МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
_____ / О.В. Юсупова
"_____" _____ 20___ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Б1.О.03.13 «Процессы и агрегаты нефтегазовых технологий»

Код и направление подготовки (специальность)	15.03.02 Технологические машины и оборудование
Направленность (профиль)	Оборудование нефтегазопереработки
Квалификация	Бакалавр
Форма обучения	Заочная
Год начала подготовки	2022
Институт / факультет	Институт нефтегазовых технологий (ИНГТ)
Выпускающая кафедра	кафедра "Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств"
Кафедра-разработчик	кафедра "Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств"
Объем дисциплины, ч. / з.е.	144 / 4
Форма контроля (промежуточная аттестация)	Экзамен

Самара 2022

Б1.О.03.13 «Процессы и агрегаты нефтегазовых технологий»

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) **15.03.02 Технологические машины и оборудование**, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от № 1170 от 20.10.2015 и соответствующего учебного плана.

Разработчик РПД:

Профессор, доктор технических наук, доцент	С.Б Коныгин
(должность, степень, ученое звание)	(ФИО)

Заведующий кафедрой	Е.М. Абуталипова, доктор технических наук, доцент
	(ФИО, степень, ученое звание)

СОГЛАСОВАНО:

Председатель методического совета факультета / института (или учебно-методической комиссии)	А.Ю Чуркина, кандидат химических наук, доцент
	(ФИО, степень, ученое звание)
Руководитель образовательной программы	С.Б. Коныгин, доктор технических наук, доцент
	(ФИО, степень, ученое звание)

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы 4
2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы 5
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся 5
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий 6
4.1 Содержание лекционных занятий 6
4.2 Содержание лабораторных занятий 6
4.3 Содержание практических занятий 6
4.4. Содержание самостоятельной работы 7
5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю) 8
6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения 8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем 8
8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю) 9
9. Методические материалы 9
10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) 11

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Общепрофессиональные компетенции			
	ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности;	ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования
			Знать общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки
		ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования
			Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки
		ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования

			Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы: **вариативная часть**

Код компетенции	Предшествующие дисциплины	Параллельно осваиваемые дисциплины	Последующие дисциплины
ОПК-1	Математика; Материаловедение и технологии конструкционных материалов; Физика; Химия; Электротехника и электроника		Гидроаэродинамика промышленных аппаратов; Дисперсные системы в оборудовании нефтегазопереработки; Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы; Физико-математические методы расчета нефтегазового оборудования

3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Вид учебной работы	Всего часов / часов в электронной форме	4 семестр часов / часов в электронной форме
Аудиторная контактная работа (всего), в том числе:	8	8
Лекции	4	4
Практические занятия	4	4
Внеаудиторная контактная работа, КСР	4	4
Самостоятельная работа (всего), в том числе:	123	123
подготовка к практическим занятиям	123	123
Контроль	9	9
Итого: час	144	144
Итого: з.е.	4	4

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы				
		ЛЗ	ЛР	ПЗ	СРС	Всего часов
1	Поиск, разведка, бурение и проектирование разработки месторождений	0	0	0	25	25
2	Добыча нефти и газа	2	0	2	25	29
3	Сбор и подготовка продукции скважин	0	0	0	25	25
4	Транспортирование и хранение нефти и газа	0	0	0	23	23
5	Переработка нефти и газа	2	0	2	25	29
	КСР	0	0	0	0	4
	Контроль	0	0	0	0	9
	Итого	4	0	4	123	144

4.1 Содержание лекционных занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема лекции	Содержание лекции (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
4 семестр				
1	Добыча нефти и газа	Основы механизированного способа добычи нефти	Основы механизированного способа добычи нефти. Применяемое оборудование.	2
2	Переработка нефти и газа	Основные технологические процессы переработки нефти	Структурная схема нефтеперерабатывающего завода. Установки первичной переработки. ЭЛОУ АВТ. Схемы атмосферного и вакуумного блоков.	2
			Итого за семестр:	**4**
			Итого:	**4**

4.2 Содержание лабораторных занятий

Учебные занятия не реализуются.

4.3 Содержание практических занятий

№ занятия	Наименование раздела	Тема практического занятия	Содержание практического занятия (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов / часов в электронной форме
4 семестр				
1	Добыча нефти и газа	Основы механизированного способа добычи нефти	Изучение конструкций глубиннонасосного оборудования.	2
2	Переработка нефти и газа	Основные технологические процессы переработки нефти	Ознакомление с основным оборудованием, используемым в процессах переработки нефти: сепараторы, насосы, печи, теплообменное оборудование.	2
			Итого за семестр:	**4**
			Итого:	**4**

4.4. Содержание самостоятельной работы

Наименование раздела	Вид самостоятельной работы	Содержание самостоятельной работы (перечень дидактических единиц: рассматриваемых подтем, вопросов)	Количество часов
4 семестр			
Поиск, разведка, бурение и проектирование разработки месторождений	Подготовка к практическим занятиям	Подготовка к практическим занятиям по разделу "Поиск, разведка, бурение и проектирование разработки месторождений". Происхождение нефти и газа. Основы бурения нефтяных и газовых скважин.	25
Добыча нефти и газа	Подготовка к практическим занятиям	Подготовка к практическим занятиям по разделу "Добыча нефти и газа". Основы механизированного способа добычи нефти. Общие методы воздействия на пласт.	25
Сбор и подготовка продукции скважин	Подготовка к практическим занятиям	Подготовка к практическому занятию по разделу "Центральные пункты сбора и подготовки нефти". Общая система сбора нефти. Ознакомление с основным оборудованием, используемым в процессах подготовки нефти.	25
Транспортирование и хранение нефти и газа	Подготовка к практическим занятиям	Подготовка к практическому занятию по разделу "Современные способы транспортировки нефти". Современные способы транспортировки нефти. Ознакомление с основным оборудованием, используемым при транспортировке нефти: насосные станции, трубопроводы	23

Переработка нефти и газа	Подготовка к практическим занятиям	Подготовка доклада по теме "Основные технологические процессы переработки нефти и газа". Основные технологические процессы переработки нефти. Переработка газа.	25
		Итого за семестр:	**123**
		Итого:	**123**

5. Перечень учебной литературы и учебно-методического обеспечения по дисциплине (модулю)

№ п/п	Библиографическое описание	Ресурс НТБ СамГТУ (ЭБС СамГТУ, IPRbooks и т.д.)
Основная литература		
1	Мстиславская, Л.П. Основы нефтегазового дела : учеб. / Л. П. Мстиславская; Рос.гос.ун-т нефти и газа им.И.М.Губкина.- М., Центрлитнефтегаз, 2010.- 253 с.	Электронный ресурс
2	Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учеб. / А. И. Скобло [и др.] .- 3-е изд., перераб. и доп..- М., Недра, 2000.- 677 с.	Электронный ресурс
Дополнительная литература		
3	Щуров, В.И. Технология и техника добычи нефти : Учеб.для ВУЗов / В. И. Щуров .- 2-е изд.,стер.-Перепеч.с изд.1983 г..- М., АльянС, 2005.- 510 с.	Электронный ресурс

Доступ обучающихся к ЭР НТБ СамГТУ (elib.samgtu.ru) осуществляется посредством электронной информационной образовательной среды университета и сайта НТБ СамГТУ по логину и паролю.

6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения

При проведении лекционных занятий используется мультимедийное оборудование.

Организовано взаимодействие обучающегося и преподавателя с использованием электронной ин-формационной образовательной среды университета.

№ п/п	Наименование	Производитель	Способ распространения
1	OpenOffice Calc	Oracle (Зарубежный)	Свободно распространяемое

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», профессиональных баз данных, информационно-справочных систем

№ п/п	Наименование	Краткое описание	Режим доступа
1	"Электронный журнал Нефтегазовое дело"	http://ogbus.ru	Ресурсы открытого доступа

8. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Лекционные занятия

Аудитории
для лекционных занятий укомплектованы мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории (наборы демонстрационного оборудования (проектор, экран, компьютер/ноутбук)).

Практические занятия

Аудитории для практических занятий укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения:
-компьютерный класс на 12 посадочных мест;
-ПО общего назначения;
-презентационная техника (проектор, экран, компьютер),

Самостоятельная работа

Помещения
для самостоятельной работы оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интеренет» и доступом к электронной информационно-образовательной среде СамГТУ:
- читальный зал НТБ СамГТУ (ауд. 200 корпус № 8; ауд. 125 корпус № 1; ауд. 41, 31, 34, 35 Главный корпус библиотеки, ауд. 83а, 414, 416, 0209 АСА СамГТУ; ауд. 401 корпус №10);
- компьютерные классы (ауд. 208, 210 корпус № 8).

9. Методические материалы

Методические рекомендации при работе на лекции

До лекции студент должен просмотреть учебно-методическую и научную литературу по теме лекции с тем, чтобы иметь представление о проблемах, которые будут разбираться в лекции.

Перед началом лекции обучающимся сообщается тема лекции, план, вопросы, подлежащие рассмотрению, доводятся основные литературные источники. Весь учебный материал, сообщаемый преподавателем, должен не просто прослушиваться. Он должен быть активно воспринят, т.е. услышан, осмыслен, понят, зафиксирован на бумаге и закреплен в памяти. Приступая к слушанию нового учебного материала, полезно мысленно установить его связь с ранее изученным. Следя за техникой чтения лекции (акцент на существенном, повышение тона, изменение ритма, пауза и т.п.), необходимо вслед за преподавателем уметь выделять основные категории, законы и определять их содержание, проблемы, предполагать их возможные решения, доказательства и выводы. Осуществляя такую работу, можно значительно облегчить себе понимание учебного материала, его конспектирование и дальнейшее изучение.

Конспектирование лекции позволяет обработать, систематизировать и лучше сохранить полученную информацию с тем, чтобы в будущем можно было восстановить в памяти основные, содержательные моменты. Типичная ошибка, совершаемая обучающимся, дословное конспектирование

речи преподавателя. Как правило, при записи «слово в слово» не остается времени на обдумывание, анализ и синтез информации. Отбирая нужную информацию, главные мысли, проблемы, решения и выводы, необходимо сокращать текст, строить его таким образом, чтобы потом можно было легко в нем разобраться. Желательно оставить в рабочих конспектах поля, на которых можно будет делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. С окончанием лекции работа над конспектом не может считаться завершенной. Нужно еще восстановить отдельные места, проверить, все ли понятно, уточнить что-то на консультации и т.п. с тем, чтобы конспект мог быть использован в процессе подготовки к практическим занятиям, зачету, экзамену. Конспект лекции – незаменимый учебный документ, необходимый для самостоятельной работы.

Методические рекомендации при подготовке и работе на практическом занятии

Практические занятия по дисциплине проводятся в целях выработки практических умений и приобретения навыков в решении профессиональных задач.

Рекомендуется следующая схема подготовки к практическому занятию:

1. ознакомление с планом практического занятия, который отражает содержание предложенной темы;
2. проработка конспекта лекции;
3. чтение рекомендованной литературы;
4. подготовка ответов на вопросы плана практического занятия;
5. выполнение тестовых заданий, задач и др.

Подготовка обучающегося к практическому занятию производится по вопросам, разработанным для каждой темы практических занятий и (или) лекций. В процессе подготовки к практическим занятиям, необходимо обратить особое внимание на самостоятельное изучение рекомендованной литературы.

Работа студентов во время практического занятия осуществляется на основе заданий, которые выдаются обучающимся в начале или во время занятия. На практических занятиях приветствуется активное участие в обсуждении конкретных ситуаций, способность на основе полученных знаний находить наиболее эффективные решения поставленных проблем, уметь находить полезный дополнительный материал по тематике занятий. Обучающимся необходимо обращать внимание на основные понятия, алгоритмы, определять практическую значимость рассматриваемых вопросов. На практических занятиях обучающиеся должны уметь выполнить расчет по заданным параметрам или выработать определенные решения по обозначенной проблеме. Задания могут быть групповые и индивидуальные. В зависимости от сложности предлагаемых заданий, целей занятия, общей подготовки обучающихся преподаватель может подсказать обучающимся алгоритм решения или первое действие, или указать общее направление рассуждений. Полученные результаты обсуждаются с позиций их адекватности или эффективности в рассмотренной ситуации.

Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы

Организация самостоятельной работы обучающихся ориентируется на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей, переход от поточного к индивидуализированному обучению с учетом потребностей и возможностей обучающегося.

Самостоятельная работа с учебниками, учебными пособиями, научной, справочной литературой, материалами периодических изданий и Интернета является наиболее эффективным методом получения дополнительных знаний, позволяет значительно активизировать процесс овладения информацией, способствует более глубокому усвоению изучаемого материала. Все новые понятия по изучаемой теме необходимо выучить наизусть и внести в глоссарий, который целесообразно вести с самого начала изучения курса.

Самостоятельная работа реализуется:

- непосредственно в процессе аудиторных занятий;
- на лекциях, практических занятиях;
- в контакте с преподавателем вне рамок расписания;
- на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации

задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.;

- в библиотеке, дома, на кафедре при выполнении обучающимся учебных и практических задач.

Эффективным средством осуществления обучающимся самостоятельной работы является электронная информационно-образовательная среда университета, которая обеспечивает доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем.

10. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)

Фонд оценочных средств представлен в приложении № 1.

Приложение 1 к рабочей программе дисциплины
Б1.О.03.13 «Процессы и агрегаты нефтегазовых технологий»

Фонд оценочных средств
по дисциплине
Б1.О.03.13 «Процессы и агрегаты нефтегазовых технологий»

Код и направление подготовки (специальность)	15.03.02 Технологические машины и оборудование
Направленность (профиль)	Оборудование нефтегазопереработки
Квалификация	Бакалавр
Форма обучения	Заочная
Год начала подготовки	2022
Институт / факультет	Институт нефтегазовых технологий (ИНГТ)
Выпускающая кафедра	кафедра "Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств"
Кафедра-разработчик	кафедра "Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств"
Объем дисциплины, ч. / з.е.	144 / 4
Форма контроля (промежуточная аттестация)	Экзамен

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Наименование категории (группы) компетенций	Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Результаты обучения (знать, уметь, владеть, соотнесенные с индикаторами достижения компетенции)
Общепрофессиональные компетенции			
	ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности;	ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования
			Знать общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки
		ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования
			Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки
		ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования

			Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа
			Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки

Матрица соответствия оценочных средств запланированным результатам обучения

Код индикатора достижения компетенции	Результаты обучения	Оценочные средства	Текущий контроль успеваемости	Промежуточная аттестация
Поиск, разведка, бурение и проектирование разработки месторождений				
ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	**Знать** общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений	Экзамен	Нет	Да
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	**Уметь** изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
	Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет

	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
Добыча нефти и газа				
ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	**Знать** общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
Сбор и подготовка продукции скважин				
ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	**Уметь** изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
	Знать общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет

ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	**Уметь** изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
	Знать основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
Транспортирование и хранение нефти и газа				
ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	**Знать** общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет

ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
Переработка нефти и газа				
ОПК-1.1 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием методов математики и математического моделирования	**Владеть** использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Знать общие методы поиска и разведки нефтегазовых месторождений	Экзамен	Нет	Да
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.2 Использует базовые знания в области физики и химии для решения задач профессиональной деятельности	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет
ОПК-1.3 Решает задачи профессиональной деятельности с использованием общеинженерных знаний	**Знать** основные технологические процессы и оборудование для подготовки и переработки нефти и газа	Экзамен	Нет	Да
	Владеть использования компьютерных технологий и литературных источников при изучении технологических машин и оборудования	выполнение заданий	Да	Нет
	Уметь изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по профилю подготовки	выполнение заданий	Да	Нет

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Машины и аппараты химических производств"

Коныгин С.Б., Иваняков С.В.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

методическое руководство к практическим занятиям
по дисциплине
"Дисперсные системы в промышленности"

Самара 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Основные понятия и определения 5
2 Классификация дисперсных систем 8
3 Распределения дисперсных частиц по размерам 10
Пример решения задачи 14
Задачи 15
4 Концентрация частиц в дисперсных системах 16
Примеры решения задач 17
Задачи 18
5 Поверхность контакта фаз в дисперсных системах 19
Примеры решения задач 20
Задачи 21
6 Объемы фаз в дисперсных системах 22
Пример решения задачи 23
Задачи 24
7 Удельная поверхность контакта фаз в дисперсных системах 27
Пример решения задачи 28
Задачи 30
8 Исходные данные для решения задач 30
Соотношения между некоторыми единицами измерения 31
Контрольные вопросы 32
Список рекомендуемой литературы 32

0

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d – размер частиц, м
N – количество частиц
n – концентрация частиц, $м^{-3}$
s, S – площадь поверхности контакта фаз, $м^2$
v, V – объем, $м^3$
m, M – масса, кг
i – номер фракции
r – расстояние между частицами, м
e – объемная доля дисперсной фазы
D – дисперсность, $м^{-1}$
x – доля
ρ – плотность фазы, $кг/м^3$
ω – плотность распределения частиц по размерам, $м^{-1}$

Список индексных обозначений

Параметр	Одна частица фракции	Фракция	Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Дисперсная система
Размер частиц	d_i	d_i	d	–	d
Количество частиц	–	N_i	N	–	N
Концентрация частиц	–	n_i	n	–	n
Поверхность контакта фаз	s_i	S_i	–	–	S
Объем	$v_{чi}$	$V_{чi}$	$V_ч$	$V_{ср}$	$V_{дс}$
Удельная поверхность	$s_{уд.чi}$	$S_{уд.чi}$	$S_{уд.ч}$	–	$S_{уд}$
Масса	$m_{чi}$	$M_{чi}$	$M_ч$	$M_{ср}$	$M_{дс}$

Введение

Основным направлением работы инженеров-механиков, подготавливаемых по специальности "Оборудование нефтегазопереработки", является проектирование оборудования, предназначенного для проведения тех или иных технологических процессов подготовки и переработки нефти и газа. Однако грамотное проектирование аппаратов без знания основных свойств перерабатываемых сред и продуктов невозможно.

Особенностью нефтегазовой промышленности является то, что большинство сред, с которыми приходится иметь дело, не являются ни газами, ни жидкостями, ни твердыми телами в чистом виде. Они представляют собой смеси газов, жидкостей и твердых тел в различных сочетаниях и называются *дисперсными системами*. Физико-химические свойства этих смесей, а также процессы, протекающие в них, значительно отличаются от аналогичных свойств и процессов в чистых газах, жидкостях или твердых телах. Это обстоятельство необходимо учитывать в процессе проектирования оборудования нефтегазопереработки.

С производственных позиций указанные дисперсные системы могут быть как полезными, так и вредными. К примеру, твердые частицы грунта, находящиеся в нефти, могут привести к износу и разрушению нефтяных насосов, и поэтому твердые частицы необходимо удалить. Полезные дисперсные системы специально создаются при проведении технологических процессов. Например, для быстрого и эффективного сжигания жидкого топлива оно распыляется в виде множества мелких капель, образуя дисперсную систему.

В связи с вышеизложенным курс "Дисперсные системы в промышленности" знакомит студента с основными свойствами дисперсных систем, процессами, протекающими в них, а также методами их создания и разрушения.

1 Основные понятия и определения

Понятие дисперсной системы тесно связано с понятиями однородных и неоднородных систем.

Гомогенная система – макроскопически однородная система, химический состав и физические свойства которой во всех ее частях одинаковы или изменяются непрерывно (без скачков), внутри которой отсутствуют поверхности контакта фаз.

В качестве примера гомогенной системы можно привести чистую воду, полностью заполняющую некоторый рассматриваемый объем (см. рисунок 1.1а). Однако вода в различных областях этого объема может иметь различную температуру и находиться под различным давлением, в результате чего ее свойства при переходе от одного места к другому могут плавно (непрерывно) изменяться.

Гетерогенная система – макроскопически неоднородная система, состоящая из двух и более гомогенных частей (фаз), разделенных поверхностями межфазного раздела, при переходе через которые скачкообразно изменяются химический состав или физические свойства.

Примером гетерогенной системы может служить емкость, частично заполненная водой, а частично – маслом (см. рисунок 1.1б). Так как данные жидкости не смешиваются, то при переходе из одной жидкости в другую скачком изменятся физико-химические свойства: плотность, вязкость и т.д.

Дисперсная система – микрогетерогенная система, состоящая из двух и более фаз, разделенных между собой сильно развитой межфазной поверхностью, причем одна из фаз находится внутри другой в виде множества мелких частиц, капель или пузырьков.

Если тщательно перемешать воду и масло, то одна из них разобьется внутри другой на множество мелких капель, и гетерогенная система станет дисперсной (см. рисунок 1.1в).

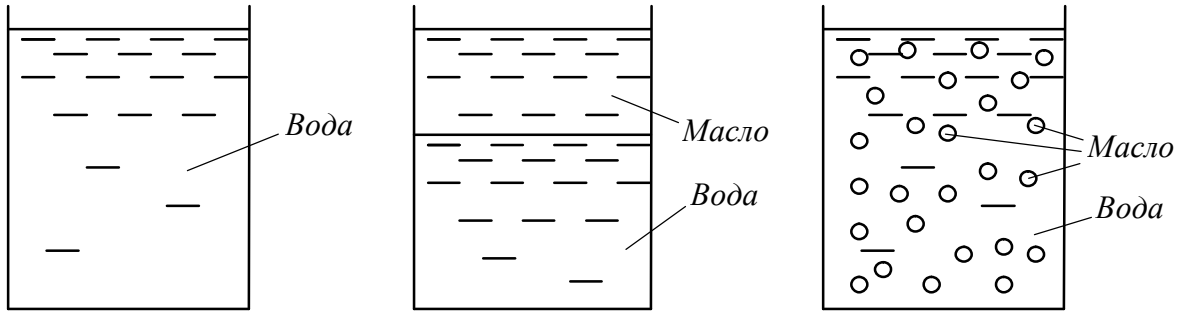
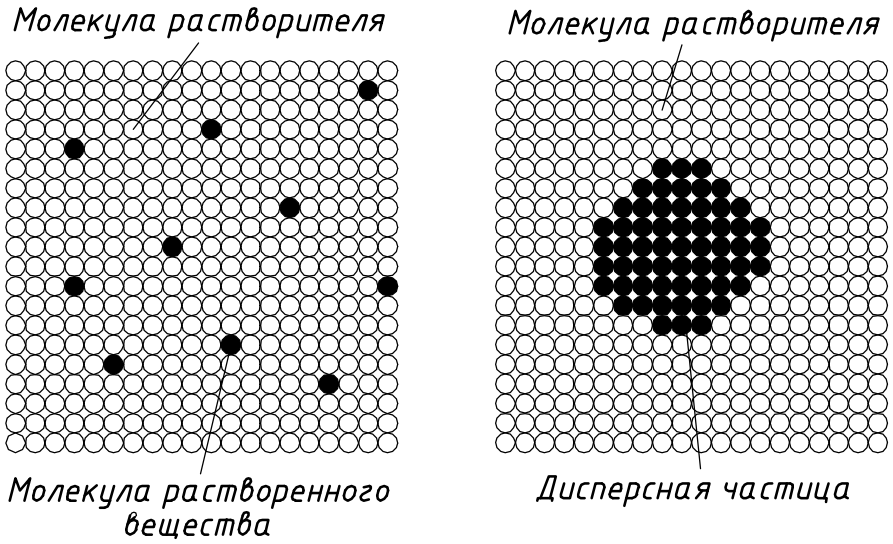


Рисунок 1.1 – Гомогенная (а), гетерогенная (б) и дисперсная (в) системы.

Следует четко различать дисперсные системы и *истинные растворы*. В истинных растворах растворенное вещество распадается в растворителе до молекулярного уровня. В дисперсных системах вещество разбито на мелкие частицы, которые в то же время состоят из значительного числа молекул и существенно больше их по размерам (см. рисунок 1.2).



а) б)

Рисунок 1.2 – Расположение молекул в истинных растворах (а) и дисперсных системах (б).

В качестве наглядного примера различия между дисперсными системами и истинными растворами можно привести процесс растворения кристаллов столовой соли в воде. Когда соль, брошенная в воду, еще не растворилась и находится в форме кристаллов, система "соль+вода" является дисперсной. После окончательного растворения соли, когда кристаллы распадаются в воде на отдельные молекулы, система "соль+вода" является истинным раствором.

Фазы, которые образуют дисперсную систему, принято называть дисперсной фазой и дисперсионной средой.

Дисперсная фаза – это фаза, разбитая на отдельные мелкие частицы, капли или пузырьки.

Дисперсионная среда – это непрерывная фаза, внутри которой раздроблена дисперсная.

В примере, приведенном на рисунке 1в дисперсной фазой является масло, а дисперсионной средой – вода. В этом случае говорят, что масло диспергировано в воде.

Диспергирование – процесс разбиения макроскопических объемов на мелкие частицы с образованием дисперсных систем.

С течением времени отдельные частицы могут слипаться друг с другом или объединяться с образованием более крупных частиц. Эти процессы приводят к разрушению дисперсной системы на отдельные фазы и называются *коагуляцией*. В случае, когда хотят подчеркнуть, что частицы объединяются с образованием более крупных, говорят о процессах *коалесценции*.

2 Классификация дисперсных систем

В силу исключительного многообразия дисперсных систем существует несколько их классификаций по различным критериям. Одна из них классифицирует дисперсные системы по агрегатному состоянию дисперсионной среды и дисперсной фазы (см. таблицу 2.1).

Таблица 2.1 – Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз.

Дисперсионная среда (непрерывная)	**Дисперсная фаза (частицы)**		
	Газ	**Жидкость**	**Твердое тело**
Газ	–	Аэрозоль (туман)	Аэрозоль(пыль, дым, порошок)
Жидкость	Пена	Эмульсия	Суспензия
Твердое тело	Твердая пена, адсорбент, катализатор	Желе, студень, жидкие включения в твердых телах	Твердый раствор, сплав

Дисперсные системы с газовой дисперсионной средой называются *аэрозолями*. Если в газовой среде находятся мелкие капли жидкости, то такая система называется *туманом*. Если в газовой среде находятся твердые частицы, то такая система в зависимости от типа твердых частиц называется *пылью*, *дымом* или *порошком*.

Пеной называется дисперсная система, состоящая из множества газовых пузырьков, разделенных между собой тонкими жидкими перегородками.

Эмульсией называется дисперсная система, состоящая из двух несмешивающихся жидкостей, одна из которых находится внутри другой в виде множества мелких капель. Одним из самых наглядных примеров эмульсии является молоко, которое состоит из сыворотки с множеством мелких капель жира. В нефтегазовой промышленности распространены эмульсии, образованные нефтью и водой.

Суспензией называется жидкая среда, содержащая твердые частицы. Примером суспензии может служить песок, находящийся у дна реки.

Примерами дисперсных систем с твердой средой и газовыми частицами (пустотами) могут служить различные строительные материалы (пенопласт и т.п.), адсорбенты (активированный уголь, силикагель, цеолиты), твердые катализаторы и другие тела, имеющие губкообразную структуру.

Системы с твердой дисперсионной средой и жидкой дисперсной фазой исключительно многообразны и являются, пожалуй, самыми

0

сложными из дисперсных систем. Сюда относятся биологические объекты, желе, студни и т.д.

К дисперсным системам, состоящим из двух твердых фаз, можно отнести бетон, различные сплавы и т.д.

Следует отметить, что приведенная в таблице 2.1 классификация является достаточно упрощенной. Многие дисперсные системы содержат три и более фазы. Во многих системах весьма сложно или даже невозможно выделить частицы и дисперсионную среду.

Следующая классификация разделяет дисперсные системы по размерам частиц или, другими словами, по степени дисперсности (раздробленности). Дисперсные системы с достаточно крупными частицами называются *грубодисперсными*, с более мелкими − *среднедисперсными*, а с совсем мелкими − *тонкодисперсными*. Если размеры частиц дисперсной фазы сравнимы с размерами атомов или молекул, то такие системы называются *молекулярными* или *атомными* (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 − Классификация дисперсных систем по степени дисперсности.

Тип дисперсной системы	Размер частиц, мкм	Примеры
Грубодисперсные	$10^{2} - 10^{3}$	Сахар, пены, грунт
Среднедисперсные	$10^{-1} - 10^{1}$	Растворимый кофе
Тонкодисперсные	$10^{-3} - 10^{-1}$	Сок растений
Молекулярные или атомные	10^{-4}	Цеолиты

Если все частицы дисперсной системы имеют одинаковые размеры, то такая система называется *монодисперсной*. Если в дисперсной системе имеются частицы различных размеров, то такая система называется *полидисперсной*. Так как абсолютно одинаковых частиц в природе не существует, то, строго говоря, все системы являются полидисперсными. Однако если размеры частиц системы достаточно близки друг к другу, то в расчетах она может рассматриваться как монодисперсная.

Если частицы в дисперсной системе могут свободно передвигаться, то такая система называется *свободнодисперсной*. Если же частицы не могут свободно перемещаться друг относительно друга, то система называется *связнодисперсной*.

3 Распределения дисперсных частиц по размерам

В различных типах дисперсных систем частицы дисперсной фазы могут иметь различные размеры и геометрическую форму. Форма частиц определяется, в основном, величиной поверхностного натяжения на границе раздела фаз и текучестями дисперсионной среды и дисперсной фазы. Если фазы дисперсной системы являются текучими, то форма частиц, как правило, является сферической. Исключения составляют в основном случаи, когда частицы расположены очень близко друг к другу и взаимодействуют (например, в пенах пузырьки газа часто имеют форму ячеек) или когда дисперсная система находится в силовом поле (например, электрическом).

Частицы дисперсной фазы можно охарактеризовать некоторым размером. Например, в качество размера сферических частиц естественно использовать их диаметр или радиус, для кубических – длину ребра куба и т.д. Если частица имеет неправильную форму, то говорят об ее *эффективном* или *характерном размере*. Выбор этого размера определяется методом, с помощью которого измеряется размер частиц. К примеру, характерным размером частиц может служить диаметр описывающей частицу сферы при использовании сита с круглыми отверстиями или диаметр сферической частицы равной массы при взвешивании и т.д.

Как отмечалось выше, в полидисперсных системах присутствуют частицы различных размеров. Для количественного описания полидисперсных систем, т.е. сколько каких частиц в них имеется, используются *распределения частиц по размерам*. Понятие распределения по размерам проиллюстрируем на следующем примере.

Будем считать, что имеется 100 кг щебня, содержащего камни различных размеров. Будем также считать, что имеется набор сит с отверстиями различных размеров: 1, 2, 3 и 4 см.

Просеем щебень через самое крупное сито, с размерами отверстий 4 см. При этом через отверстия пройдут частицы с размерами менее 4 см, а частицы с размерами более 4 см останутся в сите. После этого измерим массу частиц, оставшихся в сите. Допустим, эта масса равна 5 кг. Это означает, что 5 процентов от всей массы щебня составляют частицы с размером более 4 см.

Камни, прошедшие сквозь самое большое сито просеем еще раз через сито с размером отверстий 3 см. При этом через отверстия пройдут частицы с размером менее 3 см, а камни с размерами от 3 до 4 см останутся в сите. После этого измерим массу частиц, оставшихся в сите. Допустим, эта масса равна 20 кг. Это означает, что 20 процентов от всей массы щебня составляют частицы с размером от 3 до 4 см.

Повторяя эту операцию для сит с размерами отверстий 2 и 1 см, получим, что, к примеру, масса частиц с размерами от 2 до 3 см составляет 40 процентов, а масса частиц с размерами от 1 до 2 см – 25 процентов от общей массы.

Взвесив частицы, прошедшие через самое малое сито, получим, что их масса, к примеру, равна 10 кг. Это означает, что частицы с размерами менее 1 см составляют 10 процентов от общей массы.

Указанные данные можно свести в одну таблицу (см. таблицу 3.1), которая называется *распределением массы частиц по размерам,* или *массовым распределением частиц по размерам*. Такое распределение частиц по размерам также часто называется *фракционным составом* дисперсной системы, а группа частиц с определенным диапазоном размеров – *фракцией*.

Таблица 3.1 – Распределение массы частиц по размерам.

Размер частиц, см	менее 1	от 1 до 2	от 2 до 3	от 3 до 4	более 4
Массовая доля частиц, %	10	25	40	20	5

Как видно из таблицы 3.1, имея 4 сита, дисперсную систему можно разбить на 5 фракций. В общем случае, имея k сит, систему можно разбить на k+1 фракций, причем чем больше число фракций, тем более точно описан фракционный состав дисперсной системы.

Таки образом, массовая доля x_{mi} частиц каждой фракции от общей массы дисперсной системы определяется выражением

$$x_{mi} = \frac{m_i}{\sum_i m_i}, \qquad (3.1)$$

где m_i – масса частиц i-й фракции, кг.

Помимо массового существуют и другие типы распределений частиц по размерам. Прежде всего это *распределение количества частиц по размерам*. В этом типе распределения доля количества частиц x_i, содержащихся в i-й фракции, от общего числа частиц в дисперсной системе определяется выраженим

$$x_i = \frac{N_i}{\sum_i N_i}, \qquad (3.2)$$

где N_i – количество частиц в i-й фракции.

Кроме того, существуют *распределение объема частиц по размерам* и *распределение поверхности частиц по размерам*. Доля объема частиц i-й фракции определяется формулой

$$x_{vi} = \frac{V_i}{\sum_i V_i}, \qquad (3.3)$$

где V_i – суммарный объем всех частиц *i*-й фракции, м^3.

Доля поверхности частиц *i*-й фракции определяется формулой

$$x_{si} = \frac{s_i}{\sum_i s_i}, \tag{3.4}$$

где s_i – поверхность частиц *i*-й фракции, м^2.

Если плотность ρ всех частиц системы одинакова, то их масса и объем связаны выражением

$$m_i = \rho v_i . \tag{3.5}$$

В этом случае массовое и объемное распределение частиц по размерам совпадают

$$x_{mi} = x_{vi} . \tag{3.6}$$

Приведенные типы распределений частиц по размерам связаны между собой выражениями

$$x_{si} = \frac{x_i s_{1i}}{\sum_i x_i s_{1i}}, \tag{3.7}$$

$$x_{vi} = \frac{x_i v_{1i}}{\sum_i x_i v_{1i}}, \tag{3.8}$$

$$x_{mi} = \frac{x_i m_{1i}}{\sum_i x_i m_{1i}}, \tag{3.9}$$

где s_{1i} – поверхность одной частицы *i*-й фракции, м^2;

v_{1i} – объем одной частицы *i*-й фракции, м^3;

m_{1i} – масса одной частицы *i*-й фракции, кг.

Распределение частиц по размерам позволяет вычислить ряд интегральных (т.е. характеризующих дисперсную систему в целом) величин.

Среднеарифметический размер частиц равен

$$\bar{d} = \sum_i x_i d_i . \tag{3.10}$$

Среднеквадратическое отклонение размера частиц от среднего значения определяется выражением

$$\sigma[d] = \sqrt{\sum_i x_i \left(d_i - \bar{d}\right)^2} . \tag{3.11}$$

Дисперсия размера частиц равна

$$D[d] = \left(\sigma[d]\right)^2 . \tag{3.12}$$

Отношение среднеквадратического отклонения размеров частиц к среднему значению называется *коэффициентом вариации размеров частиц*

0

$$\gamma[d] = \frac{\sigma[d]}{\bar{d}}. \qquad (3.13)$$

Указанную величину можно использовать в качестве критерия различия между монодисперсными и полидисперсными системами. Если значение коэффициента вариации мало (например, 0,02), то разброс размеров мал по сравнению со средним значением, и систему можно считать монодисперсной. Напротив, при больших значениях коэффициента вариации систему следует рассматривать как полидисперсную.

Недостатком указанных распределений частиц по размерам является то, что они зависят от разбиения по размерам. В качестве примера приведем следующий эксперимент.

Допустим, одна и та же дисперсная система была просеяна через малое количество сит с большим шагом изменения размеров ячеек и через большое количество сит с малым шагом изменения размеров ячеек. При этом в первом случае получилось распределение, содержащее небольшое количество фракций, содержащих большое количество частиц. Во втором случае получилось распределение, содержащее большое количество фракций с малым количеством частиц в каждой. Сравнивая эти два распределения, достаточно трудно понять, что они характеризуют одну и ту же систему, так как числа в распределениях будут разные.

В этой связи хотелось бы, чтобы численные значения в обоих распределениях были близки, а второе, более детальное, распределение уточняло первое, более грубое. Для решения этой задачи вместо доли частиц каждого размера используют *плотность распределения частиц по размерам*, которая определяется выражением

$$\omega_i = \frac{x_i}{\Delta d_i}, \qquad (3.14)$$

где Δd_i – разность между максимальным и минимальным размерами i-й фракции, м.

Для графического изображения распределений частиц по размерам служат *гистограммы*. Гистограмма представляет собой совокупность вертикальных столбцов, высоты которых равны плотностям распределения частиц фракций, а горизонтальное положение и ширина определяются диапазоном размеров частиц фракций. В качестве примера в таблице 3.2 представлено распределение частиц по размерам, а на рисунке 3.1 – его гистограмма.

Таблица 3.2 – Плотность распределения частиц по размерам.

Диапазон размеров, мкм	0 – 2	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Доля частиц фракции, %	10	20	60	10
Плотность распределения, мкм$^{-1}$	0,05	0,1	0,3	0,05

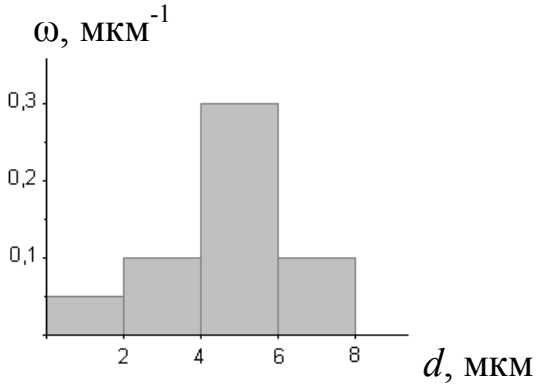


Рисунок 3.1 – Гистограмма распределения частиц по размерам.

В практических расчетах, как правило, считают, что все частицы фракции имеют одинаковый размер, равный среднему. Например для фракции 2 – 4 мкм размер всех частиц принимается равным 3 мкм. Поэтому в дальнейшем, где это не будет оговорено особо, будем характеризовать каждую фракцию дисперсной системы средним размером частиц.

Пример решения задачи.

1. *Задание.* Распределение количества сферических пузырьков по размерам представлено в таблице 3.3. Перевести его в объемное распределение пузырьков по размерам.

Таблица 3.3 – Распределение количества пузырьков по размерам.

Диаметр пузырьков, мм	1	3	5
Количество пузырьков, %	70	20	10

Решение. Для пересчета количественного распределения в объемное воспользуемся формулой (3.8)

$$x_{vi} = \frac{x_i v_{1i}}{\sum_i x_i v_{1i}}.$$

Вычислим объемы одного пузырька каждой фракции по формуле

$$v_{1i} = \frac{1}{6}\pi d_i^3 .$$

0

Подставляя численные значения из таблицы 3.3, получаем

$$v_{11} = \frac{1}{6}\pi\left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 0{,}52 \cdot 10^{-9}\ м^3,$$

$$v_{12} = \frac{1}{6}\pi\left(3 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 1{,}40 \cdot 10^{-8}\ м^3,$$

$$v_{13} = \frac{1}{6}\pi\left(5 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 6{,}50 \cdot 10^{-8}\ м^3.$$

Подставляя из таблицы доли количества частиц каждой фракции, определяем объемные доли

$$x_{v1} = \frac{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}037,$$

$$x_{v2} = \frac{0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}290,$$

$$x_{v3} = \frac{0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}673.$$

Полученное объемное распределение приведено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Объемное распределение пузырьков по размерам.

Диаметр пузырьков, мм	1	3	5
Объемная доля, %	3,7	29	67,3

Задачи.

1. При сгорании твердого топлива образовались частицы дыма с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить гистограмму распределения частиц дыма по размерам.
2. В сырьевом резервуаре находится водонефтяная эмульсия, характеризующаяся распределением капель воды по размерам, представленным в таблице 8.1. Определить среднеарифметический диаметр капель воды.
3. При распылении жидкости форсункой образуются капли, распределение по размерам которых представлено в таблице 8.1. Определить среднеквадратическое отклонение размеров капель от среднего значения.
4. В фильтр поступает суспензия с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе фильтрации было отделено 95% частиц с размером 1 мм. Построить распределение частиц суспензии по размерам после фильтрации.
5. Порошок с распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1, смешивается с порошком с размером частиц 100 мкм.

Полидисперсный порошок содержит $2 \cdot 10^{11}$ частиц, а монодисперсный – $3 \cdot 10^{11}$ частиц. Построить распределение частиц по размерам после смешения.

6. Эмульсия характеризуется распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1. Какую долю капель размером 5 мкм необходимо удалить, чтобы количество этих капель составляло 5% от общего числа оставшихся частиц. Построить распределение частиц по размерам после разделения.

4 Концентрация частиц в дисперсных системах

Помимо размеров частиц, важной характеристикой дисперсных систем является концентрация частиц дисперсной фазы.

Концентрацией дисперсной системы называется количество частиц дисперсной фазы, содержащихся в единице объема системы. Концентрация дисперсной системы определяется выражением

$$n = \frac{N}{V_{дс}}, \tag{4.1}$$

где N – количество частиц в дисперсной системе;

$V_{дс}$ – объем дисперсной системы, м^3.

Единицей измерения концентрации служит м$^{-3}$. Концентрация является удельной величиной и не зависит от объема дисперсной системы. Концентрация частиц также не зависит от размеров и формы частиц, а определяется исключительно их количеством в единице объема.

Величиной концентрации определяются объем дисперсной системы, приходящийся на одну частицу

$$V_{дс\,1} = \frac{1}{n}, \tag{4.2}$$

и среднее расстояние между дисперсными частицами

$$r = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}. \tag{4.3}$$

При малых концентрациях расстояние между частицами много больше, чем размеры самих частиц, т.е.

$$d << \frac{1}{\sqrt[3]{n}}. \tag{4.4}$$

Такие дисперсные системы называются *разбавленными*. В противном случае, т.е. при больших концентрациях, дисперсные системы называются *концентрированными*.

Если расстояние между частицами соизмеримо с размерами самих частиц, т.е.

$$d \approx \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \qquad (4.5)$$

то частицы мешают движению друг друга. Такие дисперсные системы называются *связнодисперсными*. Если расстояние между частицами достаточно для их свободного движения, то дисперсные системы называются *свободнодисперсными*.

Если дисперсная система содержит частицы различных размеров, то частицам каждого размера соответствует своя концентрация

$$n_i = \frac{N_i}{V_{дс}}, \qquad (4.6)$$

где N_i – количество частиц *i*-го размера в дисперсной системе.
Общая концентрация частиц дисперсной системы в этом случае равна сумме концентраций частиц отдельных размеров

$$n = \sum_i n_i . \qquad (4.7)$$

Общая концентрация и концентрация частиц отдельных размеров связаны выражением

$$n_i = x_i n . \qquad (4.8)$$

Следует различать концентрацию дисперсных частиц и концентрацию молекул. Когда говорят о молекулярной концентрации, то под частицами понимают молекулы или атомы, и вычисляют их количество в единице объема.

Примеры решения задач.

1. *Задание.* В аппарате объемом 10 м^3 в газовой фазе находится 10^6 капель жидкости. Определить концентрацию аэрозоля в аппарате.

Решение. Концентрация аэрозоля определяется выражением (4.1)

$$n = \frac{N}{V_{дс}} .$$

В данном случае объем дисперсной системы равен объему аппарата. Подставляя численные значения из исходных данных в выражение, получаем

$$n = \frac{10^6}{10} = 10^5 \ \text{м}^{-3}.$$

2. *Задание.* Суспензия объемом 1 м^3 и концентрацией твердых частиц 10^6 м$^{-3}$ разбавляется жидкостью объемом 4 м^3. Определить концентрацию дисперсной системы после разбавления.

Решение. В процессе разбавления дисперсной системы сохраняется полное количество твердых частиц N. Таким образом, концентрации дисперсной системы до и после разбавления будут равны

$$n_1 = \frac{N}{V_{дс1}},$$

$$n_2 = \frac{N}{V_{дс2}}.$$

Приравнивая полное количество частиц до и после разбавления, получаем

$$n_1 V_{дс1} = n_2 V_{дс2}.$$

Отсюда получаем выражение для концентрации дисперсной системы после разбавления

$$n_2 = n_1 \frac{V_{дс1}}{V_{дс2}}.$$

Объем дисперсной системы после разбавления равен сумме объемов дисперсный системы до разбавления $V_{дс1}$ и жидкости $V_{ж}$

$$V_{дс2} = V_{дс1} + V_{ж}.$$

После подстановки получаем окончательное выражение для концентрации дисперсной системы после разбавления

$$n_2 = n_1 \frac{V_{дс1}}{V_{дс1} + V_{ж}}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$n_2 = 10^6 \frac{1}{1+4} = 2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}.$$

Задачи.

7. Суспензия объемом 3 м^3 характеризуется концентрацией твердых частиц 10^7 м$^{-3}$. С течением времени из системы испарилось 0,5 м^3 дисперсионной среды. Определить концентрацию суспензии после испарения.

8. Две суспензии объемами 10 м^3 и 5 м^3 смешиваются. Концентрация твердых частиц в первой суспензии равна $5 \cdot 10^7$ м$^{-3}$, а во второй – $2 \cdot 10^7$ м$^{-3}$. Определить концентрацию частиц в смеси.

9. В дисперсной системе имеются частицы размером 1 мкм с концентрацией $4 \cdot 10^7$ м$^{-3}$ и частицы размером 3 мкм с концентрацией $1 \cdot 10^7$ м$^{-3}$. Вычислить среднее расстояние между частицами дисперсной системы.

5 Поверхность контакта фаз в дисперсных системах

Как отмечалось в разделе 1, в гетерогенных (в том числе дисперсных) системах фазы разделены между собой *поверхностью контакта фаз*. Расположение поверхности контакта фаз в гетерогенной и дисперсной системах приведено на рисунке 5.1.

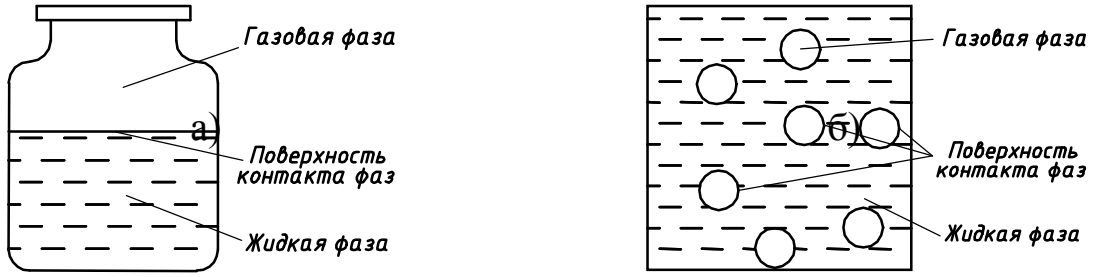


Рисунок 5.1 – Поверхность контакта фаз в гетерогенной (а) и дисперсной (б) системах "газ-жидкость".

В дисперсных системах каждая частица отделена от дисперсионной среды своей поверхностью контакта фаз. Полная поверхность контакта фаз в дисперсной системе определяется суммированием поверхностей всех частиц.

Для одной частицы сферической формы площадь межфазной поверхности равна

$$s = \pi d^2 . \qquad (5.1)$$

Для одной кубической частицы эта же площадь равна

$$s = 6d^2 . \qquad (5.2)$$

Суммарная площадь частиц *i*-й фракции определяется выражением

$$S_i = N_i s_i . \qquad (5.3)$$

Количество частиц *i*-й фракции можно вычислить с через концентрацию частиц и объем дисперсной системы

$$N_i = nV_{дс} x_i . \qquad (5.4)$$

С учетом выражения (3.4) площадь поверхности контакта фаз дисперсной системы будет равна

$$S = nV_{дс} \sum_i x_i s_i . \qquad (5.5)$$

Для частиц сферической формы выражение (3.5) примет вид

$$S = \pi n V_{дс} \sum_i x_i d_i^2 . \qquad (5.6)$$

Для частиц кубической формы выражение (3.5) примет вид

$$S = 6nV_{дс} \sum_i x_i d_i^2 . \qquad (5.7)$$

В инженерных расчетах для упрощения вычислений полидисперсная система зачастую рассматривается как монодисперсная, по свойствам аналогичная полидисперсной. В технологических задачах часто монодисперсная система должна обладать той же поверхностью контакта фаз, что и полидисперсная. Площадь межфазной поверхности в монодисперсной системе равна

$$S = nV_{дс}\pi\overline{d}_S^2 , \qquad (5.8)$$

где $\overline{d}_S$ – диаметр частиц монодисперсной системы, м.

Приравнивая площади поверхности монодисперсной и полидисперсной систем, получаем

$$nV_{дс}\pi\overline{d}_S^2 = nV_{дс}\sum_i x_i\pi d_i^2 . \qquad (5.9)$$

Откуда диаметр частиц монодисперсной системы равен

$$\overline{d}_S = \sqrt{\sum_i x_i d_i^2} . \qquad (5.10)$$

Указанный размер $\overline{d}_S$ называется *среднеповерхностным диаметром частиц* полидисперсной системы.

Примеры решения задач.

1. *Задание.* В емкости находится эмульсия объемом 10 м^3. Концентрация капель равна 10^{11} м$^{-3}$. Диаметр капель равен 15 мкм. Определить площадь поверхности контакта фаз.

Решение. Зная объем дисперсной системы $V_{дс}$ и концентрацию частиц n, можно определить количество частиц

$$N = nV_{дс} .$$

Площадь поверхности одной капли эмульсии равна

$$s = \pi d^2 .$$

Умножая количество частиц на площадь поверхности одной частицы, получаем суммарную площадь поверхности дисперсной системы

$$S = nV_{дс}\pi d^2 .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$S = 10^{11} \cdot 10 \cdot 3{,}14 \cdot \left(15 \cdot 10^{-6}\right)^2 = 707 \text{ м}^2.$$

2. *Задание.* Эмульсия характеризуется распределением капель жидкости по размерам, представленным в таблице 5.1. Определить среднеарифметический и среднеповерхностный диаметры капель эмульсии.

0

Таблица 5.1 – Распределение частиц по размерам.

Диаметр капель эмульсии, мкм	5	10	15
Доля от общего числа капель, %	60	30	10

Решение. Среднеарифметический диаметр капель найдем по формуле (3.9)

$$\overline{d} = x_1 d_1 + x_2 d_2 + x_3 d_3 .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\overline{d} = 0{,}6 \cdot 5 + 0{,}3 \cdot 10 + 0{,}1 \cdot 15 = 7{,}5 \cdot 10^{-6} = 7{,}5 \text{ мкм.}$$

Среднеповерхностный диаметр капель эмульсии вычислим по формуле (5.10)

$$\overline{d}_S = \sqrt{x_1 d_1^2 + x_2 d_2^2 + x_3 d_3^2} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\overline{d}_S = \sqrt{0{,}6 \cdot \left(5 \cdot 10^{-6}\right)^2 + 0{,}3 \cdot \left(10 \cdot 10^{-6}\right)^2 + 0{,}1 \cdot \left(15 \cdot 10^{-6}\right)^2} =$$

$$= 8{,}22 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 8{,}22 \text{ мкм.}$$

Задачи.

10. Распределение количества твердых частиц кубической формы по размерам представлено в таблице 8.1. Построить распределение поверхности контакта фаз по размерам частиц.

11. Распределение капель жидкости по размерам представлено в таблице 8.1. Определить, во сколько раз среднеповерхностный размер частиц отличается от среднеарифметического.

12. При конденсации паров на стенках емкости образовалось 10^7 полусферических капель с распределением по диаметрам, представленным в таблице 8.1. Определить поверхность контакта газовой и жидкой фаз.

13. При проведении массообменного процесса газ в виде пузырьков пропускается через слой жидкости. Распределение пузырьков газа по размерам представлено в таблице 8.1. Определить, какую долю от общей поверхности контакта газовой и жидкой фаз составляют пузырьки с размером меньше, чем 2,5 мм.

14. Распределение капель эмульсии по размерам представлено в таблице 8.1. Какую долю частиц размером 100 мкм необходимо удалить, чтобы поверхность уменьшилась на 10%.

15. Эмульсия характеризуется распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе отстаивания водонефтяной эмульсии осело 80% капель воды с размерами 100

мкм. Определить относительное изменение поверхности контакта жидкостей.

16. Суспензия характеризуется распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе фильтрации из суспензии удалены частицы с размером 200 мкм. Считая частицы кубическими, построить распределение поверхности частиц по размерам после фильтрации.

17. Распределение поверхности капель аэрозоля по размерам представлено в таблице 8.2. Считая капли сферическими, построить распределение количества частиц по размерам.

6 Объемы фаз в дисперсных системах

Объем дисперсной системы $V_{дс}$ состоит из объема дисперсной фазы (частиц) $V_ч$ и дисперсионной среды $V_{ср}$, в которой находятся частицы

$$V_{дс} = V_ч + V_{ср}\ , \qquad (6.1)$$

Так как дисперсная фаза образована множеством отдельных частиц, то объем дисперсной фазы равен сумме объемов всех частиц

$$V_ч = \sum_i v_{чi}\ , \qquad (6.2)$$

где $v_{чi}$ – объем частиц i-го размера в дисперсной системе, м^3.

Для частиц сферической формы объем равен

$$v_ч = \frac{1}{6}\pi d^3\ , \qquad (6.3)$$

где d – диаметр сферических частиц, м.

Если в системе присутствуют сферические частицы различных размеров d_i, то для каждого размера объем частицы равен

$$v_{чi} = \frac{1}{6}\pi d_i^3\ . \qquad (6.4)$$

Суммарный объем частиц i-й фракции равен

$$V_{чi} = N_i \frac{\pi d_i^3}{6}, \qquad (6.5)$$

где N_i – количество частиц i-го размера в дисперсной системе.

0

Используя распределение частиц по размерам, получим

$$V_ч = nV_{дс}\sum_i x_i \frac{\pi d_i^3}{6}. \qquad (6.6)$$

0

Как отмечалось выше, в инженерных расчетах для упрощения вычислений зачастую полидисперсная система рассматривается как монодисперсная, по свойствам аналогичная полидисперсной. Во многих задачах монодисперсная система должна обладать тем же объемом частиц, что и полидисперсная. Объем частиц (дисперсной фазы) в монодисперсной системе равен

$$V_ч = nV_{дс}\frac{\pi \bar{d}_V^3}{6}, \qquad (6.7)$$

где $\bar{d}_V$ – диаметр частиц монодисперсной системы, м.

Приравнивая выражения (6.6) и (6.7), можно найти значение размера частиц монодисперсной системы, при котором выполняется равенство объемов

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{\sum_i x_i d_i^3}\ . \qquad (6.8)$$

Найденный размер $\bar{d}_V$ называется *среднеобъемным диаметром частиц* полидисперсной системы.

Соотношение между объемами фаз в дисперсных системах принято определять с помощь *объемной доли дисперсной фазы*

$$e = \frac{V_ч}{V_{дс}}. \qquad (6.9)$$

Она показывает, какую часть от общего объема дисперсной системы составляет объем частиц. Объем дисперсионной среды при этом может быть определен выражением

$$V_{ср} = V_{дс}(1-e). \qquad (6.10)$$

Если известно распределение частиц по размерам, величину объемной доли дисперсной фазы можно найти по формуле

$$e = \frac{n}{6}\sum_i x_i \pi d_i^3\ . \qquad (6.11)$$

Пример решения задачи.

1. *Задание.* При распылении жидкости форсункой образуются капли с распределением по размерам, представленном в таблице 6.1 и концентрацией 10^7 м$^{-3}$. Найти объемные доли дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Таблица 6.1 – Распределение капель жидкости по размерам.

Диаметр частиц, мм	1	2	3
Количество частиц, %	20	50	30

Решение. Объем одной частицы фракции определяется формулой (6.4)

$$v_i = \frac{\pi d_i^3}{6}.$$

Подставляя численные значения из таблицы 6.1, получаем

$$v_1 = \frac{3{,}14 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 0{,}52 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3;$$

$$v_2 = \frac{3{,}14 \cdot \left(2 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 4{,}19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3;$$

$$v_3 = \frac{3{,}14 \cdot \left(3 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 1{,}41 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Суммарный объем частиц фракции вычисляется по формуле

$$V_i = nV_{дс}x_i v_i .$$

Подставляя численные значения и для определенности принимая объем дисперсной системы равным единице, получаем

$$V_1 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} = 0{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$V_2 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 4{,}19 \cdot 10^{-9} = 2{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$V_3 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-8} = 0{,}42 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3.$$

Объемная доля дисперсной фазы определяется выражением

$$e = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{V_{дс}}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$e = \frac{0{,}1 \cdot 10^{-2} + 2{,}1 \cdot 10^{-2} + 0{,}42 \cdot 10^{-1}}{1} = 0{,}064 .$$

Соответственно объемная доля дисперсионной среды равна

$$1 - e = 0{,}936 .$$

Задачи.

18. Распределение частиц пыли по размерам представлено в таблице 8.1. Считая частицы кубическими, определить среднеобъемный размер частиц пыли.

19. Распределение пузырьков пара по размерам представлено в таблице 8.1. Построить распределение объема дисперсной фазы по размерам.

20. При охлаждении из раствора выпали кубические кристаллы растворенного вещества общей массой 10 кг. Распределение

0

образовавшихся кристаллов по размерам представлено в таблице 8.1. Определить количество образовавшихся кристаллов.

21. В аппарате объемом 10 $м^3$ в газе содержится 10^8 капель жидкости с распределением по размерам, приведенным в таблице 8.1. Определить, какую долю от общего объема аппарата занимает жидкость.

22. Жидкость содержит твердые частицы кубической формы с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Для ее очистки от твердых частиц используется фильтр. Определить размеры отверстий фильтра, чтобы он задерживал 90% от массы механических примесей.

23. Для очистки газа от пыли используется фильтр, размеры отверстий в котором равны 0,1 мм. Распределение частиц пыли по размерам представлено в таблице 8.1. Считая частицы кубическими, определить, какая массовая доля пыли задерживается фильтром.

24. При распылении форсункой жидкости объемом 1 л образовался аэрозоль с распределением объема капель по размерам, представленным в таблице 8.3. Определить поверхность образовавшейся дисперсной системы.

25. Имеются две эмульсии с размерами капель 10 мкм и 20 мкм и концентрациями капель 10^{13} $м^{-3}$ и 10^{12} $м^{-3}$ соответственно. Определить объемную долю дисперсной фазы при смешении этих двух эмульсий в соотношении объемов 1:2.

26. Аэрозоль с распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1, обдувается высокоскоростным газовым потоком. При этом 40% капель с размером 1,0 мм распались на две одинаковые капли меньшего размера. Построить новое распределение капель аэрозоля по размерам.

27. Водонефтяная эмульсия с размером капель 100 мкм находится в резервуаре. При этом 90% капель попарно коагулировали. Определить относительное изменение поверхности контакта фаз в результате коагуляции.

28. Происходит смешение двух суспензий в соотношении объемов 1:3. Первая суспензия содержит частицы размером 0,5 мм, а вторая – 0,8 мм. Объемная доля частиц в первой суспензии равна 5%, а во второй – 2%. Считая частицы кубическими, определить их концентрацию в смеси.

29. Эмульсия с размером капель 100 мкм и концентрацией 10^9 $м^{-3}$ поступает в мешалку. В мешалке капли жидкости дробятся до размера 50 мкм. Определить концентрацию эмульсии после мешалки.

30. В емкости объемом 2 л и диаметром 20 см находится эмульсия воды в нефти с распределением по размерам, представленным в

таблице 8.1, и концентрацией 10^{13} м$^{-3}$. После осаждения капель эмульсия разделилась на две отдельные жидкости. Определить высоту отстоявшейся жидкости.

31. Дисперсная система содержит кубические частицы с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение поверхности контакта фаз по размерам.

32. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение объема капель по размерам.

33. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение массы капель по размерам.

34. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением объема по размерам, представленным в таблице 8.3. Построить распределение количества капель по размерам.

35. Аэрозоль содержит капли с распределением объема по размерам, представленным в таблице 8.3. Построить распределение поверхности капель по размерам.

36. Дисперсная система содержит сферические частицы с распределением поверхности контакта фаз по размерам, представленным в таблице 8.2. Построить распределение объема частиц по размерам.

37. Суспензия содержит кубические твердые частицы с распределением массы по размерам, представленным в таблице 8.4. Построить распределение количества частиц по размерам.

38. Эмульсия характеризуется распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1, и концентрацией 10^{12} м$^{-3}$. Определить объемную долю дисперсной фазы.

39. Суспензия характеризуется объемным распределением твердых частиц по размерам, представленным в таблице 8.3, и концентрацией 10^{11} м$^{-3}$. Считая твердые частицы сферическими, определить объемную долю дисперсионной среды.

40. В емкости находится эмульсия с распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1. Объемная доля дисперсной фазы равна 0,2. Со временем все капли с размерами более 50 мкм осели. Определить объемную долю дисперсной фазы после осаждения.

0

7 Удельная поверхность контакта фаз в дисперсных системах

Наряду с абсолютным значением поверхности контакта фаз очень часто используется *удельная поверхность контакта фаз*. Она представляет собой поверхность контакта фаз, приходящуюся на единицу объема. Можно выделить два основных типа удельной поверхности: удельную поверхность частиц (дисперсной фазы) и удельную поверхность дисперсной системы.

Удельная поверхность частиц представляет собой площадь межфазной поверхности, которая приходится на единицу объема частиц (дисперсной фазы), и определяется выражением

$$s_{уд.ч} = \frac{S}{V_ч}, \qquad (7.1)$$

где S – площадь поверхности контакта фаз, м^2;

$V_ч$ – объем частиц, м^3.

Удельная поверхность дисперсной системы представляет собой площадь межфазной поверхности, которая приходится на единицу объема дисперсной системы, и определяется выражением

$$s_{уд} = \frac{S}{V_{дс}}, \qquad (7.2)$$

где $V_{дс}$ – объем дисперсной системы, м^3.

Удельная поверхность частиц и дисперсной системы обычно измеряется в м^2/м^3 (здесь метры в числителе и знаменателе не сокращаются, для того чтобы подчеркнуть физический смысл удельной поверхности).

Разделив выражение (7.2) на (7.1), получаем, что соотношение между указанными удельными поверхностями обратно пропорционально соотношению между объемом дисперсной системы и объемом частиц

$$\frac{s_{уд}}{s_{уд.ч}} = \frac{V_ч}{V_{дс}}. \qquad (7.3)$$

Таким образом, удельная поверхность частиц и дисперсной системы связаны между собой соотношением

$$\frac{s_{уд}}{s_{уд.ч}} = e. \qquad (7.4)$$

Величина удельной поверхности частиц зависит только от их размеров и геометрической формы. Удельная поверхность дисперсной системы, помимо указанных факторов, зависит еще и от объема дисперсионной среды. К примеру, при разбавлении дисперсной

системы удельная поверхность частиц не изменяется, а удельная поверхность системы уменьшается.

Выясним, как зависит величина удельной поверхности от размеров частиц. Поверхность частицы пропорциональна квадрату ее характерного размера

$$S \sim d^2 . \qquad (7.5)$$

Объем частицы пропорционален кубу ее характерного размера

$$V_ч \sim d^3 . \qquad (7.6)$$

Составляя отношение поверхности частицы к ее объему, получаем, что величина удельной поверхности обратно пропорциональна характерному размеру частиц

$$s_{уд.ч} \sim \frac{1}{d}. \qquad (7.7)$$

Так, для частиц сферической формы величина удельной поверхности равна

$$s_{уд.ч} = \frac{6}{d}. \qquad (7.8)$$

Величина, обратная характерному размеру частиц, называется *дисперсностью*

$$D = \frac{1}{d}. \qquad (7.9)$$

Единицей измерения дисперсности является $м^{-1}$. Таким образом, величина удельной поверхности части пропорциональна дисперсности

$$s_{уд.ч} \sim D . \qquad (7.10)$$

К примеру, если частицы дисперсной системы дробятся на более мелкие, размер которых в 10 раз меньше исходных, то удельная поверхность частиц по порядку величины увеличится в 10 раз.

Пример решения задачи.

1. *Задание.* Мазут объемом 1 $м^3$ распыляется на капли, 60% от числа которых имеют размер 0,5 мм, а остальные – размер 1 мм. Определить удельную поверхность образовавшейся дисперсной системы, среднеповерхностный и среднеобъемный размеры капель.

Решение. Введем следующие буквенные обозначения для исходных данных

$V_ч = 1$ $м^3$; $d_1 = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; $x_1 = 0{,}6$;

$d_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $x_2 = 0{,}4$.

Так как рассматриваемая дисперсная система содержит капли различных размеров, то она является полидисперсной. Для нее площадь поверхности контакта фаз определяется выражением (5.5)

$$S = N\sum_i x_i \pi d_i^2 ,$$

где N – общее количество частиц распыленной жидкости.

Все значения, кроме N, содержатся в исходных данных. Определить количество образовавшихся капель можно исходя из выражения (6.6)

$$N = \frac{6V_ч}{\sum_i x_i \pi d_i^3}.$$

Подставляя в полученное выражение численные значения из исходных данных, получаем

$$N = \frac{6 \cdot 1}{0{,}6 \cdot 3{,}14 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^3 + 0{,}4 \cdot 3{,}14 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3} = 4{,}02 \cdot 10^9 .$$

Суммарная поверхность дисперсной системы равна

$$S = 4{,}02 \cdot 10^9 \left[0{,}6 \cdot 3{,}14 \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 0{,}4 \cdot 3{,}14 \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^2\right] = 6{,}94 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

Значение удельной поверхности на единицу объема дисперсной фазы определяется выражением (7.1)

$$s_{уд.ч} = \frac{S}{V_ч}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$s_{уд.ч} = \frac{6{,}94 \cdot 10^3}{1} = 6{,}94 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Среднеповерхностный диаметр частиц определяется выражением (5.10)

$$\bar{d}_S = \sqrt{\sum_i x_i d_i^2} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\bar{d}_S = \sqrt{0{,}6 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 0{,}4 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 0{,}84 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Среднеобъемный диаметр частиц определяется выражением (6.8)

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{\sum_i x_i d_i^3} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{0{,}6 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^3 + 0{,}4 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3} = 0{,}78 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

0

Задачи.

41. Распределение капель аэрозоля по размерам представлено в таблице 8.1. Объемная доля жидкости в аэрозоле равна 0,03. Определить удельную поверхность аэрозоля.
42. В 1 $см^3$ адсорбента находятся 10^{10} пор сферической формы. Распределение пор по размерам представлено в таблице 8.1. Определить удельную поверхность адсорбента.
43. Удельная поверхность аэрозоля равна 300 $м^2/м^3$. Объемная доля дисперсной фазы равна 0,01. Определить размеры капель аэрозоля и их концентрацию.

8 Исходные данные для решения задач

В таблицах 8.1 – 8.4 приведены распределения частиц по размерам, необходимые для решения задач. В качестве размеров для сферических частиц приведены диаметры, а для кубических – длина ребра.

Таблица 8.1 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), доля которых от общего числа равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
1	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011
2	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
4	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
5	0,01	0,02	0,05	0,08	0,11
6	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011
10	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
11	0,02	0,05	0,08	0,11	0,14
12	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
13	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
14	0,01	0,02	0,04	0,07	0,1
15	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
16	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
18	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
19	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
21	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
22	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

230	0,4	0,6	0,8	0,1	0,12
26	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0
30	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
31	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
32	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
33	0,05	0,07	0,09	0,11	0,12
38	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
40	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06
41	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
42	0,0005	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013

Таблица 8.2 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), доля поверхности которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
17	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
36	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18

Таблица 8.3 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), объемная доля которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
24	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
34	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
35	0,01	0,04	0,07	0,10	0,13
39	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07

Таблица 8.4 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), массовая доля которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
37	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4

Соотношения между некоторыми единицами измерения

Длина	**Площадь**	**Объем**
1 м = 10^3 мм	1 м^2 = 10^6 мм^2	1 м^3 = 10^9 мм^3
1 м = 10^6 мкм	1 м^2 = 10^{12} мкм^2	1 м^3 = 10^{18} мкм^3
1 м = 10^2 см		1 м^3 = 10^3 л

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное различие между истинными растворами и дисперсными системами?
2. Как изменяется величина удельной поверхности с уменьшением размеров частиц?
3. Что такое среднеповерхностный размер частиц?
4. Что такое среднеобъемный размер частиц?
5. Что такое дисперсность?
6. Удельная поверхность каких частиц больше: кубических или сферических?
7. Что такое поверхность раздела фаз?
8. Где находится поверхность раздела фаз в дисперсных системах?
9. Как вычислить средний размер частиц в дисперсных системах?
10. Что такое удельная поверхность частиц?
11. Как связаны между собой удельная поверхность частиц и дисперсной системы?
12. Какая величина может служить критерием различия между монодисперсными и полидисперсными системами?
13. Какая величина характеризует разброс размеров частиц относительно среднего?
14. Что такое концентрация частиц дисперсной системы?
15. Какие дисперсные системы являются концентрированными?
16. Что такое распределение частиц по размерам?
17. Как изменяется концентрация при смешении дисперсных систем?
18. В чем различие между гетерогенной и дисперсной системами?
19. В чем различие между гомогенной и гетерогенной системами?
20. В каких пределах может изменяться величина объемной доли дисперсной фазы?

Список рекомендуемой литературы

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Дисперсные системы и поверхностные явления.–М.: Наука, 1979.–200 с.
2. Зайончковский Я. Обеспыливание в промышленности.–М.: Стройиздат, 1969.–352 с.
3. Зимон А.Д. Мир частиц.–М.: Наука, 1988.–192 с.
4. Цетлин В.М. Аэрозоли в быту.–М.: Наука, 1978.–136 с.
5. Амелин А.Г. Туманы служат человеку.–М.: Изд. АН СССР, 1961.–112 с.

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Машины и аппараты химических производств"

Коныгин С.Б., Иваняков С.В.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

методическое руководство к практическим занятиям
по дисциплине
"Дисперсные системы в промышленности"

Самара 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Основные понятия и определения 5
2 Классификация дисперсных систем 8
3 Распределения дисперсных частиц по размерам 10
Пример решения задачи 14
Задачи 15
4 Концентрация частиц в дисперсных системах 16
Примеры решения задач 17
Задачи 18
5 Поверхность контакта фаз в дисперсных системах 19
Примеры решения задач 20
Задачи 21
6 Объемы фаз в дисперсных системах 22
Пример решения задачи 23
Задачи 24
7 Удельная поверхность контакта фаз в дисперсных системах 27
Пример решения задачи 28
Задачи 30
8 Исходные данные для решения задач 30
Соотношения между некоторыми единицами измерения 31
Контрольные вопросы 32
Список рекомендуемой литературы 32

0

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d – размер частиц, м
N – количество частиц
n – концентрация частиц, $м^{-3}$
s, S – площадь поверхности контакта фаз, $м^2$
v, V – объем, $м^3$
m, M – масса, кг
i – номер фракции
r – расстояние между частицами, м
e – объемная доля дисперсной фазы
D – дисперсность, $м^{-1}$
x – доля
ρ – плотность фазы, $кг/м^3$
ω – плотность распределения частиц по размерам, $м^{-1}$

Список индексных обозначений

Параметр	Одна частица фракции	Фракция	Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Дисперсная система
Размер частиц	d_i	d_i	d	–	d
Количество частиц	–	N_i	N	–	N
Концентрация частиц	–	n_i	n	–	n
Поверхность контакта фаз	s_i	S_i	–	–	S
Объем	$v_{чi}$	$V_{чi}$	$V_ч$	$V_{ср}$	$V_{дс}$
Удельная поверхность	$s_{уд.чi}$	$S_{уд.чi}$	$S_{уд.ч}$	–	$S_{уд}$
Масса	$m_{чi}$	$M_{чi}$	$M_ч$	$M_{ср}$	$M_{дс}$

Введение

Основным направлением работы инженеров-механиков, подготавливаемых по специальности "Оборудование нефтегазопереработки", является проектирование оборудования, предназначенного для проведения тех или иных технологических процессов подготовки и переработки нефти и газа. Однако грамотное проектирование аппаратов без знания основных свойств перерабатываемых сред и продуктов невозможно.

Особенностью нефтегазовой промышленности является то, что большинство сред, с которыми приходится иметь дело, не являются ни газами, ни жидкостями, ни твердыми телами в чистом виде. Они представляют собой смеси газов, жидкостей и твердых тел в различных сочетаниях и называются *дисперсными системами*. Физико-химические свойства этих смесей, а также процессы, протекающие в них, значительно отличаются от аналогичных свойств и процессов в чистых газах, жидкостях или твердых телах. Это обстоятельство необходимо учитывать в процессе проектирования оборудования нефтегазопереработки.

С производственных позиций указанные дисперсные системы могут быть как полезными, так и вредными. К примеру, твердые частицы грунта, находящиеся в нефти, могут привести к износу и разрушению нефтяных насосов, и поэтому твердые частицы необходимо удалить. Полезные дисперсные системы специально создаются при проведении технологических процессов. Например, для быстрого и эффективного сжигания жидкого топлива оно распыляется в виде множества мелких капель, образуя дисперсную систему.

В связи с вышеизложенным курс "Дисперсные системы в промышленности" знакомит студента с основными свойствами дисперсных систем, процессами, протекающими в них, а также методами их создания и разрушения.

1 Основные понятия и определения

Понятие дисперсной системы тесно связано с понятиями однородных и неоднородных систем.

Гомогенная система – макроскопически однородная система, химический состав и физические свойства которой во всех ее частях одинаковы или изменяются непрерывно (без скачков), внутри которой отсутствуют поверхности контакта фаз.

В качестве примера гомогенной системы можно привести чистую воду, полностью заполняющую некоторый рассматриваемый объем (см. рисунок 1.1а). Однако вода в различных областях этого объема может иметь различную температуру и находиться под различным давлением, в результате чего ее свойства при переходе от одного места к другому могут плавно (непрерывно) изменяться.

Гетерогенная система – макроскопически неоднородная система, состоящая из двух и более гомогенных частей (фаз), разделенных поверхностями межфазного раздела, при переходе через которые скачкообразно изменяются химический состав или физические свойства.

Примером гетерогенной системы может служить емкость, частично заполненная водой, а частично – маслом (см. рисунок 1.1б). Так как данные жидкости не смешиваются, то при переходе из одной жидкости в другую скачком изменятся физико-химические свойства: плотность, вязкость и т.д.

Дисперсная система – микрогетерогенная система, состоящая из двух и более фаз, разделенных между собой сильно развитой межфазной поверхностью, причем одна из фаз находится внутри другой в виде множества мелких частиц, капель или пузырьков.

Если тщательно перемешать воду и масло, то одна из них разобьется внутри другой на множество мелких капель, и гетерогенная система станет дисперсной (см. рисунок 1.1в).

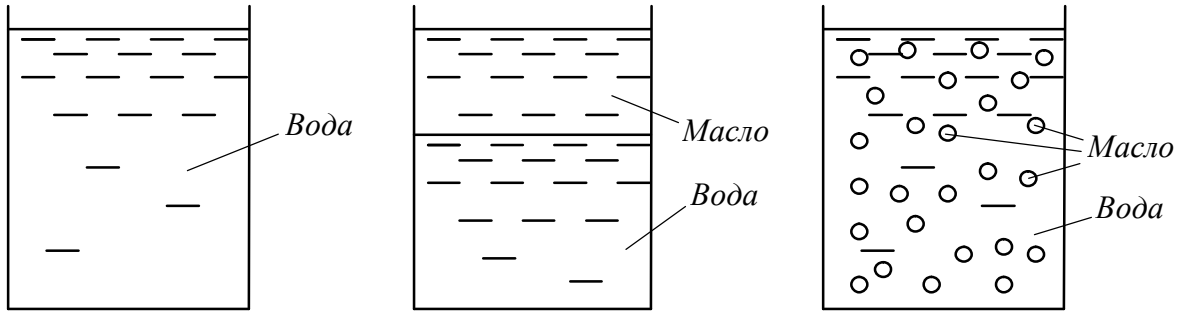
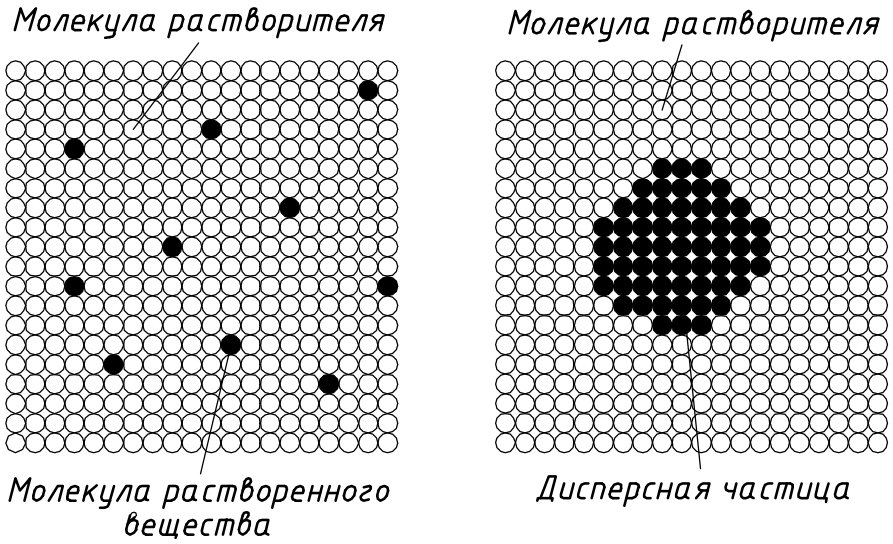


Рисунок 1.1 – Гомогенная (а), гетерогенная (б) и дисперсная (в) системы.

Следует четко различать дисперсные системы и *истинные растворы*. В истинных растворах растворенное вещество распадается в растворителе до молекулярного уровня. В дисперсных системах вещество разбито на мелкие частицы, которые в то же время состоят из значительного числа молекул и существенно больше их по размерам (см. рисунок 1.2).



а) б)

Рисунок 1.2 – Расположение молекул в истинных растворах (а) и дисперсных системах (б).

В качестве наглядного примера различия между дисперсными системами и истинными растворами можно привести процесс растворения кристаллов столовой соли в воде. Когда соль, брошенная в воду, еще не растворилась и находится в форме кристаллов, система "соль+вода" является дисперсной. После окончательного растворения соли, когда кристаллы распадаются в воде на отдельные молекулы, система "соль+вода" является истинным раствором.

Фазы, которые образуют дисперсную систему, принято называть дисперсной фазой и дисперсионной средой.

Дисперсная фаза – это фаза, разбитая на отдельные мелкие частицы, капли или пузырьки.

Дисперсионная среда – это непрерывная фаза, внутри которой раздроблена дисперсная.

В примере, приведенном на рисунке 1в дисперсной фазой является масло, а дисперсионной средой – вода. В этом случае говорят, что масло диспергировано в воде.

Диспергирование – процесс разбиения макроскопических объемов на мелкие частицы с образованием дисперсных систем.

С течением времени отдельные частицы могут слипаться друг с другом или объединяться с образованием более крупных частиц. Эти процессы приводят к разрушению дисперсной системы на отдельные фазы и называются *коагуляцией*. В случае, когда хотят подчеркнуть, что частицы объединяются с образованием более крупных, говорят о процессах *коалесценции*.

2 Классификация дисперсных систем

В силу исключительного многообразия дисперсных систем существует несколько их классификаций по различным критериям. Одна из них классифицирует дисперсные системы по агрегатному состоянию дисперсионной среды и дисперсной фазы (см. таблицу 2.1).

Таблица 2.1 – Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз.

Дисперсионная среда (непрерывная)	**Дисперсная фаза (частицы)**		
	Газ	**Жидкость**	**Твердое тело**
Газ	–	Аэрозоль (туман)	Аэрозоль(пыль, дым, порошок)
Жидкость	Пена	Эмульсия	Суспензия
Твердое тело	Твердая пена, адсорбент, катализатор	Желе, студень, жидкие включения в твердых телах	Твердый раствор, сплав

Дисперсные системы с газовой дисперсионной средой называются *аэрозолями*. Если в газовой среде находятся мелкие капли жидкости, то такая система называется *туманом*. Если в газовой среде находятся твердые частицы, то такая система в зависимости от типа твердых частиц называется *пылью*, *дымом* или *порошком*.

Пеной называется дисперсная система, состоящая из множества газовых пузырьков, разделенных между собой тонкими жидкими перегородками.

Эмульсией называется дисперсная система, состоящая из двух несмешивающихся жидкостей, одна из которых находится внутри другой в виде множества мелких капель. Одним из самых наглядных примеров эмульсии является молоко, которое состоит из сыворотки с множеством мелких капель жира. В нефтегазовой промышленности распространены эмульсии, образованные нефтью и водой.

Суспензией называется жидкая среда, содержащая твердые частицы. Примером суспензии может служить песок, находящийся у дна реки.

Примерами дисперсных систем с твердой средой и газовыми частицами (пустотами) могут служить различные строительные материалы (пенопласт и т.п.), адсорбенты (активированный уголь, силикагель, цеолиты), твердые катализаторы и другие тела, имеющие губкообразную структуру.

Системы с твердой дисперсионной средой и жидкой дисперсной фазой исключительно многообразны и являются, пожалуй, самыми

0

сложными из дисперсных систем. Сюда относятся биологические объекты, желе, студни и т.д.

К дисперсным системам, состоящим из двух твердых фаз, можно отнести бетон, различные сплавы и т.д.

Следует отметить, что приведенная в таблице 2.1 классификация является достаточно упрощенной. Многие дисперсные системы содержат три и более фазы. Во многих системах весьма сложно или даже невозможно выделить частицы и дисперсионную среду.

Следующая классификация разделяет дисперсные системы по размерам частиц или, другими словами, по степени дисперсности (раздробленности). Дисперсные системы с достаточно крупными частицами называются *грубодисперсными*, с более мелкими − *среднедисперсными*, а с совсем мелкими − *тонкодисперсными*. Если размеры частиц дисперсной фазы сравнимы с размерами атомов или молекул, то такие системы называются *молекулярными* или *атомными* (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 − Классификация дисперсных систем по степени дисперсности.

Тип дисперсной системы	Размер частиц, мкм	Примеры
Грубодисперсные	$10^{2} - 10^{3}$	Сахар, пены, грунт
Среднедисперсные	$10^{-1} - 10^{1}$	Растворимый кофе
Тонкодисперсные	$10^{-3} - 10^{-1}$	Сок растений
Молекулярные или атомные	10^{-4}	Цеолиты

Если все частицы дисперсной системы имеют одинаковые размеры, то такая система называется *монодисперсной*. Если в дисперсной системе имеются частицы различных размеров, то такая система называется *полидисперсной*. Так как абсолютно одинаковых частиц в природе не существует, то, строго говоря, все системы являются полидисперсными. Однако если размеры частиц системы достаточно близки друг к другу, то в расчетах она может рассматриваться как монодисперсная.

Если частицы в дисперсной системе могут свободно передвигаться, то такая система называется *свободнодисперсной*. Если же частицы не могут свободно перемещаться друг относительно друга, то система называется *связнодисперсной*.

3 Распределения дисперсных частиц по размерам

В различных типах дисперсных систем частицы дисперсной фазы могут иметь различные размеры и геометрическую форму. Форма частиц определяется, в основном, величиной поверхностного натяжения на границе раздела фаз и текучестями дисперсионной среды и дисперсной фазы. Если фазы дисперсной системы являются текучими, то форма частиц, как правило, является сферической. Исключения составляют в основном случаи, когда частицы расположены очень близко друг к другу и взаимодействуют (например, в пенах пузырьки газа часто имеют форму ячеек) или когда дисперсная система находится в силовом поле (например, электрическом).

Частицы дисперсной фазы можно охарактеризовать некоторым размером. Например, в качество размера сферических частиц естественно использовать их диаметр или радиус, для кубических – длину ребра куба и т.д. Если частица имеет неправильную форму, то говорят об ее *эффективном* или *характерном размере*. Выбор этого размера определяется методом, с помощью которого измеряется размер частиц. К примеру, характерным размером частиц может служить диаметр описывающей частицу сферы при использовании сита с круглыми отверстиями или диаметр сферической частицы равной массы при взвешивании и т.д.

Как отмечалось выше, в полидисперсных системах присутствуют частицы различных размеров. Для количественного описания полидисперсных систем, т.е. сколько каких частиц в них имеется, используются *распределения частиц по размерам*. Понятие распределения по размерам проиллюстрируем на следующем примере.

Будем считать, что имеется 100 кг щебня, содержащего камни различных размеров. Будем также считать, что имеется набор сит с отверстиями различных размеров: 1, 2, 3 и 4 см.

Просеем щебень через самое крупное сито, с размерами отверстий 4 см. При этом через отверстия пройдут частицы с размерами менее 4 см, а частицы с размерами более 4 см останутся в сите. После этого измерим массу частиц, оставшихся в сите. Допустим, эта масса равна 5 кг. Это означает, что 5 процентов от всей массы щебня составляют частицы с размером более 4 см.

Камни, прошедшие сквозь самое большое сито просеем еще раз через сито с размером отверстий 3 см. При этом через отверстия пройдут частицы с размером менее 3 см, а камни с размерами от 3 до 4 см останутся в сите. После этого измерим массу частиц, оставшихся в сите. Допустим, эта масса равна 20 кг. Это означает, что 20 процентов от всей массы щебня составляют частицы с размером от 3 до 4 см.

Повторяя эту операцию для сит с размерами отверстий 2 и 1 см, получим, что, к примеру, масса частиц с размерами от 2 до 3 см составляет 40 процентов, а масса частиц с размерами от 1 до 2 см – 25 процентов от общей массы.

Взвесив частицы, прошедшие через самое малое сито, получим, что их масса, к примеру, равна 10 кг. Это означает, что частицы с размерами менее 1 см составляют 10 процентов от общей массы.

Указанные данные можно свести в одну таблицу (см. таблицу 3.1), которая называется *распределением массы частиц по размерам,* или *массовым распределением частиц по размерам*. Такое распределение частиц по размерам также часто называется *фракционным составом* дисперсной системы, а группа частиц с определенным диапазоном размеров – *фракцией*.

Таблица 3.1 – Распределение массы частиц по размерам.

Размер частиц, см	менее 1	от 1 до 2	от 2 до 3	от 3 до 4	более 4
Массовая доля частиц, %	10	25	40	20	5

Как видно из таблицы 3.1, имея 4 сита, дисперсную систему можно разбить на 5 фракций. В общем случае, имея k сит, систему можно разбить на k+1 фракций, причем чем больше число фракций, тем более точно описан фракционный состав дисперсной системы.

Таки образом, массовая доля x_{mi} частиц каждой фракции от общей массы дисперсной системы определяется выражением

$$x_{mi} = \frac{m_i}{\sum_i m_i}, \qquad (3.1)$$

где m_i – масса частиц i-й фракции, кг.

Помимо массового существуют и другие типы распределений частиц по размерам. Прежде всего это *распределение количества частиц по размерам*. В этом типе распределения доля количества частиц x_i, содержащихся в i-й фракции, от общего числа частиц в дисперсной системе определяется выраженим

$$x_i = \frac{N_i}{\sum_i N_i}, \qquad (3.2)$$

где N_i – количество частиц в i-й фракции.

Кроме того, существуют *распределение объема частиц по размерам* и *распределение поверхности частиц по размерам*. Доля объема частиц i-й фракции определяется формулой

$$x_{vi} = \frac{V_i}{\sum_i V_i}, \qquad (3.3)$$

где V_i – суммарный объем всех частиц *i*-й фракции, м^3.

Доля поверхности частиц *i*-й фракции определяется формулой

$$x_{si} = \frac{s_i}{\sum_i s_i}, \tag{3.4}$$

где s_i – поверхность частиц *i*-й фракции, м^2.

Если плотность ρ всех частиц системы одинакова, то их масса и объем связаны выражением

$$m_i = \rho v_i . \tag{3.5}$$

В этом случае массовое и объемное распределение частиц по размерам совпадают

$$x_{mi} = x_{vi} . \tag{3.6}$$

Приведенные типы распределений частиц по размерам связаны между собой выражениями

$$x_{si} = \frac{x_i s_{1i}}{\sum_i x_i s_{1i}}, \tag{3.7}$$

$$x_{vi} = \frac{x_i v_{1i}}{\sum_i x_i v_{1i}}, \tag{3.8}$$

$$x_{mi} = \frac{x_i m_{1i}}{\sum_i x_i m_{1i}}, \tag{3.9}$$

где s_{1i} – поверхность одной частицы *i*-й фракции, м^2;

v_{1i} – объем одной частицы *i*-й фракции, м^3;

m_{1i} – масса одной частицы *i*-й фракции, кг.

Распределение частиц по размерам позволяет вычислить ряд интегральных (т.е. характеризующих дисперсную систему в целом) величин.

Среднеарифметический размер частиц равен

$$\bar{d} = \sum_i x_i d_i . \tag{3.10}$$

Среднеквадратическое отклонение размера частиц от среднего значения определяется выражением

$$\sigma[d] = \sqrt{\sum_i x_i \left(d_i - \bar{d}\right)^2} . \tag{3.11}$$

Дисперсия размера частиц равна

$$D[d] = \left(\sigma[d]\right)^2 . \tag{3.12}$$

Отношение среднеквадратического отклонения размеров частиц к среднему значению называется *коэффициентом вариации размеров частиц*

0

$$\gamma[d] = \frac{\sigma[d]}{\bar{d}}. \qquad (3.13)$$

Указанную величину можно использовать в качестве критерия различия между монодисперсными и полидисперсными системами. Если значение коэффициента вариации мало (например, 0,02), то разброс размеров мал по сравнению со средним значением, и систему можно считать монодисперсной. Напротив, при больших значениях коэффициента вариации систему следует рассматривать как полидисперсную.

Недостатком указанных распределений частиц по размерам является то, что они зависят от разбиения по размерам. В качестве примера приведем следующий эксперимент.

Допустим, одна и та же дисперсная система была просеяна через малое количество сит с большим шагом изменения размеров ячеек и через большое количество сит с малым шагом изменения размеров ячеек. При этом в первом случае получилось распределение, содержащее небольшое количество фракций, содержащих большое количество частиц. Во втором случае получилось распределение, содержащее большое количество фракций с малым количеством частиц в каждой. Сравнивая эти два распределения, достаточно трудно понять, что они характеризуют одну и ту же систему, так как числа в распределениях будут разные.

В этой связи хотелось бы, чтобы численные значения в обоих распределениях были близки, а второе, более детальное, распределение уточняло первое, более грубое. Для решения этой задачи вместо доли частиц каждого размера используют *плотность распределения частиц по размерам*, которая определяется выражением

$$\omega_i = \frac{x_i}{\Delta d_i}, \qquad (3.14)$$

где Δd_i – разность между максимальным и минимальным размерами i-й фракции, м.

Для графического изображения распределений частиц по размерам служат *гистограммы*. Гистограмма представляет собой совокупность вертикальных столбцов, высоты которых равны плотностям распределения частиц фракций, а горизонтальное положение и ширина определяются диапазоном размеров частиц фракций. В качестве примера в таблице 3.2 представлено распределение частиц по размерам, а на рисунке 3.1 – его гистограмма.

Таблица 3.2 – Плотность распределения частиц по размерам.

Диапазон размеров, мкм	0 – 2	2 – 4	4 – 6	6 – 8
Доля частиц фракции, %	10	20	60	10
Плотность распределения, мкм$^{-1}$	0,05	0,1	0,3	0,05

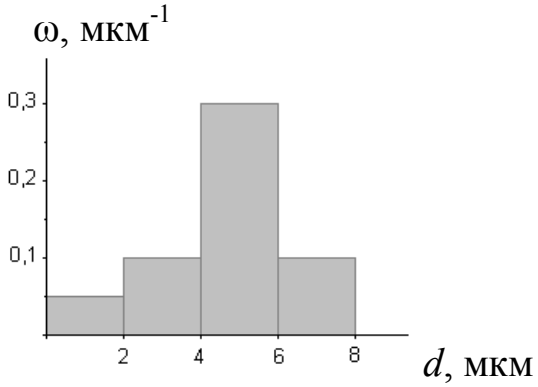


Рисунок 3.1 – Гистограмма распределения частиц по размерам.

В практических расчетах, как правило, считают, что все частицы фракции имеют одинаковый размер, равный среднему. Например для фракции 2 – 4 мкм размер всех частиц принимается равным 3 мкм. Поэтому в дальнейшем, где это не будет оговорено особо, будем характеризовать каждую фракцию дисперсной системы средним размером частиц.

Пример решения задачи.

1. *Задание.* Распределение количества сферических пузырьков по размерам представлено в таблице 3.3. Перевести его в объемное распределение пузырьков по размерам.

Таблица 3.3 – Распределение количества пузырьков по размерам.

Диаметр пузырьков, мм	1	3	5
Количество пузырьков, %	70	20	10

Решение. Для пересчета количественного распределения в объемное воспользуемся формулой (3.8)

$$x_{vi} = \frac{x_i v_{1i}}{\sum_i x_i v_{1i}}.$$

Вычислим объемы одного пузырька каждой фракции по формуле

$$v_{1i} = \frac{1}{6}\pi d_i^3 .$$

0

Подставляя численные значения из таблицы 3.3, получаем

$$v_{11} = \frac{1}{6}\pi\left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 0{,}52 \cdot 10^{-9}\ м^3,$$

$$v_{12} = \frac{1}{6}\pi\left(3 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 1{,}40 \cdot 10^{-8}\ м^3,$$

$$v_{13} = \frac{1}{6}\pi\left(5 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 6{,}50 \cdot 10^{-8}\ м^3.$$

Подставляя из таблицы доли количества частиц каждой фракции, определяем объемные доли

$$x_{v1} = \frac{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}037,$$

$$x_{v2} = \frac{0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}290,$$

$$x_{v3} = \frac{0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}}{0{,}7 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} + 0{,}2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-8} + 0{,}1 \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-8}} = 0{,}673.$$

Полученное объемное распределение приведено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Объемное распределение пузырьков по размерам.

Диаметр пузырьков, мм	1	3	5
Объемная доля, %	3,7	29	67,3

Задачи.

1. При сгорании твердого топлива образовались частицы дыма с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить гистограмму распределения частиц дыма по размерам.
2. В сырьевом резервуаре находится водонефтяная эмульсия, характеризующаяся распределением капель воды по размерам, представленным в таблице 8.1. Определить среднеарифметический диаметр капель воды.
3. При распылении жидкости форсункой образуются капли, распределение по размерам которых представлено в таблице 8.1. Определить среднеквадратическое отклонение размеров капель от среднего значения.
4. В фильтр поступает суспензия с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе фильтрации было отделено 95% частиц с размером 1 мм. Построить распределение частиц суспензии по размерам после фильтрации.
5. Порошок с распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1, смешивается с порошком с размером частиц 100 мкм.

Полидисперсный порошок содержит $2 \cdot 10^{11}$ частиц, а монодисперсный – $3 \cdot 10^{11}$ частиц. Построить распределение частиц по размерам после смешения.

6. Эмульсия характеризуется распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1. Какую долю капель размером 5 мкм необходимо удалить, чтобы количество этих капель составляло 5% от общего числа оставшихся частиц. Построить распределение частиц по размерам после разделения.

4 Концентрация частиц в дисперсных системах

Помимо размеров частиц, важной характеристикой дисперсных систем является концентрация частиц дисперсной фазы.

Концентрацией дисперсной системы называется количество частиц дисперсной фазы, содержащихся в единице объема системы. Концентрация дисперсной системы определяется выражением

$$n = \frac{N}{V_{дс}}, \tag{4.1}$$

где N – количество частиц в дисперсной системе;

$V_{дс}$ – объем дисперсной системы, м^3.

Единицей измерения концентрации служит м$^{-3}$. Концентрация является удельной величиной и не зависит от объема дисперсной системы. Концентрация частиц также не зависит от размеров и формы частиц, а определяется исключительно их количеством в единице объема.

Величиной концентрации определяются объем дисперсной системы, приходящийся на одну частицу

$$V_{дс\,1} = \frac{1}{n}, \tag{4.2}$$

и среднее расстояние между дисперсными частицами

$$r = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}. \tag{4.3}$$

При малых концентрациях расстояние между частицами много больше, чем размеры самих частиц, т.е.

$$d << \frac{1}{\sqrt[3]{n}}. \tag{4.4}$$

Такие дисперсные системы называются *разбавленными*. В противном случае, т.е. при больших концентрациях, дисперсные системы называются *концентрированными*.

Если расстояние между частицами соизмеримо с размерами самих частиц, т.е.

$$d \approx \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \qquad (4.5)$$

то частицы мешают движению друг друга. Такие дисперсные системы называются *связнодисперсными*. Если расстояние между частицами достаточно для их свободного движения, то дисперсные системы называются *свободнодисперсными*.

Если дисперсная система содержит частицы различных размеров, то частицам каждого размера соответствует своя концентрация

$$n_i = \frac{N_i}{V_{дс}}, \qquad (4.6)$$

где N_i – количество частиц *i*-го размера в дисперсной системе.
Общая концентрация частиц дисперсной системы в этом случае равна сумме концентраций частиц отдельных размеров

$$n = \sum_i n_i . \qquad (4.7)$$

Общая концентрация и концентрация частиц отдельных размеров связаны выражением

$$n_i = x_i n . \qquad (4.8)$$

Следует различать концентрацию дисперсных частиц и концентрацию молекул. Когда говорят о молекулярной концентрации, то под частицами понимают молекулы или атомы, и вычисляют их количество в единице объема.

Примеры решения задач.

1. *Задание.* В аппарате объемом 10 м^3 в газовой фазе находится 10^6 капель жидкости. Определить концентрацию аэрозоля в аппарате.

Решение. Концентрация аэрозоля определяется выражением (4.1)

$$n = \frac{N}{V_{дс}} .$$

В данном случае объем дисперсной системы равен объему аппарата. Подставляя численные значения из исходных данных в выражение, получаем

$$n = \frac{10^6}{10} = 10^5 \ \text{м}^{-3}.$$

2. *Задание.* Суспензия объемом 1 м^3 и концентрацией твердых частиц 10^6 м$^{-3}$ разбавляется жидкостью объемом 4 м^3. Определить концентрацию дисперсной системы после разбавления.

Решение. В процессе разбавления дисперсной системы сохраняется полное количество твердых частиц N. Таким образом, концентрации дисперсной системы до и после разбавления будут равны

$$n_1 = \frac{N}{V_{дс1}},$$

$$n_2 = \frac{N}{V_{дс2}}.$$

Приравнивая полное количество частиц до и после разбавления, получаем

$$n_1 V_{дс1} = n_2 V_{дс2}.$$

Отсюда получаем выражение для концентрации дисперсной системы после разбавления

$$n_2 = n_1 \frac{V_{дс1}}{V_{дс2}}.$$

Объем дисперсной системы после разбавления равен сумме объемов дисперсный системы до разбавления $V_{дс1}$ и жидкости $V_{ж}$

$$V_{дс2} = V_{дс1} + V_{ж}.$$

После подстановки получаем окончательное выражение для концентрации дисперсной системы после разбавления

$$n_2 = n_1 \frac{V_{дс1}}{V_{дс1} + V_{ж}}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$n_2 = 10^6 \frac{1}{1+4} = 2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}.$$

Задачи.

7. Суспензия объемом 3 м^3 характеризуется концентрацией твердых частиц 10^7 м$^{-3}$. С течением времени из системы испарилось 0,5 м^3 дисперсионной среды. Определить концентрацию суспензии после испарения.

8. Две суспензии объемами 10 м^3 и 5 м^3 смешиваются. Концентрация твердых частиц в первой суспензии равна $5 \cdot 10^7$ м$^{-3}$, а во второй – $2 \cdot 10^7$ м$^{-3}$. Определить концентрацию частиц в смеси.

9. В дисперсной системе имеются частицы размером 1 мкм с концентрацией $4 \cdot 10^7$ м$^{-3}$ и частицы размером 3 мкм с концентрацией $1 \cdot 10^7$ м$^{-3}$. Вычислить среднее расстояние между частицами дисперсной системы.

5 Поверхность контакта фаз в дисперсных системах

Как отмечалось в разделе 1, в гетерогенных (в том числе дисперсных) системах фазы разделены между собой *поверхностью контакта фаз*. Расположение поверхности контакта фаз в гетерогенной и дисперсной системах приведено на рисунке 5.1.

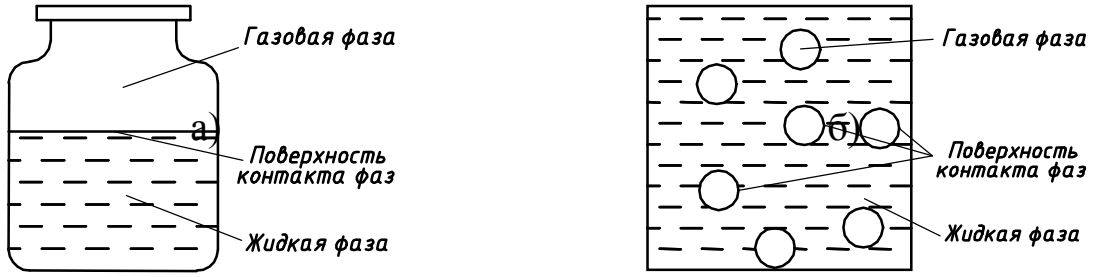


Рисунок 5.1 – Поверхность контакта фаз в гетерогенной (а) и дисперсной (б) системах "газ-жидкость".

В дисперсных системах каждая частица отделена от дисперсионной среды своей поверхностью контакта фаз. Полная поверхность контакта фаз в дисперсной системе определяется суммированием поверхностей всех частиц.

Для одной частицы сферической формы площадь межфазной поверхности равна

$$s = \pi d^2 . \qquad (5.1)$$

Для одной кубической частицы эта же площадь равна

$$s = 6d^2 . \qquad (5.2)$$

Суммарная площадь частиц *i*-й фракции определяется выражением

$$S_i = N_i s_i . \qquad (5.3)$$

Количество частиц *i*-й фракции можно вычислить с через концентрацию частиц и объем дисперсной системы

$$N_i = nV_{дс} x_i . \qquad (5.4)$$

С учетом выражения (3.4) площадь поверхности контакта фаз дисперсной системы будет равна

$$S = nV_{дс} \sum_i x_i s_i . \qquad (5.5)$$

Для частиц сферической формы выражение (3.5) примет вид

$$S = \pi n V_{дс} \sum_i x_i d_i^2 . \qquad (5.6)$$

Для частиц кубической формы выражение (3.5) примет вид

$$S = 6nV_{дс} \sum_i x_i d_i^2 . \qquad (5.7)$$

В инженерных расчетах для упрощения вычислений полидисперсная система зачастую рассматривается как монодисперсная, по свойствам аналогичная полидисперсной. В технологических задачах часто монодисперсная система должна обладать той же поверхностью контакта фаз, что и полидисперсная. Площадь межфазной поверхности в монодисперсной системе равна

$$S = nV_{дс}\pi\overline{d}_S^2 , \qquad (5.8)$$

где $\overline{d}_S$ – диаметр частиц монодисперсной системы, м.

Приравнивая площади поверхности монодисперсной и полидисперсной систем, получаем

$$nV_{дс}\pi\overline{d}_S^2 = nV_{дс}\sum_i x_i\pi d_i^2 . \qquad (5.9)$$

Откуда диаметр частиц монодисперсной системы равен

$$\overline{d}_S = \sqrt{\sum_i x_i d_i^2} . \qquad (5.10)$$

Указанный размер $\overline{d}_S$ называется *среднеповерхностным диаметром частиц* полидисперсной системы.

Примеры решения задач.

1. *Задание.* В емкости находится эмульсия объемом 10 м^3. Концентрация капель равна 10^{11} м$^{-3}$. Диаметр капель равен 15 мкм. Определить площадь поверхности контакта фаз.

Решение. Зная объем дисперсной системы $V_{дс}$ и концентрацию частиц n, можно определить количество частиц

$$N = nV_{дс} .$$

Площадь поверхности одной капли эмульсии равна

$$s = \pi d^2 .$$

Умножая количество частиц на площадь поверхности одной частицы, получаем суммарную площадь поверхности дисперсной системы

$$S = nV_{дс}\pi d^2 .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$S = 10^{11} \cdot 10 \cdot 3{,}14 \cdot \left(15 \cdot 10^{-6}\right)^2 = 707 \text{ м}^2.$$

2. *Задание.* Эмульсия характеризуется распределением капель жидкости по размерам, представленным в таблице 5.1. Определить среднеарифметический и среднеповерхностный диаметры капель эмульсии.

0

Таблица 5.1 – Распределение частиц по размерам.

Диаметр капель эмульсии, мкм	5	10	15
Доля от общего числа капель, %	60	30	10

Решение. Среднеарифметический диаметр капель найдем по формуле (3.9)

$$\overline{d} = x_1 d_1 + x_2 d_2 + x_3 d_3 .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\overline{d} = 0{,}6 \cdot 5 + 0{,}3 \cdot 10 + 0{,}1 \cdot 15 = 7{,}5 \cdot 10^{-6} = 7{,}5 \text{ мкм.}$$

Среднеповерхностный диаметр капель эмульсии вычислим по формуле (5.10)

$$\overline{d}_S = \sqrt{x_1 d_1^2 + x_2 d_2^2 + x_3 d_3^2} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\overline{d}_S = \sqrt{0{,}6 \cdot \left(5 \cdot 10^{-6}\right)^2 + 0{,}3 \cdot \left(10 \cdot 10^{-6}\right)^2 + 0{,}1 \cdot \left(15 \cdot 10^{-6}\right)^2} =$$

$$= 8{,}22 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 8{,}22 \text{ мкм.}$$

Задачи.

10. Распределение количества твердых частиц кубической формы по размерам представлено в таблице 8.1. Построить распределение поверхности контакта фаз по размерам частиц.

11. Распределение капель жидкости по размерам представлено в таблице 8.1. Определить, во сколько раз среднеповерхностный размер частиц отличается от среднеарифметического.

12. При конденсации паров на стенках емкости образовалось 10^7 полусферических капель с распределением по диаметрам, представленным в таблице 8.1. Определить поверхность контакта газовой и жидкой фаз.

13. При проведении массообменного процесса газ в виде пузырьков пропускается через слой жидкости. Распределение пузырьков газа по размерам представлено в таблице 8.1. Определить, какую долю от общей поверхности контакта газовой и жидкой фаз составляют пузырьки с размером меньше, чем 2,5 мм.

14. Распределение капель эмульсии по размерам представлено в таблице 8.1. Какую долю частиц размером 100 мкм необходимо удалить, чтобы поверхность уменьшилась на 10%.

15. Эмульсия характеризуется распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе отстаивания водонефтяной эмульсии осело 80% капель воды с размерами 100

мкм. Определить относительное изменение поверхности контакта жидкостей.

16. Суспензия характеризуется распределением частиц по размерам, представленным в таблице 8.1. В процессе фильтрации из суспензии удалены частицы с размером 200 мкм. Считая частицы кубическими, построить распределение поверхности частиц по размерам после фильтрации.

17. Распределение поверхности капель аэрозоля по размерам представлено в таблице 8.2. Считая капли сферическими, построить распределение количества частиц по размерам.

6 Объемы фаз в дисперсных системах

Объем дисперсной системы $V_{дс}$ состоит из объема дисперсной фазы (частиц) $V_ч$ и дисперсионной среды $V_{ср}$, в которой находятся частицы

$$V_{дс} = V_ч + V_{ср}\ , \qquad (6.1)$$

Так как дисперсная фаза образована множеством отдельных частиц, то объем дисперсной фазы равен сумме объемов всех частиц

$$V_ч = \sum_i v_{чi}\ , \qquad (6.2)$$

где $v_{чi}$ – объем частиц i-го размера в дисперсной системе, м^3.

Для частиц сферической формы объем равен

$$v_ч = \frac{1}{6}\pi d^3\ , \qquad (6.3)$$

где d – диаметр сферических частиц, м.

Если в системе присутствуют сферические частицы различных размеров d_i, то для каждого размера объем частицы равен

$$v_{чi} = \frac{1}{6}\pi d_i^3\ . \qquad (6.4)$$

Суммарный объем частиц i-й фракции равен

$$V_{чi} = N_i \frac{\pi d_i^3}{6}, \qquad (6.5)$$

где N_i – количество частиц i-го размера в дисперсной системе.

0

Используя распределение частиц по размерам, получим

$$V_ч = nV_{дс}\sum_i x_i \frac{\pi d_i^3}{6}. \qquad (6.6)$$

0

Как отмечалось выше, в инженерных расчетах для упрощения вычислений зачастую полидисперсная система рассматривается как монодисперсная, по свойствам аналогичная полидисперсной. Во многих задачах монодисперсная система должна обладать тем же объемом частиц, что и полидисперсная. Объем частиц (дисперсной фазы) в монодисперсной системе равен

$$V_ч = nV_{дс}\frac{\pi \bar{d}_V^3}{6}, \qquad (6.7)$$

где $\bar{d}_V$ – диаметр частиц монодисперсной системы, м.

Приравнивая выражения (6.6) и (6.7), можно найти значение размера частиц монодисперсной системы, при котором выполняется равенство объемов

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{\sum_i x_i d_i^3}\ . \qquad (6.8)$$

Найденный размер $\bar{d}_V$ называется *среднеобъемным диаметром частиц* полидисперсной системы.

Соотношение между объемами фаз в дисперсных системах принято определять с помощь *объемной доли дисперсной фазы*

$$e = \frac{V_ч}{V_{дс}}. \qquad (6.9)$$

Она показывает, какую часть от общего объема дисперсной системы составляет объем частиц. Объем дисперсионной среды при этом может быть определен выражением

$$V_{ср} = V_{дс}(1-e). \qquad (6.10)$$

Если известно распределение частиц по размерам, величину объемной доли дисперсной фазы можно найти по формуле

$$e = \frac{n}{6}\sum_i x_i \pi d_i^3\ . \qquad (6.11)$$

Пример решения задачи.

1. *Задание.* При распылении жидкости форсункой образуются капли с распределением по размерам, представленном в таблице 6.1 и концентрацией 10^7 м$^{-3}$. Найти объемные доли дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Таблица 6.1 – Распределение капель жидкости по размерам.

Диаметр частиц, мм	1	2	3
Количество частиц, %	20	50	30

Решение. Объем одной частицы фракции определяется формулой (6.4)

$$v_i = \frac{\pi d_i^3}{6}.$$

Подставляя численные значения из таблицы 6.1, получаем

$$v_1 = \frac{3{,}14 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 0{,}52 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3;$$

$$v_2 = \frac{3{,}14 \cdot \left(2 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 4{,}19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3;$$

$$v_3 = \frac{3{,}14 \cdot \left(3 \cdot 10^{-3}\right)^3}{6} = 1{,}41 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Суммарный объем частиц фракции вычисляется по формуле

$$V_i = nV_{дс}x_i v_i .$$

Подставляя численные значения и для определенности принимая объем дисперсной системы равным единице, получаем

$$V_1 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}52 \cdot 10^{-9} = 0{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$V_2 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 4{,}19 \cdot 10^{-9} = 2{,}1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$V_3 = 10^7 \cdot 1 \cdot 0{,}3 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-8} = 0{,}42 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3.$$

Объемная доля дисперсной фазы определяется выражением

$$e = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{V_{дс}}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$e = \frac{0{,}1 \cdot 10^{-2} + 2{,}1 \cdot 10^{-2} + 0{,}42 \cdot 10^{-1}}{1} = 0{,}064 .$$

Соответственно объемная доля дисперсионной среды равна

$$1 - e = 0{,}936 .$$

Задачи.

18. Распределение частиц пыли по размерам представлено в таблице 8.1. Считая частицы кубическими, определить среднеобъемный размер частиц пыли.

19. Распределение пузырьков пара по размерам представлено в таблице 8.1. Построить распределение объема дисперсной фазы по размерам.

20. При охлаждении из раствора выпали кубические кристаллы растворенного вещества общей массой 10 кг. Распределение

0

образовавшихся кристаллов по размерам представлено в таблице 8.1. Определить количество образовавшихся кристаллов.

21. В аппарате объемом 10 $м^3$ в газе содержится 10^8 капель жидкости с распределением по размерам, приведенным в таблице 8.1. Определить, какую долю от общего объема аппарата занимает жидкость.

22. Жидкость содержит твердые частицы кубической формы с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Для ее очистки от твердых частиц используется фильтр. Определить размеры отверстий фильтра, чтобы он задерживал 90% от массы механических примесей.

23. Для очистки газа от пыли используется фильтр, размеры отверстий в котором равны 0,1 мм. Распределение частиц пыли по размерам представлено в таблице 8.1. Считая частицы кубическими, определить, какая массовая доля пыли задерживается фильтром.

24. При распылении форсункой жидкости объемом 1 л образовался аэрозоль с распределением объема капель по размерам, представленным в таблице 8.3. Определить поверхность образовавшейся дисперсной системы.

25. Имеются две эмульсии с размерами капель 10 мкм и 20 мкм и концентрациями капель 10^{13} $м^{-3}$ и 10^{12} $м^{-3}$ соответственно. Определить объемную долю дисперсной фазы при смешении этих двух эмульсий в соотношении объемов 1:2.

26. Аэрозоль с распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1, обдувается высокоскоростным газовым потоком. При этом 40% капель с размером 1,0 мм распались на две одинаковые капли меньшего размера. Построить новое распределение капель аэрозоля по размерам.

27. Водонефтяная эмульсия с размером капель 100 мкм находится в резервуаре. При этом 90% капель попарно коагулировали. Определить относительное изменение поверхности контакта фаз в результате коагуляции.

28. Происходит смешение двух суспензий в соотношении объемов 1:3. Первая суспензия содержит частицы размером 0,5 мм, а вторая – 0,8 мм. Объемная доля частиц в первой суспензии равна 5%, а во второй – 2%. Считая частицы кубическими, определить их концентрацию в смеси.

29. Эмульсия с размером капель 100 мкм и концентрацией 10^9 $м^{-3}$ поступает в мешалку. В мешалке капли жидкости дробятся до размера 50 мкм. Определить концентрацию эмульсии после мешалки.

30. В емкости объемом 2 л и диаметром 20 см находится эмульсия воды в нефти с распределением по размерам, представленным в

таблице 8.1, и концентрацией 10^{13} м$^{-3}$. После осаждения капель эмульсия разделилась на две отдельные жидкости. Определить высоту отстоявшейся жидкости.

31. Дисперсная система содержит кубические частицы с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение поверхности контакта фаз по размерам.

32. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение объема капель по размерам.

33. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением по размерам, представленным в таблице 8.1. Построить распределение массы капель по размерам.

34. Дисперсная система содержит сферические капли с распределением объема по размерам, представленным в таблице 8.3. Построить распределение количества капель по размерам.

35. Аэрозоль содержит капли с распределением объема по размерам, представленным в таблице 8.3. Построить распределение поверхности капель по размерам.

36. Дисперсная система содержит сферические частицы с распределением поверхности контакта фаз по размерам, представленным в таблице 8.2. Построить распределение объема частиц по размерам.

37. Суспензия содержит кубические твердые частицы с распределением массы по размерам, представленным в таблице 8.4. Построить распределение количества частиц по размерам.

38. Эмульсия характеризуется распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1, и концентрацией 10^{12} м$^{-3}$. Определить объемную долю дисперсной фазы.

39. Суспензия характеризуется объемным распределением твердых частиц по размерам, представленным в таблице 8.3, и концентрацией 10^{11} м$^{-3}$. Считая твердые частицы сферическими, определить объемную долю дисперсионной среды.

40. В емкости находится эмульсия с распределением капель по размерам, представленным в таблице 8.1. Объемная доля дисперсной фазы равна 0,2. Со временем все капли с размерами более 50 мкм осели. Определить объемную долю дисперсной фазы после осаждения.

0

7 Удельная поверхность контакта фаз в дисперсных системах

Наряду с абсолютным значением поверхности контакта фаз очень часто используется *удельная поверхность контакта фаз*. Она представляет собой поверхность контакта фаз, приходящуюся на единицу объема. Можно выделить два основных типа удельной поверхности: удельную поверхность частиц (дисперсной фазы) и удельную поверхность дисперсной системы.

Удельная поверхность частиц представляет собой площадь межфазной поверхности, которая приходится на единицу объема частиц (дисперсной фазы), и определяется выражением

$$s_{уд.ч} = \frac{S}{V_ч}, \qquad (7.1)$$

где S – площадь поверхности контакта фаз, м^2;

$V_ч$ – объем частиц, м^3.

Удельная поверхность дисперсной системы представляет собой площадь межфазной поверхности, которая приходится на единицу объема дисперсной системы, и определяется выражением

$$s_{уд} = \frac{S}{V_{дс}}, \qquad (7.2)$$

где $V_{дс}$ – объем дисперсной системы, м^3.

Удельная поверхность частиц и дисперсной системы обычно измеряется в м^2/м^3 (здесь метры в числителе и знаменателе не сокращаются, для того чтобы подчеркнуть физический смысл удельной поверхности).

Разделив выражение (7.2) на (7.1), получаем, что соотношение между указанными удельными поверхностями обратно пропорционально соотношению между объемом дисперсной системы и объемом частиц

$$\frac{s_{уд}}{s_{уд.ч}} = \frac{V_ч}{V_{дс}}. \qquad (7.3)$$

Таким образом, удельная поверхность частиц и дисперсной системы связаны между собой соотношением

$$\frac{s_{уд}}{s_{уд.ч}} = e. \qquad (7.4)$$

Величина удельной поверхности частиц зависит только от их размеров и геометрической формы. Удельная поверхность дисперсной системы, помимо указанных факторов, зависит еще и от объема дисперсионной среды. К примеру, при разбавлении дисперсной

системы удельная поверхность частиц не изменяется, а удельная поверхность системы уменьшается.

Выясним, как зависит величина удельной поверхности от размеров частиц. Поверхность частицы пропорциональна квадрату ее характерного размера

$$S \sim d^2 . \qquad (7.5)$$

Объем частицы пропорционален кубу ее характерного размера

$$V_ч \sim d^3 . \qquad (7.6)$$

Составляя отношение поверхности частицы к ее объему, получаем, что величина удельной поверхности обратно пропорциональна характерному размеру частиц

$$s_{уд.ч} \sim \frac{1}{d}. \qquad (7.7)$$

Так, для частиц сферической формы величина удельной поверхности равна

$$s_{уд.ч} = \frac{6}{d}. \qquad (7.8)$$

Величина, обратная характерному размеру частиц, называется *дисперсностью*

$$D = \frac{1}{d}. \qquad (7.9)$$

Единицей измерения дисперсности является $м^{-1}$. Таким образом, величина удельной поверхности части пропорциональна дисперсности

$$s_{уд.ч} \sim D . \qquad (7.10)$$

К примеру, если частицы дисперсной системы дробятся на более мелкие, размер которых в 10 раз меньше исходных, то удельная поверхность частиц по порядку величины увеличится в 10 раз.

Пример решения задачи.

1. *Задание.* Мазут объемом 1 $м^3$ распыляется на капли, 60% от числа которых имеют размер 0,5 мм, а остальные – размер 1 мм. Определить удельную поверхность образовавшейся дисперсной системы, среднеповерхностный и среднеобъемный размеры капель.

Решение. Введем следующие буквенные обозначения для исходных данных

$V_ч = 1$ $м^3$; $d_1 = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; $x_1 = 0{,}6$;

$d_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $x_2 = 0{,}4$.

Так как рассматриваемая дисперсная система содержит капли различных размеров, то она является полидисперсной. Для нее площадь поверхности контакта фаз определяется выражением (5.5)

$$S = N\sum_i x_i \pi d_i^2 ,$$

где N – общее количество частиц распыленной жидкости.

Все значения, кроме N, содержатся в исходных данных. Определить количество образовавшихся капель можно исходя из выражения (6.6)

$$N = \frac{6V_ч}{\sum_i x_i \pi d_i^3}.$$

Подставляя в полученное выражение численные значения из исходных данных, получаем

$$N = \frac{6 \cdot 1}{0{,}6 \cdot 3{,}14 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^3 + 0{,}4 \cdot 3{,}14 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3} = 4{,}02 \cdot 10^9 .$$

Суммарная поверхность дисперсной системы равна

$$S = 4{,}02 \cdot 10^9 \left[0{,}6 \cdot 3{,}14 \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 0{,}4 \cdot 3{,}14 \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^2\right] = 6{,}94 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

Значение удельной поверхности на единицу объема дисперсной фазы определяется выражением (7.1)

$$s_{уд.ч} = \frac{S}{V_ч}.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$s_{уд.ч} = \frac{6{,}94 \cdot 10^3}{1} = 6{,}94 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Среднеповерхностный диаметр частиц определяется выражением (5.10)

$$\bar{d}_S = \sqrt{\sum_i x_i d_i^2} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\bar{d}_S = \sqrt{0{,}6 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^2 + 0{,}4 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 0{,}84 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Среднеобъемный диаметр частиц определяется выражением (6.8)

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{\sum_i x_i d_i^3} .$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\bar{d}_V = \sqrt[3]{0{,}6 \cdot \left(0{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^3 + 0{,}4 \cdot \left(1 \cdot 10^{-3}\right)^3} = 0{,}78 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

0

Задачи.

41. Распределение капель аэрозоля по размерам представлено в таблице 8.1. Объемная доля жидкости в аэрозоле равна 0,03. Определить удельную поверхность аэрозоля.
42. В 1 $см^3$ адсорбента находятся 10^{10} пор сферической формы. Распределение пор по размерам представлено в таблице 8.1. Определить удельную поверхность адсорбента.
43. Удельная поверхность аэрозоля равна 300 $м^2/м^3$. Объемная доля дисперсной фазы равна 0,01. Определить размеры капель аэрозоля и их концентрацию.

8 Исходные данные для решения задач

В таблицах 8.1 – 8.4 приведены распределения частиц по размерам, необходимые для решения задач. В качестве размеров для сферических частиц приведены диаметры, а для кубических – длина ребра.

Таблица 8.1 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), доля которых от общего числа равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
1	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011
2	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
4	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
5	0,01	0,02	0,05	0,08	0,11
6	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011
10	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
11	0,02	0,05	0,08	0,11	0,14
12	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
13	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
14	0,01	0,02	0,04	0,07	0,1
15	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
16	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
18	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
19	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
21	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
22	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

230	0,4	0,6	0,8	0,1	0,12
26	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0
30	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
31	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
32	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
33	0,05	0,07	0,09	0,11	0,12
38	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
40	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06
41	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
42	0,0005	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013

Таблица 8.2 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), доля поверхности которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
17	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
36	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18

Таблица 8.3 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), объемная доля которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
24	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
34	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
35	0,01	0,04	0,07	0,10	0,13
39	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07

Таблица 8.4 – Исходные данные для задач.

Номер задачи	Размер частиц (мм), массовая доля которых равна				
	10%	20%	30%	25%	15%
37	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4

Соотношения между некоторыми единицами измерения

Длина	**Площадь**	**Объем**
1 м = 10^3 мм	1 м^2 = 10^6 мм^2	1 м^3 = 10^9 мм^3
1 м = 10^6 мкм	1 м^2 = 10^{12} мкм^2	1 м^3 = 10^{18} мкм^3
1 м = 10^2 см		1 м^3 = 10^3 л

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное различие между истинными растворами и дисперсными системами?
2. Как изменяется величина удельной поверхности с уменьшением размеров частиц?
3. Что такое среднеповерхностный размер частиц?
4. Что такое среднеобъемный размер частиц?
5. Что такое дисперсность?
6. Удельная поверхность каких частиц больше: кубических или сферических?
7. Что такое поверхность раздела фаз?
8. Где находится поверхность раздела фаз в дисперсных системах?
9. Как вычислить средний размер частиц в дисперсных системах?
10. Что такое удельная поверхность частиц?
11. Как связаны между собой удельная поверхность частиц и дисперсной системы?
12. Какая величина может служить критерием различия между монодисперсными и полидисперсными системами?
13. Какая величина характеризует разброс размеров частиц относительно среднего?
14. Что такое концентрация частиц дисперсной системы?
15. Какие дисперсные системы являются концентрированными?
16. Что такое распределение частиц по размерам?
17. Как изменяется концентрация при смешении дисперсных систем?
18. В чем различие между гетерогенной и дисперсной системами?
19. В чем различие между гомогенной и гетерогенной системами?
20. В каких пределах может изменяться величина объемной доли дисперсной фазы?

Список рекомендуемой литературы

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Дисперсные системы и поверхностные явления.–М.: Наука, 1979.–200 с.
2. Зайончковский Я. Обеспыливание в промышленности.–М.: Стройиздат, 1969.–352 с.
3. Зимон А.Д. Мир частиц.–М.: Наука, 1988.–192 с.
4. Цетлин В.М. Аэрозоли в быту.–М.: Наука, 1978.–136 с.
5. Амелин А.Г. Туманы служат человеку.–М.: Изд. АН СССР, 1961.–112 с.