщенного пара;

Рs – давление насыщенного пара;

с – концентрация в пересыщенном растворе;

сs – концентрация в насыщенном растворе.

Критическая степень пересыщения связана с критическим радиусом rкр следующим соотношением:

 (1.8)

Самопроизвольное возникновение ядер конденсации зависит от многих причин, к ним можно отнести химические свойства реагирующих веществ, характер ассоциации атомов и молекул, вязкость среды, температура и др.

Образование дисперсной фазы, с помощью метода конденсации, проходит две стадии: возникновение центров конденсации; рост зародышей.

Дисперсность полученных систем зависит от соотношения скорости образования зародышей и скорости их роста. При малой, по отношению ко второй стадии, скорости образования зародышей, в системе образуется небольшое число достаточно крупных частиц. Если же скорость возникновения зародышей велика, а скорость их роста мала в системе, наоборот, возникает большое число мелких частиц. В этом случае образуются высокодисперсные золи, размер частиц в которых позволяет отнести их к коллоидным растворам.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

Методом механического диспергирования 5 г толуола в 1 л воды получена дисперсная система с частицами толуола шарообразной формы с радиусом 2,5· 10–7 м. Плотность толуола равна 0,867 кг/м3.

Решение:

1. Определяем дисперсность системы D и удельную поверхность Sуд. *D*= 1/а, для шарообразной частицы *а* = 2*r*, т. е.



1. Рассчитываем параметры шарообразной частицы толуола.



1. Рассчитываем общую поверхность частиц S и число частиц N в дисперсной системе. I способ:



где V – объем всех частиц,



тогда



Число частиц определим как отношение объема всех частиц на объем одной частицы



II способ: Число частиц определим через отношение массы всех частиц к массе одной частицы



### 1.3 Задачи для самостоятельного решения

1. Массовая концентрация мучной пыли в воздухе рабочих зон помещения мукомольных предприятий составляет 4,2 мг/м3. Определить численную концентрацию мучной пыли, если средний диаметр частиц составляет 3,7 мкм, а их плотность равна 1,1 · 103 кг/м3.
2. Суспензия кварца содержит сферические частицы, причем 30 % объема приходится на частицы, имеющие радиус 1·10–5 м, а объем остальных – на частицы радиуса 5·10–5 м. Какова удельная поверхность кварца?
3. Приняв, что в золе серебра каждая частица представляет собой куб с длиной ребра l = 4·10–8 м, определите, сколько коллоидных частиц может получиться из 1·10–4 кг серебра. Вычислите суммарную поверхность полученных частиц и рассчитайте поверхность одного кубика серебра с массой 1·10–4 кг. Плотность серебра равна 10,5·103 кг/м3.
4. Золь ртути состоит из шариков диаметром 1·10–8 м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 1 г ртути? Плотность ртути равна 13,56·103 кг/м3.
5. Вычислите удельную поверхность гидрозоля сульфида мышьяка As2S3, средний диаметр частиц которого равен 1,2·10–7 м, а плотность равна 3,43·103 кг/м3. Ответ дайте в м–1 и в м2/кг.
6. Определите величину удельной поверхности суспензии каолина плотностью 2,5·103 кг/м3, состоящей из шарообразных частиц со средним диаметром 0,5·10–6 м. Суспензию считайте монодисперсной. Ответ дайте в м–1 и в м2/кг.
7. Найдите удельную поверхность угля, применяемого в топках для пылевидного топлива, если известно, что угольная пыль предварительно просеивается через сито с отверстиями 7,5·10–5 м. Плотность угля равна 1,8·103 кг/м3. Систему считайте монодисперсной. Ответ дайте в м–1 и в м2/кг.
8. Удельная поверхность суспензии селена составляет 5·105 м–1. Найдите общую поверхность частиц 3 г суспензии. Плотность селена равна 4,28·103 кг/м3.
9. Вычислите удельную поверхность 1 кг угольной пыли с диаметром частиц, равным 8·10–5 м. Плотность угля равна 1,8·103 кг/м3.
10. Вычислите суммарную площадь поверхности 2 г платины, раздробленной на правильные кубики с длиной ребра 1·10–8 м. Плотность платины равна 21,4·103 кг/м3.
11. Вычислите суммарную площадь поверхности 1 г золота, раздробленного на правильные кубики с длиной ребра 5·10–9 м. Плотность золота равна 19,6·103 кг/м3.
12. Золь ртути состоит из шариков диаметром 6·10–8 м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 0,5 см3 ртути?
13. Допуская, что в коллоидном растворе золота каждая частица представляет собой куб с длиной ребра 2·10–8 м, рассчитайте: а) число частиц в 1 г золя золота; б) общую площадь поверхности частиц золота. Плотность золота равна 19,6·103 кг/м3.
14. Дисперсность золя ртути составляет 1,6·107 м–1. Рассчитайте: а) суммарную поверхность частиц 1 г ртути; б) общее число частиц в растворе при дроблении 0,1 г ртути. Примите, что частицы золя ртути имеют сферическую форму. Плотность ртути равна 13,56·103 кг/м3.
15. Дисперсность частиц 2 г коллоидного золота составляет 5·107 м–1. Принимая форму частиц в виде кубиков, определите, какую поверхность они могут покрыть, если их плотно уложить в один слой. Плотность золота равна 19,6·103 кг/м3.
16. Золь ртути состоит из сферических частиц диаметром d = 6 ·10–6 м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 2,5 см3 ртути?
17. Вычислите суммарную поверхность 250 г угольной пыли с диаметром частиц, равным 6·10–5 м. Плотность угля равна 1,8·103 кг/м3.
18. Определите величину удельной поверхности суспензии каолина (плотность равна 2,5·103 кг/м3), если шарообразные частицы суспензии имеют дисперсность 2·106 м–1. Суспензию считайте монодисперсной. Ответ дайте в м–1 и в м2/кг.
19. Золь ртути состоит из шариков радиусом 3·10–7 м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 300 г ртути? Плотность ртути равна 13,56·103 кг/м3.
20. При изготовлении эмульсии масла в воде диаметр капель при машинном перемешивании составляет 4·10–6 м, а при ручном взбалтывании 2·10–5 м. Найдите, во сколько раз удельная площадь поверхности эмульсии масла при машинном перемешивании больше, чем при ручном взбалтывании. Плотность масла равна 0,8·103 кг/м3.
21. Какой длины будет нить золота, если 50 г кубиков золота расположить друг за другом. Плотность золота равна 19,6·103 кг/м3. Длина ребра кубика золота составляет 4·10–7 м.
22. Рассчитайте средний диаметр частиц силикагеля, если его удельная поверхность равна 8,3·103 м2/кг, а плотность = 2200 кг/м3.
23. Какова общая поверхность 5 кг угля, если средний радиус частиц равен 2,4·10–5 м? Плотность угля составляет 1800 кг/м3.
24. Рассчитайте удельную объемную и удельную массовую поверхность 5 г эмульсии бензола в воде дисперсностью D = 2 мкм–1 при температуре 313 K. Плотность бензола при этой температуре равна 0,858 г/см3.
25. Дана дисперсная система с массой дисперсной фазы m, плотностью дисперсной фазы, с частицами дисперсной фазы определенной формы и размера: r – радиус шара, l – длина ребра куба (данные приведены в табл. 1.1).

Необходимо:

* рассчитать дисперсность системы D и удельную поверхность Sуд; – рассчитать параметры частицы дисперсной фазы: объем V0, поверхность S0, массу m0;
* рассчитать общую поверхность всех частиц S и число частиц N в дисперсной системе.

Таблица 1.1 – Параметры дисперсной системы

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Дисперсная фаза | Дисперсионная среда | Форма частиц | *r* (*l*),м | 10–3, кг/м3 | *m*,кг |
| Сера | Вода | Куб | 2 10–8 | 2,07 | 1 |

## 2 Термодинамика межфазной поверхностности

### 2.1 Природа поверхностной энергии

Наиболее важной характеристикой поверхности является поверхностное натяжение, которое определена как избыточная энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности:

 (2.1)

Физическая природа поверхностного натяжения в нескомпенсированности поля межмолекулярных сил на межфазных поверхностях. Поверхностное натяжение характеризует различия в интенсивности межмолекулярных взаимодействий граничащих фаз. Чем сильнее межмолекулярные связи в веществе, тем больше поверхностное натяжение на его межфазной поверхности.

Она является частью свободной энергии системы в целом. В самопроизвольных процессах эта энергия может быть снижена либо за счет уменьшения площади поверхности и изменения ее формы, либо за счет снижения поверхностного натяжения.

### 2.2 Факторы, влияющие на поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение на границе раздела фаз между жидкостью и газом определяют следующие факторы: химическая природа вещества, температура, природа граничащих фаз, наличие примесей, заряд поверхности, кривизна поверхности жидкости.

Энергия межмолекулярных взаимодействий зависит от температуры. С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается, а теплота образования единицы площади поверхности увеличивается. Это объясняется тем, что с повышением температуры расстояние между молекулами в жидких телах увеличивается, и соответственно поверхностное натяжение уменьшается. С помощью температурного коэффициента можно определить поверхностное натяжение при любой температуре, если известно значение поверхностного натяжения при какой-то температуре.



где .

Появление кривизны поверхности из-за стремления системы к минимуму поверхностной энергии ведет не только к изменению площади межфазной поверхности, но и к появлению избыточного давления внутри фаз. Взаимосвязь между избыточным внутренним давлением в теле и кривизной его поверхности выражается уравнением Лапласа:



Или для сферической поверхности радиусом r



Искривление поверхности вызывает повышение или понижение давления в фазе по сравнению с плоской поверхностью фазы такого же химического состава. Очевидно, что это приводит к изменению термодинамических параметров вещества, определяющих его физические свойства и реакционную способность. Понятие *термодинамическая реакционная способность* вещества характеризует его способность изменять химический или фазовый состав, т.е. вступать в химическую реакцию или переходить в новую фазу (например, испаряться или конденсироваться, растворяться).

У тел с искривленной поверхностью меняется не только внутреннее давление, но и его свободная энергия:



где p – давление пара над искривленной поверхностью;

pS – давление пара над плоской поверхностью.

Тогда уравнение, записанное для сферической поверхности, называется уравнением капиллярной конденсации Кельвина (Томсона):



При появлении кривизны поверхности и увеличении степени дисперсности уменьшается и температура фазовых переходов.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

При конденсации тумана, состоящего из капель кадмия, образовалось 12,5 10–6 м3 жидкого кадмия. Поверхностное натяжение при температуре конденсации равно 570 мДж/м2. Свободная поверхностная энергия всех капель составляла 53 Дж. Вычислите дисперсность и диаметр капель жидкого кадмия.

Решение:

Энергия Гиббса поверхности определяется по уравнению:



Связь между удельной поверхностью Sуд, поверхностью S, объемом V и дисперсностью D выражается соотношением:



тогда поверхность тумана определяется по формуле:



Таким образом, дисперсность капель составит:



Тогда диаметр капель:



### 2.3 Задачи для самостоятельного решения

1. Во влажном воздухе образуется туман при температуре 271 K и коэффициенте пересыщения 4,22. Рассчитайте критический размер ядер конденсации и число молекул, содержащихся в них. Поверхностное натяжение воды составляет 74 мДж/м2, мольный объем воды равен 18·10–6 м3/моль.
2. Рассчитайте избыточное давление в капле воды (за счет кривизны) с удельной поверхностью 3·106 м–1 при температуре 313 K, если поверхностное натяжение воды при 298 K составляет 71,96 мДж/м2, а температурный коэффициент поверхностного натяжения воды d/dT = –0,16 мДж/(м2 K).
3. Рассчитайте давление насыщенных паров над каплями четыреххлористого углерода с дисперсностью 0,1 нм–1 при температуре 293 K. Давление насыщенных паров четыреххлористого углерода над плоской поверхностью при этой температуре равно 13000 Па, плотность 1,593 г/см3, поверхностное натяжение 25,68 мДж/м2.
4. Определите, насколько давление паров над каплями воды диаметром 0,2 мкм больше, чем давление паров над плоской поверхностью при температуре 298 K. Поверхностное натяжение воды 71,96 мДж/м2, мольный объем 18,05 см3/моль.
5. По зависимости поверхностного натяжения (σ) от температуры определить температурный коэффициент поверхностного натяжения для ртути:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 313 | 363 | 413 | 443 |
| Поверхностное натяжение , Н/м | 0,4797 | 0,4680 | 0,4564 | 0,4494 |

1. По зависимости поверхностного натяжения (σ) от температуры определить температурный коэффициент поверхностного натяжения для метанола и полную поверхностную энергию:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 273 | 283 | 293 | 303 | 313 |
| Поверхностное натяжение  , Н/м | 24,5 | 23,5 | 22,6 | 21,8 | 20,9 |

1. По зависимости поверхностного натяжения от температуры определить графически температурный коэффициент поверхностного натяжения (σ) для бензола и полную поверхностную энергию:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 353 | 363 | 373 | 383 | 393 |
| Поверхностное натяжение  , Н/м | 20,28 | 19,16 | 18,02 | 16,85 | 15,71 |

1. Образование изморози наблюдается во влажном воздухе при температуре 273 K и коэффициенте пересыщения 4,37. Рассчитайте минимальный размер капель при конденсации и число молекул их составляющих. Поверхностное натяжение воды 73,8 мДж/м2, мольный объем воды 18· 10–6 м3/моль.
2. Аэрозоль ртути сконденсировался в виде большой капли объемом 3,5 см3. Определите свободную поверхностную энергию аэрозоля, если дисперсность составляла 10 мкм–1. Поверхностное натяжение ртути равно 0,475 Дж/м2.
3. Сколько нужно затратить энергии, чтобы диспергировать 1·10–5 м3 масла в виде тумана с дисперсностью частиц 1·105 м–1? Поверхностное натяжение масла 40,5·10–3 Н/м.
4. Определите свободную поверхностную энергию GS 10 г тумана, если поверхностное натяжение равно 73·10–3 Дж/м2, а дисперсность частиц составляет 4·107 м–1. Плотность воды равна 1·103 кг/м3.
5. Чему равна избыточная поверхностная энергия капли ртути диаметром

1,2 мм, если поверхностное натяжение на границе ртуть – воздух равно 473,5·10–3 Дж/м2?

1. Во сколько раз увеличится свободная поверхностная энергия системы при пептизации геля Fe(OH)3, если при этом радиус частиц геля уменьшится от 1·10–6 до 1·10–9 м?
2. Во сколько раз уменьшится свободная поверхностная энергия водяного тумана, если при этом радиус его капель увеличится от 1·10–6 м до 1,2·10–3 м?
3. Во сколько раз изменится поверхностная энергия системы при пептизации золя Al(OH)3, если при этом радиус частиц изменился с 10–6 м до 10–9 м?
4. Определите количество частиц, полученных в результате диспергирования 0,5 г серебра, считая, что монодисперсные частицы сферические и их радиус 8 нм. Плотность серебра 10,5 г/см3.
5. Определите свободную поверхностную энергию 0,004 кг тумана, если поверхностное натяжение равно 73·10–3 Н/м, а дисперсность частиц тумана D = 5·105 м–1. Плотность воды 1000 кг/м3.
6. Как изменится свободная энергия при диспергировании частиц в золе при постоянной температуре, если радиус частиц изменится с 6·10–5 до 4·10–8 м?
7. При 273 K поверхностное натяжение гексана равно 21,31·10–3 Н/м. Определите поверхностное натяжение гексана при 313 K, если температурный коэффициент равен –1,039·10–4 Н/(м·K).
8. Определите поверхностное натяжение бензола при 293, 313 и 343 K, если температурный коэффициент равен –0,13 мДж/(м2 K). Полная поверхностная энергия постоянная и не зависит от температуры US = 61,9 мДж/м2.
9. Аэрозоль ртути сконденсировался в виде большой капли объемом 2,5 см3. Определите, на сколько уменьшилась поверхностная энергия ртути, если дисперсность аэрозоля составила 10 мкм–1, а поверхностное натяжение ртути 0,473 Дж/м2.
10. Туман, состоящий из капелек кадмия, сконденсировался, при этом образовалось 12,5·10–6 м3 жидкого кадмия, а свободная поверхностная энергия капелек уменьшилась на 530 Дж. Поверхностное натяжение жидкого кадмия при температуре конденсации равно 0,57 Н/м. Вычислить дисперсность и размер (диаметр) капель жидкого кадмия.
11. Сколько нужно затратить энергии, чтобы диспергировать 1·10–5 м2 масла в виде тумана, дисперсность частиц которого равна 105 м–1? Поверхностное натяжение масла составляет 40,5·10–3 Н/м.
12. По следующим данным вычислить полную поверхностную энергию для бензола и сделать вывод о зависимости полной поверхностной энергии от температуры:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 363 | 383 | 413 | 433 |
| , Н/м | 19,16 | 16,85 | 14,45 | 11,29 |
| Температурный коэффициент (*d*)/(*dT*) 103,  H/(м·K) | –0,113 | –0,1155 | –0,111 | –0,108 |

1. По данным вычислить полную поверхностную энергию для CCl4 и сделать вывод о зависимости полной поверхностной энергии от температуры:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 313 | 463 | 503 | 523 | 633 |
| , Н/м | 24,41 | 7,28 | 3,56 | 1,93 | 1,2 |
| Температурный коэффициент (*d*)/(*dT*) 103, H/(м·K) | -0,12 | -0,10 | -0,09 | -0,08 | -0,07 |

## 3 Кинетические свойства свободнодисперсных систем

Молекулярно-кинетические свойства обусловлены непрерывным хаотическим движением молекул и атомов.

### 3.1 Броуновское движение

*Броуновское движение* – это непрерывное беспорядочное движение частиц микроскопических и коллоидных размеров, не затухающее во времени. Это движение тем интенсивнее, чем выше температура и чем меньше масса частицы и вязкость дисперсионной среды.

Количественной характеристикой броуновского движения частиц дисперсной фазы принято считать средний сдвиг частицы за время, т.е. сдвиг – это изменение координаты частицы за определенный отрезок времени:

 (3.1)

где Д-коэффициент диффузии [м2/с],

τ- время диффузии.

Эйнштейн и Смолуховский предложили статистическую теорию, в основе которой лежит следующий постулат: броуновское движение совершенно хаотично, т. е. в нем наблюдается полная равноправность всех направлений.

 (3.2)

Таким образом, средний сдвиг частицы зависит от температуры, времени, радиуса, вязкости.

### 3.2 Диффузия

Диффузия – самопроизвольный процесс выравнивания концентрации молекул, ионов или коллоидных частиц под влиянием их теплового движения.

Процесс диффузии является необратимым, он протекает до полного выравнивания концентрации, так как хаотическое распределение частиц отвечает максимальной энтропии системы.

Закон диффузии установил Фик по аналогии с законами переноса тепла и электричества:

где dQ – количество продиффундировавшего вещества;

Д – коэффициент диффузии;

*dc/dx* – градиент концентрации;

s – площадь, через которую идет диффузия;

τ – продолжительность диффузии.

Минус перед правой частью уравнения стоит потому, что производная *dc/dx* отрицательна, т. к. с увеличением x концентрация уменьшается.

Часто для описания диффузии используется удельный поток – количество вещества, диффундирующее за единицу времени через сечение единичной площади:



Диффузионный поток характеризует количество вещества, переносимое в результате диффузии за единицу времени через сечение, равное единице площади.

### 3.3 Осмос

*Осмос* – это односторонняя диффузия молекул растворителя через полупроницаемую мембрану при условии разности концентраций раствора по обе стороны мембраны.

При разделении двух растворов различной концентрации или раствора и чистого растворителя полупроницаемой перегородкой (мембраной) возникает поток растворителя от меньшей концентрации вещества к большей, что приводит к выравниванию концентраций.

Равновесное осмотическое давление для коллоидных растворов рассчитывают на основании закона Вант-Гоффа по уравнению:



Таким образом, осмотическое давление увеличивается с ростом числа частиц. Осмотическое давление истинных растворов всегда больше, чем коллоидных, поскольку там больше атомов и молекул. Оно не зависит от природы и массы частиц и очень зависит от размера частиц.

Концентрации коллоидных растворов:

1) Частичная или численная концентрация – это число отдельных частиц в единице объема дисперсной системы:

где V – общий объем дисперсной системы;

N – число частиц дис-персной фазы.

2) Мольно-объемная концентрация:

где n – число молей частиц ДФ (n = N/NA) [моль/м3].

3) Объемно-массовая концентрация:



Взаимосвязь между концентрациями.



### 3.4 Седиментация

Образование дисперсных систем сопровождается увеличением свободной энергии системы. Следовательно, дисперсная система является принципиально термодинамически неустойчивой, т.е. рано или поздно должна самопроизвольно разрушиться. Поэтому речь может идти только об относительной термодинамической устойчивости дисперсных систем.

*Относительная устойчивость* – это способность системы в течение определенного времени сохранять неизменной размеры частиц дисперсной фазы и их распределение в объеме системы. В этом плане различают седиментационную (кинетическую) устойчивость, т. е. устойчивость к осаждению частиц дисперсной фазы, характеризующую способность противостоять действию силы тяжести, и агрегативную устойчивость, т. е.

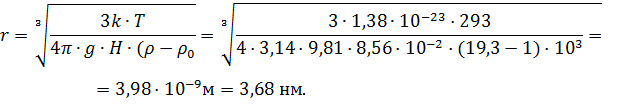
устойчивость к объединению частиц.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

1.Определите радиус частиц гидрозоля золота, если после установления диффузионно-седиментационного равновесия при 293 K на высоте Н = 8,56 см концентрация частиц изменяется в е раз. Плотность золота 19,3 г/см3, плотность воды 0 = 1,0 г/см3.

Решение:

Распределение частиц по высоте при установлении диффузионноседиментационного равновесия описывается гипсометрическим уравнением. Согласно условию задачи, ν= ν0/e и ln( ν/ ν0) = –1. С учетом этого выражение для радиуса частиц принимает вид



2.Рассчитать и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц в водной среде:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| *m*,мг | 6,5 | 12,0 | 17,5 | 25,0 | 37,0 | 44,0 | 47,5 | 49,0 | 50,0 | 50,0 |

Высота осаждения H = 0,12 м, вязкость среды 𝜂=10–3 Па·с, плотность частиц дисперсной фазы ρ= 2,7·103 кг/м3, плотность среды ρ0 = 103 кг/м3. Решение:

Для решения задачи строим седиментационную кривую m = f (



)

.

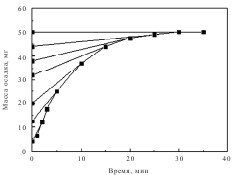
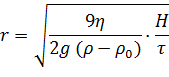


Рисунок 3.1- Седиментационная кривая

Обрабатываем седиментационную кривую методом касательных. Определяем по графику массы фракций, считаем радиус частиц по уравнению и определяем долю каждой фракции. Заносим все данные в табл. 3.3.



где mi- масса частиц данной фракции.

Сводная таблица для построения интегральной и дифференциальной кривых распределения

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 120 | 300 | 600 | 900 | 1200 | 1500 | 2100 |
| *mi ·* 103,г | 4 | 8,5 | 7,5 | 12 | 6 | 6 | 6 |
| Qi, ·% | 8 | 17 | 15 | 24 | 12 | 12 | 12 |
| *ri ·* 106,м | 2,7 | 1,7 | 1,2 | 1,0 | 0,87 | 0,77 | 0,65 |

На основе данных табл. строим интегральную кривую распределения.

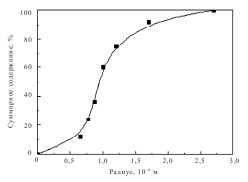


Рисунок 3.2 - Интегральная кривая распределения

Проводим обработку интегральной кривой для построения дифференциальной кривой распределения (рис. 3.3).

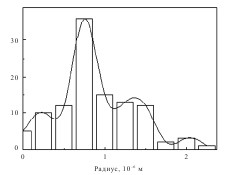


Рисунок 3.3 - Дифференциальная кривая распределения

### 3.5 Задачи для самостоятельного решения

1. Определите радиус частиц гидрозоля золота, если после установления диффузионно-седиментационного равновесия при 293 K на высоте h = 8,56 см концентрация частиц изменяется в е раз. Плотность золота = 19,3 г/см3, плотность воды 0 = 1,0 г/см3.
2. Рассчитайте и сравните время оседания частиц в гравитационном и центробежном полях при следующих условиях: радиус частиц r = 10–7 м; плотность дисперсионной фазы = 3·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ = 1·103 кг/м3; вязкость = 1·10–3 Па с; высота оседания Н = 0,1 м; центробежное ускорение 2h = 200g.
3. Рассчитайте радиус частиц золя AgCl в воде, если время их оседания в центрифуге составило 10 мин при следующих условиях: исходный уровень h1 = 0,09 м; конечный уровень h2 = 0,14 м; плотность дисперсной фазы = 5,6·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ = 1·103 кг/м3; частота вращения центрифуги, n = 1000 об/мин; вязкость = 1·10–3 Па с.
4. Определите высоту, на которой после установления диффузионноседиментационного равновесия концентрация частиц гидрозоля SiO2 уменьшится вдвое. Частицы золя сферические, дисперсность частиц: а) 0,2 нм–1; б) 0,1 нм–1; в) 0,01 нм–1. Плотность SiO2 2,7 г/см3, плотность воды 1 г/см3, температура 298 K.
5. Для гидрозоля А12О3 рассчитайте высоту, на которой концентрация частиц уменьшается в 2,7 раза. Форма частиц сферическая, удельная поверхность дисперсной фазы гидрозоля: а) 109 м–1; б) 0,5·109 м–1; в) 108 м–1. Плотность А12О3 4 г/см3, плотность дисперсионной среды 1 г/см3, температура 293 K.
6. Частицы бентонита дисперсностью D = 0,8 мкм–1 оседают в водной среде под действием силы тяжести. Определите время оседания 1 на расстояние h = 0,1 м, если плотность ρ0 бентонита = 2,1 г/см3, плотность среды ρ = 1,1 г/см3, вязкость среды ρ0 = 2 10–3 Па с. Во сколько раз быстрее осядут частицы на то же расстояние в центробежном поле, если начальное расстояние от оси вращения h0 = 0,15 м, а скорость вращения центрифуги п = 600 об/с?
7. Определите радиус частиц гидрозоля золота, если после установления диффузионно-седиментационного равновесия при 293 K на высоте Н = 8,56 см концентрация частиц изменяется в е раз. Плотность золота ρ= 19,3 г/см3, плотность воды ρ0 = 1,0 г/см3.
8. В опытах Вестгрена было получено следующее установившееся под действием силы тяжести распределение частиц гидрозоля золота по высоте:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *h*,мкм | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| Число частиц в единице объема | 1431 | 1053 | 779 | 408 | 254 | 148 | 93 |

Определите средний размер частиц гидрозоля, если плотность дисперсной фазы равна 19,6 г/см3, температура 292 K.

1. Рассчитайте, за какое время сферические частицы А12О3, распределенные в среде с вязкостью 1,5·10–3 Па с, оседают на высоту 1 см, если удельная поверхность частиц составляет: а) 104 м–1; б) 105 м–1; в) 106 м–1. Плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды равны соответственно 4 и

1 г/см3.

1. Определите удельную поверхность порошка сульфата бария (в расчете на единицу массы), если частицы его оседают в водной среде на высоту 0,226 м за 1350 с (предполагая, что частицы имеют сферическую форму). Плотность сульфата бария и воды соответственно 4,5 и 1 г/см3, вязкость воды 1·10–3 Па·с.
2. Граница между гидрозолем золота и дисперсионной средой в центробежном поле ультрацентрифуги через 1 ч после начала опыта находилась на расстоянии 3,70 см от оси вращения, а через 1,5 ч – на расстоянии 3,78 см. Определите размер и удельную поверхность (в расчете на единицу массы) сферических частиц гидрозоля, если скорость вращения ротора центрифуги 8700 об/мин, плотность золота 19,3 г/см3, плотность воды 1 г/см3, вязкость воды 1·10–3 Па·с.
3. Пробирка высотой 0,1 м заполнена высокодисперсной суспензией кварца (плотность 2650 кг/м3) в воде (плотность 1000 кг/м3, вязкость 0,001 Па с). Время полного оседания частиц равно 2 ч. Каков минимальный размер частиц, принимая, что они имеют сферическую форму?
4. Рассчитайте и сравните скорости оседания частиц Al2O3 в воде в гравитационном и центробежном полях при следующих условиях: радиус частиц r = 5·10–7 м; плотность дисперсной фазы = 3,9·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1,103 кг/м3; вязкость = 1·10–3 Па с; центробежное ускорение 2h = 300g.
5. Рассчитайте и сравните скорости оседании частиц глины в воде в гравитационном и центробежном полях при следующих условиях: радиус частиц r = 2·10–6 м; высота оседания H = 0,2 м; плотность дисперсной фазы = 2,7·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3; вязкость 1·10–3 Па·с; частота вращения центрифуги n = 1000 об/мин.
6. Рассчитайте скорость и время оседания частиц с высоты Н = 0,2 м в центробежных полях центрифуг с частотой вращения п, равной 600 об/мин и 6000 об/мин. Радиус частиц r = 2·10–6 м; плотность дисперсной фазы 2,7·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды 1·103 кг/м3; вязкость η = 1·10–3 Па·с.
7. Рассчитайте размер частиц АgС1 в ацетоне, если время их оседания в центрифуге составило 8 мин при следующих условиях: исходный уровень h1 = 0,05 м; конечный уровень h2 = 0,10 м; плотность дисперсной фазы ρ = 5,6·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 0,79·103 кг/м3; вязкость η= 0,33·10–3 Па·с; частота вращения центрифуги n = 1800 об/мин.
8. Рассчитайте время оседания частиц А12О3 радиусом r = 10–7 м в центробежном поле при следующих условиях: плотность дисперсной фазы ρ = 3,9 103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3; исходный уровень оседания h1 = 0,05 м; конечный уровень h2 = 0,12 м; вязкость η= 1·10–3 Па·с; частота вращения центрифуги n = 1800 об/мин.
9. Рассчитайте размер частиц пигмента кубового желтого в воде, если время их оседания в центробежном поле составило 180 с при следующих условиях: исходный уровень h1 = 0,04 м; конечный уровень h2 = 0,09 м; плотность дисперсной фазы = 1,3·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3; вязкость η=1·10–3 Па·с; частота вращения центрифуги n = 1800 об/мин.
10. Вычислите и сравните скорости оседания в воздухе частиц аэрозоля хлорида аммония радиусом 10–6, 10–7 и 10–8 м. Плотность дисперсной фазы 1,5 г/см3, плотностью воздуха можно пренебречь, вязкость дисперсионной среды 1,8·10–5 Па·с, температура 293 K.
11. На основании экспериментальных данных о числе частиц (n) в суспензии гуммигута на различных высотах уровней отсчета (х – высота до горизонтальной плоскости) покажите применимость формулы Перрена:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *х*,мкм | α | α –25 | α –50 | α –75 | α –100 |
| *n* | 100 | 116 | 146 | 171 |  |

71– 75. Задачи на седиментационный анализ.

1. Рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц по данным седиментационного анализа суспензии талька в воде:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 15 | 30 | 60 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 |
| *m*,мг | 3 | 6 | 8 | 9 | 12 | 13 | 13,5 | 13,5 |

Н= 0,1 м; ρ= 2,7·103 кг/м3; ρ0 = 1 103 кг/м3. Используйте метод построения касательных к кривой седиментации.

1. Постройте седиментационную кривую, рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц глины в водном растворе уксусной кислоты, используя графический метод обработки кривой седиментации:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 9 | 12 | 15 |
| *m*,мг | 8 | 12 | 15 | 18 | 25 | 30 | 33 | 35 | 35 |

Высота оседания *Н* = 0,093 м; вязкость 𝜂= 1· 10–3 Па∙ с; плотность глины ρ= 2,76· 103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1,1· 103 кг/м3.

1. Постройте седиментационную кривую, рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц воронежской глины в воде, пользуясь графическим методом обработки кривой седиментации:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 |
| *m*,мг | 8 | 11 | 18 | 21 | 26 | 29 | 34 | 38 | 40 | 40 |

Высота оседания *Н* = 0,09 м; вязкость 𝜂= 1·10–3 Па с; плотность глины ρ= 2,76·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3.

1. Рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения частиц глины в воде, пользуясь графическим методом обработки кривой седиментации.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 0,25 | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 | 24 | 28 |
| *m*,мг | 2 | 7 | 11 | 14 | 22 | 37 | 45 | 48 | 50 | 50 |

Высота оседания *Н* = 0,12 м; вязкость 𝜂= 1·10–3 Па с; плотность глины ρ= 2,54·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3. Использовать метод построения касательных к кривой седиментации.

1. Рассчитайте и постройте интегральную и дифференциальную кривые распределения для суспензии глины в воде по следующим экспериментальным данным:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, мин | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| *m*,мг | 6,5 | 12 | 17,5 | 25 | 37 | 44 | 47,5 | 49 | 50 | 50 |

Плотность частиц дисперсной фазы ρ= 2,74·103 кг/м3; плотность дисперсионной среды ρ0 = 1·103 кг/м3; вязкость 𝜂= 1·10–3 Па·с, высота оседания *Н* = 0,12 м. Используйте метод построения касательных к кривой седиментации.

**4 Адсорбция**

***Адсорбция*** –процесс самопроизвольного перераспределениякомпонентов системы между поверхностным слоем вещества и объемной фазой.

Принято вещество, на поверхности которого происходит адсорбция, называть ***адсорбентом***, а вещество, которое адсорбируется – ***адсорбатом***.

Процесс, обратный адсорбции, называется ***десорбцией***.

Для количественного описания адсорбции применяют две величины:

1. абсолютную величину адсорбции *А*, представляющую собой количество вещества (адсорбата), адсорбированное единицей площади поверхности или единицей массы адсорбента;
2. избыточную или гиббсовскую адсорбцию Г, определяемую избытком вещества (компонента) в поверхностном слое по сравнению с его количеством в объемной фазе, отнесенным к единице площади поверхности или к единице массы адсорбата.

### 4.1 Классификация адсорбционных процессов

По типу взаимодействия между адсорбентом и адсорбатом адсорбцию можно классифицировать:

1. ***физическая адсорбция*** –осуществляется за счет межмолекулярных сил притяжения Ван-дер-Ваальса и за счет водородных связей;
2. ***химическая адсорбция* (*хемосорбция*)**–возникает в результате химического взаимодействия между молекулами адсорбата и адсорбента с образованием нового поверхностного соединения;
3. ***ионный обмен*** –эквивалентный обмен ионов(катионов илианионов) между поверхностью адсорбента и объемной фазой, ионы которой способны к эквивалентному обмену.

### 4.2 Изотермы адсорбции

Процесс адсорбции может происходить на межфазных грани-цах: газ – жидкость, газ – твердое, жидкость – жидкость, жидкость – твердое.

Величина адсорбции из растворов зависит от концентрации в нем адсорбата, а адсорбция газа определяется его давлением при постоянной температуре.

Зависимости *А* = *f* (*c*)*T* ; *А* = *f* (*Р*)*T* – называются *изотермами* *адсорбции*.Зависимость *А* = *f* (*Т*)*С* – *изопикной* адсорбции;зависимость *А* = *f* (*Т*)*Р* – *изобарой* адсорбции; зависимость *С* = *f* (*Т*)*А*;

Так как проще поддерживать постоянной температуру, поэтому чаще всего адсорбцию описывают изотермой. Используя изотермы адсорбции, полученные при различных температурах, можно построить изопикну и изостеру адсорбции.

### 4.3 Фундаментальное адсорбционное уравнение Гиббса

Исходя из второго начала термодинамики, Дж. Гиббс вывел важное уравнение, связывающее величину адсорбции со способностью растворенного вещества изменять поверхностное натяжение ( ) раствора:



,

(4.1)

где Г*i* – гиббсовская адсорбция, т. е. поверхностный избыток *i*-го компонента на поверхности по сравнению с объемом; *i* – химический потенциал *i*-го компонента системы.

### 4.4 Теории адсорбции

*Уравнение Генри.* Форма изотермы адсорбции на твердых телах зависит от многих параметров: свойств адсорбента и адсорбата; взаимодействия молекул адсорбента и адсорбата; взаимодействия молекул адсорбата между собой в жидкой или газовой фазе и в адсорбированном состоянии.

Разделим изотерму адсорбции (рис. 4.1) на три участка и рассмотрим каждый из них.

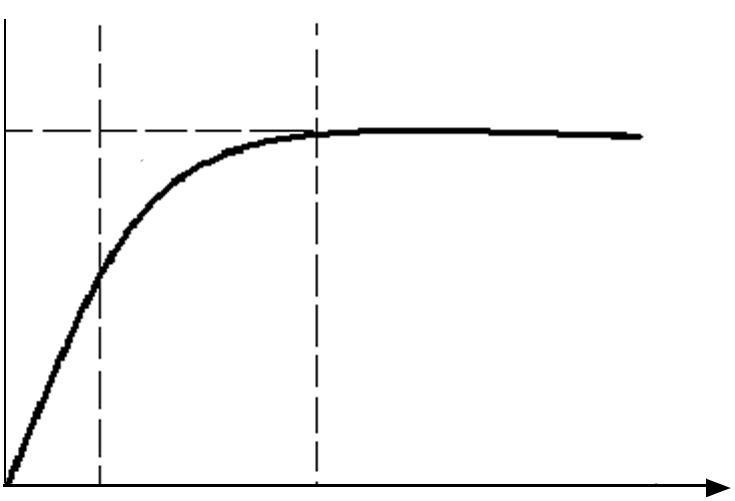


Рисунок 4.1 - Изотерма адсобции

В области малых концентраций или давлений (участок I), соответствующих малым заполнениям поверхности, взаимодействие между молекулами адсорбата незначительное. Зависимости *А* = *f* *T* (*C*) или *А* = *f* *T* (*P*) сводятся к простейшей форме, которая описывается уравнением Генри и соответствует линейному участку на кривой:

*A* = *k*Г*С* или *A* = *k*Г*Р*, (4.2)

где *k*Г – константа распределения или константа Генри;

*С* – концентрация адсорбата в объемной фазе;

*Р* – давление пара или газа (адсорбата).

Любая изотерма в области низких концентраций и давлений описывается уравнением Генри.

Участок II – скорость адсорбции уменьшается по сравнению с I участком, но остается выше скорости десорбции.

Участок III – адсорбция достигает максимального значения (предельного),

т. е. вся поверхность сорбента заполнена адсорбатом.

*Теория Ленгмюра* является фундаментальным вкладом в теорию адсорбции. Она позволяет учесть отклонения от закона Генри, связанные с ограниченной поверхностью адсорбента. Выводы изотермы Ленгмюра базируются на трех постулатах:

1. адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах, каждый из которых взаимодействует только с одной молекулой адсорбата, образуя на поверхности адсорбента мономолекулярный слой;
2. адсорбционные центры энергетически эквипотенциальны, т. е. равны по своей энергии;
3. адсорбируемые молекулы не взаимодействуют друг с другом. Аналитическим выражением изотермы мономолекулярной адсорбции Ленгмюра в широкой области концентраций (или давлений) на энергетически эквипотенциальной поверхности являются уравнения:

или(для газов),(4.3)

где *k* – константа адсорбционного равновесия, характеризующая энергию взаимодействия адсорбента с адсорбатом (чем сильнее это взаимодействие, тем выше константа адсорбционного равновесия);

*А* –емкость адсорбционного монослоя или число адсорбированных центров, приходящихся на единицу площади поверхности или на единицу массы адсорбента (величина предельной адсорбции при монослойном заполнении поверхности адсорбента молекулами адсорбата).

Изотерма Ленгмюра обычно решается графическим путем.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

По экспериментальным данным построить изотерму адсорбции V = f (P) и ее линейную зависимость P/V = f (P).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 1,67 | 8,83 | 20,0 | 36,3 | 52,0 |
| *V ·*106,м3/г | 3,47 | 13,83 | 23,00 | 27,94 | 33,43 |

Определить константы уравнения. Найти степень заполнения адсорбента при давлении 2,7·104 Па. При каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

Решение:

Строим зависимости адсорбции от концентрации V = f (P) и линейную зависимость в координатах P/V = f (P).

Заполняем таблицу для построения линейной зависимости уравнения Ленгмюра.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P* 10–3,Па | 1,67 | 8,83 | 20,0 | 36,3 | 52,0 |
| *Р*/*V* 10–8,Па/м3 | 4,8 | 6,4 | 8,7 | 12,9 | 15,6 |

По линейной зависимости определяем константы уравнения Ленгмюра:

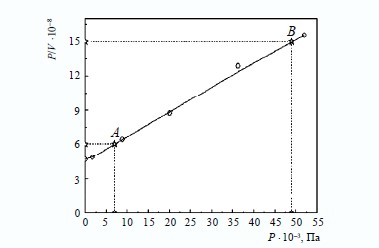
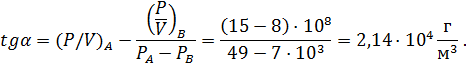


Рисунок 4.2 - Линейная зависимость уравнения Ленгмюра

1. Находим тангенс угла наклона по координатам двух точек на построенной кривой



1. Находим значение предельной адсорбции



1. Отрезок, отсекаемый на оси ординат, составляет



Тогда постоянная адсорбционного обмена равна



1. Степень заполнение сорбента составляет . Необходимо найти адсорбцию при указанном давлении P = 2,7·104 Па по уравнению Ленгмюра:



Степень заполнения сорбента составит



1. Определим давление при степени заполнения 0,4, так как θ= 0,4, то V = 0,4·4,6·10–5 = 1,84·10–5 м3/г.

Рассчитаем давление из уравнения Ленгмюра



### 4.5 Задачи для самостоятельного решения

1. Покажите,что адсорбция метана на слюде подчиняетсяуравнению Ленгмюра, и найдите графически константы этого уравнения по следующим данным:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, *Р* 10–5, Па | 19,2 | 15,2 | 1,6 | 1,2 | 0,4 |
| Адсорбированное количество, мм3/см2 | 65,0 | 59,9 | 11,7 | 11,2 | 4,0 |

1. Покажите, что адсорбция аргона на стекле подчиняется уравнению Ленгмюра, и найдите графически константы этого уравнения по следующим данным:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, *Р* 10–5, Па | 73,0 | 37,3 | 19,6 | 0,6 | 5,7 | 2,2 | 1,0 |
| Адсорбированное количество, мм3/см2 | 9,4 | 7,5 | 6,3 | 4,3 | 2,56 | 1,2 | 0,4 |

1. Покажите, что адсорбция окиси углерода на кокосовом угле подчиняется уравнению Фрейндлиха, и найдите графически константы этого уравнения по следующим данным:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, см рт.ст. | 10,1 | 18,8 | 32 | 43 | 54 | 67 |
| Адсорбированное количество,см3/г | 8,54 | 13,1 | 18,2 | 21 | 23,8 | 26,3 |

1. Покажите, что адсорбция окиси углерода на кокосовом угле подчиняется уравнению Фрейндлиха, и найдите графически константы этого уравнения по следующим данным:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, см рт.ст. | 7,3 | 18,0 | 30,4 | 54,0 | 88,2 |
| Адсорбированное количество, см3/г | 2,34 | 5,17 | 7,84 | 11,9 | 16,5 |

1. Покажите, что адсорбция аргона на кокосовом угле подчиняется уравнению Фрейндлиха, и найдите графически константы этого уравнения по следующим данным:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, см рт.ст. | 5,42 | 9,84 | 12,9 | 21,8 | 29,5 | 56,4 |
| Адсорбированное количество,см3/г | 9,9 | 15,4 | 18,6 | 24,0 | 28,8 | 39,4 |

1. Количество *V* азота (273 K и 1,01 105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Давление, *Р* 10–5, Па | 1,62 | 5,30 | 17,30 | 30,70 | 44,50 |
| V·106, мм3/см2 | 0,31 | 0,99 | 3,04 | 5,10 | 6,90 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 2·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) СO2 (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 4,20 | 8,10 | 11,70 | 16,5 | 24,00 |
| *V ·*106,м3/г | 12,73 | 21,20 | 26,4 | 32,20 | 38,60 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 2·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) СО2 (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 9,8 | 24,2 | 41,3 | 60,0 | 72,50 |
| *V ·*106,м3/г | 2,53 | 5,57 | 8,43 | 11,20 | 12,85 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента, определите степень заполнения адсорбента при давлении 5·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) NH3 (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P·* 10–3,Па | 10,5 | 21,6 | 42,7 | 65,6 | 85,2 |
| *V ·*106,м3/г | 60,40 | 90,3 | 115,7 | 127,0 | 132,40 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 5·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) Н2 (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P* 10–3,Па | 27,6 | 43,4 | 57,4 | 72,2 | 86,1 |
| *V* 106,м3/г | 0,447 | 0,698 | 0,915 | 1,142 | 1,352 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 2·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) этилена (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 273 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P·* 10–3,Па | 9,35 | 12,45 | 22,5 | 42,6 | 82,50 |
| *V ·*106,м3/г | 39,5 | 42,8 | 49,9 | 56,5 | 64,5 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 5·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) N2 (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 194,5 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 1,67 | 8,83 | 20,0 | 36,3 | 52,0 |
| *V ·*106,м3/г | 3,47 | 13,83 | 23,0 | 27,94 | 33,43 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 2,7·104 Па; определите, при каком давлении газа степень заполнения адсорбента составит 0,4.

1. Количество (V) аргона (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 194,5 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 3,22 | 7,25 | 13,15 | 17,25 | 39,5 |
| *V ·*106,м3/г | 5,09 | 10,02 | 15,56 | 18,81 | 29,14 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра, определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 3·104 Па; при каком давлении газа степень заполнения 0,4.

1. Количество (V) этилена (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 293 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 2,0 | 4,27 | 10,57 | 29,5 | 91,5 |
| *V ·*106,м3/г | 10,4 | 20,8 | 30,5 | 42,4 | 55,2 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции

(м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 2·104 Па, при каком давлении газа степень заполнения 0,4.

1. Количество (V) метана (273 K и 1,01·105 Па), адсорбированное 1 г угля при 194,5 K и различном давлении следующее:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 25,6 | 36,7 | 47,8 | 60,5 | 77,0 |
| *V ·*106,м3/г | 15,2 | 19,1 | 22,3 | 25,3 | 28,4 |

Постройте изотерму адсорбции V = f (P) и p/V = f (P); опишите изотерму адсорбции с помощью уравнения Ленгмюра; определите величину адсорбции (м3/г) при максимальном заполнении адсорбента; определите степень заполнения адсорбента при давлении 5·104 Па; при каком давлении газа степень заполнения 0,4.

1. Окись углерода адсорбируется на слюде; данные при 90 K представлены ниже. Определите, какой изотерме – Ленгмюра или Фрейндлиха – лучше соответствуют эти данные? Найдите постоянные уравнения

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *V а*,см3 | 0,130 | 0,150 | 0,162 | 0,166 | 0,175 | 0,180 |
| *P*,мм рт.ст. | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |

1. Определите константы эмпирического уравнения Фрейндлиха, используя следующие данные об адсорбции диоксида углерода на активном угле при 293 K:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P ·*10–3,Па | 1,00 | 4,48 | 10,0 | 14,4 | 25,0 | 45,2 |
| *A·* 102,кг/кг | 3,23 | 6,67 | 9,67 | 11,72 | 14,5 | 17,7 |

1. Пользуясь константами уравнения Фрейндлиха k = 4,17·10–3,

1/n = 0,4, рассчитайте и постройте изотерму адсорбции углекислого газа на угле для следующих интервалов давления: 100·102, 200·102, 400·102, 500·102 Н/м2.

1. По данным сорбции углекислого газа на угле постройте изотерму адсорбции и определите константы изотермы адсорбции Фрейндлиха:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P·*10–2,Н/м2 | 5 | 10 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| *A·*103,кг/кг | 3,0 | 5,5 | 16,0 | 23,0 | 31,0 | 35,0 |

1. По константам уравнения Ленгмюра А = 182·10–3 и k =0,1·10–2 рассчитайте и постройте изотерму адсорбции углекислого газа на активированном угле в пределах следующих равновесных давлений газа: 10· 102 – 400·102 Па.

96–100. Задачи на полимолекулярную адсорбцию.

1. Используя уравнение БЭТ, постройте изотерму адсорбции бензола по нижеуказанным данным и рассчитайте удельную поверхность адсорбента по изотерме адсорбции бензола:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P*/*Рs* | 0,04 | 0,08 | 0,16 | 0,22 | 0,27 | 0,36 | 0,46 |
| *А*,моль/кг | 0,348 | 0,483 | 0,624 | 0,724 | 0,805 | 0,928 | 1,130 |

Площадь, занимаемую молекулой бензола, принять равной 0,49 нм2.

1. Используя уравнение БЭТ, постройте изотерму адсорбции бензола по нижеуказанным данным и рассчитайте удельную поверхность адсорбента по изотерме адсорбции бензола.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P*/*Рs* | 0,05 | 0,12 | 0,19 | 0,26 | 0,34 | 0,44 | 0,50 |
| *А*,моль/кг | 0,31 | 0,593 | 0,795 | 0,99 | 1,21 | 1,525 | 1,77 |

Площадь, занимаемую молекулой бензола, примите равной 0,49 нм2.

1. Ниже приведены экспериментальные данные по адсорбции азота на TiO2 (рутиле) при 75 K:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P·*102,Па | 60,94 | 116,41 | 169,84 | 218,65 | 275,25 |
| *А*,моль/кг | 0,367 | 0,417 | 0,467 | 0,512 | 0,567 |

Постройте график соответствующий линейному уравнению БЭТ. Найдите константы и С. Рассчитайте удельную поверхность адсорбента. Давление насыщенного пара азота при указанной температуре Рs = 78 300 Па, площадь, занимаемая одной молекулой азота, – S0 = 0,16 нм2.

1. Используя уравнение БЭТ, постройте изотерму адсорбции бензола по нижеуказанным данным и рассчитайте удельную поверхность адсорбента по изотерме адсорбции бензола:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P*/*Рs* | 0,03 | 0,07 | 0,12 | 0,17 | 0,24 | 0,31 | 0,38 |
| *А*,моль/кг | 0,196 | 0,301 | 0,373 | 0,423 | 0,488 | 0,520 | 0,625 |

Площадь, занимаемую молекулой бензола, примите равной 0,49 нм2.

1. Используя уравнение БЭТ, постройте изотерму адсорбции бензола по нижеуказанным данным и рассчитайте удельную поверхность адсорбента по изотерме адсорбции бензола:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *P*/*Рs* | 0,02 | 0,05 | 0,11 | 0,19 | 0,25 | 0,30 | 0,36 |
| *А*,моль/кг | 0,104 | 0,196 | 0,298 | 0,387 | 0,443 | 0,488 | 0,55 |

Площадь, занимаемую молекулой бензола, примите равной 0,49 нм2.

## 5 КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, АДГЕЗИЯ, СМАЧИВАНИЕ, РАСТЕКАНИЕ

### 5.1 Капиллярное поднятие

*Формула Жюрена.* Капиллярные явления обусловлены действием поверхностного натяжения на границе раздела несмешивающихся сред. К капиллярным явлениям относят обычно явления в жидких средах, вызванные искривлением их поверхности, граничащей с другой жидкостью, газом или собственным паром. Причины возникновения заключены в характере взаимодействия жидкости с материалом стенок капилляров. Поведение жидкости в капиллярных сосудах зависит от того, смачивает или не смачивает жидкость материал их стенок. В зависимости от характера взаимодействия возможно три варианта:

* поверхность стенок капилляра лиофильна, т.е. смачивается жидкостью (мениск имеет вогнутую форму); в результате избыточное давление Лапласа, направленное к центру кривизны, стремится растянуть жидкость и поднимает ее в капилляре;
* поверхность стенок капилляра лиофобна, т.е. не смачивается жидкостью (мениск имеет выпуклую форму); избыточное давление Лапласа направлено внутрь жидкости и опускает ее в капилляре; наблюдается отрицательное капиллярное поднятие;
* поверхность стенок капилляра индифферентна; избыточное давление Лапласа отсутствует; изменения уровня жидкости в капилляре не происходит.

Высота капиллярного поднятия жидкости в капилляре может быть рассчитана с использованием формулы Жюрена:

 (5.1)

где θ- угол смачивания жидкостью стенок капилляра;

r0 – радиус капилляра;

(ρж– ρг ) – разность плотностей жидкости и газовой среды.

### 5.2 Адгезия

В гетерогенных системах различают взаимодействие внутри фаз и между фазами. Взаимодействие атомов и молекул внутри фазы называют *когезией.* Она определяет существование веществ в конденсированном состоянии. Взаимодействие между приведенными в контакт поверхностями конденсированных фаз называют адгезией (прилипанием). Различают адгезию между фазами твердое – твердое, твердое – жидкое, жидкое – жидкое.

Процесс адгезии наиболее изучен для систем, где одна из фаз – жидкая. Различают адгезию – вещество, которое наносится, и субстрат – материал, на который наносится адгезию.

*Уравнения Дюпре* отражает закон сохранения энергии при адгезии.

 (5.2)

где W1, W2 – работа когезии жидкой и твердой фаз.

Таким образом, при растворении вещества работа адгезии WA равна или может быть больше полусуммы работ когезии для обеих фаз.

От работы адгезии следует отличать *адгезионную прочность* WП, т.е.

работу, затраченную на разрушение адгезионного соединения. Она равна сумме работы адгезии и работы деформации адгезионного слоя Wдеф:

(5.3)

### 5.3 Смачивание

*Смачивание* – это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкостью при условии, что присутствует третья (обычно газовая) фаза, причем происходит одновременный контакт всех этих трех несмешивающихся фаз (в случае адгезии взаимодействуют только две фазы). Смачивание зависит от соотношения сил сцепления молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела (т.е. адгезии) и сил когезионного взаимодействия

Уравнение Дюпре в приведенной выше форме на практике используется редко из-за экспериментальных трудностей в надежном определении поверхностных натяжений на границах твердой фазы с воздухом и твердой фазы с жидкостью. Исключить эти величины из расчетов можно, используя *уравнение Дюпре – Юнга*:

 (5.4)

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

Вычислите поверхностное натяжение воды по методу поднятия жидкости в капилляре, если при опускании капилляра в воду она поднялась на 22,5 мм. Радиус капилляра был предварительно определен по длине и весу столбика ртути, затянутой в капилляр на высоту 7,3 см. Масса ртути составляет 1,395 г, плотность ртути равна 13,56·103 кг/м3.

*Решение*:

1. Найдем радиус капилляра. Объем капилляра (цилиндра) равен

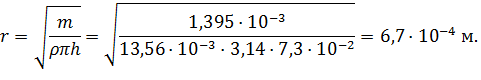
*V = r*2*h*. С другой стороны:



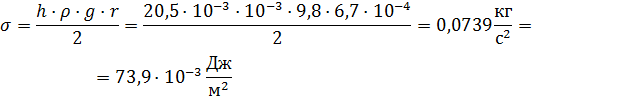
Получаем:



отсюда находим радиус капилляра:



1. Вычислим поверхностное натяжение воды, используя формулу Жюрена:



### 5.4 Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитайте поверхностное натяжение ртути, если в стеклянном капилляре радиусом 0,16·10–3 м столбик ее опустился на 0,012 м ниже уровня ртути в сосуде. Плотность ртути равна 13,6·103 кг/м3. Краевой угол смачивания равен 130°.
2. Вычислите поверхностное натяжение глицерина, если в стеклянном капилляре с радиусом 0,4·10–3 м он поднимается на высоту 27 10–3 м. Плотность глицерина равна 1,26·103 кг/м3. Краевой угол смачивания равен нулю.
3. Рассчитайте работу адгезии *W*A ртути к стеклу при 293 K, если известен краевой угол смачивания *и* = 130°. Поверхностное натяжение ртути σ = 475 мДж/м2. Найдите коэффициент растекания *f* ртути по стеклу.
4. На какую высоту поднимается вода между двумя вертикальными пластинами, частично погруженными в эту жидкость, если расстояние между ними 5·10–4 м. Плотность и поверхностное натяжение воды соответственно равны 0,997 г/см3 и 71,96 мДж/м2. Краевой угол смачивания принять равным нулю.
5. Рассчитайте работу адгезии в системе «вода – графит», зная, что краевой угол равен 90°, а поверхностное натяжение воды составляет 71,96 мДж/м2. Определите коэффициент растекания воды на графите.
6. Рассчитайте работу адгезии *W*A ртути к стеклу при 283 K, если известен краевой угол *и* = 150°. Поверхностное натяжение ртути σ= 465 мДж/м2. Найдите коэффициент растекания *f* ртути по поверхности стекла.
7. Вычислите коэффициент растекания и определите, будет ли растекаться нормальный гексан по воде, если работа когезии для гексана 0,0368 Дж/м2, а работа адгезии гексана к воде 0,0401 Дж/м2.
8. Определите поверхностное натяжение жидкости, если в капилляре диаметром *d* = 1·10–3 м она поднимается на высоту *h* = 32,6·10–3м.Плотность жидкости1000кг/м3.Краевой угол смачивания равен нулю.
9. Вода взболтана с бензольным раствором амилового спирта. Найдите поверхностное натяжение на границе раздела фаз, если поверхностное натяжение бензольного раствора спирта и воды на границе с воздухом соответственно равны 0,0414 и 0,0727 Дж/м2.
10. По коэффициенту растекания определите, будет ли растекаться сероуглерод СS2 по воде, если работа когезии для сероуглерода равна 0,0628 Дж/м2, а работа адгезии сероуглерода к воде равна 0,0558 Дж/м2.
11. Вычислите коэффициент растекания по воде для бензола анилина, если работа когезии для бензола равна 0,0577 Дж/м2, для анилина равна 0,0832 Дж/м2, а работы адгезии соответственно равны 0,0666 и 0,1096 Дж/м2.
12. Вычислите коэффициент растекания олеиновой кислоты по поверхности воды при 20 °С. Поверхностное натяжение воды, кислоты и межфазное натяжение соответственно равны: 0,0728, 0,0323 и 0,0160 Дж/м2. Будет ли кислота растекаться по поверхности воды?
13. Взяты вещества гептан и гептиловая кислота. Какое из них будет лучше растекаться по воде, если работы когезии соответственно равны 0,0402 и 0,0556 Дж/м2, а работы адгезии равны 0,0419 и 0,0948 Дж/м2?
14. Будет ли растекаться йодбензол по поверхности воды при 16,8 °С, если поверхностное натяжение воды, йодбензола и межфазное натяжение соответственно равны 0,0733, 0,0403, 0,0457 Дж/м2?
15. Найдите поверхностное натяжение на границе раздела гексан – вода после взбалтывания гексана с водой и разделения фаз. Поверхностное натяжение гексана и воды на границе с воздухом соответственно равны 0,0184 и 0,0727 Дж/м2.
16. Взяты вещества йодистый этил и гептиловая кислота. Какое из них будет лучше растекаться по воде, если работы когезии соответственно равны 0,0498 и 0,0556 Дж/м2, а работы адгезии равны 0,0637 и 0,0948 Дж/м2?
17. Будет ли растекаться бензол по поверхности воды при 20 °С, если поверхностное натяжение воды, бензола и межфазное натяжение соответственно равны 0,0728, 0,0288, 0,0351 Дж/м2?
18. Определите поверхностное натяжение водного раствора бутанола, если после взбалтывания его с бензолом межфазное натяжение составляет

0,0355 Дж/м2. Поверхностное натяжение бензола на границе с воздухом равно 0,0288 Дж/м2. Как введение в водный раствор бутанола влияет на поверхностное натяжение воды?

1. Будет ли растекаться гексан по поверхности воды при 20 °С, если поверхностное натяжение воды, гексана и межфазное натяжение соответственно равны 0,0728, 0,0184, 0,0471 Дж/м2?
2. Взяты вещества йодистый этил и анилин. Какое из них будет лучше растекаться по воде, если работы когезии соответственно равны 0,0498 и 0,0832 Дж/м2, а работы адгезии равны 0,0637 и 0,1096 Дж/м2?
3. Найдите поверхностное натяжение на границе раздела хлороформ – вода после взбалтывания хлороформа с водой и разделения фаз. Поверхностное натяжение хлороформа и воды на границе с воздухом соответственно равны 0,0271 и 0,0727 Дж/м2.
4. Взяты вещества бензол и гептиловая кислота. Какое из них будет лучше растекаться по воде, если работы когезии соответственно равны 0,0577 и 0,0556 Дж/м2, а работы адгезии равны 0,0666 и 0,0948 Дж/м2?
5. Будет ли сероуглерод растекаться по поверхности воды при 20 °С, если поверхностное натяжение воды, сероуглерода межфазное натяжение соответственно равны 0,0728, 0,0323, 0,0475 Дж/м2?
6. Работа когезии воды *W*К = 145,5·10–30 Дж/м2. Краевой угол смачивания тефлона, граничащего одновременно с воздухом и водой, = 120°. Чему равна работа адгезии на границе тефлон – вода?
7. Чему равен краевой угол смачивания парафина, граничащего однов- ременно с воздухом и водой, если работа когезии воды *W*К= 145,5·10–30Дж/м2,а работа адгезии на границе парафин–вода *W*A= 58,76·10–30Дж/м2?

## 6 КОАГУЛЯЦИЯ ЛИОФОБНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Устойчивость дисперсной системы означает неизменность во времени ее основных параметров: дисперсности и равновесного распределения дисперсной фазы в дисперсионной среде. С точки зрения устойчивости, имеет место резкое различие в поведении между двумя основными классами дисперсных систем: лиофильными и лиофобными.

Если лиофильные системы диспергируются самопроизвольно с уменьшением свободной энергии системы, то в случае лиофобных систем баланс внутренней энергии не компенсируется энтропийным фактором.

Для них

G = U – T S < 0. (6.1)

Поэтому лиофобные системы термодинамически неустойчивы. Несмотря на это, многие лиофобные системы практически не изменяются в течение длительного времени, проявляя относительную устойчивость. При этом устойчивость подразделяют на седиментационную (способность системы сохранять равномерное распределение дисперсной фазы в дисперсионной среде) и агрегативную (способность системы сохранять на постоянном уровне степень дисперсности).

Агрегативная устойчивость определяется действием следующих факторов:

1. адсорбционно-сольватный фактор устойчивости обусловлен взаимодействием частиц дисперсной фазы с дисперсионной средой или адсорбцией веществ-стабилизаторов на поверхности частиц дисперсной фазы;
2. энтропийный фактор устойчивости действует в основном в ультрамикрогетерогенных системах, для дисперсной фазы которых характерно броуновское движение; сущность его состоит в стремлении частиц дисперсной фазы к равномерному распределению по всему объему системы;
3. структурно-механический фактор устойчивости связан сналичием на поверхности частиц слоя, обладающего упругостью и механической прочностью; разрушение слоя требует затрат энергии и времени;
4. электрический фактор устойчивости дисперсных систем обусловлен существованием на межфазной границе дисперсной фазы двойного электрического слоя.

### 6.1 Характеристика процесса коагуляции

Большинство дисперсных систем стремится уменьшить поверхностную энергию путем самопроизвольного укрупнения частиц.

Одним из таких путей является коагуляция частиц твердой дисперсной фазы. *Коагуляция* – это процесс потери агрегативной устойчивости дисперсных систем, связанный с агрегацией частиц с образованием флокул. *Флокулы* – это образования агрегатов частиц дисперсной фазы, разделенных тонкими прослойками дисперсионной среды.

Различают две стадии коагуляции:

1. стадия – скрытая коагуляция. На этой стадии частицы укрупняются, но еще не теряют своей седиментационной устойчивости.
2. стадия – явная коагуляция. На этой стадии частицы теряют свою седиментационную устойчивость. Если плотность частиц больше плотности дисперсионной среды, образуется осадок.

Коагуляция сопровождается резким изменением ряда свойств дисперсной системы, по которым определяют начало этого процесса. Характерными признаками коагуляции является резкое увеличение светорассеяния и выпадение осадка дисперсной фазы. Знание закономерностей ее протекания представляет большой теоретический и практический интерес. Коагуляцию вызывают как физические, так и химические воздействия. К физическим относят перемешивание, механическую вибрацию, воздействие ультразвука, электрического или магнитного поля, изменение температуры, различные виды излучения (ультрафиолетовое, рентгеновское, радиоактивное).

Иногда вместо порога коагуляции используют величину, называемую коагулирующей способностью VК. Это объем золя, который коагулирует под действием 1 моля электролита:



### 6.2 Кинетика коагуляции

Процесс коагуляции приводит к постепенному уменьшению суммарной концентрации частиц коллоидного раствора: / d < 0 ( – время после начала коагуляции). Вычисление скорости коагуляции (υ , м–3, с–1) сводится к подсчету числа столкновений первичных и более сложных (двойников, тройников и т. д.) частиц, образующихся в процессе коагуляции





Знак «–» стоит потому, что концентрация частиц со временем уменьшается, а скорость всегда положительна. Степень коагуляции:

где Z – общее число столкновений частиц в единицу времени;

Zэф – число эффективных столкновений (т.е. столкновений, приводящих к коагуляции) в единицу времени.

Если = 0, коагуляция не происходит, коллоидный раствор агрегативно устойчив. Если = 1, происходит быстрая коагуляция, т. е. каждое столкновение частиц приводит к их агрегации. Если 0 << 1, то наблюдается медленная коагуляция, т.е. не все столкновения частиц приводят к агрегации.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ*

По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии глины с исходной концентрацией частиц 50·1014 м–3 при T = 287 K, = 10–3 Па·с.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 120 | 330 | 450 | 570 |
| *i* 10–14, част/м3 | 50,0 | 10,0 | 5,0 | 4,0 | 2,9 |

Решение:

Определяем графически по экспериментальным данным время половинной коагуляции и константу скорости коагуляции. Для этого строим график

зависимости 

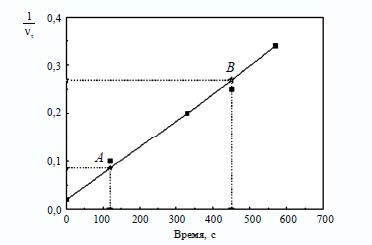


Рисунок 6.1 - Линейная зависимость для нахождения константы скорости коагуляции

По координатам двух точек на прямой определяем тангенс угла наклона, который и будет равен скорости быстрой коагуляции:



Далее посчитаем время половинной коагуляции:



Считаем теоретические константу скорости коагуляции и время половинной коагуляции:



Сравниваем экспериментальные и теоретические значения. Если они близки, то данные подчиняются теории быстрой коагуляции. В нашем случае

и .

Вывод: экспериментальные и теоретические значения близки, т.о. данные подчиняются теории быстрой коагуляции.

### 6.3 Задачи для самостоятельного решения

1. По экспериментальным данным, время половинной коагуляции гидрозоля составляет 340 с при исходной частичной концентрации ρ0 = 5,3 1014 част/м3, вязкости дисперсионной среды 1 мПа с температуре 293 K. Как изменится скорость коагуляции, если вязкость среды увеличится в 3 раза?
2. Рассчитайте время половинной коагуляции аэрозоля с дисперсностью 0,25 нм–1 и концентрацией *mV* = 1,5 10–3 кг/м3, если константа быстрой коагуляции равна 3 10–16 м3/с. Плотность частиц аэрозоля примите равной 2,2 г/см3.
3. Во сколько раз уменьшится суммарное число частиц дыма через 5, 25 и 100 с после начала коагуляции? Средний радиус частиц составляет 15 нм, концентрация *mV* = 10–3 кг/м3, плотность частиц 2,4 г/см3. Константа быстрой коагуляции равна 3 10–16 м3/с.
4. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота с исходной концентрацией v0 = 2,7·1014 част/м3 при температуре 290,4 K, вязкости дисперсионной среды η=1,073·10–3 Па с; определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 420 | 600 | 900 |
| *i* 10–14, част/м3 | 2,7 | 2,34 | 2,25 | 1,69 | 1,47 | 1,36 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водная суспензия каолина при температуре 287 K, вязкости дисперсионной среды η= 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 90 | 150 | 210 | 270 | 330 |
| *i* 10–14, част/м3 | 8,90 | 6,51 | 5,12 | 4,40 | 3,65 | 3,24 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии каолина при температуре 287 K, вязкости дисперсионной среды η = 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 90 | 150 | 210 | 270 | 330 |
| *i* 10–14, част/м3 | 5,00 | 3,92 | 3,54 | 3,30 | 2,80 | 2,70 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля селена при температуре 293 K, вязкости дисперсионной среды η= 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 38,5 | 61,0 | 89,6 | 185 | 303 |
| *i* 10–14, част/м3 | 33,5 | 11,1 | 8,51 | 4,98 | 3,75 | 1,90 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота при температуре 290 K, вязкости дисперсионной среды η= 1,07·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 240 | 420 | 600 |
| *i* 10–14, част/м3 | 2,69 | 2,34 | 2,25 | 2,02 | 1,69 | 1,47 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота при температуре 290 K, вязкости дисперсионной среды η = 1 10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 30 | 6 | 120 | 240 | 480 |
| *i* 10–14, част/м3 | 20,20 | 14,70 | 10,80 | 8,25 | 4,89 | 3,03 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота с исходной концентрацией v0 = 2,7·1014 част/м3 при температуре 292 K, вязкости дисперсионной среды η=1·10–3 Па с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 600 | 900 | 1320 |
| *i* 10–14, част/м3 | 2,7 | 2,34 | 2,25 | 1,47 | 1,36 | 1,20 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляциилиофобной системы с исходной концентрацией v0 = 20,2·1014 част/м3 при температуре 298 K, вязкости дисперсионной среды η= 1·10–3 Па с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 125 | 250 | 378 | 425 |
| *i* 10–14, част/м3 | 20,2 | 8,08 | 5,05 | 3,67 | 3,31 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота с исходной концентрацией v0 = 5,22·1014 част/м3 при действии поваренной соли при температуре 291 K, вязкости дисперсионной среды η= 1,06·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 180 | 420 | 600 |
| *i* 10–14, част/м3 | 5,22 | 4,35 | 3,63 | 3,38 | 2,31 | 1,95 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции лиофобной системы с исходной концентрацией v0 = 32,2·1014 част/м3 при температуре 299 K, вязкости дисперсионной среды η = 10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 7,0 | 15,0 | 20,2 | 28,0 |
| *i* 10–14, част/м3 | 32,2 | 24,2 | 19,9 | 16,7 | 14,2 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии глины с исходной концентрацией v0 = 50·1014 част/м3 при температуре 287 K, вязкости дисперсионной среды η= 10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 120 | 330 | 450 | 570 | 1260 |
| *i* 10–14, част/м3 | 50 | 5,7 | 5,0 | 4,0 | 2,9 | 1,0 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции лиофобной системы с исходной концентрацией v0 = 29,7·1014 част/м3 при температуре 291 K, вязкости дисперсионной среды η= 1,06·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 11 | 14 | 26 | 43 |
| *i* 10–14, част/м3 | 29,7 | 20,9 | 19,1 | 14,4 | 10,7 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии каолина с исходной концентрацией v0 =5·1014 част/м3 при температуре 289 K, вязкости дисперсионной среды η=1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 100 | 175 | 250 | 400 | 500 |
| *i* 10–14, част/м3 | 5,00 | 3,78 | 3,23 | 2,86 | 2,22 | 1,96 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии глины с исходной концентрацией v0 =50·1014 част/м3 при температуре 287 K, вязкости дисперсионной среды = 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.
2. Во сколько раз уменьшится суммарное число частиц дыма через 5, 25 и 100 с после начала коагуляции? Средний радиус частиц составляет 15 нм, концентрация *mV* = 10–3 кг/м3, плотность частиц 2,4 г/см3. Константа быстрой коагуляции равна 3 10–16 м3/с.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 90 | 120 | 330 | 450 | 570 |
| *i* 10–14, част/м3 | 5,00 | 10,5 | 5,7 | 5,0 | 4,0 | 2,9 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водной суспензии каолина с исходной концентрацией v0 =8,9·1014 част/м3 при температуре 290 K, вязкости дисперсионной среды η= 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 90 | 150 | 210 | 270 | 330 |
| *i* 10–14, част/м3 | 8,9 | 6,51 | 5,12 | 4,40 | 3,65 | 3,2 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота с исходной концентрацией v0 = 5,22·1014 част/м3 при действии поваренной соли при температуре 291 K, вязкости дисперсионной среды η= 1,06·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 300 | 600 | 900 |
| *i* 10–14, част/м3 | 5,22 | 4,35 | 3,63 | 2,75 | 1,95 | 1,48 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции гидрозоля золота с исходной концентрацией *п*0 *=* 2,8 1014 част/м3 при температуре 296 K, вязкости дисперсионной среды η= 10–3 Па·с. Определить время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 60 | 120 | 300 | 600 | 900 |
| *i* 10–14, част/м3 | 2,8 | 2,45 | 2,33 | 1,67 | 1,46 | 1,28 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции лиофобной системы с исходной концентрацией v0 = 29,7·1014 част/м3 при температуре 291 K, вязкости дисперсионной среды η= 1,06·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 11 | 14 | 26 | 43 |
| *i* 10–14, част/м3 | 29,7 | 20,9 | 19,1 | 14,4 | 10,7 |

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции водная суспензия каолина при температуре 287 K, вязкости дисперсионной среды η= 1·10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 90 | 150 | 210 | 270 | 330 |
| *i* 10–14, част/м3 | 8,90 | 6,51 | 5,12 | 4,40 | 3,65 | 3,24 |

1. Рассчитайте время половинной коагуляции аэрозоля с дисперсностью 0,26 нм–1 и концентрацией *mV* = 1,7 10–3 кг/м3, если константа быстрой коагуляции равна 3·10–15 м3/с. Плотность частиц аэрозоля примите равной

2,5 г/см3.

1. По опытным данным проверьте теорию быстрой коагуляции лиофобной системы с исходной концентрацией v0 = 32,2·1014 част/м3 при температуре 299 K, вязкости дисперсионной среды η = 10–3 Па·с. Определите время половинной коагуляции и константы коагуляции.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| τ, с | 0 | 7,0 | 15,0 | 20,2 | 28,0 |
| *i* 10–14, част/м3 | 32,2 | 24,2 | 19,9 | 16,7 | 14,2 |

**Перечень использованных информационных ресурсов**

1. Марков В.Ф. Коллоидная химия: примеры и задачи: учеб. пособие /

В.Ф. Марков, Т.А. Алексеева, Л.А. Брусницына, Л.Н. Маскаева. - Екатеринбург.: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 188 с.

1. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии / Б.Д. Сумм. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 240 с.
2. Гельфман М.И. Коллоидная химия:учеб. для вузов/ М.И. Гельфман, О.В. Ковалевич, В.Н. Юстратов;4-е изд. – СПб.: Лань, 2008. - 316 с.
3. Замышляева О. Г. Вопросы и задачи по курсу «Коллоидная химия»:

электрон. учеб. пособие / О. Г. Замышляева. - Нижний Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2010. - 47 с.

1. Щукин Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М.: Высш. шк., 2004. - 445 с.
2. Цыренова С.Б. Руководство к решению примеров и задач по коллоидной химии: учеб. пособие / С.Б. Цыренова, Е.И. Чебунина, Ф.П. Балдынова. – УланУдэ.: Изд-во ВСГТУ, 2000. - 210 с.
3. Захарченко В.Н. Сборник задач и упражнений по физической и коллоидной химии/ В.Н. Захарченко. - М.: Просвещение, 1978. - 175 с.
4. Беляев А.П. Физическая и коллоидная химия. Задачник. / А.П. Беляев, А.С. Чухно, Л.А. Бахолдина, В.В. Гришин. Изд-во: «ГЭОТАР-Медиа», 2014. - 288 с.

# ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В процессе изучения курса «Коллоидная химия» студент-заочник должен выполнить контрольную работу. К выполнению контрольной работы можно приступить только после усвоения теоретической части курса и решения примеров типовых задач. *Каждый студент выполняет вариант заданий, соответствующий двум последним цифрам номера студенческого билета* (таблица). Например, номер студенческого билета 98546, две последние цифры 46, им соответствует вариант контрольного задания под номером 7 (согласно объяснениям, приведенным ниже таблицы). Контрольная работа должна быть аккуратно оформлена; для замечаний рецензента нужно оставлять широкие поля; писать четко и ясно; *номера и условия задач переписывать полностью и в том порядке, в каком они указаны в задании.* В конце работы следует дать список использованной литературы. Ссылки на используемую литературу оформляют в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008. Пример правильного оформления ссылок на учебники – в библиографическом списке рекомендуемой литературы.

*Варианты и задачи для контрольной работы*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Последние цифры  номера  зачетной книжки\* | №  варианта |  | Номера задач, относящихся к данному варианту | | | | | |  |
| **Х0** | **1** | 1 | 21 | 41 | 66 | 86 | 106 | 126 | 146 |
| **Х1** | **2** | 2 | 22 | 42 | 67 | 87 | 107 | 127 | 147 |
| **Х2** | **3** | 3 | 23 | 43 | 68 | 88 | 108 | 128 | 148 |
| **Х3** | **4** | 4 | 24 | 44 | 69 | 89 | 109 | 129 | 149 |
| **Х4** | **5** | 5 | 25 | 45 | 70 | 90 | 110 | 130 | 150 |
| **Х5** | **6** | 6 | 26 | 46 | 71 | 91 | 111 | 131 | 20 |
| **Х6** | **7** | 7 | 27 | 47 | 72 | 92 | 112 | 132 | 19 |
| **Х7** | **8** | 8 | 28 | 48 | 73 | 93 | 113 | 133 | 18 |
| **Х8** | **9** | 9 | 29 | 49 | 74 | 94 | 114 | 134 | 17 |
| **Х9** | **10** | 10 | 30 | 50 | 75 | 95 | 115 | 135 | 16 |
| **Y0** | **11** | 11 | 31 | 51 | 76 | 96 | 116 | 136 | 15 |
| **Y1** | **12** | 12 | 32 | 52 | 77 | 97 | 117 | 137 | 20 |
| **Y2** | **13** | 13 | 33 | 53 | 78 | 98 | 118 | 138 | 21 |
| **Y3** | **14** | 14 | 34 | 54 | 79 | 99 | 119 | 139 | 22 |
| **Y4** | **15** | 15 | 35 | 55 | 80 | 100 | 120 | 140 | 23 |
| **Y5** | **16** | 16 | 36 | 56 | 81 | 101 | 121 | 141 | 24 |
| **Y6** | **17** | 17 | 37 | 57 | 82 | 102 | 122 | 142 | 25 |
| **Y7** | **18** | 18 | 38 | 58 | 83 | 103 | 123 | 143 | 26 |
| **Y8** | **19** | 19 | 39 | 59 | 84 | 104 | 124 | 144 | 27 |
| **Y9** | **20** | 20 | 40 | 60 | 85 | 105 | 125 | 145 | 28 |

\*- ***где Х*** *– это любая цифра* ***от 0 до 4; а Y*** *– это любая цифра* ***от 5 до 9***

***Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, преподавателем не рецензируется и не*  *засчитывается как сданная.***