

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## ЭНЦИКЛОПЕДИЯ



**МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**ЭНЦИКЛОПЕДИЯ**

**MECHANICAL ENGINEERING**  
**Encyclopaedia**

Главный редактор академик РАН  
**К.В. Фролов**



# **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

## **ЭНЦИКЛОПЕДИЯ**

### **В Сорока томах**

---

#### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**ФРОЛОВ К.В.**

**Председатель редакционного совета**

**Члены совета:**

Белянин П.Н. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Колесников К.С. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Адамов Е.О., Анфимов Н.А., Асташов В.К., Бессонов А.П., Бюшгенс Г.С., Васильев В.В., Васильев Ю.С., Воронин Г.П., Глебов И.А., Долбенко Е.Т., Жесткова И.Н., Кирпичников М.П., Клюев В.В., Коптев Ю.Н., Ксенович И.П., Мартынов И.А., Митенков Ф.М., Новожилов Г.В., Носов В.Б., Образцов И.Ф., Панин В.Е., Паничев Н.А., Патон Б.Е., Пашин В.М., Платонов В.Ф., Пугин Н.А., Румянцева О.Н., Силаев И.С., Туполев А.А., Федосов Е.А., Фортов В.Е., Черный Г.Г., Шемякин Е.И.

Раздел IV  
РАСЧЕТ  
И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

---

Том IV-12  
МАШИНЫ И АППАРАТЫ  
ХИМИЧЕСКИХ  
И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ  
ПРОИЗВОДСТВ

Редактор-составитель академик АЕН РФ, д-р техн. наук  
**М.Б. Генералов**

Ответственный редактор д-р техн. наук  
**А.С. Тимонин**

Редакторы тома: **М.Б. Генералов, А.М. Кутепов, Ю.И. Макаров**  
(Особенности проектирования химического и нефтехимического оборудования.  
Машины и аппараты для механических процессов), **А.М. Кутепов, Д.А. Баранов**  
(Машины и аппараты для гидромеханических процессов. Машины и аппараты для  
массообменных процессов), **И.И. Поникаров, С.И. Поникаров** (Машины и аппараты  
для тепловых процессов), **А.С. Дудырев, И.А. Щуляк** (Химические реакторы),  
**В.К. Скуратов, Н.И. Басов** (Оборудование для переработки пластмасс и резины),  
**А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц** (Оборудование высокого давления)

УДК 621.01/03  
ББК 34.44  
М38

Авторы: М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев, С.В. Анаников, Д.А. Баранов, Н.И. Басов, П.С. Беляев, Б.В. Бердышев, М.Г. Беренгартен, В.К. Битюков, В.В. Битюкова, В.Н. Блиничев, С.М. Бражников, С.Н. Булатов, В.А. Булкин, А.Ю. Вальдберг, Г.Б. Векслер, А.Н. Веригин, А.А. Вещев, А.З. Вольнец, М.Г. Гайнуллин, А.Р. Герке, Г.М. Гончаров, Ю.И. Гусев, Ю.В. Гутин, И.В. Доманский, Б.Н. Дудко, А.С. Дудырев, Л.В. Ерохина, А.С. Жихарев, А.И. Зимин, В.В. Зобнин, А.А. Иванов, А.Г. Ишутин, Ю.В. Казанков, В.Г. Калыгин, И.Г. Каменщиков, А.В. Каталымов, А.С. Клинков, И.В. Кораблев, А.П. Корчагин, Б.Б. Кравец, Ю.В. Красицкий, А.М. Кузнецов, А.М. Кутепов, В.И. Лившиц, О.А. Лоншаков, Ю.И. Макаров, А.В. Малинов, А.А. Мошкин, С.А. Мошкина, В.Е. Мизонов, В.А. Миронов, В.И. Муштаев, Е.Я. Нейман, В.А. Немьтков, Г.А. Носов, В.Н. Оборин, А.В. Огурцов, А.Н. Остриков, В.Ф. Павлова, К.Б. Панфилович, А.А. Пахомов, О.А. Перельгин, В.Ф. Першин, А.А. Поворов, И.И. Поникаров, С.И. Поникаров, Ю.П. Попов, А.И. Пронин, С.В. Рачковский, С.П. Рудобашта, В.К. Скуратов, А.Р. Смышляев, Э.Ш. Теляков, А.С. Тимонин, С.А. Трифонов, В.М. Ульянов, В.Н. Федоров, И.И. Фелипчук, В.Г. Фролов, В.Ф. Фролов, И.В. Чепура, А.А. Шевченко, М.А. Шерышев, В.С. Шубин, И.А. Щупляк, В.И. Энтин, С.В. Энтин, В.М. Этингов

Рецензенты: И.М. Головных, В.Г. Жуков, А.Г. Лаптев, Р.М. Мальшев, В.А. Любартович, Е.А. Сериков, А.Ф. Туболкин

Рабочая группа Редакционного совета: К.С. Колесников, П.Н. Белянин, В.В. Васильев, В.К. Асташов, А.П. Бессонов, Н.Ф. Иванникова, Е.Т. Долбенко, И.Н. Жесткова, Г.М. Москвитин

Машиностроение. Энциклопедия / Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение.

М38

Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12 / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др.; Под общ. ред. М.Б. Генералова. 2004 – 832 с.; ил.

Рассмотрены вопросы обеспечения надежности и безопасности машин и аппаратов химических и нефтехимических производств при их проектировании.

Приведены конструкции и особенности расчетов оборудования для осуществления механических, гидромеханических, тепло-, массообменных и химических процессов, а также аппаратов и трубопроводов высокого давления.

УДК 621.01/03  
ББК 34.44

ISBN 5-217-03214-6(Т.IV – 12)  
ISBN 5-217-01949-2

© Издательство «Машиностроение», 2004

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> (М.Б. Генералов, А.М. Кутепов, Ю.И. Макаров) .....	10		
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	13		
<b>РАЗДЕЛ 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b> .....	14		
<b>ГЛАВА 1.1. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ</b> (М.Б. Генералов, А.М. Кутепов, Ю.И. Макаров) .....	14	<b>ГЛАВА 1.5. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ОТ КОРРОЗИИ</b> (А.А. Шевченко) .....	72
<b>ГЛАВА 1.2. НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ</b> .....	17	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	84
1.2.1. Прогнозирование надежности на стадии проектирования (В.Г. Калыгин) .....	17	<b>РАЗДЕЛ 2. МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> .....	86
1.2.2. Определение остаточного ресурса (В.С. Шубин) .....	19	<b>ГЛАВА 2.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ</b> (В.Н. Блиничев) .....	86
<b>ГЛАВА 1.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</b> .....	21	2.1.1. Дробилки .....	86
1.3.1. Технологические отходы химического производства и возможности их снижения (В.Г. Калыгин) ..	21	2.1.2. Оборудование для среднего измельчения .....	100
1.3.2. Основные аспекты безопасности (Ю.П. Попов) ..	23	2.1.3. Оборудование для тонкого измельчения .....	103
1.3.3. Наиболее важные технические решения по обеспечению безопасности оборудования (Ю.П. Попов) .....	26	<b>ГЛАВА 2.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ И ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	126
1.3.4. Неразрушающий контроль и диагностика как средства обеспечения безопасности (И.В. Кораблев) ..	32	2.2.1. Физико-механические свойства сыпучих материалов (А.В. Катыльмов) .....	126
<b>ГЛАВА 1.4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> (А.С. Тимошин) .....	37	2.2.2. Смесители (Ю.И. Макаров) .....	129
		2.2.3. Дозаторы, питатели (А.В. Катыльмов) .....	153
		2.2.4. Бункера и затворы (А.В. Катыльмов) .....	158
		<b>ГЛАВА 2.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ</b> (В.Е. Мизонов) .....	160
		1.4.1. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам .....	37
		1.4.2. Стали .....	40
		1.4.3. Чугуны .....	50
		1.4.4. Цветные металлы и сплавы .....	56
		1.4.5. Неметаллические материалы .....	58

2.3.1. Процесс классификации, его характеристики и критерии эффективности ..	160		
2.3.2. Механические и гидравлические классификаторы .....	163		
2.3.3. Пневматические классификаторы .....	167		
2.3.4. Магнитные классификаторы .....	174		
2.3.5. Электростатические классификаторы .....	176		
<b>ГЛАВА 2.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ (Ю.И. Гусев) .....</b>	<b>179</b>		
2.4.1. Грануляторы .....	179		
2.4.2. Таблеточные машины .....	193		
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>205</b>		
<b>РАЗДЕЛ 3. МАШИНЫ И АППАРАТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>207</b>		
<b>ГЛАВА 3.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>207</b>		
3.1.1. Отстойники (И.В. Чепура) .....	207		
3.1.2. Фильтры (Ю.В. Гутин) .....	218		
3.1.3. Центрифуги и сепараторы (Г.Б. Векслер) .....	234		
3.1.4. Гидроциклоны (Д.А. Баранов, А.И. Пронин, А.А. Иванов) .....	254		
3.1.5. Пеногасители (В.Н. Блиничев) .....	260		
3.1.6. Сепараторы для разделения парожидкостных систем (А.С. Жихарев) .....	262		
<b>ГЛАВА 3.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЫЛЕГАЗОВЫХ СИСТЕМ (Ю.В. Красовицкий) .....</b>	<b>265</b>		
3.2.1. Электрофильтры (А.А. Мошкин, С.А. Мошкина, В.И. Энтин, В.К. Битюков, Б.Б. Кравец) .....	265		
3.2.2. Тканевые фильтры (В.П. Александров, С.В. Энтин, А.В. Малинов, В.И. Энтин, В.К. Битюков) .....	272		
3.2.3. Фильтры с зернистыми, жесткими и полужесткими перегородками (А.Н. Остриков, В.К. Битюков, С.В. Энтин) .....	281		
3.2.4. Аппараты центробежного действия сухого типа (А.Ю. Вальдберг, С.В. Энтин, В.В. Битюкова, А.Н. Остриков) .....	289		
3.2.5. Пылеулавливающие аппараты мокрого типа (А.Ю. Вальдберг) .....	301		
3.2.6. Волокнистые фильтры (А.Ю. Вальдберг, И.Г. Каменьщиков, А.А. Мошкин, А.В. Огурцов) .....	313		
<b>ГЛАВА 3.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>319</b>		
3.3.1. Перемешивающие устройства (И.В. Чепура) ..	319		
3.3.2. Аппараты псевдоожуженного слоя (В.Ф. Фролов) .....	334		
3.3.3. Роторно-модуляционные аппараты (А.И. Зимин) .....	345		
3.3.4. Пенообразователи (В.Н. Блиничев) .....	350		
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>354</b>		
<b>РАЗДЕЛ 4. МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>358</b>		
<b>ГЛАВА 4.1. РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ .....</b>	<b>358</b>		
4.1.1. Кожухотрубчатые теплообменники (В.А. Булкин) .....	358		
4.1.2. Змеевиковые теплообменные аппараты (В.В. Алексеев) .....	369		
4.1.3. Теплообменники типа "труба в трубе" (В.А. Булкин) .....	376		
4.1.4. Аппараты воздушного охлаждения (О.А. Перельгин) .....	377		
4.1.5. Пластинчатые и пластинчато-ребристые теплообменники (С.И. Поникаров) .....	383		
4.1.6. Спиральные теплообменные аппараты (С.И. Поникаров) .....	389		
4.1.7. Теплообменные аппараты из неметаллических материалов (М.Г. Гайнуллин) .....	390		
<b>ГЛАВА 4.2. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ И СМЕСИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ .....</b>	<b>393</b>		
4.2.1. Периодически действующие регенеративные теплообменники (О.А. Лончаков) .....	394		
4.2.2. Непрерывно действующие регенеративные теплообменники (О.А. Лончаков) .....	400		

	4.2.3. Смесительные теплообменники ( <i>С.В. Рачковский</i> )	403			
<b>ГЛАВА 4.3.</b>	<b>ВЫПАРНЫЕ АППАРАТЫ</b>			<b>ГЛАВА 5.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ</b>	482
	( <i>С.В. Анаников</i> )	408		5.2.1. Сушильные полочные аппараты ( <i>С.П. Рудобашта</i> )	486
	4.3.1. Виды выпарного оборудования	409		5.2.2. Сушильные аппараты с вращающимся барабаном ( <i>В.М. Ульянов</i> )	487
	4.3.2. Расчет выпарных аппаратов	417		5.2.3. Распылительные сушилки ( <i>А.А. Пахомов</i> )	491
<b>ГЛАВА 4.4.</b>	<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ</b>	421		5.2.4. Сушильные ленточные и вальцеленточные аппараты ( <i>С.П. Рудобашта</i> )	504
	( <i>Э.Ш. Теляков</i> )			5.2.5. Сушильные аппараты взвешенного слоя ( <i>В.М. Ульянов</i> )	510
	4.4.1. Назначение, классификация, основы расчета	421		5.2.6. Сушильные циклонные аппараты ( <i>В.М. Ульянов</i> )	518
	4.4.2. Топливоно-сжигающие устройства технологических печей	422		5.2.7. Сушильные шахтные аппараты ( <i>С.П. Рудобашта</i> )	520
	4.4.3. Трубчатые печи	425		<b>ГЛАВА 5.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ</b>	
	4.4.4. Печи с вращающимися барабанами	430		( <i>Г.А. Носов</i> )	525
	4.4.5. Печи для обработки твердых материалов и расплавов	432		5.3.1. Кристаллизаторы для отверждения расплавов	527
	4.4.6. Шахтные многозонные печи	433		5.3.2. Кристаллизаторы с отводом теплоты через охлаждаемые поверхности	533
	4.4.7. Печи с кипящим слоем	434		5.3.3. Выпарные кристаллизаторы	539
<b>ГЛАВА 4.5.</b>	<b>ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ</b>			5.3.4. Вакуум-кристаллизаторы	543
	( <i>К.Б. Панфилович</i> )	434		<b>ГЛАВА 5.4. СУБЛИМАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ</b>	
	4.5.1. Принцип работы и элементы тепловых труб	434		( <i>А.З. Волынец, С.М. Бражников</i> )	550
	4.5.2. Применение тепловых труб и их конструкции	437		5.4.1. Общие сведения	550
	<b>ГЛАВА 4.6. ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ</b>	442		5.4.2. Вакуумная сублимационная аппаратура	553
	( <i>А.Р. Герке</i> )			<b>ГЛАВА 5.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕМБРАННЫХ И ЭЛЕКТРОДИФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ</b>	562
	4.6.1. Генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны)	442		5.5.1. Аппараты для обратного осмоса, ультра- и микрофльтрации ( <i>А.А. Поворов, Л.В. Ерохина</i> )	562
	4.6.2. Плазмохимические реакторы	446		5.5.2. Аппараты для диализа и электродиализа ( <i>А.А. Поворов, В.Ф. Павлова</i> )	574
	4.6.3. Примеры процессов, использующих плазменную технику	449		5.5.3. Аппараты для мембранного испарения и газовой диффузии ( <i>С.А. Трифонов</i> )	585
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	454			
<b>РАЗДЕЛ 5. МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ</b>		456			
<b>ГЛАВА 5.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ АБСОРБЦИИ, РЕКТИФИКАЦИИ И АДСОРБЦИИ</b>		456			
	5.1.1. Колонные аппараты для осуществления абсорбции и ректификации ( <i>В.С. Шубин, С.А. Трифонов</i> )	456			
	5.1.2. Оборудование для адсорбции ( <i>С.П. Рудобашта</i> )	468			



ГЛАВА 5.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ (С.Н. Булатов).....	588	7.2.2. Оборудование для литья под давлением (Ю.В. Казанков).....	681
5.6.1. Оборудование для жидкостной экстракции ...	588	ГЛАВА 7.3. ЭКСТРУЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	691
5.6.2. Твердофазные экстракторы .....	602	7.3.1. Экструдеры (В.К. Скуратов).....	691
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	611	7.3.2. Экструзионные агрегаты и их комплектующее оборудование (В.К. Скуратов).....	700
РАЗДЕЛ 6. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ .....	614	7.3.3. Оборудование для раздувного формования (Б.В. Бердышев, А.Р. Смышляев).....	702
ГЛАВА 6.1. ЖИДКОСТНЫЕ РЕАКТОРЫ (И.А. Щутяк).....	614	ГЛАВА 7.4. ПЕРЕРАБОТКА ЛИСТОВЫХ, ПЛЕНОЧНЫХ, ЖИДКИХ И ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	710
ГЛАВА 6.2. РЕАКТОРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКЦИЙ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ (В.Н. Федоров).....	621	7.4.1. Формовочные машины листовых и пленочных материалов (М.А. Шершнев).....	710
ГЛАВА 6.3. ТВЕРДОФАЗНЫЕ РЕАКТОРЫ (А.Г. Ишутин).....	629	7.4.2. Оборудование для ротационного и центробежного формования (В.Г. Фролов).....	718
ГЛАВА 6.4. РЕАКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ (И.В. Доманский).....	633	ГЛАВА 7.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ (В.А. Немытков, Г.М. Гончаров, В.Н. Оборин).....	722
6.4.1. Барботажные аппараты .....	633	7.5.1. Прием, хранение и подготовка резиновых смесей.....	722
6.4.2. Барботажные газлифтные аппараты.....	635	7.5.2. Изготовление листовых резиновых и резинотканевых материалов.....	726
6.4.3. Барботажные аппараты с механическими перемешивающими устройствами .....	637	7.5.3. Производство формовых и неформовых резинотехнических изделий.....	729
6.4.4. Барботажные аппараты с инжектированием и диспергированием газа струями жидкости .....	639	7.5.4. Производство конвейерных лент, плоских приводных и клиновых ремней.....	730
6.4.5. Пленочные аппараты.....	640	7.5.5. Производство рукавов.....	732
ГЛАВА 6.5. РЕАКТОРЫ ДЛЯ ИТЕРОФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ГАЗ-ТВЕРДОЕ ТЕЛО (М.Г. Беренгартен, В.В. Зобнин).....	647	7.5.6. Производство шин (А.А. Вещев).....	734
ГЛАВА 6.6. РЕАКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ-ТВЕРДОЕ ТЕЛО (А.Н. Веригин).....	657	ГЛАВА 7.6. ФОРМУЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛАСТМАСС И РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ.....	745
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	662	7.6.1. Оснастка, применяемая при формовании листовых и пленочных термопластов (М.А. Шершнев).....	745
РАЗДЕЛ 7. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС И РЕЗИНЫ .....	664	7.6.2. Формующий инструмент (В.А. Миронов).....	746
ГЛАВА 7.1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО (П.С. Белляев, А.С. Клинков, В.Ф. Першин).....	664		
7.1.1. Оборудование для измельчения.....	664		
7.1.2. Оборудование для смешения.....	665		
ГЛАВА 7.2. ПРЕССОВАНИЕ И ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ.....	672		
7.2.1. Прессовое оборудование для производства изделий из терморезистивных полимерных материалов (И.И. Фелищук).....	672		

<b>ГЛАВА 7.7. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ (А.А. Шевченко) . . . . .</b>	<b>756</b>	8.1.2. Расчет на прочность сосудов высокого давления (В.И. Лившиц, В.М. Этингов) . . . . .	<b>778</b>
7.7.1. Характеристика композиционных материалов . . . . .	756	<b>ГЛАВА 8.2. ТРУБОПРОВОДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (Е.Я. Нейман, Б.Н. Дудко) . . . . .</b>	<b>799</b>
7.7.2. Методы изготовления изделий . . . . .	757	8.2.1. Конструкции и материалы элементов трубопроводов . . . . .	801
7.7.3. Оборудование и оснастка для изготовления изделий из композиционных материалов . . . . .	760	8.2.2. Расчет на прочность элементов трубопроводов . . . . .	805
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>765</b>	<b>ГЛАВА 8.3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОСУДОВ И ТРУБОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (А.П. Корчагин) . . . . .</b>	<b>813</b>
<b>РАЗДЕЛ 8. ОБОРУДОВАНИЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ . . . . .</b>	<b>767</b>	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>821</b>
<b>ГЛАВА 8.1. СОСУДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ (В.И. Лившиц) . . . . .</b>	<b>767</b>	<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ . . . . .</b>	<b>822</b>
8.1.1. Конструктивное исполнение сосудов высокого давления . . . . .	770		

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

**История создания отрасли химического и нефтехимического машиностроения.** Химическое и нефтехимическое машиностроение как специализированная отрасль промышленности возникла в 1928–1933 гг. До этого оборудование для предприятий химического профиля либо закупалось за границей, либо изготовлялось на заказ на отдельных машиностроительных заводах, не специализировавшихся на производстве такого оборудования.

С 1926 г. проектирование аппаратов и машин для развивающейся химической промышленности сосредотачивается в проектной организации «Химстрой» и объем производства машин и аппаратов на отечественных машиностроительных заводах начинает медленно расти.

К 1928 г. объем продукции химической промышленности далеко не удовлетворял потребностей возрождающихся металлургической, нефтяной, угольной отраслей промышленности, сельского хозяйства и новых отраслей промышленности таких, как авиационная, электротехническая, автомобильная. Для организации управления производством химического и нефтяного машиностроения в 1930 г. был создан трест химического машиностроения, реорганизованный в 1931 г. в Объединение химического машиностроения (ВОСХИМ) [3, 4].

К 1938 г. отечественное химическое и нефтяное машиностроение практически полностью стало удовлетворять потребности развивающейся химической промышленности в оборудовании. На предприятиях химического и нефтяного машиностроения начали изготов-

лять сложное оборудование (турбокомпрессоры, центрифуги, колонны высокого давления и др.). К 1941 г. эта отрасль объединила 17 машиностроительных заводов, среди которых были такие крупные предприятия, как Уралхиммаш, Сумской машиностроительный завод, киевский завод «Большевик», фастовский завод «Красный Октябрь», московский завод «Компрессор» и др. Промышленность химического и нефтяного машиностроения избавилась от необходимости в технической помощи зарубежных специалистов и закупки сложного оборудования за рубежом.

С целью разработки новых технологий и оборудования для развивающихся отраслей химической промышленности создавались крупные отраслевые научно-исследовательские институты (ГИАП, НИИХИММАШ, НИИПМ, НИИШП, Криогенмаш и др.). Проектную разработку нового оборудования осуществляли такие проектные организации, как Гипрокаучук, Гипрогазоочистка, Гипрохим, Гипропласт и др.

Постепенно химическая промышленность, химическое и нефтяное машиностроение превратились в ведущие отрасли страны: были построены крупнейшие химические комбинаты и заводы по производству удобрений, каучука, пластмасс, инсектофунгицидов, различных химических продуктов, красителей и др., оснащенные современным оборудованием.

В 1965 г. производство химического и нефтегазоперерабатывающего оборудования было выделено в новую отрасль – химическое и нефтяное машиностроение.

За период с 1959 по 1970 гг. вступило в строй более 400 предприятий и крупных химических производств, работающих на отечественном оборудовании: Джамбульский, Кокандский суперфосфатные заводы, Березинский калийный комбинат, Стерлитамакский содовый завод, Ташкентский лакокрасочный завод, Саратовский химкомбинат, Красноярский завод искусственного волокна и многие другие химические объекты.

Таким образом в нашей стране сформировалась сеть заводов химического машиностроения, которые специализируются на производстве оборудования для химической, нефтехимической, нефте- и газоперерабатывающей отраслей промышленности. Многие предприятия являются крупными объединениями, в которые входят научно-исследовательские подразделения, конструкторские бюро и машиностроительные комплексы, способные разрабатывать и изготовлять оборудование любого уровня сложности. К таким предприятиям относятся в первую очередь ОАО «ДзержинскХИММАШ», ОАО «КурганХИММАШ», ОАО «ПензХИММАШ», ОАО «СтарорусскХИММАШ», ОАО «КурганХИММАШ», ОАО «Тамбовский завод химического машиностроения "Комсомолец"», ОАО «УралХИММАШ».

Наибольший вклад в развитие отрасли химического и нефтехимического машиностроения внесли следующие отраслевые институты: НИИхиммаш (Москва), ЛенНИИхиммаш, ДзержинскНИИхиммаш, ИркутскНИИхиммаш, СеверодонецкНИИхиммаш, УкрНИИхиммаш, ВНИИнефтемаш, ГИАП, НИИОгаз, ГИПРОгазоочистка, ГИПРОпласт, ГИПРОхим, НИИОгаз, НИИПМ, НИИШП, НИИУИФ и ряд других.

Развитие химической промышленности и промышленности химического машиностроения, расширение научно-исследовательских работ в отраслевых НИИ и конструкторских разработок в проектных организациях потребовало подготовки соответствующих специалистов: технологов, механиков, конструкторов. Подготовка инженеров-механиков по химическому оборудованию была начата в 1920 г. в Московском химико-технологическом институте им. М.И. Менделеева на механическом факультете. В 1931 г. этот факультет был преобразован в Московский институт инженеров химического машиностроения, который в 1933 г. был переименован в Московский ин-

ститут химического машиностроения (МИХМ), в 1933 г. – в Московскую государственную академию химического машиностроения (МГАХМ), а в 1997 г. – в Московский государственный университет инженерной экологии (МГУИЭ).

МИХМ до 1958 г. был единственным в стране специализированным вузом по подготовке инженеров-механиков, конструкторов и научных работников для предприятий химической промышленности, химического и нефтяного машиностроения, НИИ и проектных организаций химического профиля. Особенность обучения инженеров широкого профиля по машинам и аппаратам химических производств в этом вузе состояла в тесной взаимосвязи механической и технологической подготовок. Необходимость расширения и улучшения подготовки специалистов химического профиля обусловила создание в десятках вузов страны кафедр по машинам и аппаратам химических производств, особенно в местах размещения химических предприятий. Большую методическую и практическую помощь этим вузам оказал МИХМ.

Создание особой научной школы подготовки инженеров-механиков по машинам и аппаратам химических производств в МИХМе – большая заслуга выдающихся ученых страны, работающих в нем в разные годы, таких как П.Л. Капица, И.И. Артоболевский, М.В. Кирпичев, Я.М. Колотыркин, Н.М. Караваев, В.П. Беляков, С.З. Рогинский, А.В. Лыков, Б.К. Климов, А.А. Гухман, А.Г. Горст, А.Н. Плановский, А.Г. Касаткин, С.Н. Шорин, И.Я. Клинов, И.П. Усюкин и др.

Многие научные и конструкторские проблемы решены специалистами высших учебных заведений, среди которых следует отметить: Московский государственный университет инженерной экологии (МГУИЭ–МИХМ), С.-ПГТИ (технологический институт), Казанский ГТУ, Тамбовский ГТУ, Ярославский ГТУ и ряд других.

**Тенденции развития и совершенствования химического и нефтехимического машиностроения.** Можно выделить следующие основные тенденции в совершенствовании и развитии машин и аппаратов химических производств:

увеличение единичных мощностей установок, машин и аппаратов и улучшение их технико-экономических показателей;

использование рабочих процессов, основанных на новых физических явлениях;

расширение диапазонов рабочих параметров (давления, температуры, скоростей рабочих сред, движения рабочих органов и др.);

более широкое использование при изготовлении нестандартных изделий стандартных деталей и узлов, стандартизованных рядов параметров химического оборудования, рациональных методов его изготовления, монтажа и ремонта;

создание гибких производственных систем с широким использованием компьютерной техники и средств автоматизации;

более широкое применение САПР при проектировании, поиске оптимальных геометрических и режимных параметров оборудования, рациональных методов его изготовления, монтажа и ремонта;

поиск новых конструкционных материалов и способов упрочнения традиционных конструкционных материалов;

применение новых технологий изготовления оборудования, более совершенных методов контроля качества его изготовления и диагностики состояния при эксплуатации;

проведение сертификации выпускаемой продукции;

повышение экологичности химического оборудования;

создание оборудования для ресурсосберегающих безотходных технологий;

улучшение дизайна выпускаемой продукции.

**Назначение, области применения и особенности эксплуатации машин и аппаратов химических и нефтехимических производств.** Машин и аппараты химических и нефтехимических производств представляют собой комплекс механизмов и конструкций, предназначенных для проведения технологических процессов в соответствии с заданной программой с целью получения потребительского товара или полупродукта. Протекающие в них технологические процессы носят обычно сложный характер: на предмет труда помимо механического воздействия может накладываться один или совокупность процессов химической технологии (химическое превращение, межфазовый массообмен, нагрев или охлаждение, изменение агрегатного состояния вещества и т.д.).

Особенностью машин и аппаратов химических производств является то, что технологические процессы в них могут протекать при

очень низких (близких к абсолютному нулю) и высоких (до 5000 °С) температурах, больших давлениях (свыше 200 МПа) и глубоком вакууме, в агрессивных и взрывоопасных средах. Кроме того, они работают со средами различного агрегатного состояния: газ – газ, газ – жидкость, газ – твердое вещество, жидкость – жидкость, жидкость – твердое вещество, твердое вещество – твердое вещество.

Все это обуславливает необходимость принятия при проектировании оборудования ряда специфических конструктивных решений, использования практически всех известных конструкционных материалов (металлов, сплавов, пластмасс, керамики, стекла, дерева, полимеров), обеспечивающих надежность и экологическую защищенность конструкций.

Химическое производство включает стадии подготовки сырья, химического превращения, выделения целевых продуктов, обезвреживания и утилизацию отходов производства. Каждая из них может содержать соответствующее количество разнородных процессов: механических, гидродинамических, тепловых, массообменных, химических, биохимических. Современное химическое производство отличается многостадийностью, энергонасыщенностью, материалоемкостью, большой протяженностью трубопроводных и кабельных коммуникаций, широким использованием компьютерной техники и средств автоматизации.

Ввиду многообразия технологических процессов, используемых в химических и нефтегазоперерабатывающих производствах, а также условий их проведения продукция химического и нефтяного машиностроения, пожалуй, как ни одна из отраслей машиностроения, отличается огромным числом изделий, выпускаемых как серийно, так (часто) и индивидуально.

Следует отметить, что химическое оборудование широко используется в пищевой, горнорудной, угольной, металлургической, бумажной, микробиологической, медицинской и других отраслях промышленности.

**Классификация оборудования для химических и нефтехимических производств.** В технической литературе по процессам и аппаратам химической технологии часто используется классификация химического оборудования с использованием следующих признаков [1, 3]:

по организационно-технической структуре процессов – оборудование периодических и непрерывных процессов;

по кинетическим закономерностям, т.е. по процессуальному признаку – оборудование для механических, тепловых, массообменных, химических процессов. В свою очередь каждый из этих классов делится по процессуальному признаку на группы, которые в свою очередь по конструктивному признаку делятся на подгруппы. Например, к классу оборудования механических процессов относятся группы измельчителей, классификаторов, дозаторов и питателей, смесителей, грануляторов, прессов, а к группе измельчителей – подгруппы щековых, конусных, валковых, молотковых и других измельчителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов Д.А.** и др. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 1, 2. / Под ред. А.М. Кутепова. М.: Логос, 2000. 480 с.
2. **Генералов М.Б.** От МИХМа к МГУИЭ. Страницы истории. Учебное пособие. М.: МГУИЭ, 2000. 292 с.
3. **Плановский А.Н., Николаев П.И.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: 1987. 496 с.
4. **Развитие химической промышленности в СССР (1917–1980 гг.)** / Под ред. Л.А. Костандова и Н.М. Жаворонкова. М.: Наука, 1984. 277 с.

## РАЗДЕЛ I

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

---

*Химическая система* – совокупность физико-химических процессов, происходящих в системе, и средств для их реализации. Химическая система включает: собственно химический процесс, аппарат для его реализации, экобиозащитный узел (блок), средства для контроля, управления и связи основного и вспомогательного процессов. Соответствующие промышленные процессы протекают в так называемых *химико-технологических системах*, каждая из которых представляет собой совокупность процессов и аппаратов, объединенных в единый производственный комплекс для выпуска продукции различного назначения.

Цель проектирования химико-технологических систем – не только достижение требуемой производительности и качества получаемой продукции, но и обеспечение экологической и технологической безопасности эксплуатации и обслуживания. Решение задач разработки безопасных химико-технологических систем реализуется в ходе системного инженерно-конструкторского проектирования системы автоматизированного проектирования (САПР) [11].

### Глава 1.1

#### ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Эффективность и современный технический уровень машин и аппаратов химических и нефтяных производств, как и любой другой промышленной продукции, определяется группой показателей качества [1, 15]: показателями назначения, надежности, безопасности, транс-

портбельности, эргономичности, экономическими, эргономическими, а также технической эстетики, патентно-правовыми и экологическими. При проектировании и изготовлении изделий используется теория управления качеством [18].

Обоснование выбора номенклатуры показателей качества изделия проводится с учетом следующего: назначения и условий использования продукции; анализа требований потребителя; задач управления качеством продукции; основных требований к показателям качества продукции.

Для качественного функционирования изделий первостепенное значение имеют показатели назначения, надежности, технологичности, унификации и экономические.

Для обеспечения качества продукции требуются: необходимая материальная база (покупные изделия, материалы, технологическое и испытательное оборудование, средства измерения, помещения, транспортные средства и т.д.); квалифицированный персонал, заинтересованный в хорошей работе (человеческий фактор); глубоко продуманная организационная структура и четкое управление предприятием в целом и управление качеством в частности.

Для проверки фактического соответствия поставляемой продукции показателям качества используются различные организационно-технические процедуры, формы и методы их проведения: измерения, контроль, диагностика, испытания, анализ причин брака, отказов, рекламаций и др. Все эти процедуры выполняются, как правило, разработчиком и изготовителем продукции или по их заказу сторонней организацией.

Необходимость обеспечения объективности и достоверности информации о качестве продукции обусловила широкое распространение сертификации ее соответствия. Особенностью сертификации в отличие от других видов проверок является то, что она осуществляется третьей стороной, независимой как от изготовителя, так и от потребителя.

Сертификация представляет собой процесс, осуществляемый ее участниками в определенной системе по выбранной схеме и предусматривающий выполнение ряда этапов и процедур, перечень, последовательность выполнения и содержание которых регламентируются стандартами, правилами и порядками.

*Систему сертификации* обычно составляют: центральный орган (ЦОС), совет по сертификации различных видов объектов, комиссия по апелляциям; правила и порядок проведения сертификации; нормативные документы, на соответствие которым производится сертификация; процедуры (схемы) сертификации; порядок инспекционного контроля.

ЦОС осуществляет управление системой и надзор за ее деятельностью, формирует совет по сертификации и комиссию по апелляции, может передавать свое право на проведение сертификации другим органам.

Работы по сертификации проводят органы по сертификации и испытательные лаборатории, которые могут входить в систему или быть самостоятельными подразделениями, услугами которых пользуется центральный орган.

Регистрацию систем сертификации осуществляет Госстандарт РФ как национальный орган по сертификации. Основной структурной составляющей Госстандарта в области сертификации является Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации (ВНИИС), служащий научно-методическим центром наиболее крупной и разветвленной системы *обязательной сертификации ГОСТ Р*.

Если система сертификации в своей практике применяет стандарты, правила и процедуры, относящиеся к продукции (процессам, услугам) определенного вида, занимается доказательством соответствия именно этих объектов, ее называют *системой сертификации однородной продукции*. Несколько таких систем могут входить в общую для них систему сертификации. Наиболее характерный пример такой общей системы – система сертификации ГОСТ Р.

Основными отечественными стандартами в области сертификации систем качества в Регистре систем качества являются: ГОСТ Р 40.002–2000 «Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Основные положения»; ГОСТ Р 40.003–2000 «Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Порядок проведения сертификации систем качества и сертификации производств»; ГОСТ Р 40.005–2000 «Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Инспекционный контроль сертифицированных систем качества и производств».

Проектирование, изготовление и пуск нового оборудования связаны со значительными затратами материальных и трудовых ресурсов, поэтому они должны вестись по проектам, обеспечивающим следующее:

реализацию и учет последних достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта;

внедрение высокопроизводительного, энергосберегающего оборудования и агрегатов большой единичной мощности;

рациональное использование природных ресурсов, комплексное использование сырья и материалов, безотходную энергосберегающую технологию производства;

автоматизацию и механизацию функционирования машин и аппаратов.

В большинстве случаев химическое оборудование работает в условиях агрессивных сред, высоких температур и давлений, при переработке взрывоопасных и ядовитых сред, поэтому необходимо при проектировании решать проблемы охраны окружающей среды, применения новых материалов, обеспечения повышенной надежности и безопасности.

При проектировании машин и аппаратов должны выполняться требования следующих стандартов: Единые системы конструкторской документации (ЕСКД); Единые системы технологической документации (ЕСТД); Единые системы допусков и посадок (ЕСДП); Единые системы защиты от коррозии и старения материалов и изделий (ЕСЗКС); Система стандартов по безопасности труда (ССБТ); Правила Госгортехнадзора России и др.

Стандартизованы ряды параметров функционирования и характеристик химического оборудования: давления, температуры, площадей поверхности теплообмена, диаметров и т.д. Разработаны ГОСТы на нормы и методы расчета наиболее часто используемых машин и



аппаратов и их основных элементов (обечаек, фланцев, лап, лазов, уплотнений, опор и др.), на термины, используемые в расчетно-пояснительных записках. Кроме того, нормативными документами являются отраслевые стандарты соответствующих отраслей.

Разработка конструкторской документации осуществляется в соответствии с ГОСТ 2.103. Она включает следующие этапы: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочий проект. Несмотря на различие задач, решаемых на отдельных этапах проектирования, имеются общие методы их решения. К таким методам относятся конструктивная преемственность, трансформация и инверсия, эвристика [1, 4].

**Конструктивная преемственность при проектировании** выражается в использовании всего опыта, накопленного в машиностроении вообще и в химическом машиностроении в частности. Она не является простым или масштабным переносом той или иной систем известной конструкции машины или аппарата, так как учитывает возможность использования в разрабатываемой конструкции новых, более совершенных технических средств (комплектов изделий, конструкционных материалов, технологий изготовления, методов упрочнения и др.). От конструктора требуются глубокие знания по оборудованию проектируемого типа, условиям его эксплуатации, а также анализ недостатков по отзывам и рекламациям предприятий и потребителей аналогичного оборудования. При этом важное значение имеют сведения, содержащиеся в справочной литературе, каталогах, архиве конструкторского бюро по оборудованию данного типа, в отечественной и зарубежной технической литературе, в поисковых НИР в отрасли по технологиям, в которых будет использоваться разрабатываемое изделие.

**Эвристика** – метод генерации идей при обсуждении свойств прототипа создаваемой машины или аппарата, ее отдельных функциональных систем или элементов. Для обсуждения привлекаются компетентные специалисты, перед которыми ставится определенная задача по вопросам функционирования и конструкции вновь создаваемого оборудования. Их высказывания фиксируются, затем анализируются. Анализ используется для принятия решения по одному или нескольким вариантам разрабатываемого оборудования. Если число предлагае-

мых решений по конструкции разрабатываемого изделия большое, то используется упорядоченный поиск, позволяющий найти рациональное решение.

Процесс создания изделия включает три взаимосвязанных процесса: проектирование, производство и эксплуатацию. Современная тенденция выпуска конкурентноспособной продукции определила новую стратегию создания изделий машиностроения. Вместо последовательного перехода от проектирования к изготовлению процесс проектирования изделия стали вести параллельно с разработкой технологии его изготовления, которая вносит коррективы в проектируемую конструкцию с учетом возможностей машиностроительной базы, наличия соответствующих конструкционных материалов и готовых деталей, удобства обработки отдельных деталей, сборки узлов и стоимости изготовления [18].

Только после согласования проектной и технологической документации приступают к производству изделия. Технологическая подготовка производства (ТПП) занимает промежуточное положение между проектированием и технологией изготовления. Основными функциями ТПП являются: обеспечение технологичности конструкции изделия; разработка технологических процессов; проектирование и изготовление средств технологического оснащения; управление процессом ТПП.

Особенность проектирования химического оборудования связана с тем, что в большинстве машин и аппаратов химических производств протекают сложные механические, гидродинамические, массообменные, тепловые и химические процессы. Они предъявляют определенные требования к конструкции оборудования и режиму его работы. Поэтому необходимо знать закономерности процессов, протекающих в оборудовании проектируемого типа, которые можно найти в технической литературе [1, 6, 11] или установить их путем исследований протекающего процесса в лабораторной модели оборудования разрабатываемого типа. Наиболее удобной формой представления закономерностей процесса является его математическая модель, которая позволяет проводить оптимизацию основных параметров процесса [11].

Результаты исследования опытной модели изделия, промышленной эксплуатации опытной партии нового изделия, анализа его отказов и рекламаций, поступивших от потре-

бителя, используются для внесения соответствующих коррективов в окончательную конструкторскую документацию.

## Глава 1.2

### НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

#### 1.2.1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Надежность** – свойство объекта сохранять во времени значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции. Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может проявляться через безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость как в отдельности, так и через определенное сочетание этих свойств для объекта в целом или для его частей.

**Значение надежности [2].** Решение практических задач теории надежности применительно к объектам химического машиностроения и смежных отраслей имеет многолетнюю историю и в то же время играет огромную роль в решении центральной задачи – повышения качества выпускаемой продукции.

Развитие научно-технического прогресса требует решения на высоком уровне вопросов проектирования, изготовления, испытания, доводки и эксплуатации машин и агрегатов химических производств и обеспечения их надежности на всех этапах жизненного цикла.

Наука о надежности получила бурное развитие в 50–60-е годы XX века в результате решения больших экономических проблем и обеспечения безопасности работы человека в этих условиях.

В химическом машиностроении и родственных отраслях проявились следующие характерные черты:

большая единичная мощность машин и агрегатов (колонны синтеза аммиака производительностью 1360 т/сутки, оборудование производства полиэтилена высокого давления – 150...180 тыс. т/год, аппараты переработки нефти – 6 млн. т/год и др.).

сложность технологических систем химического производства, связанная с комплексной переработкой сырья;

интенсификация процессов, проводимых в агрегатах;

объединение нескольких химических и смежных производств общими материальными и энергетическими потоками.

В этих условиях каждый случай непредвиденной остановки производства (авария, отказ) вызывает огромные убытки.

Большая единичная мощность машин и агрегатов, обработка в них пожароопасных, взрывоопасных и токсичных сред предъявляют к ним повышенные требования по обеспечению безопасности. Отказы оборудования в этих условиях могут привести не только к экономическим, но и, в большей степени, к экологическим и социальным потерям.

Оценку надежности оборудования и его элементов можно производить двумя путями: статистической обработкой экспериментальных данных о надежности и аналитическим вероятностным представлением закономерностей химических процессов, протекающих в объектах. Следует иметь в виду, что аналитическая оценка надежности обходится намного дешевле экспериментальной.

Проблема повышения надежности оборудования решается разработкой методов прогнозирования показателей его надежности на стадии проектирования. Определение количественных характеристик при проектировании позволяет оценить принятие технических решений, выбрать оптимальные варианты конструктивных исполнений отдельных агрегатов и машин и всего производства, конструировать производство с заданным уровнем надежности, т.е. управлять формированием его надежности при создании. На стадии изготовления надежность должна обеспечиваться применяемой технологией изготовления и, кроме того, может конструктивно и технологически совершенствоваться. На стадии эксплуатации надежность должна поддерживаться за счет разработки эффективной системы технического обслуживания и ремонта. На этом этапе могут проводиться успешные работы по модернизации, в результате чего надежность оборудования может быть повышена.

Для того чтобы объективно сравнивать различные типы и образцы машин и аппаратов по надежности, задаваться необходимым уровнем их надежности и осуществлять контроль за ним при производстве, испытаниях и эксплуатации, необходимо располагать количественными характеристиками (показателями) надежности.

При анализе надежности необходимо различать объекты невосстанавливаемые и восстанавливаемые в условиях эксплуатации. Критерии оценки этих объектов будут различными. Большинство химического оборудования относится к восстанавливаемым объектам. К невосстанавливаемым могут быть отнесены подшипники качения, шестерни, шпонки, болты, гайки, клиновые ремни.

#### Методы прогнозирования надежности.

Определение показателей надежности на стадии проектирования является наиболее интересной и важной задачей в теории надежности. Эта задача имеет огромное значение для достижения наибольшей эффективности использования оборудования. С учетом прогноза надежности возможен рациональный выбор варианта проекта, перспективное планирование ремонтного хозяйства.

Существуют три группы методов прогноза надежности.

1. *Теоретические расчетно-аналитические методы, или методы математического моделирования.* Вероятностно-аналитические методы имеют для практики значительный недостаток: некоторые из них могут быть использованы только тогда, когда имеются аналитические выражения для распределений случайных величин. Вывести и получить аналитические выражения для распределений случайных величин обычно очень сложно, поэтому на стадии проектирования, когда дается ориентировочная оценка показателей надежности, эти методы не всегда подходят. Хотя вычисление вероятности нахождения случайной величины в заданных пределах ее значений, обеспечивающих нормальное безотказное функционирование используемого объекта, в математическом отношении весьма простая операция, если имеется закон распределения этой случайной величины:

$$P(X_{\min \text{ доп}} \leq X \leq X_{\max \text{ доп}}) = \\ = R = \int_{X_{\min \text{ доп}}}^{X_{\max \text{ доп}}} \varphi(X) dX,$$

где  $R$  – надежность, т.е. вероятность нахождения случайной величины  $X$  в допустимых пределах  $X_{\min \text{ доп}}$ ,  $X_{\max \text{ доп}}$  (минимально и максимально допустимом).

Задача подсчета надежности сводится к нахождению теоретической непрерывной и

дискретной плотности вероятности состояния одной  $X$  или нескольких  $X_1, X_2 \dots X_n$  случайных величин. Знание распределения  $\varphi(X)$  – необходимое условие расчета. Наиболее распространенные теоретические расчетно-аналитические методы следующие:

1) на основе известных законов распределений для показателей надежности оборудования в целом;

2) на основе известных законов распределений для показателей надежности отдельных элементов;

3) на основе принятия нормальных законов распределения для показателей надежности отдельных элементов (упрощение);

4) на основе любых законов распределения параметров оборудования (статистическое моделирование, или метод Монте–Карло);

5) комбинаторно-матричный с любыми распределениями вероятности параметров оборудования.

Перечисленные методы представляют основную часть из большого количества расчетно-аналитических методов.

2. *Экспериментальные и экспериментально-аналитические методы – физическое моделирование.* Здесь можно отметить следующие методы:

1) на основе сбора и обработки ретроспективной и текущей информации о надежности оборудования;

2) на основе специальных испытаний на надежность в нормальных условиях эксплуатации и ускоренных или форсированных испытаний;

3) на основе испытаний моделей оборудования в нормальных условиях эксплуатации и ускоренных испытаний.

3. *Эвристические методы, или методы эвристического моделирования.* Здесь можно выделить следующие методы:

1) экспертных или балльных оценок. Выбирается комиссия, состоящая из опытных, высокопрофессиональных в данном вопросе экспертов, которые путем выставления баллов оценивают рассматриваемый показатель надежности. Затем проводится математическая обработка результатов оценки (коэффициент конкордации и др.);

2) мажоритарный, или голосования, основанный на использовании мажоритарной функции. Мажоритарная функция принимает значения «да» или «нет»: «1» или «0», причём

значение «1» принимается тогда, когда число переменных, входящих в нее и принимающих значение «1», больше числа переменных, принимающих значение «0». Иначе функция принимает значение «0».

Все перечисленные методы являются недетерминированными, или основанными на статистике, или субъективными, поэтому ответ является неопределенным. Но несмотря на это, эти методы позволяют сравнить по надежности различные варианты, выбрать оптимальную систему, найти слабые места и выработать рекомендации по оптимизации надежности и эффективности функционирования оборудования.

Если невозможны испытания объекта в целом, то можно прогнозировать надежность, комбинируя испытания отдельных элементов с аналитическими методами. Прогноз на надежность позволяет провести расчеты по обеспечению запасными частями, организовать техническое обслуживание и ремонт, а значит, обеспечить рациональную эксплуатацию оборудования.

Чем сложнее объект, тем больший эффект дают расчетные методы на всех этапах его разработки и эксплуатации.

**Оценка надежности по критерию коррозионной стойкости.** В химической промышленности в 57 случаях из 100 причиной преждевременного выхода оборудования из строя является коррозия. Оценка надежности с использованием традиционных статистических методов для многих видов химического оборудования малоприменяема, так как для применения таких методов необходима однородная статистическая информация об отказах. Поэтому оценка эксплуатационной надежности многих видов химического оборудования осуществляется индивидуально для каждого экземпляра.

Одним из основных показателей, определяющих надежность (ресурс) оборудования в условиях коррозионного воздействия сред, является скорость коррозии. Оценка ресурса оборудования в коррозионных средах фактически сводится к определению скорости коррозии металла, из которого оно изготовлено, и расчету срока службы путем деления толщины стенки на скорость коррозии. Такой подход позволяет правильно прогнозировать ресурс оборудования при равномерной (общей, сплошной) коррозии его элементов. Однако равномерная коррозия наблюдается примерно в 1/3 всех случаев причин выхода оборудова-

ния из строя. Неравномерность коррозии оборудования обусловлена многими причинами, как детерминированными (различием нагрузок или воздействий на разные участки поверхности), так и стохастическими (обусловленными случайными сочетаниями физико-химических свойств металла, его нагруженного состояния на разных участках поверхности и другими причинами).

Предельным состоянием сосуда (аппарата), подвергающегося при эксплуатации коррозионно-эрозионному разрушению, является уменьшение толщины его стенок до предельной (расчетной) величины, ниже которой не обеспечивается необходимый запас его несущей способности. Следует иметь в виду, что глубина отдельных локальных повреждений (исключая трещины) может значительно превышать среднюю глубину повреждений и не нарушать несущей способности аппарата. Допустимое количество (доля) повреждений на поверхности аппаратов и их размеры должны регламентироваться в зависимости от характера нагрузки на элементы оборудования и свойств применяемых материалов.

## 1.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Продление сроков эксплуатации химического и нефтехимического оборудования является огромным резервом повышения эффективности его использования и экономии материальных ресурсов, но при этом возникает серьезная проблема обеспечения надежности и безопасности производства.

Задача определения остаточного ресурса эксплуатируемого оборудования относится к классу задач индивидуального прогнозирования и включает решение таких задач, как оценка текущего состояния и развитие этого состояния в ближайшем будущем, оценка вероятностей наступления отказов и прогнозирования аварийных ситуаций, оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям. На основе этого прогноза устанавливается предельно допустимый срок эксплуатации оборудования или назначается срок очередного контроля его состояния.

Основой для прогнозирования остаточного ресурса оборудования служит следующая информация:

диагностические данные о состоянии, данные текущего оперативного контроля в процессе эксплуатации;

данные о нагрузках и условиях воздействия окружающей среды;

априорная информация об элементах, определяющих ресурс.

Существуют два основных направления определения остаточного ресурса: 1) основанное на физических предпосылках; 2) вероятностные методы оценки остаточного ресурса.

Чисто физические методы оценки остаточного ресурса, как правило, не учитывают многообразия реальных условий эксплуатации, в связи с этим значения показателей ресурса, рассчитанные путем физических предпосылок, часто во много раз превышают значения, полученные путем обработки статистических данных. Применение вероятностных методов оценки остаточного ресурса требует получения статистической информации о ресурсе анализируемого оборудования, что затруднено как экономически, так и во времени. Кроме того, требуется выполнение условия статистической устойчивости, что для изделий единичного исполнения сомнительно.

Наиболее перспективным направлением определения остаточного ресурса является использование физических представлений о ресурсных свойствах с применением вероятностных методов.

**Под остаточным ресурсом оборудования** (после времени  $t_k$ ) понимается его наработка, начиная с момента  $t_k$  до перехода в предельное состояние при установленных режимах применения и условиях эксплуатации.

Если  $T$  – наработка объекта от начала эксплуатации до перехода его в предельное состояние, то остаточный ресурс

$$\tau = T - t_k,$$

где  $T \geq t_k$ .

Поскольку  $\tau$  является случайной величиной, то для ее оценки используются следующие числовые характеристики:

средний остаточный ресурс  $T(t_k)$ , определяемый как математическое ожидание остаточного ресурса после времени  $t_k$ ;

гамма-процентный остаточный ресурс  $T_\gamma$ , определяемый как наработка с некоторого момента времени  $t_k$ , в течение которой безотказно проработавший объект будет иметь значение условной вероятности безотказной работы

$$\frac{P[t_k + T_\gamma(t_k)]}{P(t_k)} = \gamma,$$

где  $0 < \gamma < 100$ .

Средний остаточный ресурс

$$T(t_k) = \frac{1}{P(t_k)} \int_{t_k}^{\infty} P(t) dt,$$

где  $t$  – текущая наработка;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы за время  $t$ .

Гамма-процентный остаточный ресурс  $T_\gamma(t_k)$  есть корень уравнения

$$P_t(t) = \gamma$$

относительно  $t(t = T_\gamma(t_k))$  при заданном значении  $\gamma$ . Гамма-процентный остаточный ресурс используется в том случае, когда продолжаемый период эксплуатации определяется по количеству отказов.

Оценки показателей среднего остаточного ресурса  $T(t_k)$  и гамма-процентного остаточного ресурса  $T_\gamma(t_k)$  могут быть получены из следующих соотношений:

$$\hat{T}(t_k) \geq \frac{T - t_k}{P(t_k)},$$

$$\hat{T}_\gamma(t_k) \geq T_\gamma - t_k.$$

Для случая, когда вероятность безотказной работы  $P(t)$  на интервале  $(0, t_k)$ , представленная графически, является выпуклой книзу, то справедлива следующая оценка:

$$\hat{T}(t_k) \geq \frac{T - (t_k/2) + (1 + P(t_k))}{(t_k)}.$$

Для объектов с монотонно убывающей интенсивностью отказов во времени  $\lambda(t)$  справедливо

$$T(t_k) > \frac{1}{\lambda(t_k)} (t_k > 0),$$

а для монотонно возрастающей интенсивности отказов во времени справедливо

$$T(t_k) < \frac{1}{\lambda(t_k)}$$

При отсутствии отказов оценку  $T(t_k)$  можно получить из соотношения

$$\hat{T}(t_k) \geq T_n - t_k,$$

где  $T_n$  – нижняя доверительная граница для среднего ресурса при некотором уровне доверительной вероятности  $\alpha$ .

### Глава 1.3

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### 1.3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Предприятия химической и нефтехимической промышленности (первой группы по потенциальным возможностям загрязнения биосферы) отличаются разнообразием токсичных газовых выбросов и жидких стоков. Главные из них – органические растворители, амины, альдегиды, хлор и его производные, оксиды азота, циановодород, фториды, сернистые соединения (диоксид серы, сероводород, сероуглерод), металлоорганические соединения, соединения фосфора, мышьяка, ртуть. Перечень некоторых опасных для окружающей среды отходов предприятий этой группы представлен в табл. 1.3.1.

К числу отходов химической промышленности и производства минеральных удобрений относятся гипсосодержащие отходы (фосфогипс и др.), фосфорные шлаки, пиритные огарки, галитовые отходы и глинистые шламы, содовые сплавы, отходы нефтехимии и др. Отвалы и шламохранилища, занятые отходами химических производств, занимают тысячи гектаров земли. Крупнотоннажными гипсосодержащими отходами являются в первую очередь фосфо-, боро- и фторогипс, титаногипс, а также сульфогипс [9].

### 1.3.1. Характерные выбросы в атмосферу основных производств химической промышленности

Производство	Выбрасываемые вещества
Кислот:	
азотной	NO, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>
серной	NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (пыль)
соляной	HCl, Cl <sub>2</sub>
шавелевой	NO, NO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (пыль)
сульфаминовой	NH <sub>3</sub> , NH(SO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
фосфорной (фосфора)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , HF, фосфогипс (пыль)
уксусной	CH <sub>3</sub> CHO, CH <sub>3</sub> COOH
Удобрений:	
сложных	NO, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , HF, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , HNO <sub>3</sub> , пыль
карбамида	NH <sub>3</sub> , CO, (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO (пыль)
аммиачной селитры	CO, NH <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (пыль)
аммиачной воды	NH <sub>3</sub>
суперфосфата	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HF, пыль
хлорида кальция	HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CaCl <sub>2</sub> (пыль)
хлористой извести	Cl <sub>2</sub> , CaCl <sub>2</sub> (пыль)
Тетрахлорэтилена	HCl, Cl <sub>2</sub>
Ацетона	CH <sub>3</sub> CHO, (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO
Аммиака	NH <sub>3</sub> , CO
Метанола	CH <sub>3</sub> OH, CO
Капролактама	NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO
Диоксида титана	TiO <sub>2</sub> , FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , сажа
Катализаторов	NO, NO <sub>2</sub> , пыль
Искусственных волокон	H <sub>2</sub> S, CS <sub>2</sub>
Стекланных волокон	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), SiF <sub>4</sub> , пыль

**Безотходная технология** [9] – экологическая стратегия химического производства, включающая комплекс мероприятий, обеспечивающих минимальные потери природных ресурсов при максимальной экономической эффективности. К концепции безотходной технологии существует два подхода. Один из них основан на законе сохранения вещества, в соответствии с которым сырье (материя) всегда может быть преобразовано в ту или иную продукцию. Следовательно, можно создать такой технологический цикл, в котором все экологически опасные вещества будут преобразовываться в безопасный продукт или исходное сырье. Согласно другому подходу, полностью безотходную технологию нельзя создать ни практически, ни теоретически (подобно тому, как энергию нельзя полностью перевести в полезную работу в соответствии со вторым законом термодинамики, так и сырье невозможно полностью перевести в полезный экологически безопасный продукт).

**Полностью безотходная технология** – это идеальная система, к которой должен стремиться всякий реальный технологический цикл, и чем больше будет это приближение, тем меньше будет экологически опасный след.

Более реальной является так называемая **малоотходная технология**, под которой понимается такой способ производства продукции, когда вредное воздействие на окружающую среду доведено до санитарно-гигиенических норм и соответствующих предельно допустимых концентраций (ПДК).

Иногда используют понятие **экологически чистой технологии**, подразумевая такой метод производства продукции, при котором сырье и энергию применяют настолько рационально, что объемы выбрасываемых в окружающую среду загрязняющих веществ и отходов сведены к минимуму.

Таким образом, приняв за основу, что полностью безотходная технология – это идеальная модель производства, можно утверждать, что и малоотходная технология требует определенных корректирующих коэффициентов, оценивающих степень ее приближения к безотходной.

Имеется ряд подходов к определению безотходности производства: экспериментальная оценка, оценки по сырьевому и энергетическому балансам, полноте использования энергии, по общему параметру оптимизации, полученному с помощью функции желательности

и технологического профиля, а также экономическим путем при сопоставлении затрат на производство продукции. Общий баланс относительной токсичности массы вредных веществ выглядит следующим образом:

$$\sum (m_i + m_T + m_C) - \sum m_H - \sum m_P = 0,$$

где  $m_T, m_C, m_C$  – масса отходов, поступающих в окружающую среду соответственно с газовыми выбросами, твердыми отходами и сточными водами;  $\sum m_H$  – масса нейтрализованных отходов;  $\sum m_P$  – масса рассеянных отходов.

Относительная экологичность типового процесса, технологической линии, цеха

$$A = \frac{(m_T + m_T + m_C) - \sum m_H - \sum m_P}{\sum (m_T + m_T + m_C)} 100\%.$$

При условии  $A \rightarrow 0$  процесс приближается к безотходному.

Методология оценки категории безотходности химических производств предполагает, что коэффициент безотходности

$$K_B = \Phi(K_M, K_3, K_A),$$

где  $K_M, K_3, K_A$  – коэффициенты полноты использования соответственно материальных, энергетических ресурсов и соответствия экологическим требованиям.

В зависимости от величины  $K_B$  и мощности производства разделяют на три категории: безотходные ( $K_B \geq 0,90 \dots 0,97$ ), малоотходные ( $0,80 \dots 0,90 \leq K_B \leq 0,90 \dots 0,97$ ) и рядовые ( $K_B \leq 0,80 \dots 0,90$ ).

В общем случае для оценки степени совершенства технологического процесса, учитывая взаимодействие с окружающей средой, за критерий безопасности принят коэффициент экологического действия

$$K = \frac{B_\Phi}{B_T} = \frac{B_T}{B_T + B_{II}},$$

где  $B_T$  – теоретическое воздействие, необходимое для производства;  $B_\Phi$  – фактическое воздействие;  $B_{II}$  – воздействие, определяемое конкретным производством.

Если  $B_{\phi} \gg B_T$ , то  $K \rightarrow 0$ , т.е. данное производство абсолютно не учитывает требований экологической безопасности, что неизбежно ведет к так называемому экологическому «просчету» или экологическому «бумерангу». Чем выше значение коэффициента экологического воздействия  $K$ , тем более совершенно производство с учетом воздействия на окружающую среду, тем более существенно приближение к безотходной технологии.

Социально-экономический эффект безотходных производств определяют по комплексному критерию

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i - y}{Z_n} \rightarrow \max,$$

где  $\mathcal{E}_i$  – сумма всех эффектов, достигаемых при внедрении безотходного производства;  $y$  – ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления;  $Z_n$  – полные затраты на осуществление безотходного производства.

При наличии ряда вариантов безотходного производства должен быть выбран вариант с наибольшим  $\eta$  при минимальных полных затратах  $Z_n$ .

Сочетание прогрессивной технологии с современными методами очистки и контроля газопылевых выбросов, вторичного использования отходов позволяет реконструировать существующие и проектировать новые цехи, отдельные производственные участки, отвечающие всем требованиям экологической и технологической безопасности.

### 1.3.2. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Современная промышленность отвергла концепцию абсолютной безопасности и пришла к концепции приемлемого (допустимого) риска, суть которой в стремлении к такой безопасности, которую приемлет общество в данный период времени. Приемлемый риск считает в себе технические, экономические, социальные, политические аспекты и представляет некоторый компромисс между безопасностью и возможностями ее достижения. В некоторых странах, например в Голландии, приемлемые

риски установлены в законодательном порядке. Максимально приемлемым уровнем индивидуального риска обычно считается  $1 \cdot 10^{-6}$  в год, пренебрежимо малым – индивидуальный риск поражающих воздействий  $1 \cdot 10^{-8}$  в год.

Для снижения величины риска, связанного с эксплуатацией, обслуживанием и ремонтом производственного оборудования, эффективным средством является повышение надежности технического объекта. Основой для этого служит комплекс мер, применяемых на стадиях проектирования, монтажа и эксплуатации.

**Технологическая безопасность в нормальных условиях эксплуатации оборудования.** Безопасность оборудования определяется вероятностью возникновения поражающих факторов и уровнем существующих вредных факторов. Уровень опасности и принципы обеспечения технологической и экологической безопасности оборудования химических и нефтехимических производств связаны со свойствами перерабатываемых ими веществ. Так, оборудование для получения или переработки нейтральных и безопасных по химическому воздействию пожаро- или взрывоопасности веществ может не обеспечивать санитарно-гигиенических требований к показателям микроклимата в рабочей зоне. При переработке горючих веществ должно быть исключено образование взрывоопасных смесей или условия их переработки должны быть такими, при которых возникновение и распространение пламени было невозможно.

При работе с нейтральными твердыми и жидкими веществами, парами и газами технические решения, принимаемые при создании оборудования, должны обеспечивать:

санитарно-гигиенические нормы в рабочей зоне по температуре, относительной влажности воздуха, скорости его движения, интенсивности теплового излучения, запыленности за счет герметизации при загрузке (разгрузке) веществ и при проведении технологического процесса, в том числе за счет отвода пыли и паров общеобменной или местной вентиляцией;

защиту от термических ожогов (при положительных и отрицательных температурах) теплоизоляцией, компоновкой и размещением оборудования и вспомогательных средств, необходимых при выполнении технологических операций;

защиту от поражения электрическим током соответствующим исполнением электро-



оборудования и принятием защитных мер по заземлению, занулению и т.п.;

защиту от недопустимых уровней шума, вибрации, полей электромагнитных излучений;

защиту от разрушения под давлением сжатых нейтральных паров или газов (воздуха, азота, аргона) или при внезапном нерегламентированном повышении давления в процессе технологической операции (например, в результате перегрева и вскипания жидкости) или от внешних источников (сжатого воздуха, азота, водяного пара).

Более высокий уровень опасности представляет эксплуатация оборудования с горючими жидкостями (маслами, дистиллятами, диэтиленгликолем), легковоспламеняющимися жидкостями (спиртами, бензинами, гексаном), горючими газами, в том числе сжиженными (этаном, этиленом, пропаном), и другими веществами, классификация которых установлена ГОСТ 12.1.007. Опасность повышается за счет возможного пожара или взрыва этих веществ при достижении взрывоопасных концентраций их смесей с воздухом от источника зажигания, а также вследствие самовоспламенения при перегреве или разложении при повышенной температуре. Технические решения создаваемого оборудования (в дополнение к указанным) должны быть направлены на исключение возможностей:

образования пожаро- и взрывоопасных концентраций веществ назначением соответствующих технологических режимов работы, вентиляции, продувки, а при необходимости, подачи флегматизаторов;

появления источников зажигания, которое может быть обеспечено соответствующим уровнем и видом взрывозащиты электрооборудования, исключения искр при трении или ударе;

самовоспламенения окружающей взрывоопасной смеси от нагретых поверхностей;

нерегламентированного подъема температуры при нарушении условий проведения экзотермических реакций;

разрушения оборудования под давлением при выполнении технологических операции или при нарушении правил эксплуатации.

Повышенной является опасность использования вредных веществ первого и второго классов опасности, чрезвычайно- и высокоопасных, а также веществ остро направленного действия третьего класса опасности (умеренно опасных) в виду их токсичности. При перера-

ботке таких веществ оборудование дополнительно должно обеспечивать исключение химических ожогов и токсического поражения (респираторного или при попадании на кожный покров) при загрузке, разгрузке, пробоотборе, выполнении очистительных работ по окончании технологических операций соответствующей герметизацией, созданием безопасных конструкций загрузочных (разгрузочных) устройств, введением узлов, нейтрализующих и улавливающих пары вредных веществ и обеспечивающих удобство очистки.

Опасные свойства веществ стандартизируются системой стандартов по безопасности труда (ССБТ).

**Экологическая безопасность в нормальных условиях эксплуатации оборудования.** Экологическая безопасность обеспечивается конструированием оборудования таким образом, чтобы вредные и химически опасные вещества были заключены в герметичные закрытые системы. Герметичность систем и оборудования должна исключать загрязнение окружающей среды вредными и взрывоопасными веществами в соответствии с общими санитарно-гигиеническими требованиями к воздуху рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005 и показателями опасности вредных веществ по ГОСТ 12.1.007, а их теплоизоляция – недопустимое тепловыделение или теплопоглощение.

**Зона влияния производства на атмосферный воздух** считается территория, на которой суммарное загрязнение атмосферы от всей совокупности источников выброса предприятия, в том числе низких и неорганизованных, превышает 0,05 ПДК загрязняющих веществ. Характеристика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу включает: класс опасности вещества, валовой выброс загрязняющих веществ (тыс. т/год), в том числе количество уловленных и обезвреженных и выбрасываемых в воздух вредных веществ.

Воздействие химического и нефтехимического производства на окружающую среду оценивают с учетом рельефа местности и планировки территории предприятия. Общий уровень воздействия на состояние территории находят по картам участка размещения объекта с анализом размеров сооружений. Размер предполагаемой зоны загрязнения объекта определяют по состоянию территории объекта-аналога, находившегося в эксплуатации не менее 10...15 лет.

Для оценки воздействия проектируемого производства на поверхностные воды определяют режим водопотребления и водоотведения. Пригодность воды для нужд производства оценивают по химическим и биохимическим показателям, привязанным к конкретной его технологии. При оценке качества вод водных производств выявляют их фоновое загрязнение и определяют количество загрязняющих веществ, которое будет поступать в водную среду после ввода его в эксплуатацию.

**Риск аварии [2].** Возможность возникновения аварийной ситуации, ее вероятность, масштаб и продолжительность должны быть определены для всех химических и нефтехимических производств, связанных с повышенной опасностью для окружающей среды и людей.

Аварийность на объектах-аналогах оценивают по показателям риска их неблагоприятного воздействия на окружающую среду, объекты инфраструктуры, животного мира и людей. **Риск аварии** – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. Основными количественными показателями риска аварии являются:

технический риск – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;

индивидуальный риск – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;

потенциальный территориальный риск (или потенциальный риск) – частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории;

коллективный риск – ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время;

социальный риск – зависимость частоты возникновения событий, в которых пострадало на определенном уровне не менее определенного числа человек, что характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей;

ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенное время.

**Общие требования, связанные с безопасностью оборудования.** Технологическое и вспомогательное общинженерное оборудова-

ние должно соответствовать условиям технологического процесса. Эксплуатационные технические параметры, особенности конструкции, используемые конструкционные (в том числе уплотняющие, прокладочные) и смазочные материалы, герметичность, средства взрывопредупреждения и взрывозащиты, приспособленность к диагностированию технического состояния, помехоустойчивость, коррозионная стойкость и другие характерные особенности оборудования выбирают с учетом конкретных условий эксплуатации. К ним относятся: физико-химические свойства обрабатываемых веществ (в том числе моющих средств), параметры технологического процесса, влажность, запыленность, температура воздуха рабочей зоны, режим работы (сменность, длительность процесса между регламентными остановками и др.) и принятая в отрасли система обслуживания и ремонта [22].

Конструкция, ее прочность, материальное исполнение, использование комплектующих изделий, смазочных материалов и многое другое должны обеспечивать надежную и безопасную работу оборудования в диапазоне заданных параметров.

В нашей стране принята предупредительная система обеспечения безопасности производственного оборудования, когда производитель работ, связанных с созданием, разработкой и эксплуатацией потенциально опасных производств, обязан доказать и поддерживать свою организационно-техническую готовность для их выполнения. Технические доказательства сопровождаются доказательством организационно-технической готовности предприятия выполнять потенциально опасные виды работ и включают получение:

лицензии (Госгортехнадзора России) на проектирование технического средства;

лицензии (Госгортехнадзора России) на экспертизу промышленной безопасности;

сертификата об утверждении типа средств измерений (Госстандарта России);

сертификата соответствия (Госстандарта России);

разрешения на применение технического средства (Госгортехнадзора России) и др.

В подавляющем большинстве случаев перед принятием решения федеральным органом исполнительной власти проводится экспертиза представляемой документации независимой экспертной организацией.

Ниже приведены следующие общие наиболее характерные требования по обеспечению безопасности в зависимости от типа оборудования.

**Оборудование для переработки пожаро- и взрывоопасных и токсичных веществ.** Условия взрывоопасности технологического процесса (операции) обеспечивают предупреждением образования взрывоопасных концентраций веществ и их смесей следующим образом:

использованием дозирующих устройств, реализующих подачу компонентов со скоростью и точностью, не допускающих отклонения их соотношений от регламентированных значений и образования взрывоопасных концентраций в оборудовании;

выбором гидродинамических (способов и режима перемещения среды и смешения компонентов, напора и скорости потока), теплообменных (теплого напора, площади поверхности теплообмена и др.) характеристик процесса и геометрических характеристик аппаратов.

Оборудование, в котором при регламентном режиме или при отклонении от регламентного режима невозможно избежать вероятности образования взрывоопасных сред или возникновения источников энергии, величина которой превышает минимальную энергию зажигания обращающихся в процессе веществ, оснащают системами подачи инертных газов, флегматизирующих добавок и других продуктов, локализирующих или предотвращающих образование взрывоопасных концентраций. Одновременно применяют стандартизированные системы взрывопредупреждения и взрывоподавления.

При использовании инертного газа для подготовки оборудования, проведения операций по обработке твердых горючих материалов с возможным образованием взрывоопасных концентраций технологической среды в оборудовании и трубопроводах предусматривают автоматизированный контроль за содержанием кислорода и автоматическую остановку операции при достижении значений концентрационных пределов взрываемости. Количество инертного газа выбирают с учетом особенностей работы всей технологической установки и системы транспортирования.

Оборудование, в котором обрабатываются вещества, способные к разложению, самовоспламенению при длительном пребывании в аппаратуре, а также коммуникации для транспортировки таких веществ не должны иметь

мест их возможного застоя, залеживания, скопления, коркообразования. При этом поверхность оборудования должна быть гладкой и легко очищаемой.

### 1.3.3. НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

**Герметичность.** Оборудование, работающее с опасными и вредными веществами (газами, парами, жидкостями) и предназначенное для проведения таких процессов, как бромирование, хлорирование, цианирование и других с применением метанола, ртути, ее смесей и подобных опасных веществ, должно быть герметичным. Такое оборудование оснащают устройствами проверки герметичности перед проведением операций с вредными веществами.

Условие безопасности параметров воздушной среды в рабочем помещении

$$C_{\text{вв.рз}} < C_{\text{ПДК}},$$

где  $C_{\text{вв.рз}}$  – концентрация вредного вещества в рабочей зоне;  $C_{\text{ПДК}}$  – предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ.

При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны нескольких вредных веществ разнонаправленного действия ПДК остаются такими же, как и при изолированном их воздействии. При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны нескольких вредных веществ однонаправленного действия сумма отношений фактических концентраций каждого из них в воздухе к их ПДК не должна превышать единицы.

Оборудование, работающее под давлением вредных веществ (жидкостей и газов), должно испытываться на герметичность. Степень герметичности оборудования задается при проектировании.

При периодической подаче сырья, содержащего вредные вещества, в аппараты применяют шлюзовые герметичные затворы, обеспечивающие предупреждение выделения вредных газов и паров. Для загрузки, разгрузки, отбора проб и других аналогичных операций предусматривают устройства, исключающие возможность загрязнения воздуха взрыво-, пожароопасными и вредными веществами. При необходимости оборудование оснащают встроенными в конструкцию или индивидуальными

системами отсосов. Аппаратуру для легковоспламеняющихся и агрессивных жидкостей оснащают устройствами для измерения их уровня без открывания люков.

Для оборудования герметичных технологических систем регламентируются возможные утечки горючих веществ. В документации на оборудование указываются допустимые величины этих утечек в рабочем и стояночном режимах, а также способы определения герметичности. Насосы, оборудование с перемешивающими устройствами и др., перерабатывающее взрывопожароопасные среды, в местах выхода валов оснащают двойными торцовыми уплотнениями с циркулирующей запирающей жидкости для уплотнений всех типов.

В случае использования в оборудовании движущихся деталей (например, мешалок) необходимо исключить возможность соударения подвижных и неподвижных деталей. Герметичность подвижных и неподвижных узлов аппаратов без давления с легковоспламеняющимися и вредными жидкостями (парами и газами) обеспечивают устройством гидрозатворов с нейтральными жидкостями или применением уплотнений, исключающих выход паров и газов в воздух рабочей зоны. Оборудование для вредных и легковоспламеняющихся жидкостей снабжают поддоном или располагают над общим поддоном для сбора содержимого аппарата в случае его разрушения. Поддоны имеют уклон днища и патрубок в нижней точке для безопасного удаления пролитой на поддон жидкости. В случае необходимости поддон оснащают устройствами для нейтрализации оставшейся жидкости после слива.

**Поглотительные системы.** Оборудование для осуществления хлорирования, цианирования, бромирования и других аналогичных опасных процессов снабжают нейтрализующей или улавливающей системой для поглощения паров и газов, выделяющихся в процессе реакции. Объем оборудования такой системы должен обеспечить надежное и бесперебойное выполнение цикла технологических операций, в том числе с учетом времени нейтрализации и очистки самой поглотительной системы, которая включена постоянно. В случае использования вредных газов поглотительная система работает под разрежением. При необходимости в поглотительную систему подают реагенты (воду, газообразный аммиак и др.) в соответствии с химическим процессом. В оборудовании поглотительной системы предусматривают

соответствующие узлы подсоединения и управления ими.

Оборудование для переработки вредных веществ с использованием вакуума оснащают ловушками для поглощения паров и газов перед насосами. Оборудование для работы с гидрореагирующими веществами также оснащают ловушками, предупреждающими попадание в него влаги, и предусматривают возможность осушки оборудования (подогревом, продувкой, вакуумированием и т.п.). Обогрев (охлаждение) оборудования для работы с гидрореагирующими веществами через рубашки и другие устройства не должен производиться водой для исключения возможности ее попадания в реакционную массу при их разрушении или разгерметизации. Оборудование поглотительных и нейтрализующих систем и ловушек оснащают средствами контроля их работоспособности (контролем наличия нейтрализующих и сорбирующих сред, их качеством и т.п.).

Трубопроводы для сжиженных газов, взрыво-, пожароопасных и вредных веществ должны иметь фланцевые или иные разъемы в исполнении, обеспечивающем герметичность стыка.

Все оборудование и трубопроводы, предназначенные для агрессивных сред и сырья, должны конструктивно исключать возможность образования «мертвых пространств» (мешков) и обеспечить возможность полного опорожнения самотеком. В случае невозможности такого конструктивного исполнения и необходимости слива, например, сифоном, оборудование снабжается мерником с нейтрализующим веществом, а слив производится только после выполнения операции нейтрализации.

Для всех аппаратов и трубопроводов, предназначенных для сжиженных газов, жидких и газообразных вредных продуктов предусматривается устройство для их промывки, продувки (пропарки) инертным газом, паром, сжатым воздухом или вакуумированием. Последующему включению аппаратов и трубопроводов, содержащих взрывоопасные продукты, после останковки и освобождения от продуктов должна предшествовать продувка инертными газами или паром. Оборудование оснащается узлами для подключения (в соответствии с регламентом и проектом) линий воды, пара, инертного газа, проветривания и нейтрализации.

**Оборудование, характеризующееся выделением теплоты.** Оборудование для проведения процессов, сопровождающихся выделением конвекционной и лучистой теплоты (нагревательные печи, сушильные камеры и др.), снабжают экранированием, теплоизоляцией, устройствами и приспособлениями для отвода теплоты, предотвращающими или резко ограничивающими ее выделение в рабочую зону. При этом температура нагретых поверхностей оборудования или ограждений должна соответствовать требованиям СНиП (строительных норм и правил) и СанПиН (санитарных норм и правил). Для работы с пожаро- и взрывоопасными веществами температура нагрева поверхности оборудования ограничивается с учетом температуры их самовоспламенения.

Температура нагретой поверхности аппарата, теплоизоляции или защитного кожуха в месте возможного контакта человека с поверхностью не должна превышать 45 °С. Устройства теплозащиты включают в проект оборудования, поставляют и монтируют одновременно.

**Оборудование для работы при отрицательных температурах.** Конструкция арматуры, трубопроводов и теплоизоляция должна исключать их замерзание и приток теплоты, опасный по фазовому переходу за счет быстрого вскипания и создания недопустимых давлений. Оборудование, работающее при низких температурах, снабжают теплоизоляцией, обеспечивающей санитарно-гигиенические нормы на рабочем месте и исключающей обморожение людей. Оборудование для продуктов разделения воздуха создается по правилам безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха.

**Оборудование, создающее вибрацию.** Оборудование, являющееся источником вибрации, разрабатывают и поставляют в комплекте с виброизоляторами, рассчитанными на типовые условия установки. Значения вибрационных характеристик устанавливают исходя из обеспечения безопасности конструкции оборудования и с учетом допустимых уровней вибрации для человека. Особое внимание следует обратить на защиту оборудования и трубопроводов от разрушения при воздействии вибрационных нагрузок и на соответствие уровней вибрации установленным нормам для устранения этой опасности.

В паспорт или инструкцию по эксплуатации оборудования вносят значения вибрацион-

ных характеристик, измеренные в ходе испытаний. Динамические нагрузки, передаваемые основанию, не должны превышать 50 Н. Уровни вибрации при конструировании аппаратов снижают применением вибропоглощающих и виброизолирующих устройств и материалов. Устранение вибрации работающего оборудования, вызванной неуравновешенностью деталей, достигается статической и динамической балансировкой.

**Оборудование, работающее при повышенном уровне шума.** Предельно допустимые значения шумовых характеристик оборудования определяются в соответствии с требованиями стандартов с учетом условий размещения и допускаемых уровней звукового давления в октавных полосах частот. Кроме санитарных аспектов в условиях воздействия шума для оператора важно исключить возможность искажения речевых сигналов в помещении, приводящего к неправильному пониманию сообщений. Необходимо, чтобы энергетический уровень акустических индикаторов речевых сообщений превышал уровень шума не менее, чем на 10 дБ.

Для уменьшения уровня шума в конструкции предусматривают экраны и звукоизолирующие кожухи, звукоизолирующие и вибродемпфирующие покрытия, глушители аэродинамического шума, подшипники повышенного качества, осуществляют балансировку движущихся частей, надежное крепление отдельных узлов и частей оборудования. Оборудование снабжается паспортом с указанием спектра излучаемой звуковой мощности.

**Оборудование, характеризующееся излучением электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот.** Оборудование, которое при работе создает электромагнитные поля, выпускают в таком исполнении, чтобы рассеяние и потери энергии были минимальными. Интенсивность электромагнитных полей радиочастот на рабочем месте не должна превышать значений, указанных в СанПиН при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот по стандартам ССБТ.

Для снижения интенсивности излучения до предельно допустимых значений используют экранирование элементов, являющихся источниками излучения (трансформаторов, индукторов и др.), поглотители, ослабители и делители мощности, волноводные разветвления. Оборудование с электровакуумными при-

борами с рабочим напряжением выше 10 кВ должно обеспечивать защиту от воздействия мягкого рентгеновского излучения в соответствии с требованиями СанПиН для работы с источниками мягких рентгеновских лучей.

Оборудование, являющееся возможным источником излучения электромагнитных полей радиочастот, снабжают паспортом с уровнем излучения, измеренного изготовителем.

**Оборудование, характеризующееся низкой механической прочностью.** Аппаратура и трубопроводы из стекла, керамики и других хрупких материалов защищают от механического воздействия и разрушения и исключают возможность случайных ударов и неосторожного обращения в момент эксплуатации. Указанное требование выполняют следующим образом:

введением в конструкцию защитных ограждений кожухов и др.;

надежным закреплением элементов оборудования на кронштейнах и других основаниях, исключающим перемещение и излишние нагрузки;

введением усилений элементов и мягких прокладок в местах крепления;

развязкой и монтажом трубопроводов (если это допустимо по условиям прочности, герметичности и коррозионной стойкости) через гибкие элементы;

исключением воздействия вибрации на аппаратуру и трубопроводы;

удобной компоновкой оборудования, трубопроводов и перекрывающих элементов (кранов и др.), исключающей возможность неосторожного воздействия персонала на конструкцию при монтаже, работе и при проведении операций по очистке, нейтрализации, продувке;

сборкой при подготовке к работе и разборкой после окончания работы без применения металлических инструментов.

Применение такого оборудования для пожаро- и взрывоопасных веществ запрещено.

**Электрооборудование.** Все электроприборы, средства контроля, сигнализации и блокировок, пульты и щиты управления по исполнению должны соответствовать условиям среды помещений, в которых они устанавливаются и отвечать требованиям соответствующих правил и стандартов.

Оборудование с использованием электротехнологий должно иметь соответствующую степень защиты, которая обусловлена категорией технологического блока и классом зоны.

Защитное заземление, зануление, защитное отключение оборудования, приборов, средств сигнализации и блокировки выполняются в соответствии с требованиями стандартов и правил.

**Исполнение оборудования, связанного со статическим электричеством.** От оборудования и трубопроводов осуществляют отвод электрического потенциала в соответствии с действующими правилами защиты от статического электричества. При использовании электризующихся легковоспламеняющихся жидкостей принимают меры по снижению накопления и отводу зарядов статического электричества, включающие соответствующую геометрию, топологию и размеры элементов оборудования, обеспечивающих допустимую скорость перемещения электризующейся среды и релаксации заряда. Для случая повышенной опасности электризации части оборудования имеют плавные отводы и исключают заостренные элементы, способствующие разряду. Части оборудования и трубопроводов из неметаллических материалов, на которых вероятны генерация, накопление и разряды статического электричества считаются электростатически заземленными, если сопротивление любой точки внутренней и внешней поверхности относительно контура заземления не превышает  $10^7$  Ом.

**Общие требования к конструкционным материалам.** Используемые конструкционные материалы должны обеспечить:

достаточную для указанного в паспорте оборудования ресурса общую химическую и коррозионную стойкость в соответствующих агрессивных средах с заданной концентрацией, температурой, давлением, а также стойкость против других возможных видов коррозионного разрушения (межкристаллитной коррозии, электрохимической коррозии сопряженных металлов в электролитах, коррозии под напряжением);

достаточную механическую прочность и износостойкость при указанных давлениях и температуре эксплуатации, а также с учетом абразивных свойств среды;

наилучшую способность материала свариваться с обеспечением необходимых механических свойств сварных соединений и коррозионной стойкости их в агрессивной среде. Сварочные материалы должны обеспечивать механические свойства металла шва, аналогичные основным соединяемым сваркой материалам.

Прокладочные и уплотняющие материалы должны быть износостойкими и поддерживать герметичность в условиях эксплуатации (при заданных значениях давления, температуры, наличия абразивных частиц) и исключать взаимодействие с обрабатываемыми веществами. При использовании в конструкции деталей с малой долговечностью предусматривается возможность быстрой и легкой их замены.

Теплоизолирующие материалы должны быть нейтральными по отношению к обрабатываемым веществам и негорючими. При работе оборудования с вредными веществами первого и второго классов опасности теплоизоляционный материал не должен их впитывать и сорбировать.

Применение конструкционных материалов и комплектующих изделий производится на основании соответствующих стандартов и технических условий. Применение материалов, указанных в этих документах, при рабочих параметрах, выходящих за установленные пределы, а также материалов, не указанных в стандартах и технических условиях, не допускается.

Оборудование и используемые в нем комплектующие и материалы должны исключать возможность возникновения источников энергии, превышающих энергию зажигания обрабатываемых в процессе опасных веществ (искры механического или электрического происхождения, теплового разогрева, приводящего к самовоспламенению).

Части оборудования и транспортных систем (трубопроводов, трубок, шлангов), соприкасающиеся с пожаро- и взрывоопасными веществами, а также те, на которых возможно оседание пыли этих веществ, должны выполняться из материалов, не дающих фрикционных искр при работе подвижных, периодически открываемых или снимаемых частей оборудования (крышек, люков), при ударе и трении инструментом, пробоотборниками.

**Освидетельствование технического состояния оборудования.** Конструкция оборудования должна предусматривать возможность его диагностики и мониторинга. Объем, методы и периодичность диагностических работ устанавливаются разработчиками и указываются в инструкциях на оборудование. При этом обращается внимание на доступность и простоту подготовки и проведения диагностирования в процессе эксплуатации с помощью минимальной номенклатуры и типоразмеров

диагностирующих средств, а также на наиболее рациональную схему размещения контрольных точек. При использовании тестового диагностирования и мониторинга необходимо исключить влияние тестового воздействия на правильность работы оборудования.

В документации по диагностированию оборудования приводится перечень аппаратуры и приборов с указанием пределов и точности измерений и методов их использования.

В конструкции оборудования предусматриваются узлы сопряжения оборудования, средств диагностирования и мониторинга, исключающие возможность их неправильного соединения (применением смещенных отверстий, шпонок, маркировок). Техническое освидетельствование используют для оценки остаточного ресурса оборудования.

**Индикация работоспособности оборудования.** В конструкции оборудования необходимо предусмотреть индикаторы для определения состояния оборудования, а также контрольные точки, которые можно использовать для обнаружения отказов и которые характеризуют правильность регулировки и настройки.

В качестве контролируемого выбирается такой параметр, отклонение которого от заданного значения не сопровождается возникновением неисправности, а предупреждает о ее приближении. В документации указывают критерии состояния (в том числе предельно допустимого) узлов и деталей, вызывающие необходимость регулировки, смены или ремонта или прекращения эксплуатации оборудования. Конструкция оборудования и трубопроводов должна обеспечивать возможность проведения внешнего и внутреннего осмотра для технического освидетельствования, а соединения элементов оборудования должны быть размещены в местах, доступных для визуального наблюдения, обслуживания, монтажа и демонтажа так, чтобы исключить возможность их поломки.

**Монтаж оборудования.** Поставка оборудования, как правило, производится в собранном виде после испытаний на предприятии-изготовителе. Для оборудования, подлежащего выверке при монтаже, конструкция предусматривает выверочные базы и места установки накладных средств измерения. Документация должна учитывать монтажную технологичность с учетом транспортирования.

Отдельные виды оборудования химического и нефтехимического производства часто имеют большие габаритные размеры, что при-

водит к необходимости его «доизготовления» на месте эксплуатации. Если оборудование в собранном виде является нетранспортабельным, то особое внимание уделяют разбивке его на поставочные части с четкой привязкой к монтажно-маркировочной и сборочной документации. В этом случае обязательна специальная документация, обеспечивающая технологию сборки и контроля ее качества.

#### **Устройства для подавления аварий.**

Выбор методов и средств для предупреждения и предотвращения развития аварий (встроенных или индивидуальных противоаварийных устройств: запорной, запорно-регулирующей арматуры, клапанов, отсекающих и других отключающих устройств, предохранительных устройств от повышения давления, средств подавления и локализации пламени, автоматических систем подавления взрыва), разработка последовательности и времени срабатывания элементов системы защиты определяются по результатам анализа схем возможного развития аварий так, чтобы исключалось опасное развитие процесса.

При установке предохранительных устройств на аппаратах (трубопроводах) с взрыво- и пожароопасными веществами предусматривают меры и средства (в том числе автоматического регулирования процесса), обеспечивающие минимальную частоту их срабатывания.

Аварийное срабатывание средств защиты, отключение установки в целом, группы оборудования или одной единицы не должны вызывать опасных отклонений параметров или нарушений в работе смежного с отключаемым оборудованием. В необходимых случаях предусматриваются системы аварийного освобождения аппаратов в аварийную емкость.

Надежность и время срабатывания систем противоаварийной защиты (ПАЗ) определяются с учетом времени развития возможной аварии и с указанием регламентированных, предельно допустимых и опасных значений параметров. Время срабатывания системы защиты должно исключать опасное развитие процесса. Системы ПАЗ и управления процессами должны исключать их срабатывание от случайных и кратковременных сигналов нарушения нормального хода технологического процесса, в том числе и в случае переключений на резервный или аварийный источник электроснабжения. При выборе систем ПАЗ и ее элементов для объектов с блоками первой категории взрывоопасности в обоснованных случаях должны использоваться резервируемые элек-

тронные и микропроцессорные системы. Система аварийного останова должна иметь тройное резервирование программируемого логического контроллера на базе микропроцессора. Контроль за параметрами, определяющими взрывоопасность объектов с блоками первой категории взрывоопасности, осуществляется не менее, чем от двух независимых датчиков с отдельными точками отбора.

Документация на оборудование, оснащенное средствами взрывозащиты, локализации пламени и другими противаварийными устройствами, должна предусматривать способ подтверждения взрывозащищенности оборудования (испытания промышленного образца, модельные испытания).

**Комплексность оценки безопасности оборудования.** Обычно кроме показателей, формально определяющих безопасность конструкции, в их число включают некоторые эксплуатационные характеристики и некоторые (не все) характеристики назначения. Причины включения этих характеристик в перечень для оценки не объясняют, но в этом кроется глубокий смысл: потребитель должен получить работоспособное оборудование, а его характеристики должны обеспечить безопасную работу смежных по технологической схеме агрегатов, гарантируя определенный уровень технологических параметров и допустимые их колебания для всего оборудования.

Еще более подробным становится анализ, если учесть, что любая технологическая система включает совокупность оборудования и оснастки, средств инженерного обеспечения, контроля и управления, предметов производства, материалов и исполнителей, с помощью которых обеспечивается выпуск продукции с регламентированными свойствами. Взаимодействие именно этих элементов производственной системы определяет ее безопасность. Здесь не бывает мелочей, ведомственных ограничений или приоритетов анализа.

**Законодательная экспертиза безопасности.** Российским законодательством (о промышленной безопасности, экологической экспертизе, техническом регулировании), постановлениями правительства (о экспертизе проектно-сметной документации) и другими подзаконными актами определена обязательная оценка соответствия и экспертиза промышленной безопасности оборудования, применяемого на опасных промышленных производствах, экологическая экспертиза, экспертиза проектов строительства предприятий, зданий и сооружений производственного назначения [22].



При экспертных работах качество объекта прямо связывают с признаками, свидетельствующими о вероятности наступления аварийной ситуации, а нарушения требований технических регламентов, включаемых в них государственных и отраслевых стандартов, ведомственных норм и правил надзорных органов считают возможными причинами возникновения таких ситуаций. Естественным способом регулирования качества объекта и основанием выбора направлений его совершенствования являются меры, исключающие отклонения принятых технических решений от норм документов, регулирующих правовые, организационные, социально-экономические и технические аспекты безопасности производства.

#### 1.3.4. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА КАК СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Неразрушающий контроль и диагностика (НКид) – начинающие и определяющие части проблемы обеспечения безопасности химического производства. Контроль обозначает проверку соответствия параметров установленным техническим требованиям, а неразрушающие методы контроля не должны нарушать пригодность объекта к применению. Несоответствие получаемой продукции установленным требованиям является дефектом, для обнаружения и поиска которого используются теория, методы и средства технической диагностики. Обнаружение и поиск дефектов являются процессами определения технического состояния объекта, т.е. его диагностирования.

*Безопасность – средство экономической состоятельности опасного производства.* Следует отметить, что как бы ни важны были вопросы безопасности вообще, они подчинены экономике производства, но та в свою очередь не может быть эффективной, если не обеспечит безаварийность и отсутствие инцидентов, затратив для этого иногда значительные ресурсы.

Любое повышение безопасности производства достигается за счет необходимого дополнительного увеличения расходов. Возникает проблема определения оптимального уровня расходов, при котором технология и производство остаются рентабельными. Применение систем НКид удорожает продукцию при выпуске и эксплуатации, однако их использование на всех стадиях изготовления, проверки и эксплуатации существенно повышает надеж-

ность изделий и оборудования, обеспечивая громадный в масштабе страны экономический выигрыш. К особенностям современных систем НКид относится значительное увеличение числа проверяемых параметров (многофункциональность) и повышение производительности контрольных операций.

Ввиду необходимости получения и обработки огромных массивов информации при контроле широко используются автоматизированные и роботизированные системы НКид. Особенно перспективны контрольно-диагностические автоматы при контроле очень больших поверхностей, в условиях повышенных температур, агрессивных сред и др. Точность работы таких систем зависит от чувствительности и разрешающей способности входящих в них измерительных каналов и преобразователей информации. Автоматизация градуировки и калибровки измерительных схем вместе со встроенной автодиагностикой получают все более широкое распространение в системах НКид. В связи с этим можно выделить следующие перспективные направления развития НКид.

**Интеллектуализация методов и средств НКид.** В НКид используется более 100 методов исследования, тысячи типов приборов.

В основе решения диагностических задач лежит прежде всего оптимальный выбор метода контроля, дающего наиболее объективную информацию о параметре диагностирования. Важнейшей проблемой становится не фиксация дефекта как уже возникшего отклонения от нормируемого параметра, а исследование и регистрация физических и других эффектов, предшествующих по времени переходу материала или изделия в «дефектное» состояние. Интеллект диагностики начинается с правильного выбора физического эквивалента, наиболее адекватного изучаемому явлению, характеризующему работоспособность объекта. На основе этого должна проектироваться диагностическая технология. Для решения этой проблемы используются датчики на базе микроэлектронной технологии, построенные на основе самых различных физических явлений и химических преобразований.

Интеллектуализация современных методов НКид связана с их интенсивной компьютеризацией, широким использованием встроенных процессоров, персональных и мини-ЭВМ, разработкой программ, алгоритмов тестового и функционального диагностирования.

Стали нормой перевод диагностической информации в двух- и трехмерное изображение с последующей обработкой в реальном масштабе времени, амплитудно-фазочастотная обработка многомерного сигнала, реконструктивная томография и т.д. Переход на экспертные диагностические многомашинные испытательные комплексы для крупных химических производств позволит определять остаточный ресурс оборудования и риск эксплуатации.

**Создание единой системы контроля химического производства и окружающей среды.** С увеличением масштабов производства, углублением экологических проблем регионов все очевиднее становится неразрывная взаимосвязь методов и средств определения состояния промышленного объекта и окружающей среды. Системы диагностирования химического производства должны включать системы экологического мониторинга. Важно отметить, что многие измерительные каналы, алгоритмы диагностирования, методы и устройства преобразования информации, используемые физические и химические эффекты и технические средства идентичны при диагностировании химического предприятия и окружающей среды. Они должны быть унифицированы и системно спроектированы для решения общей задачи обеспечения безопасности людей и окружающей среды.

**Совершенствование диагностических технологий.** Технические средства НКИД включают аппаратную часть, программное обеспечение и эксплуатационно-техническую документацию. К сожалению, разработкам необходимой технологической документации, методикам, исследованию оптимальных процедур НКИД уделяется явно недостаточное внимание. От правильного выбора технологии НКИД в большой степени зависит эффективность конечного результата – долговременная работоспособность оборудования при минимальных затратах. В качестве примера можно привести применяющийся до сих пор метод испытания труб большого диаметра с помощью гидропрессов, для которого необходимо строить специальные цехи и многотонное испытательное оборудование. В то же время автоматизированный ультразвуковой дефектоскоп позволяет выявлять дефекты с большей достоверностью, чем гидроиспытания, при этом затраты на контроль меньше в сотни раз. Алгоритмы испытаний должна формировать диагностическая технология с тем, чтобы определить, что и как следует применять. Именно

технология должна минимизировать диагностические параметры, методы и средства, обеспечивающие достоверность определения аномального события.

Диагностические технологии должны работать на опережение, надежно распознавать предаварийную ситуацию, исключать возможность аварийной эксплуатации оборудования. Главным становится не оценка размеров дефектов (дефектометрия), а определение остаточного ресурса оборудования, степени риска его эксплуатации.

**Общая характеристика средств НКИД.** К средствам НКИД относят контрольно-измерительную аппаратуру, в которой используют проникающие поля, излучения и вещества для получения информации о качестве исследуемых материалов и объектов.

Выбор метода и прибора неразрушающего контроля для решения задачи дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит от параметров контролируемого объекта и условий его обследования. Ни один из методов и приборов не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме требованиям практики. В соответствии с назначением приборов контролируемые параметры и дефекты разделяют на четыре группы (табл. 1.3.2).

**1.3.2. Классификация контролируемых параметров и дефектов**

Группа	Параметры и дефекты
I	Дефекты типа нарушения сплошности: раковины, трещины, расслоения, поры и др.
II	Отклонения размеров – длины, ширины, высоты, диаметра, толщины стенки, а также толщины покрытия и глубины поверхностного слоя (закаленного, обезуглероженного и т.д.)
III	Удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная индукция, твердость, влажность, напряжение, структура, химический состав, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, плотность и др.
IV	Эмиссия волн напряжения, развитие во времени трещин, увеличение напряжений, утонение стенки, увеличение зазора и т.д.

В табл. 1.3.3 приведены примеры применения основных методов неразрушающего контроля для оценки выявляемости дефектов нарушения сплошности. В качестве объектов контроля выбраны наиболее массовые изделия из ферромагнитных и неферромагнитных материалов, а также из диэлектриков. Каждый метод контроля оценивается экспериментально по пятибалльной системе.

**Системы автоматического контроля и диагностики.** Системы автоматического контроля (САК) и технической диагностики (СТД) являются разновидностями информационно-измерительных систем (ИИС), с помощью которых можно осуществлять контроль за состоянием химического производства. Отличим СТД и САК является то, что СТД не только выдает информацию об исправности (или неисправности) контролируемого производства, но и указывает место неисправности. СТД, как правило, имеет устройство воздействия на объект (генератор стимулирующих воздействий), а САК может и не иметь таких устройств.

САК делят на системы непрерывного контроля параметров производства и системы с дискретным последовательным контролем этих параметров. В свою очередь, непрерывные САК делят на многоканальные и сканирующие. Многоканальные САК включают несколько параллельных измерительных каналов для непрерывного контроля однородных или разнородных параметров. Каждый измерительный канал включает датчик соответствующего параметра, например средство неразрушающего контроля (СНК), устройство сравнения с нормой и устройство индикации отклонений. Многоканальные САК отличаются высокой надежностью и быстродействием. Недостаток таких систем – повышенная сложность и стоимость, поэтому их применяют для контроля наиболее ответственных параметров. Сканирующие САК применяют для контроля распределенных в пространстве параметров (полей температур, давлений, механических напряжений и др.). Эти системы включают, как правило, один измерительный канал и сканирующее устройство, перемещающее датчик по запрограммированной траектории. В результате получают оценку значений контролируемого параметра как функцию координат и времени.

САК с дискретным последовательным контролем (их иногда называют многоточеч-

ными) применяют для контроля сложных объектов с большим числом контролируемых параметров. Структурная схема такой системы включает несколько датчиков контролируемых параметров, унифицированные выходные сигналы которых через измерительный коммутатор поочередно поступают на сравнивающее устройство. Изменение норм и переключение коммутатора осуществляются устройством управления. Достоинством многоточечных САК является меньшее количество оборудования по сравнению с многоканальными системами, возможность наращивания числа измерительных каналов. Недостатком этих систем является пониженное быстродействие и возможность пропуска предаварийной или даже аварийной ситуации на объекте.

Часто используют комбинированные САК, в которых наиболее важные параметры объекта контролируются непрерывно, а менее значимые – оцениваются с помощью дискретного последовательного контроля.

СТД по целевому назначению делят на диагностические и прогнозирующие. Диагностические СТД предназначены для обнаружения неисправности объекта, а прогнозирующие системы по результатам проверки в предыдущие моменты времени предсказывают поведение объекта в будущем, т.е. решают гораздо более трудную задачу.

В СТД используют следующие виды проверок: функциональную; алгоритмическую и логически-комбинационную. При функциональной проверке выявляют наличие сигнала на выходе объекта при поступлении сигнала на его вход; отсутствие выходного сигнала является отказом. При алгоритмической проверке в соответствии с алгоритмом работы объекта проверяется последовательность выполнения функций. Логически-комбинационная проверка, называемая также тестовой, позволяет обнаруживать неисправности на любом уровне. На вход проверяемого объекта в этом случае подают специальный диагностический тест, специальные стимулирующие сигналы.

Существуют различные методы оптимизации программ диагностики, разработанные на основе указанных принципов. Для повышения надежности СНК и диагностики и быстрого устранения неполадок они обеспечиваются системой автоконтроля в процессе эксплуатации. В случае выхода из строя одного из элементов автоматизированные средства

**1.3.3. Оценка выявляемости дефектов типа нарушения  
сплошности различными видами НКД**

Объекты контроля	Радиационный	Акустический	Вихрековый	Магнитный	Капиллярный (проникающими веществами)	Тепловой	Оптический	Радиоволновой
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Неферромагнитные материалы</b>								
Проволока диаметром, мм:								
0,01...1	0	5	5	0	0	3	4	0
1...14	4	5	5	0	0	0	4	0
Прутки диаметром, мм:								
3...40	5	5	5	0	0	0	4	0
30...100	5	5	5	0	0	0	4	0
Трубы диаметром, мм:								
3...30	4	5	5	0	0	0	4	0
30...156	5	5	5	0	0	0	4	0
156...1000	5	5	5	0	0	0	4	0
Листы, плиты толщиной, мм:								
0,1...1	4	5	5	0	4	3	4	3
0,1...3,9	5	5	5	0	4	0	4	0
4...10 и более	5	5	5	0	4	0	4	0
Сортовой прокат	5	5	4	0	4	0	4	0
Отливки	5	4	3	0	5	0	4	0
Металлургические заготовки (слябы, слитки)	5	4	0	0	5	3	4	0
<b>Ферромагнитные материалы</b>								
Проволока диаметром 5 мм	4	5	5	5	0	3	4	0
Прутки диаметром, мм:								
3...40	5	5	5	5	0	0	4	0
30...100	5	5	5	5	0	0	5	0
Трубы сварные диаметром, мм:								
3...30	4	5	5	5	4	0	4	0
30...156	5	5	5	5	4	0	4	0
156...1000	5	5	5	5	4	0	4	0
Листы, плиты толщиной, мм:								
0,1...1	5	5	5	5	4	3	4	3
0,1...3,9	5	5	5	5	4	0	4	0
4...10 и более	5	5	5	4	4	0	4	0
Сортовой прокат	5	5	4	5	4	0	4	0
Отливки	5	4	0	4	4	0	4	0
Металлургические заготовки (слябы, слитки)	5	4	4	3	4	4	4	0
<b>Диэлектрики</b>								
Резина	5	4	0	0	4	0	4	5
Керамика, порошковый материал	5	4	0	0	4	3	4	5
Бетон, железобетон	5	3	0	0	4	0	4	5
Монокристаллы	3	4	0	0	0	5	4	5
Многослойные материалы	4	5	0	0	0	3	0	5
Стекло	3	4	0	0	0	3	5	3
Стеклопластики	3	4	0	0	5	5	5	5

Продолжение табл. 1.3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Соединения</b>								
Сварные	5	5	3	5	4	3	0	0
Клеевые	3	5	0	0	4	4	4	5
Паяные	5	5	3	0	3	3	0	0
Резьбовые	0	0	3	5	4	0	0	0
<b>Детали и изделия</b>								
Железнодорожные рельсы	3	5	3	4	3	0	0	0
Многослойные конструкции из пластиков и стеклопластиков	3	4	3	0	0	3	0	4
Радиоэлектронные схемы и детали	4	0	0	0	0	5	3	4
Электровакуумные приборы	4	0	0	0	0	3	3	3
Котлы и радиаторы	5	4	4	3	4	3	4	0

Примечание. Оценка вида НКид: 5 – отличная; 4 – хорошая; 3 – удовлетворительная; 0 – неудовлетворительная.

останавливают операцию контроля и сигнализируют о возникшей неисправности. Наибольший экономический эффект достигается, когда эти средства непосредственно управляют технологическим процессом.

Такие методы, как радиографический, рентгенотелевизионный, магнитопорошковый, капиллярный и другие, результаты которых оператор оценивает визуально по изображению дефекта, автоматизированы не полностью. Создание автоматизированных систем обработки изображения (АСОИЗ) для указанных методов – наиболее актуальная задача.

Наиболее трудоемкими и наименее надежными механизмами автоматизированных СНК, как правило, являются устройства сканирования. В процессе сканирования должен поддерживаться постоянный зазор между преобразователем, источником поля и контролируемым изделием. Движение преобразователя и контролируемого изделия относительно друг друга может быть поступательным, вращательным, сложным возвратно-поступательным и др. Особенностью систем сканирования СНК и диагностики является высокая точность их изготовления. Они могут быть электронными, электромеханическими, гидравлическими, пневматическими и др. Дополнительно к механическим устройствам стабилизации зазора применяют электронные измерительные устройства, которые сигнализируют о выходе зазора за пределы допустимых значений и регулируют коэффициент усиления измерительного тракта в функции величины зазора, под-

держивая неизменной чувствительность прибора к основному контролируемому параметру.

Различают многоэлементные и одноэлементные системы сканирования. Многоэлементные системы состоят из ряда неподвижных входных преобразователей, расположенных относительно друг друга линейно, матрично и т.д. Информация с многоэлементной входной системы снимается путем предварительного усиления сигнала каждого преобразователя и последующего коммутирования всех входных сигналов электронным коммутатором для дальнейшей вторичной обработки. Подобного рода системы входных преобразователей отличаются большой скоростью получения информации с определенной площади контролируемого объекта. В ряде случаев они также требуют перемещения относительно контролируемого объекта. Недостатками многоэлементных систем являются их громоздкость, пониженная чувствительность и разрешающая способность при обнаружении дефектов типа нарушения сплошности. Объясняется это тем, что дефекты нарушения сплошности имеют малые размеры (от микрометров до миллиметров) и для получения необходимой информации с помощью ряда неподвижных преобразователей требуется, чтобы размеры преобразователя или зона его контроля была значительно меньше, чем размеры дефекта. Для дефектоскопического контроля это часто трудноосуществимая задача.

Более простыми, надежными и более чувствительными являются одноэлементные сис-

темы сканирования. Они содержат один или несколько (до десяти) преобразователей, перемещающихся относительно контролируемой поверхности объекта. Каждый преобразователь контролирует определенную часть поверхности объекта. Размеры и параметры преобразователя выбирают так, чтобы получить максимальные чувствительность и разрешающую способность контроля. За счет перемещения преобразователя информация о дефекте является непрерывной функцией в отличие от дискретных ее значений, получаемых от неподвижных рядом расположенных преобразователей. Таким образом, снимается максимальный объем информации о качестве контролируемой поверхности. Недостатком одноэлементных систем является их малая производительность. Поэтому в промышленности при высокопроизводительном контроле все шире используют многоканальные приборы и системы сканирования.

В качестве главного элемента систем сканирования автоматизированных СНК и диагностики могут использоваться роботы-манипуляторы. На этой основе создаются разнообразные роботизированные технологические комплексы неразрушающего контроля (РТК НКИД). В основу создания РТК НКИД положена совокупность приборов неразрушающего контроля, промышленных роботов, выполняющих функции перемещения датчика прибора относительно объекта контроля и разбраковки изделий, а также специализированных устройств связи прибора, робота и объекта контроля между собой.

В качестве средств представления информации широкое применение получили вычислительные устройства, которые позволяют строить двух- и трехмерные изображения объекта контроля в требуемом масштабе, выявить на изображении точки локализации дефектов и обозначить яркостным или цветным способом участки с наибольшими градиентами полей и излучений, характеризующие наличие дефектов или напряженные состояния. Эти устройства позволяют строить сечения объектов, наносить цифровые данные о размерах и локализации дефектов, а также изоконтурные – эквипотенциальные линии вторичных полей, характеризующих дефекты. Они обеспечивают файловую систему хранения результатов.

При использовании полутонновых дисплеев появляется возможность совместно с изображением объекта строить эпюры распределения потока сил, напряжений, нагрузок, температуры и т. п.

## Глава 1.4

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### 1.4.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Специфические условия работы химического оборудования, характеризуемые диапазоном давлений от глубокого разрежения (вакуума) до избыточного (250 МПа и выше), большим интервалом рабочих температур ( $-254 \dots +1000$  °С и выше) при агрессивном воздействии среды, предъявляют высокие требования к выбору конструкционных материалов проектируемой аппаратуры.

Наряду с обычными требованиями высокой коррозионной стойкости в определенных агрессивных средах к конструкционным материалам, применяемым в химическом машиностроении, одновременно предъявляются также требования высокой механической прочности, жаростойкости и жаропрочности, сохранения удовлетворительных пластических свойств при высоких и низких температурах, устойчивости при знакопеременных или повторных однозначных нагрузках (циклической прочности), малой склонности к старению и др.

Для изготовления технологической аппаратуры химических и нефтехимических производств используют конструкционные материалы, стойкие и весьма стойкие в агрессивных средах. Материалы пониженной стойкости применяют в исключительных случаях.

При выборе материалов для аппаратов, работающих под давлением при низких и высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от температуры.

При статическом приложении нагрузки важными характеристиками для оценки прочности материала являются предел текучести  $\sigma_T$  (или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  или  $\sigma_{1,0}$ ) и временное сопротивление  $\sigma_B$ . Упругие свойства металлов характеризуются значениями модуля упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Эти характеристики являются основными при расчетах на прочность деталей аппаратуры, работающей под давлением при низких ( $-40 \dots -254$  °С), средних ( $+200 \dots -40$  °С) и высоких (выше  $+200$  °С) температурах.

Для работы при низких температурах по нормам Госгортехнадзора РФ следует выбирать металлы, у которых порог хладоломкости меньше заданной рабочей температуры. Следует отметить, что в химической промышленности на протяжении многих лет безаварийно эксплуатируется при рабочих температурах до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  большое количество аппаратов, трубопроводов, арматуры, насосов и другого оборудования, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества и из серого или ковкого чугуна, т.е. из материалов, имеющих ударную вязкость  $KCU < 20\text{ Дж/см}^2$  при указанной температуре. Поэтому при выборе металла для работы при низких температурах следует исходить не только из его ударной вязкости, но и учитывать величину и характер приложенной нагрузки (статический, динамический, пульсирующий), наличие и характер концентраторов напряжений и чувствительность металла к надрезам, начальные напряжения в конструкции, способ охлаждения металла (хладоносителем или окружающей средой).

При статическом приложении нагрузки в ряде случаев допускается изготовление аппаратов из металлов, приобретающих хрупкость при пониженных рабочих температурах, но не имеющих дефектов, нарушающих однородность структуры и способствующих концентрации напряжений. Технология изготовления аппаратов из таких материалов должна исключать возможность возникновения высоких начальных напряжений в конструкции. К таким аппаратам можно отнести свободно опирающиеся емкости для жидких и газообразных продуктов, содержащихся в них под небольшим избыточным давлением, металлоконструкции неответственного назначения и др.

При динамических нагрузках кроме указанных выше характеристик необходимо учитывать также ударную вязкость  $a_H$ . Для многих углеродистых и легированных сталей ударная вязкость при низких температурах (обычно ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) резко понижается, что исключает применение этих материалов в таких рабочих условиях. Ударная вязкость для большинства цветных металлов и сплавов (меди, алюминия, никеля и их сплавов), а также хромоникелевых сталей аустенитного класса при низких температурах, как правило, уменьшается незначительно и пластические свойства этих материалов сохраняются на достаточно

высоком уровне, что позволяет применять их при рабочих температурах до  $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для оборудования, подверженного ударным или пульсирующим нагрузкам и предназначенного для работы при низких температурах, следует применять металлы и сплавы с ударной вязкостью  $KCU \geq 30\text{ Дж/см}^2$ . Для деталей, имеющих концентраторы напряжений (болтов, шпилек), рекомендуются материалы, у которых при рабочей температуре ударная вязкость  $KCU \geq 40\text{ Дж/см}^2$ .

При высокой температуре наблюдается значительное снижение основных показателей, характеризующих прочностные свойства металлов и сплавов. Временное сопротивление  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  зависят от времени пребывания под нагрузкой и скорости нагружения, так как с повышением температуры металл из упругого состояния переходит в упругопластическое и под действием нагрузки непрерывно деформируется (ползучесть). Температура, при которой начинается ползучесть, у разных металлов различная: для углеродистых сталей обыкновенного качества ползучесть наступает при температуре выше  $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для низколегированных – при температуре выше  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для жаропрочных – при более высокой температуре.

С увеличением времени пребывания металла под нагрузкой характеристики прочности уменьшаются тем значительно, чем выше температура эксплуатации оборудования. Поэтому при расчете на прочность аппаратов, работающих длительное время при высоких температурах, допускаемые напряжения определяют по отношению к условному пределу ползучести  $\sigma_{пл}$  или по пределу длительной прочности  $\sigma_{дл}$ . Для химической аппаратуры допускаемая скорость ползучести принимается  $\leq 10^{-7}\text{ мм/(м}\cdot\text{ч)}$  ( $10^{-5}\text{ \% в год}$ ), для крепежных деталей –  $\leq 10^{-9}\text{ мм/(м}\cdot\text{ч)}$  ( $10^{-7}\text{ \% в год}$ ).

Понижение механических свойств при высоких температурах обусловлено происходящими в металле структурными и фазовыми превращениями. К структурным изменениям такого рода можно отнести графитизацию углеродистой и молибденовой сталей, образование ферритной фазы в хромоникелевых сталях при длительной работе металла в условиях высоких температур. В ряде случаев стабильность структуры стали в течение длительного срока службы оборудования удается обеспе-

чить путем термической обработки. В большинстве случаев для аппаратуры, предназначенной для работы при высоких температурах, применяют жаропрочные стали специальных марок, характеризуемые достаточной механической прочностью и стабильностью структуры. Наряду с жаропрочностью металлы должны обладать жаростойкостью. При непрерывном процессе окалинообразования рабочее сечение металла уменьшается, что приводит к повышению рабочего напряжения и ухудшению условий безопасной эксплуатации оборудования.

Некоторые детали аппаратуры (болты, шпильки, пружины и др.) вследствие повышения пластичности металла при высоких температурах работают в условиях постепенного снижения напряжений, вызванных первоначально приложенной нагрузкой (затягом), при сохранении геометрических размеров (релаксация напряжений). Расчет таких деталей следует производить на предварительную нагрузку (затяг), обеспечивающую на заданный период времени остаточную нагрузку, необходимую для нормальной работы конструкции.

При выборе конструкционных материалов для химического оборудования необходимо также учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное температурное расширение), технологию изготовления аппаратуры, дефицитность и стоимость материалов, наличие стандартов или технических условий на его поставку, освоенность материала промышленностью и др. Так как стоимость изделия в значительной мере определяется стоимостью примененных для его изготовления материалов, при всех прочих равных условиях предпочтение следует отдать более дешевым и менее дефицитным материалам.

В химическом аппаратостроении основным способом выполнения металлических неразъемных соединений является сварка, а в ряде случаев – пайка. Хорошая свариваемость металлов является одним из основных необходимых условий, определяющих пригодность материала для создаваемой конструкции. Следует стремиться к максимально возможному, без ущерба для конструкции, сокращению номенклатуры применяемых марок материалов и типоразмеров.

Аппаратуру не рекомендуется изготавливать целиком из дорогостоящих и дефицитных

материалов. Коррозии обычно подвержена лишь внутренняя поверхность аппаратов. Для обеспечения амортизационного срока службы аппарата достаточен слой коррозионно-стойкого металла толщиной в несколько миллиметров. Таким образом, представляется целесообразным изготавливать аппаратуру для активных коррозионных сред из двухслойного проката, облицовочный слой которого может быть выполнен из требуемого коррозионно-стойкого металла или сплава. Например, вместо монолитной толстолистовой стали 12Х18Н10Т или 10Х17Н13М2Т целесообразно применять двухслойную листовую сталь 16ГС + 12Х18Н10Т или СтЗсп + 10Х17Н13М2Т.

В настоящее время металлургической промышленностью освоен ряд новых марок высоколегированных сталей с малым содержанием никеля, которые рекомендуется применять в химическом машиностроении в качестве заменителей дефицитных хромоникелевых сталей или сталей с большим содержанием никеля. К таким сталям относятся 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т и др.

Для активных коррозионных сред наиболее целесообразно изготовление химической аппаратуры из неметаллических материалов: природных кислотоупоров, керамики, фарфора, стекла, углеродистых материалов, пластических масс (фаолита, полиэтилена, винилпласта и др.) или из углеродистой стали, покрытой кислотостойкими эмалями, резиной или пластмассами (для соответствующих сред, давления и температуры).

В последнее время в конструировании химической аппаратуры все большее применение находят композиционные материалы, которые по механической прочности превосходят даже качественные стали, а по коррозионной стойкости не уступают керамике, стеклу и эмалям.

Таким образом, при конструировании химической аппаратуры к конструкционным материалам должны предъявлять следующие требования:

- 1) достаточной общей химической и коррозионной стойкости материала в агрессивной среде с заданными концентрацией, температурой и давлением, при которых осуществляется технологический процесс, а также стойкость против других возможных видов коррозионного разрушения (межкристаллитной, электрохимической сопряженных металлов в электролитах, под напряжением и др.);



2) достаточной механической прочности при заданных значениях давления и температуры технологического процесса, с учетом специфических требований, предъявляемых при испытании аппаратов на прочность, герметичность и других видах в эксплуатационных условиях при действии на аппараты различного рода дополнительных нагрузок (ветровой, собственного веса и др.);

3) наилучшей способности материала свариваться с обеспечением высоких механических свойств сварных соединений и коррозионной стойкости их в агрессивной среде, обрабатываться резанием, давлением, подвергаться изгибу и др.;

4) низкой стоимости материала, недефицитностью и освоенностью его промышленностью. Необходимо стремиться применять двухслойные стали, неметаллические материалы, стали с покрытиями из неметаллических материалов. Номенклатура применяемых материалов как по наименованию, маркам, так и по сортаменту должна быть минимальной с учетом ограничений, предусматриваемых ведомственными нормами и действующими на заводах-изготовителях инструкциями;

5) качества, при этом химический состав и механические свойства материалов и полуфабрикатов должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов;

6) возможности простой утилизации при выработке сроков эксплуатации оборудования, узлов и деталей.

#### 1.4.2. СТАЛИ

Стали и сплавы являются наиболее распространенными и конструкционными материалами при изготовлении химического оборудования. Сталь обладает хорошей прочностью, низкой стоимостью по отношению к другим конструкционным материалам, весьма технологична при обработке и изготовлении полуфабрикатов, выдерживает высокие температуры и агрессивное воздействие коррозионно-активных сред. Для изготовления аппаратов применяют следующие стали и сплавы в виде полуфабрикатов:

углеродистую сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380–94), поставляемую в виде листового, сортового и фасонного проката, труб, поковок и т.д.; по степени раскисления – спо-

койную (сп), полуспокойную (пс), реже – кипящую (кп);

качественную углеродистую конструкционную, поставляемую в виде листового проката (ГОСТ 5520–79) и в виде сортового проката и труб (ГОСТ 1050–88);

низколегированную сталь (с содержанием легирующих элементов до 2,5 %), поставляемую в виде листового проката (ГОСТ 5520–79), сортового и фасонного проката, труб и поковок (ГОСТ 19281–89);

легированную конструкционную сталь (с содержанием легирующих элементов до 10 %), поставляемую в виде сортового проката, труб и поковок (ГОСТ 4543–71);

теплоустойчивую сталь (ГОСТ 20072–74), поставляемую в виде листового и сортового проката и труб;

высоколегированную сталь и коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные сплавы, поставляемые в виде листового проката, труб и поковок;

стали и сплавы с особыми свойствами, поставляемые в виде листового и сортового проката и труб по специальным ТУ;

двухслойные стали, поставляемые в виде листового проката (ГОСТ 10885–85 и ТУ) с основным слоем из углеродистых, низколегированных и легированных сталей и плакирующим слоем из коррозионно-стойких материалов;

отливки из конструкционной, нелегированной и легированной сталей, поставляемые по ГОСТ 977–88.

В табл. 1.4.1 приведены марки сталей, рекомендуемых для сварных аппаратов с инертными средами, работающих без давления и устанавливаемых на открытом воздухе или в неотопляемом помещении в зависимости от средней температуры самой холодной пятидневки.

**Листовая сталь.** Из листовой стали изготовляют корпуса (обечайки), днища, фланцы, различные тарелки, трубные решетки и многие другие детали аппаратов. Листовой прокат – основной материал для изготовления большинства аппаратов.

Рекомендуемые марки сталей в зависимости от условий применения (рабочих параметров) приведены в табл. 1.4.2 для листовой стали, а в табл. 1.4.3 – для двухслойной листовой стали.

#### 1.4.1. Марки сталей, рекомендуемых для сварных аппаратов, работающих без давления с инертными средами

Температура воздуха, °С	Марка стали
Не ниже -30	СтЗпс, СтЗсп, СтЗГпс, 15К, 16К, 18К, 20К, 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1
-30...-40	
-41...-60	09Г2С, 10Г2С1

Примечания: 1. Для материалов, не приведенных в таблице, нижний температурный предел применения должен определяться исходя из требований табл. 1.4.2. 2. Материалы для сосудов и аппаратов, устанавливаемых в районах со средней температурой воздуха наиболее холодной пятидневки ниже -40 °С, выбираются специализированной научно-исследовательской организацией. 3. Пределы применения двухслойных сталей определяются по основному слою. 4. Допускается испытание сталей на ударный изгиб при средней температуре воздуха наиболее холодной пятидневки для заданного района установки сосуда или аппарата. 5. Пуск, остановку и испытание сосудов и аппаратов на герметичность в зимнее время следует проводить в соответствии с требованиями ОСТ 26 291-94.

Листовую углеродистую сталь марки СтЗсп и двухслойную сталь с основным слоем и стали марки СтЗГпс толщиной более 25 мм и марки СтЗГпс толщиной более 30 мм допускается применять при условии проведения испытаний металла на ударный изгиб на предприятии-изготовителе аппарата или сосуда. Испытания на ударный изгиб следует проводить на трех образцах. При этом ударная вязкость КСУ должна быть не менее: 50 Дж/см<sup>2</sup> при температуре +20 °С; 30 Дж/см<sup>2</sup> - при температуре -20 °С и после механического старения, а на одном образце допускается ударная вязкость не менее 25 Дж/см<sup>2</sup>.

Листовая сталь толщиной листа более 60 мм, предназначенная для сосудов и аппаратов, работающих под давлением более 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>), должна подвергаться на предприятии-поставщике металла ультразвуковому контролю или другому равноценному методу контроля.

Для изготовления аппаратов применяется листовая прокат, состав и размеры которого приведены в табл. 1.4.4 - табл. 1.4.7.

#### 1.4.2. Рекомендуемые марки листовой стали

Марка стали	Температура стенки, °С	Давление среды, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не более	Пункты примечаний
1	2	3	4
СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп	+10...+200	1,6 (16)	2
	-15...+350	0,07 (0,7)	
	-30...+550	-	3
СтЗпс, СтЗсп, СтЗГпс	-20...+425	5 (50)	4, 10, 12, 17
	Св. 0...+200	Не ограничено	6, 10
08кп	-40...+475		7
20К	-20...+425		10
16К, 18К, 20К, 22К	-20...+475		1, 5, 10, 11
22К	-20...+350		
09Г2С, 10Г2С1	-70...+200		
17ГС, 17Г1С, 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1	-40...+475		5, 8, 9, 10
09Г2С, 09Г2СА	-70...+475		10
17ГС, 17Г1С, 16ГС, 14Г2, 09Г2С	-40...+475		10, 13-15, 23, 24
09Г2Сш	-60...+450		10
09Г2СЮЧ, 09ХГ2СЮЧ	-70...+475		
12ХМ	-40...+560		-
10Х2М1А-А, 10Х2М1А (10Х2М1А-ВД, 10Х2М1А-ш)	-40...+550		
10Х2М1А-А			

Продолжение табл. 1.4.2

1	2	3	4
15Х5М	- 40...+ 650	Не ограничено	18, 22
10Х2ГНМ	- 40...+ 550		-
20ЮЧ	- 40...+ 475		
09ХГ2НАБЧ			
16ГМЮЧ			
15Х2МФА-А	- 40...+ 600	10 (100)	
	+ 510...+ 560		
12Х2МФА	- 40...+ 500	Не ограничено	13-15, 23, 24
15Г2СФ	- 60...+ 350		
09Г2ФБ, 10Г2ФБ	- 60...+ 420	10 (100)	-
09Г2БТ, 10Г2БТ, 07ГФБ-У	- 70...+ 200	Не ограничено	-
10ХСНД, 15ХСНД	- 30...+ 475	16 (160)	13-15, 23, 24
Д40, Е40	- 40...+ 200		-
А, В	0...+ 200	Не ограничено	4, 17
Е32, Д32	- 20...+ 200		
10Х14Г14Н4Т	- 196...+ 500		18, 22
08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	- 40...+ 300		-
02Х8Н22С6, 02Х8Н22С6-ПД, 02Х8Н22С6-Ш	- 40...+ 120	-	-
03Х19АГЗН10	- 196...+ 450	Не ограничено	18, 22
03Х21Н21М4ГБ	- 70...+ 450		
08Х18Г8Н2Т	- 20...+ 300		
07Х13АГ20	- 70...+ 300	5 (50)	-
08Х18Н10Т	- 253...+ 610	Не ограничено	18, 22
	+ 610...+ 700		-
08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б	+ 610...+ 700	5 (50)	18, 22
08Х18Н12Б	- 196...+ 610	Не ограничено	-
03Х18Н11	- 253...+ 450		
10Х17Н13М2Т	- 253...+ 700		
	Св. + 350...+ 700		18, 19, 22
08Х17Н13М2Т	- 253...+ 700		-
10Х17Н13М3Т	+ 196...+ 350	18, 22	
02Х18Н11	- 253...+ 450	5 (50)	-
10Х17Н13М3Т	Св. + 350...+ 600	Не ограничено	18, 19, 22
08Х17Н15М3Т	- 196...+ 600		18, 22
03ХН28МДТ, 06ХН28МДТ	- 196...+ 400		-
03Х17Н14М3	- 196...+ 450		18, 22
08Х18Н10	- 253...+ 600		-
08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т		18, 22	
15Х18Н12С4ТЮ	- 20...+ 200	2,5 (25)	-
12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т	- 253...+ 350	Не ограничено	18, 22
	- 253...+ 610		18, 19, 22
12Х18Н10Т	+ 610...+ 700	5 (50)	-
12Х18Н10Т	- 253...+ 350	Не ограничено	-
	- 253...+ 610		19
	+ 610...+ 700		5 (50)
08Х13	- 40...+ 550	До 0,07 (0,7)	18, 20, 22, 25

Продолжение табл. 1.4.2

1	2	3	4
08X13, 12X13, 20X13	- 40...+ 550	Не ограничено	3, 18, 22, 25
			2 (для сталей марок 12X13, 20X13)
08X17T, 15X25T	+ 20...+ 700		18, 22
	+ 20...+ 1000		

Примечания: 1. Допускается применять сталь марок 15 и 20 (ГОСТ 1577-93) при тех же условиях, что сталь марок 16К, 18К и 20К, при этом объем и виды испытаний этих сталей на предприятии-изготовителе аппаратов должны быть проведены по ГОСТ 5520 в том же объеме, что и для сталей марок 15К, 16К, 18К и 20К. 2. Толщина листа не более 16 мм. 3. Для трубных решеток, а также ненагруженных деталей внутренних устройств и других неотчетственных конструкций. 4. Допускается применять листовой прокат сталей марок СтЗсп, СтЗпс толщиной не более 25...40 мм. 5. Механические свойства листов по ГОСТ 5520 толщиной менее 12 мм проверяют на листах, взятых от партии. 6. Допускается применять сталь марок Ст5пс и Ст5сп для деталей, не подлежащих сварке, при тех же параметрах, что и сталь марки Ст4сп с использованием на ударный изгиб на предприятии-изготовителе аппаратов или их отдельных деталей. 7. Прокладки из стали марки 08кп толщиной не более 2 мм применяют при температуре стенки до - 70 °С. 8. Для сосудов и аппаратов из стали марки 10Г2С1, работающих под давлением, температура стенки должна быть не ниже - 60 °С. 9. Допускается применение стали марки 10Г2 по ГОСТ 1577 при температуре стенок - 70 - 41 °С с техническими требованиями для стали марки 09Г2С в этом температурном интервале. 10. Испытание на механическое старение производится в том случае, если при изготовлении сосудов и аппаратов, имеющих температуру стенки выше 200 °С, сталь подвергается холодной деформации (вальцовке, гибке, отбортовке и др.). 11. Для сталей марок 16К, 18К, 20К испытание при - 20 °С производится на металлургическом предприятии. Значение ударной вязкости должно быть не менее 30 Дж/см<sup>2</sup>. 12. При толщине листов менее 5 мм допускается применение сталей по ГОСТ 14637. 13. Контроль макроструктуры должен проводиться по ГОСТ 5520 от партии листов. 14. Листы, поставляемые по ГОСТ 19281, должны быть испытаны полностью при температуре стенки ниже - 30 °С, выше 200 °С или давлении более 5 МПа (50 кгс/см<sup>2</sup>) при толщине листа 12 мм и более. 15. Для нетермообработанных сосудов. 16. Для сталей, поставляемых по ГОСТ 5521, при температуре стенки выше 200 °С необходимо проведение испытания на старение. 17. Допускается применение сталей марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1Д по ГОСТ 5521 при температуре стенки - 40...+ 200 °С. 18. Допускается применение стали по ГОСТ 7350 группы поверхности М3б и М4б при условии, что в расчете на прочность должны быть учтены глубина залегания дефектов и минусовые отклонения. 19. Для сред, не вызывающих межкристаллитную коррозию. 20. Для изделий толщиной до 12 мм. 21. Для изготовления деталей, не подлежащих сварке. 22. Коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная толстолистовая сталь по ГОСТ 7350 должна быть заказана горячекатаной, термически обработанной, травленной, с обрезной кромкой, с качеством поверхности по группе М2б и требованием по стойкости к межкристаллитной коррозии. 23. При заказе проката толщиной до 32 мм включительно класс прочности должен быть 325, 345; при толщине более 32 мм класс прочности 265, 295. 24. ГОСТ 19281 распространяется на прокат из сталей повышенной прочности, применяемых для сосудов, не подвергаемых термической обработке. Возможность применения проката из сталей по ГОСТ 19281 для сосудов, подвергаемых термической обработке, должна согласовываться со специализированной научно-исследовательской организацией. 25. Для внутренних не подлежащих сварке деталей сосудов допускается применение стали марки 08X13 при температуре стенки - 60...+ 550 °С.

#### 1.4.3. Рекомендуемые марки листовой двухслойной стали

Марка стали	Температура стенки, °С	Давление среды, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не более	Пункты примечаний
1	2	3	4
СтЗсп+08X13	- 20...+ 200		1, 3
	- 20...+ 425		1, 3, 5
СтЗсп с плакирующим слоем из сталей марок 12X18Н10Т, 08X18Н10Т, 10X17Н13МЗТ, 10X17Н13М2Т, 08X17Н15МЗТ, 06X28МДТ	- 20...+ 200	5 (50)	1, 3

Продолжение табл. 1.4.3

1	2	3	4
20К + 08Х13	- 20... + 200	Не ограничено	1, 3, 5
	- 20... + 475		
20К с плакирующим слоем из сталей марок 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 06ХН28МДТ	- 20... + 200		1, 3
	- 20... + 425		
16ГС+08Х13, 09Г2С+08Х13	- 40... + 200		1, 2, 3, 5
	- 40... + 475		
09Г2С в зависимости от температуры стенки с плакирующим слоем из сталей марок 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 06ХН28МДТ	- 70... + 200		1, 4, 5
16ГС, 09Г2С с плакирующим слоем из сталей марок 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 06ХН28МДТ	- 40... + 200		1, 3, 5
	- 30... + 200		
12ХМ+08Х13	- 40... + 425		1, 2, 4, 5
	- 40... + 560	1	
15Г2СФ с плакирующим слоем из сталей марок 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	- 40... + 425	-	
20К+НМжМц28-2,5-1,5	- 20... + 425	5 (50)	
12ХМ+08Х18Н10Т	- 40... + 560	Не ограничено	1

Примечания: 1. При заказе листов из двухслойной стали по ГОСТ 10885 толщиной более 25 мм, предназначенных для сосудов и аппаратов, работающих под давлением более 4 МПа (40 кгс/см<sup>2</sup>), необходимо требовать сцепления слоев по первому классу сплошности. 2. Допускается применять двухслойные стали с коррозионно-стойким слоем из сталей марок 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т при температуре стенки, не превышающей максимально допустимую для стали основного слоя, при толщине плакирующего слоя не более 15 % общей толщины, но не более 8 мм. 3. При толщине двухслойных листов менее 10 мм допускается применение основного слоя сталей по ГОСТ 14637 и ГОСТ 5520. 4. По согласованию со специализированной научно-исследовательской организацией допускается применение двухслойных сталей с основным слоем из сталей марок 16ГС, 09Г2С, по ГОСТ 5520 и ГОСТ 19281. 5. Испытания проводятся по листу на предприятии-поставщике металла при температуре стенки ниже - 30 °С, выше 200 °С при давлении более 5 МПа (50 кгс/см<sup>2</sup>) при толщине листа 12 мм и более.

#### 1.4.4. Рекомендуемые состав и размеры стального листового проката, мм

Основные размеры	Сталь листовая		
	горячекатаная (ГОСТ 19903)	холоднокатаная (ГОСТ 19904)	горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая (ГОСТ 10885)
1	2	3	4
Ширина	500...3800	500...2300	1200...2800
Длина	1200...12000	1000...6000	2000...9400

Продолжение табл. 1.4.4

1	2	3	4
Толщина листа стали:  углеродистой обыкновенного качества (ГОСТ 380)  качественной углеродистой низколегированной (ГОСТ 5520)  котельной (ГОСТ 5520)  коррозионно-стойкой, жаростойкой и жаропрочной	0,5...160 (в листах)	0,5...5 (в листах)	4...160
	1,2...12 (в рулонах)	0,5...3 (в рулонах)	—
	4...160	—	4...160
	4...60	—	4...160
	1,5...3,9 (ГОСТ 5582)	0,7...3,9 (ГОСТ 5582)	—
	4...50 (ГОСТ 7350)	4...5 (ГОСТ 7350)	—

## 1.4.5. Рекомендуемые размеры листовой горячекатаной стали, мм

Толщина	Ширина	Длина	Толщина	Ширина
	<b>В листах</b>		<b>В рулонах</b>	
0,4...0,6	500...1000	750...2000	1,2...12,0	500...630
0,63...0,75	500...1250	710...2500	1,5...12,0	650...950
0,8...0,9	500...1250	710...2500	1,2...12,0	1000...1250
1,0	600...1250	1420...2500	1,5...12,7	1400...1500
1,2...1,4	600...1250	1420...3000	3...12	1600...1800
1,5...1,8	600...1500	1420...6000	6...10	1900...2000
2,0...2,8	600...1500	1420...6000	7...10	2100...2200
3,0...3,9	600...1800	1420...6000		
4,0...5,6	600...1800	1420...6000		
6,7...7,0	760...2000	2000...7000		
8...10	710...2500	2000...12000		
11...12	1000...2500	2000...12000		
13...25	1000...2800	2500...12000		
26...40	1250...3600	2500...12000		
42...160	1250...3800	2500...9000		

**1.4.6. Рекомендуемые размеры листовой холоднокатаной стали, мм**

Толщина	Ширина	Длина	Толщина	Ширина
<b>В листах</b>			<b>В рулонах</b>	
0,35...0,5	500...1100	1000...3000	0,5...3,0	500...1000
0,55...0,65	500...1250	1000...3500	0,55...3,0	1100...1250
0,7...0,75	500...1420	1000...4000	0,7...3,0	1400
0,8...1,0	500...1500	1000...4000	0,7...2,5	1420
1,1...1,3	500...1800	1000...4200	0,8...2,5	1500
1,4...2,0	500...1800	1000...6000	1,1...2,5	1600...1800
2,2...3,2	500...2300	1000...6000	2,1...2,5	1900...2300
3,5...3,9	250...2300	2000...4750		
4,0...5,0	1250...2300	3000...4500		

**1.4.7. Рекомендуемые размеры двухслойных коррозионно-стойких листов из стали**

Общая толщина листа, мм	Толщина коррозионно-стойкого слоя, мм	Общая толщина листа, мм	Толщина коррозионно-стойкого слоя, мм
4	0,7...1,1	22; 24; 25; 26	3,0...4,0
4; 5	0,8...1,2	28; 30	3,5...5,0
6; 7	1,0...1,8	32; 34; 36; 38	4,0...6,0
8; 9; 10; 11; 12; 13	2,0...3,0	40; 42; 45; 48	
14; 15		50; 52; 55; 60	
16; 17; 18; 19; 20	2,5...3,1		
21			

**Примечание.** В двухслойной стали, изготовленной электрошлаковой сваркой, промежуточный слой относится к основному. Длина и ширина двухслойных листов соответствуют ГОСТ 19903.

При агрессивном воздействии коррозионно-активных сред агрегаты, узлы и детали оборудования должны изготавливаться из коррозионно-стойких сталей. В нашей стране принята десятибалльная шкала коррозионной стойкости материалов, которая приведена в табл. 1.4.8

Рекомендуемые марки сталей для изготовления коррозионно-стойкого оборудования приведены в табл. 1.4.9.

В табл. 1.4.10 приведены сведения коррозионной стойкости сталей различных марок в тех или иных условиях эксплуатации.

**1.4.8. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости сталей [9]**

Группа стабильности	Скорость коррозии металла, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	0,001	1
Весьма стойкие	0,001...0,005	2
	0,005...0,01	3
	0,01...0,05	4
Стойкие	0,05...0,1	5
	0,1...0,5	6
Пониженно-стойкие	0,5...1,0	7
	1,0...5,0	8
Малостойкие	5,0...10,0	9
	10,0	10

## 1.4.9. Коррозионно-стойкие стали (ГОСТ 5632)

Структурный класс	Марка	Область применения
Ферритный	08X13, 08X18T1	Изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред (атмосферным осадкам, слабым растворам минеральных и органических кислот) при нормальной температуре
	15X25T	Детали, не подвергающиеся действию ударных нагрузок, работающие в средах окислительного характера
Аустенитный	08X18H10T	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах типа азотной кислоты и др.
	08X17H13M2T	Сварная аппаратура, работающая в кипящей фосфорной, серной, 10 %-ной уксусной кислоте и серноокислых средах
	10X14Г14M4T	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах слабой агрессивности, а также при температурах до $-253^{\circ}\text{C}$
	03X21H21M4ГБ	Сварная аппаратура по производству фосфорных удобрений
Аустенитно-ферритный	08X22H6T	Сварная аппаратура в химической, пищевой и других отраслях промышленности; является заменителем стали типа 12X18H10T при температуре до $300^{\circ}\text{C}$
	08X21H6M2T	Заменитель стали 10X17H13M2T
Мартенситный	20X13, 30X13, 40X13	Режущий, измерительный и хирургический инструмент, упругие элементы, предметы домашнего обихода
Аустенитно-мартенситный	07X16H6	Высокопрочные штамповые конструкции и детали, работающие в слабоагрессивных средах
	08X17H5M3	Нагруженные детали, работающие в атмосферных условиях, слабоагрессивных средах восстановительного характера
Мартенситно-ферритный	12X13	Предметы домашнего обихода, изделия, работающие в слабоокислительных средах
	14X17H2	Нагруженные детали, работающие в слабоагрессивных средах окислительного характера в авиационной, химической промышленности

1.4.10. Коррозионная стойкость (в баллах) сталей в различных средах при различной температуре  $t$  [9]

Коррозионная среда, концентрация, %	$t, ^{\circ}\text{C}$	08X13, 12X13	08X18T1	15X25	08X21H6M2T	08X18H10T	08X17H13M2T
1	2	3	4	5	6	7	8
Азотная кислота:							
5	20	5	4	3	—	3	3
5	85	7	5	5	—	4	4
5	$t_{\text{кип}}$	8	7	5	—	—	—
10	20	5	4	4	3	3	—
10	85	7	5	5	5	5	5
10	$t_{\text{кип}}$	8	7	6	5-6	5-6	5-6
50	20	6	6	5	—	3	3
50	80	8	7	6	5	5	4-5



Продолжение табл. 1.4.10

1	2	3	4	5	6	7	8
50	$t_{\text{кип}}$	9	8	7	6	6	6-7
65	20	6	5	5	-	4	4
65	85	9	8	7	5	5	5
65	$t_{\text{кип}}$	10	9	8		8	8
Серная кислота:							
10	20	10	10	10	4	5	4
10	75	10	10	10	6	7	7
10	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	10	10	10
40	20	10	10	10	6-7	7-8	6-7
40	50	10	10	10	7	8	7
40	100	10	10	10	10	10	10
60	20	9	8	8	4	4	3-4
60	70	10	10	10	9	10	9
60	100	10	10	10	10	10	10
98	20	6	6	6	3	4	3
98	100	8	8	7	9	10	9
100	20	5	4	4	3	5	3
100	70	-	-	-	7	9	8
125	10	10	10	-	10	10	10
Смесь кислот (азотная + серная):							
1,0+50	50	-	-	-	4	5	4
3,0+30	50	-	-	-	4	5	5
3,0+30	$t_{\text{кип}}$	-	10	10	-	7	-
5,0+15	$t_{\text{кип}}$	-	-	-	5	5	5
5,0+50	50	-	-	-	5	5	5
5,0+65	100	-	-	-	9	10	9
15+80	60	7	6	6	-	6	-
25+75	60	8	7	5	5	5	5
36+5	85	-	-	-	-	5	5
Соляная кислота:							
0,5	20	8	6	6	5	5	4
0,5	50	8	7	7	6	6	5
0,5	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	9	9	8
5	20	9	8	8	6	6	5
5	60	10	10	10	9	9	8
10	20	10	10	10	6	6	6
10	60	10	10	10	9	9	9
20	20	10	10	10	8	8	7
20	20	10	10	10	8	8	7
20	60	10	10	10	8	8	8
30	20	10	10	9	8	7	6
30	60	10	10	10	9	8	7
37	20	10	10	10	9	9	7

Продолжение табл. 1.4.10

1	2	3	4	5	6	7	8
Уксусная кислота:							
1	90	5	5	5	3	4	3
1	$t_{\text{кип}}$	—	—	—	4	5	4
5	20	6	5	4	1	1	1
5	75	8	6	6	3	4	3
5	$t_{\text{кип}}$	10	8	7	5	6	5
15	20	7	6	6	1	1	1
15	80	8	7	7	3	5	3
15	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	5	8	5
50	20	7	7	6	1	3	1
50	60	—	—	—	3	4	3
50	100	10	9	8	5	8	5
80	20	6	5	5	1	2	2
80	80	9	8	—	4	5	5
80	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	6	8	6
98	$t_{\text{кип}}$	—	—	—	5	7	5
100	20	6	5	—	4	5	4
100	90	9	—	—	5	6	5
100	$t_{\text{кип}}$	10	10	—	7	8	6
Фосфорная кислота:							
5	20	4	3	3	1	1	1
5	50	5	4	3	2	2	2
10	$t_{\text{кип}}$	9	8	—	4	4	4
50	20	8	7	5	2	3	3
50	85	—	8	6	4	5	4
50	$t_{\text{кип}}$	10	9	8	2	—	5
85	20	4	4	3	3	4	3
85	85	9	8	8	6	6	4
85	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	5	8	7
90	110	10	10	10	—	10	10
Фтористо-водородная кислота:							
5	20	—	—	—	10	10	7
10	20	—	—	—	—	7	7
40	20	10	10	10	10	10	8
Щавелевая кислота:							
5	20	8	7	6	—	5	4
5	85	8	7	7	6	7	5
10	20	8	7	6	5	5	5
10	75	8	8	8	—	7	6
10	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	7	10	8
25	85	9	9	8	7	9	8
25	$t_{\text{кип}}$	10	10	10	9	10	8

Продолжение табл. 1.4.10

1	2	3	4	5	6	7	8
Едкое кали (КОН):							
25	$t_{\text{кип}}$	4	4	4	3	4	3
25	20	2	2	2	2	2	2
50	$t_{\text{кип}}$	7	7	7	5	7	6
расплав	300	10	10	10	10	10	10
Едкий натр:							
10	90	5	5	—	4	5	4
20	50	4	4	—	3	4	3
20	$t_{\text{кип}}$	8	5	—	5	5	5
60	90	8	7	7	5	5	5
60	160	—	—	—	8	9	8
90	300	9	9	9	—	8	8
расплав	318	10	10	10	9	10	10

## 1.4.3. ЧУГУНЫ

Чугуны, как материалы, обладающие хорошими литейными свойствами, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и антифрикционными качествами, до сих пор находят широкое применение при изготовлении химических и нефтехимических аппаратов, узлов и деталей.

Однако их отличает ряд недостатков: высокая хрупкость, сложность обработки резанием, высокие коэффициенты линейного расширения, сильная зависимость прочностных характеристик от температуры, трудность, а в ряде случаев и невозможность сварки.

Правила Госгортехнадзора РФ регламентируют использование чугунных отливок по температуре и давлению.

В химическом машино- и аппаратостроении наибольшее применение получили следующие виды чугунов.

**Серый чугун** (ГОСТ 1412) марок СЧ 10, СЧ 15, СЧ 18, СЧ 20, СЧ 21, СЧ 30 и СЧ 35.

Из чугуна СЧ 10 изготавливают корпусные и ненагруженные детали простой конфигурации, а из чугуна остальных марок — ответственные корпусы и детали сложной конфигурации, работающие в слабоагрессивных средах. При расчете деталей на растяжение коэффициент запаса прочности для серого чугуна принимают 6...8.

Коррозионная стойкость серого чугуна приведена в табл. 1.4.11.

**Щелочестойкие чугуны** СЧ Щ1 и СЧ Щ2 применяют для изготовления корпусов, деталей и узлов машин и аппаратов, работающих в

водных растворах щелочей NaOH и КОН при давлении до 1 МПа и температуре — 15...+ 300 °С.

**Ферросилиды** С15, С17 и антихлор МФ 15 применяют для изготовления корпусов, деталей и узлов простой конфигурации для работы с сильноагрессивными средами (растворами солей, азотной и серной кислот) при давлении до 0,25 МПа и температуре 0...+ 700 °С. При разработке конструкции следует учитывать, что кремнистые чугуны очень хрупкие, чувствительны к колебаниям температуры и трудно обрабатываются резанием. Поэтому изделия из них получают отливкой, предусматривая плавные переходы. Ферросилиды широко применяют при изготовлении арматуры.

Следует иметь в виду, что ферросилиды легко корродируют под воздействием соляной кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений.

**Жаростойкие чугуны**, содержащие до 32 % Cr и 1...2 % Si применяют в котельно-топочном оборудовании. Чугуны марки ЖЧХ 0,8; ЖЧХ 1,5; ЖЧ6 5,5 (ГОСТ 7769) используют при изготовлении узлов и деталей, работающих при температуре соответственно 550, 600 и 800 °С, а чугуны марок ЖЧХ 16 и ЖЧХ 30 обладают хорошей стойкостью до температур 1000...1200 °С при действии дымовых газов, содержащих сернистые соединения.

**Жаростойкий и коррозионно-стойкий чугун ЧН15Д7Х2** применяют при изготовлении узлов и деталей, работающих при температуре + 100...+ 600 °С и агрессивных средах.

1.4.11. Коррозионная стойкость серого чугуна

Коррозионная среда, концентрация, %	Массовый показатель, $K_m$ , г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Глубинный показатель, $L$ , мм/год	Коррозионная среда, концентрация, %	Массовый показатель, $K_m$ , г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Глубинный показатель, $L$ , мм/год
Азотная кислота:			Сернистый аммоний:		
10	60,0	—	5...10	0,57...0,65	0,68...0,78
20	24,0	—	20	0,24	0,29
50...75	14,0...12,0	—	Хлористый кальций, 5...10	0,20...0,25	0,24...0,30
Серная кислота:			Хлористый натрий:		
10	35,0...48,0	—	5...10	0,125	0,15
25	25,0...30,0	—	20	0,24	0,29
50	0,25	—	Сода, 10	0,015	0,018
75	0,10	—	Едкий натр:		
Соляная кислота:			5	0,003	0,0036
10...75	25,0...30,0	—	10	0,026	0,031
Уксусная кислота:			25	0,006	0,007
10...25	18,5...15,0	—	Керосин	0,01	0,012
50...75	12,5...9,5	—	Сернистый натрий, 10	0,03	0,04
Медный купорос:			Водопроводная вода при температуре °С:		
0,5	2,3	—	20	0,30...0,55	0,40...0,67
10	23,5	—	90	0,14...0,23	0,17...0,28
Хлорид аммония при температуре 20 °С, 5,0...20,0	0,8...1,05	0,95...1,30	Морская вода:		
Хлорид аммония при температуре 95 °С:			спокойная	0,13...0,30	0,15...0,36
5,0	4,0	4,8	азрированная	0,45...0,70	0,50...0,84
20,0	4,85	5,8	проточная	0,60...1,00	0,75...1,25
Хлорид марганца при температуре 80 °С, 10	0,66	0,79	Дистиллированная вода:		
Нитрат аммония, 5,0	0,63	0,76	спокойная	0,23...0,27	0,28...0,32
Сульфат аммония, 5,0	0,63	0,76	азрированная	0,79	0,95
Алломокалиевые квасцы, 5,0	0,65	0,76	Атмосфера со степенью агрессивности:		
Сульфат алюминия, 5,0	0,83	1,00	1...2	0,25...0,40	0,025
Фосфорная кислота, 3,5	0,52	0,62	3...5	0,45...0,50	0,15...0,80
Смесь кислот (HNO <sub>3</sub> 25 % + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 75 %)	0,12	0,145	Почва с коррозионной активностью: высокой,	—	0,30...0,50
			$\rho = 100...500$ Ом·см		
			средней,	—	0,10...0,25
			$\rho = 500...1000$ Ом·см		
			слабой,	—	0,05...0,1
			$\rho > 1000$ Ом·см		

Антифрикционный чугун АЧС-1, АЧС-2 (ГОСТ 1585) используют для изготовления узлов и деталей, испытывающих трение (подшипников, шарниров, направляющих и др.).

Ковкие чугуны (ГОСТ 1215) КЧ 30-6, КЧ 33-8, КЧ 35-10, КЧ 37-12, КЧ 45-7,

КЧ 50-5, КЧ 55-7, КЧ 60-3, КЧ 65-3, КЧ 70-2, КЧ 80-1,5 применяют в основном для небольших отливок. Основным преимуществом отливок из ковкого чугуна является однородность их свойств по сечению, практически отсутствие внутренних напряжений. С целью

исключения напряжений в конструкциях отливки получают со стенками толщиной до 50 мм.

**Высокопрочные чугуны** (ГОСТ 7293) ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100 применяют для изготовления узлов и деталей с повышенными механическими свойствами. Они имеют высокую жидкотекучесть, незначительную склонность к образованию горячих трещин. Вместе с тем их склон-

ность к образованию усадочных раковин и литейных напряжений выше, чем у серого чугуна. Кроме того, они имеют удовлетворительную коррозионную стойкость (не ниже, чем марок СЧ), жаростойкость, хладостойкость, антифрикционные свойства, обрабатываемость резанием и могут подвергаться сварке и автогенной резке.

В табл. 1.4.12 - табл. 1.4.15 приведены свойства чугуна различных марок.

#### 1.4.12. Механические свойства серого чугуна с пластинчатым графитом

Марка	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Твердость, НВ	Примечание
СЧ10	275	139...274	Малоответственные отливки с толщиной стенок до 15 мм (корпуса, крышки, кожухи и др.)
СЧ15	314	160...224	Малоответственные отливки с толщиной стенок 10...30 мм (трубы, корпуса клапанов, вентили при давлении до 20 МПа и др.)
СЧ18	354	167...224	Ответственные отливки с толщиной стенок 10...20 мм (шкивы, зубчатые колеса, станины, суппорты и др.)
СЧ20	397	167...236	Ответственные отливки с толщиной стенок до 30 мм (блоки цилиндров, поршни, тормозные барабаны, каретки и др.)
СЧ25	450	176...245	Ответственные отливки с толщиной стенок до 40 мм (кокильные формы, поршневые кольца и др.)
СЧ30	490	177...250	Ответственные отливки с толщиной стенок до 60 мм (поршни, гильзы дизелей, рамы, штампы и др.)
СЧ35	540	193...264	Ответственные высоконагруженные отливки с толщиной стенок до 100 мм (малые коленчатые валы, детали паровых двигателей и др.)

#### 1.4.13. Механические свойства ковкого чугуна и его применение

Марка	Твердость, НВ	Временное сопротивление разрыву, МПа, не менее	Марка	Твердость, НВ	Временное сопротивление разрыву, МПа, не менее
КЧ 30-6	100...163	294	КЧ 55-4	192...241	539
КЧ 33-8	100...163	323	КЧ 60-3	200...269	588
КЧ 35-10	100...163	333	КЧ 65-3	212...269	637
КЧ 37-12	110...163	362	КЧ 70-2	241...285	686
КЧ 45-7	150...207	441	КЧ 80-1,5	270...320	784
КЧ 50-5	170...230	490			

**Примечание.** Применяются в основном для изготовления небольших отливок, работающих в условиях динамических нагрузок. Ограниченное применение обусловлено сложностью изготовления отливок, длительностью термической обработки, ограниченными допускаемыми размерами сечений (не более 30...40 мм).

**1.4.14. Механические свойства легированного чугуна  
для отливок со специальными свойствами**

Марка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_H$ , МПа	Твердость, НВ	Свойства
ЧХ1	170	350	203...280	Жаростойкий
ЧХ2	150	310	203...208	
ЧХ3	150	310	223...356	Жаростойкий, износостойкий
ЧХЗТ	200	400	440...580	Износостойкий
ЧХ9Н5	350	700	490...607	
ЧХ16	350	700	390...440	Износостойкий, жаростойкий
ЧХ16М2	170	490	490...607	
ЧХ22	290	540	333...607	
ЧХ22С	290	540	215...333	Коррозионно- и жаростойкий
ЧХ28	370	560	215...264	
ЧХ28П	200	400	245...390	Стойкий в цинковом расплаве
ЧХ28Д2	390	690	390...635	Износо- и коррозионно-стойкий
ЧХ32	390	690	245...333	Жаро- и износостойкий
ЧС5	150	290	140...294	Жаростойкий
ЧС5Ш	290	—	223...294	
ЧС13	100	210	294...390	Коррозионно-стойкий в жидкой среде
ЧС15	60	170	294...390	
ЧС17	40	140	390...450	
ЧС15М4	60	140	390...450	
ЧС17М3	60	100	390...450	Жаростойкий
ЧЮХШ	390	590	183...356	Жаро- и износостойкий
ЧЮ6С5	120	240	236...294	
ЧЮ7Х2	120	170	254...294	Жаро- и износостойкий при высокой температуре
ЧЮ22Ш	290	490	235...356	
ЧЮ30	200	350	356...536	
ЧГ6С3Ш	496	680	215...254	Износостойкий
ЧГ7Х4	150	330	490...586	
ЧГ8Д3	150	330	176...285	Маломагнитный
ЧНХТ	280	430	196...280	Коррозионно-стойкий в газовых средах двигателей внутреннего сгорания
ЧНХМД	290	690	196...280	
ЧНМШ	490	—	183...280	
ЧН2Х	290	490	215...280	Износостойкий
ЧХ4Х2	200	400	460...645	
ЧН1Г7Ш	390	—	120...250	Жаропрочный
ЧН15Д7	150	350	120...250	Маломагнитный
ЧН15Д3Ш	340	—	120...250	
ЧН19Х3Ш	340	—	120...250	
ЧН20Д2Ш	500	—	120...220	Жаропрочный, хладостойкий, маломагнитный

П р и м е ч а н и е .  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву;  $\sigma_H$  – сопротивление изгибу.

#### 1.4.15. Основные эксплуатационные свойства и области применения отливок из легированных чугунов по ГОСТ 7769

Марка	Эксплуатационные свойства	Область применения
1	2	3
ЧХ1	Повышенная коррозионная стойкость в газовой, воздушной, щелочной средах в условиях трения. Жаростойкий в воздушной среде до 500 °С	Детали коксохимического оборудования, сероуглеродные реторты
ЧХ2	То же, до 600 °С	Детали контактных аппаратов химического оборудования, решетки трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов
ЧХ3	То же, но жаростойкий до 700 °С, износостойкий	Детали электролизеров, колосники, детали стекломашин
ЧХ3Т	Износостойкий	Для футеровки пылепроводов и др.
ЧХ16	Жаростойкий до 900 °С, износостойкий при 20 °С и повышенной температуре	Арматура химического машиностроения
ЧХ9Н5	Износостойкий	Для футеровки пылепроводов и др.
ЧХ16М2		
ЧХ22, ЧХ28Д2		
ЧХ22С	Коррозионно-стойкий в запыленных газовых средах при температуре до 1000 °С, кислотостойкий и устойчивый к межкристаллитной коррозии	Детали, не подвергающиеся действию постоянных и переменных нагрузок. Детали аппаратуры для концентрированной азотной и фосфорной кислот
ЧХ28, ЧХ32	Высококоррозионно-стойкий в растворах кислот (азотной, серной, фосфорной, соляной, уксусной, молочной и т.д.), щелочей и солей (азотно-кислом аммония, сульфите аммония, хлорной извести, хлорном железе, селитре), в газах, содержащих серу или SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O. Жаростойкие до 1150 °С, износостойкие	Детали, работающие при небольших механических нагрузках в среде SO <sub>2</sub> и SO <sub>3</sub> , в щелочах высокой концентрации, азотной кислоте, растворах и расплавах солей до 1000 °С
ЧХ28П	Эрозионно стойкий (после окислительного отжига) в цинковых расплавах	Сопряженные детали пар трения, работающие в цинковом расплаве агрегатов горячего непрерывного цинкования
ЧГ6С3Ш, ЧГ7Х4	Износостойкий	Для пылепроводов и пульпопроводов
ЧГ8Д3	Немагнитный, износостойкий	Немагнитные детали, сопряженные трущиеся детали арматуры
ЧЮХШ	Жаростойкий в воздушной среде до 700 °С	Пресс-формы для стекольных изделий, детали печного оборудования, ролики чистовых клетей листопркатных станов
ЧЮ7Х2	Жаростойкий в воздушной среде до 750 °С, износостойкий	Детали печной арматуры
ЧЮ6С5	Жаростойкий в воздушной среде до 800 °С, в среде, содержащей соединения серы, стойкий к резким сменам температуры	Детали, эксплуатируемые в агрессивных газовых средах при обжиге сернистых рудных материалов

Продолжение табл. 1.4.15

1	2	3
ЧЮ22Ш	Жаростойкий в среде, содержащей серу, сернистый газ, оксиды ванадия и пары воды. В воздушной среде жаростойкий до 1100 °С. Высокопрочный при повышенной температуре	Детали обжиговых колчеданных печей, нагревательных кольцевых печей, колосники агломерационных машин
ЧЮ30	Износостойкий в воздушной среде до 1150 °С	Детали печей обжига колчедана
ЧС5	Жаростойкий в топочных газах и воздушной среде до 700 °С	Сероуглеродные реторты
ЧС5Ш	Жаростойкий в топочных газах и воздушной среде до 800 °С	Подовые плиты термических печей
ЧС13, ЧС15, ЧС17	Высококоррозионно-стойкий до 200 °С в концентрированных и разбавленных кислотах, растворах щелочей, солей, кроме фтористо-водородных. Не допускает переменных или ударных нагрузок и перепада температур	Трубы и фасонные детали для трубопроводной арматуры, теплообменников и детали химической арматуры, катодной защиты
ЧС15М4, ЧС17М3	Особокоррозионно-стойкий в серной, азотной, соляной кислотах различной концентрации и температуры, водяных растворах щелочей и солей, при перепаде температур внутри детали до 30 °С, отсутствии динамических нагрузок	Простые по конфигурации детали центробежных и поршневых насосов, компрессоров, трубы и фасонные детали для трубопроводной арматуры, теплообменников, другие детали химической аппаратуры
ЧНХТ	Коррозионно-стойкий в слабощелочных и газовых средах и водных растворах	Маслоты для поршневых, компрессионных и маслоъемных колец
ЧНХМД	Хорошие механические свойства и сопротивление коррозии в продуктах сгорания топлива	Детали кислородных и газовых motoкомпрессоров
ЧН2Х	Повышенные механические свойства, коррозионно-стойкий в продуктах сгорания топлива, кислороде, водных растворах и расплавах каустика	Различные типы зубчатых колес, цилиндры двигателей, абразивные диски, дроссели, холодильные цилиндры
ЧНМШ	Повышенные механические свойства при температуре до 500 °С	Маслоты поршневых колец, холодильные цилиндры
ЧНХМДШ, ЧНЗХМДШ	Высокие прочностные характеристики при статическом и динамическом нагружении, износостойкий	Облицовочные ситовые плиты и др.
ЧН15ХЗШ, ЧН15Д7	Коррозионно- и эрозионно стойкий в щелочах, слабых растворах кислот, серной кислоте любой концентрации, в морской воде, в перегретых водяных парах. Высокий коэффициент линейного расширения	Насосы, вентили и другие детали химической, нефтеперерабатывающей промышленности и арматуростроения



Продолжение табл. 1.4.15

1	2	3
ЧН19Х3Ш, ЧН11Г7Ш	Жаропрочный до 600 °С, коррозионно- и эррозионно стойкий в щелочах, слабых растворах кислот, серной кислоте любой концентрации при температуре более 50 °С, в морской воде, в перегретом водяном паре. Высокий коэффициент линейного расширения	Головки поршней, корпуса насосов, вентили, маломагнитные детали
ЧН20Д2Ш	Высокая стабильность механических свойств до -100 °С. Может быть пластически деформирован в холодном состоянии	Насосы и другие детали нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, детали топливной арматуры, двигателей и холодильных машин, немагнитные детали

## 1.4.4. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

При изготовлении химического оборудования широкое распространение получили цветные металлы и сплавы, так как они обладают повышенной коррозионной стойкостью к воздействию целого ряда агрессивных сред. Кроме того, большинство цветных металлов и

сплавов имеют значительно более высокие коэффициенты теплопроводности, что способствует интенсификации многих технологических процессов. В табл. 1.4.16 приведены рекомендуемые в химическом машиностроении цветные металлы и сплавы для изготовления технологического оборудования и трубопроводов.

#### 1.4.16. Цветные металлы и сплавы, рекомендуемые для изготовления сварного и паяного технологического оборудования и трубопроводов

Марка (ГОСТ или ТУ)	Температура стенки, °С	Давление среды, МПа, не более	Назначение
1	2	3	4

## Алюминий высокой технической чистоты

A995; A99; A98; A97; A95; A85; A8; A7; A7E; A6; A5; A35; A0 (ГОСТ 11069-2001)	-196...+150	0,6	Обечайки, днища, крышки, корпуса, детали внутренних и внешних устройств емкостной и колонной аппаратуры, предназначенной для работы со средами средней и повышенной агрессивности
-------------------------------------------------------------------------------------------	-------------	-----	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Алюминиевые деформируемые сплавы

АД0; АД00; АД00Е; АД000; АД0Е; АД1; АД (ГОСТ 4784-97)	-196...+150	0,6	Обечайки, днища, крышки, корпуса, детали внутренних и внешних устройств емкостной и колонной аппаратуры, трубные пучки, патрубки, предназначенные для работы со средами средней и повышенной агрессивности
Амц; Амг2; Амг3; Амг5; Амг6 (ГОСТ 4784-97)		1,6	Трубные пучки, трубные решетки, патрубки, фланцы технологического оборудования, технологические трубопроводы
Д1; Д16 (ГОСТ 4784-97)	0...+150		Аппаратурные и трубопроводные фланцы, крепежные детали аппаратов и трубопроводов

Продолжение табл. 1.4.16

1	2	3	4
<b>Литейные алюминиевые сплавы</b>			
АЛ1–АЛ9	0... + 250	1,6	Детали и изделия, работающие при повышенных температурах, действию больших ударных и статистических нагрузок
АЛЗ4(ВАЛ5)		6,4	Корпусные детали, работающие под высоким давлением
АЛЗЗ(ВАЛ1)	0... + 350	1,6	Детали
<b>Бронза</b>			
БрОФ8, 0-0,3; БрОФ7-0,2; БрОФ6,5-0,4; БрОФ6,5-0,15; БрОФ4-0,25; БрОЦ4-3; БрОЦС4-4-4 (ГОСТ 5017–74) БрА7; БрАМц9-2; БрАЖ9-4; БрАЖН10-4-4; БрБ2; БрБНТ1.9; БрКН1-3; БрКМц3-1; БрМц5 (ГОСТ 18175–78) Бр03ц12С5; Бр03Ц6С5Н1; Бр04Ц7С5; Бр04Ц4С17; Бр05Ц5С5; Бр06Ц6С3; Бр08С4; Бр010Ф1; Бр010Ц2; Бр010С10	– 196... + 400	4	Детали внутренних и внешних устройств технологической аппаратуры, работающих в средах средней и повышенной агрессивности. Арматура, антифрикционные детали, фильтрованные сетки, подшипники, втулки, вкладыши подшипников
<b>Никель и сплавы</b>			
НП1; НП2; НПЗ; НМЖМц28–2,5–1,5	– 196... + 500	1	Обечайки, днища, крышки, внутренние и внешние устройства емкостной, колонной и теплообменной аппаратуры, трубные пучки и трубопроводы для сред высокой агрессивности
«Хастеллой»: Н70МФВ-ВИ; ХН58В; ХН65МВУ «Монель»	– 196... + 600	1,6	То же, для сред высокой агрессивности восстановительного характера

## 1.4.5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Химически стойкие неметаллические материалы нашли широкое применение в качестве как самостоятельных конструктивных материалов для изготовления технологической аппаратуры, работающей без давления или под небольшим избыточным давлением, так и футеровочных материалов для защиты аппаратуры от разрушающего действия агрессивных сред.

В ряде технологических производств применение неметаллических химически стойких материалов позволяет производить замену

остродефицитных и дорогостоящих высоколегированных сталей, цветных металлов и сплавов. В других технологических производствах разрушающее действие агрессивной среды на металлы и сплавы столь велико, что применение неметаллических химически стойких конструктивных материалов представляет единственную возможность для осуществления технологического процесса производства химических продуктов.

В табл. 1.4.17 приведены неметаллические химически стойкие материалы, рекомендуемые для технологической аппаратуры и трубопроводов.

**1.4.17. Рекомендуемые неметаллические материалы для химической аппаратуры и трубопроводов химических производств**

Материал	Характеристика материала	Температура стенки, °С	Давление среды, МПа, не более	Назначение
1	2	3	4	5
<b>Природные кислотоупоры</b>				
Андезит	Горные породы, состоящие из нескольких минералов. Обладают исключительно высокой химической стойкостью против минеральных кислот любых концентраций при любых температурах, включая и высокие. Хорошо сопротивляются сжимающим нагрузкам, но неудовлетворительно работают на растяжение и на изгиб	≤ 600	0,07	Абсорбционные башни в производстве соляной и азотной кислот; аппаратура для получения купоросного масла и корпуса электрофильтров в установках для концентрирования серной кислоты.
Бештаунит		≤ 800		Для футеровки абсорбционных, сушильных и погложительных башен при нитрозном и контактном способах получения серной кислоты и для аппаратов, подверженных воздействию агрессивных кислот и газов при высоких температурах
Гранит (украинский и карельский)		≤ 200		Поглотительные башни в производстве соляной и азотной кислот; аппаратура для производства йода, брома и других агрессивных химических продуктов
Кварцит (карельский)		≤ 1000		Насадка абсорбционных башен в производстве соляной, азотной и других минеральных кислот

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Кислотоупорный (антофиллитовый) и щелочестойкий (хризотилловый) асбест	Минерал, имеющий волокнистую структуру. Отличается высокой химической стойкостью во многих агрессивных средах и высокой температуростойкостью. Негорюч, обладает низким коэффициентом теплопроводности	≤ 600	0.07	Сальниковая набивка и прокладочный материал для фланцевых соединений
		≤ 400		Тепловая изоляция химических аппаратов и трубопроводов

**Каменное литье**

Плавные диабаз и базальт	Отличаются высокой прочностью на истирание и невысокой термостойкостью, вследствие чего футеровочные изделия из него (кирпич, плитки) применяются при ограниченном перепаде температур: в жидкостях до 100 °С, в газах до 200 °С. Устойчивы при действии кислот (за исключением плавиковой) и щелочей, растворов солей любых концентраций, полностью непроницаем для агрессивных жидкостей и газовых сред	≤ 200	—	Для футеровки химических аппаратов, работающих в условиях воздействия минеральных кислот средних и высоких концентраций под атмосферным или повышенным давлением (автоклавы, монжусы, реакторы, кристаллизаторы, сатураторы, отстойники, кислотохранилища, травильные ванны и др.)
--------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	---	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Керамические кислотоупорные материалы и бетон**

Керамика: дунитовая	Обладает прочностью, теплостойкостью, не поддается истиранию и не пропускает жидкостей. Устойчива против воздействия минеральных кислот (за исключением плавиковой и фосфорной) и органических кислот любой концентрации и щелочных сред концентрации до 2 %	≤ 180 для кислых сред: ≤ 30 для щелочных сред	0.07	Реакторы, ванны, сосуды, тарелки колпачковые типа ТТК (для металлических колонных аппаратов) диаметром 300...1800 мм и другая аппаратура, предназначенная для работы с кислыми агрессивными средами любой концентрации с разбавленными растворами щелочей
кислотоупорная	Устойчива против воздействия минеральных кислот (за исключением плавиковой и фосфорной) и органических кислот любой концентрации			—

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
шамотно-бентонитовая пористая №21; 32; 43; 64	Устойчива против воздействия минеральных кислот (за исключением плавиковой и фосфорной) и органических кислот любой концентрации и щелочных сред концентрации до 10 %	≤ 350 для кислот сред; ≤ 30 для щелочных сред	—	Пористые элементы (цилиндры и диски) для фильтрующих аппаратов, работающих в кислых и щелочных средах
Фарфор: твердый кислотоупорный	Прочный теплостойкий, не поддающийся истиранию и не пропускающий жидкостей. Устойчив против воздействия минеральных кислот (за исключением плавиковой и фосфорной) и органических кислот любой концентрации и щелочных сред концентрации до 10 %	≤ 120 для кислот сред; ≤ 30 для щелочных сред	0,07	Реакторы, нутч-фильтры, ванны, сосуды и другие аппараты, предназначенные для работы с кислыми агрессивными средами любой концентрации с разбавленными растворами щелочей
			0,4	Трубы и фасонные части к ним для трубопроводов
кислотупорный	Устойчив против воздействия минеральных кислот (за исключением плавиковой и фосфорной) и органических кислот любой концентрации		—	Насадка для колонных аппаратов (кольца Рашига); футеровочные штучные изделия (кирпич, плитка) для антикоррозионной защиты емкостной аппаратуры из углеродистой стали и других конструкционных материалов от воздействия агрессивных сред
Кислотоупорный бетон	Смесь кислотоупорных материалов различного гранулометрического состава (андезит, бештаунит, гранит, кварц, щебень, песок, пылевидный наполнитель) с добавлением технического кремнефтористого натрия. Смесь растворяют в 35...38 %-ном водном растворе жидкого стекла. Она застывает в прочный бетон, устойчивый во многих минеральных кислотах	—	—	Кислотохранилища, башни для сушки хлористого водорода, кристаллизаторы и другие аппараты в производстве минеральных кислот. Для футеровки аппаратов, изготавливаемых из углеродистой стали, железобетона и кирпича

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
<b>Искусственные силикатные материалы</b>				
Стекло: силикатное (известково- натриевое)	Обладает повышенной хрупкостью и пониженной теплостойкостью, плохо противостоит резким изменениям температуры (растрескивается), но устойчиво во многих агрессивных средах (кислотах и др.)	≤ 50	—	Бутыли для хранения кислот, водомерные стекла, фонари и смотровые окна химических аппаратов и трубопроводов; трубопроводы. Для футеровки емкостной аппаратуры, изготовляемой из углеродистой стали и других конструкционных материалов
боросиликатное (термостойкое)	Отличается высокой термической устойчивостью и высокой химической стойкостью в органических и минеральных кислотах (за исключением фосфорной и плавиковой)	≤ 400		
кварцевое	Отличается высокой термической устойчивостью и огнеупорностью, что позволяет применять его для аппаратуры, работающей в условиях высоких температур с резкими перепадами. Устойчиво в органических и минеральных кислотах любых концентраций (за исключением плавиковой и фосфорной), но плохо сопротивляется растворам солей и щелочам	≤ 1000	1,0	Емкостная, колонная и теплообменная сварная и литая химическая аппаратура для производства многих минеральных и органических кислот и различных реактивов. Аппаратура для органического синтеза химических продуктов, органических красителей, лаков, эфиров и др.; трубопроводы. Заменитель платиновой аппаратуры
Эмаль: кислотоупорная (покрывная) класса I марок Э-1; 17; 141; 143 для покрытия стальной аппаратуры и марки 5а и класса II для покрытия чугунной аппаратуры	Устойчива при воздействии большинства неорганических и органических кислот и их солей (за исключением технической фосфорной кислоты, содержащей следы фтора, плавиковой и кремнефтористоводородной кислоты), крепких растворов органических кислот и их солей, газов кислотного характера (хлористый водород, сернистый и углекислый газы). Неустойчива к воздействию расплавов щелочей и щелочных растворов при высоких температурах	≤ 200	0,6	Для коррозионно-стойкого покрытия сварной стальной и литой чугунной аппаратуры, предназначенной для работы со многими средами средней и повышенной агрессивности в производствах химически чистых кислот, солей, красителей, фармацевтических и парфюмерных препаратов, пищевых продуктов, взрывчатых веществ и др.
химически стойкая класса II (группы А и Б)	Группы А устойчива при действии слабых растворов органических кислот при температуре кипения, группы Б — при нормальной температуре			

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
<b>Термореактивные пластмассы</b>				
<p>Фаолит:</p> <p>А – листы сырые (ТУ НКХП 322–45); листы отвержденные (ТУ ГХП 35–44); трубы (ТУ МХП 321–51); сортмент по МН 1808</p> <p>Т – листы сырые (ТУ НКХП 322–45); листы отвержденные (ТУ ГХП 35–44); трубы и фасонные части к ним (ТУ МХП 321, сортмент по МН 1808)</p> <p>П – прессовочная масса</p> <p>Фаолитовая замазка марки А по МРТУ 6-05-1003–66</p>	<p>Кислотоупорная пластическая масса, получаемая на основе жидкой фенолоформальдегидной смолы и кислотостойкого наполнителя – асбеста (фаолит марки А), графита (фаолит марки Т) и кварцевого песка (фаолит марки П).</p> <p>Изделия из сырого фаолита можно формовать при нормальной температуре без применения высокого давления с последующим отверждением (бакелизацией), что позволяет изготавливать из него крупногабаритную аппаратуру, не пользуясь прессами.</p> <p>Производится в виде как готовых изделия (из отвержденного материала), так и полуфабрикатов – сырых листов, прессованной массы и замазки.</p> <p>Поддается всем видам механической обработки, хорошо прессуется, склеивается между собой при помощи фаолитовой замазки или замазки арзамит</p>	0...+140	0,06	<p>Абсорбционные и ректификационные колонны, скрубберы, сушильные башни, насадочные колонны, сборники, емкости, кристаллизаторы и другие аппараты для сред средней и повышенной агрессивности. Для футеровки емкостной аппаратуры из углеродистой стали</p> <p>Теплообменная аппаратура (оросительные холодильники) для тех же сред; трубопроводы</p> <p>Запорная арматура</p> <p>Для соединения листового фаолита и труб при изготовлении из них изделий</p>
<p>Текстолит: конструкционный ПТ, ПТК (ГОСТ 5)</p>	<p>Слоистый материал, получаемый путем прессования уложенной слоями хлопчатобумажной ткани, пропитанной резольной фенолокрезоло или ксиленолоформальдегидной смолы или смесью этих смол. Отличается высокой прочностью на сжатие, хорошо обрабатывается резанием, обладает высокой устойчивостью во многих агрессивных средах, имеет низкий коэффициент теплопроводности</p>	- 196... + 125	-	<p>Детали внутренних устройств аппаратов (шестерни, ролики для тросов, муфты и др.) для сред средней и повышенной агрессивности; теплоизолирующие подкладки под опоры аппаратов и проставки в низкотемпературной арматуре</p>
<p>графитированный; листы и плиты</p>	<p>Хорошо работает на сжатие, хорошо обрабатывается резанием, обладает хорошими антифрикционными свойствами и высокой устойчивостью во многих агрессивных средах</p>			<p>Вкладыши подшипников скольжения для узлов перемешивающих устройств и другие детали аппаратов для агрессивных сред</p>

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Асботекстолит: плиты толщиной 6...150 мм (МРТУ 6-05-898)	Обладает низким коэффициентом теплопроводности	- 196... + 140		Для теплоизоляционных подкладок под опоры аппаратов, работающих при высоких и низких температурах стенки
Асбовинил	Композиция из кислотоустойчивого асбеста и лака этиноль. Обладает хорошей адгезией к металлу, бетону, дереву, керамике, возможностью нанесения футеровочного слоя шпателем или кистью, высокими пределами рабочих температур, при которых сохраняются антикоррозионные свойства материала, доступностью и дешезвиной исходного сырья. Устойчив к резким колебаниям температуры, обладает низким коэффициентом теплопроводности и высокой устойчивостью к воздействию большинства кислот, щелочей и других агрессивных сред. Токсичен и огнеопасен	-- 50... + 110		Для антикоррозионной футеровки химических аппаратов емкостного типа для агрессивных сред. Толщина футеровочного слоя асбовинила обычно достигает 10...12 мм. Непригоден для применения его в качестве самостоятельного конструкционного материала

**Пластмассы термопластичные**

Поливинилхлорид суспензионный (винипласт) (ГОСТ 14332)	<p>Сохраняет достаточную прочность до температуры 60 °С, не подвержен быстрому старению, снижает механические свойства и химическую стойкость, но очень чувствителен к надрезу, резко снижает ударную вязкость (иногда до 100 % исходной).</p> <p>Устойчив к воздействию почти всех кислот, щелочей и растворов солей любых концентраций. Исключение составляют сильные окислители (азотная кислота, олеум). Нерастворим во всех органических растворителях за исключением ароматических и хлорированных углеводородов (бензол, толуол, дихлорэтан, хлорбензол). В большинстве случаев химическая стойкость винипласта, наивысшая для средних концентраций, низкая для высоких и низких концентраций. Легко обрабатывается резанием, легко деформируется в горячем состоянии, хорошо сваривается и склеивается</p>	0...+ 40	0,6	<p>Обечайки, днища, крышки, детали внутренних устройств сварных и клееных технологических аппаратов для сред средней и повышенной агрессивности: для футеровки технологической аппаратуры.</p> <p>Фланцы аппаратов, воздуховодов и другие детали аппаратов и трубопроводов</p>
--------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
<p>Полиэтилен: высокого давления (ПЭВД) (ГОСТ 16337)</p> <p>низкого давл- ения (ПЭНД) (ГОСТ 16338)</p>	<p>Склонен к старению под воздействием кислорода воздуха и солнечной радиации, повышающих жесткость и хрупкость материала. Применение универсальных стабилизаторов надежно защищает материал от старения обоих видов. С повышением температуры резко снижаются прочностные свойства. Обладает хорошей адгезией к металлам и многим неметаллическим материалам, что позволяет применять его в качестве антикоррозионного футеровочного материала для аппаратуры, работающей в различных агрессивных средах.</p>	<p>- 60... + 50</p>		<p>Трубопроводы технологических производств для транспортирования воды, инертных газов, негорючих и нетоксичных паров и жидкостей, продуктов с токсическими свойствами, пожаро- и взрывоопасных жидкостей и газов, к которым материал химически стоек и для которых непроницаем, а также для негорючих и нетоксичных паров и жидкостей, к которым материал условно стоек</p>
	<p>Поддается различным методам переработки (экструзии, прессованию, литью под давлением), легко сваривается и склеивается.</p> <p>При нормальной температуре устойчив к воздействию большинства минеральных кислот, оснований и растворов солей, а также ко многим органическим жидкостям, но набухает в углеводородах, а при 60...70 °С растворяется в них. При 20 °С нестойк к ацетону, бензину, керосину, сероуглероду, нефти, трихлорэтилену, концентрированному раствору йода, хлору. С повышением температуры среды химическая стойкость снижается. В большинстве случаев химическая стойкость является наивысшей для средних концентраций среды и меньшей для низких и высоких концентраций. Горит под воздействием открытого пламени</p>	<p>- 60... + 60</p>	<p>1,0</p>	<p>Трубопроводы технологических производств для транспортирования воды, инертных газов, нетоксичных паров и жидкостей, продуктов с токсическими свойствами, за исключением сильнодействующих ядовитых веществ и дымящихся кислот, горючих (в том числе и сжиженных) и активных газов, легко воспламеняющихся и горючих жидкостей, к которым материал химически стоек и для которых непроницаем, а также для негорючих и нетоксичных паров и жидкостей, к которым материал условно стоек</p>

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
<p>Термостабилизированный полипропилен (ГОСТ 26996)</p>	<p>Выдерживает значительные механические нагрузки и обладает высокой эластичностью. Твердость почти в 2 раза выше твердости полиэтилена низкого давления и более чем в 5 раз выше твердости полиэтилена высокого давления. Высокие механические свойства сохраняет вплоть до температуры размягчения.</p> <p>Процесс старения аналогичен старению полиэтилена и затормаживается у стабилизированного материала.</p> <p>Хорошо сваривается, но плохо склеивается из-за слабого набухания в органических растворителях. Методы переработки такие же, как и полиэтилена.</p> <p>Отличается высокой стойкостью к воздействию минеральных кислот и щелочей даже при повышенных температурах, органических растворителей при нормальной температуре, но разрушается в дымящейся азотной кислоте, олеуме и растворах галогенов, при 80 °С растворяется в ароматических углеводородах (бензоле, толуоле) и галогенозамещенных углеводородах</p>	<p>- 10... + 100</p>	<p>1,0</p>	<p>Обечайки, днища и другие детали сварной емкостной технологической аппаратуры, изготавливаемой из листового материала в сочетании с металлическими каркасами и без них, предназначенной для работы со средами средней и повышенной агрессивности.</p> <p>Детали внутренних устройств и патрубков аппаратов того же назначения; трубопроводы технологических производств.</p> <p>Плиты и рамы фильтр-прессов, фильтрованные ткани</p>
<p>Полистирол: общего назначения (ГОСТ 20282)</p> <p>ударопрочный А, Б (ГОСТ 28250)</p>	<p>Сваривается хуже, чем полиэтилен и полипропилен; прочность сварного шва составляет 40...50 % прочности основного материала. Склеивается специальным клеем.</p> <p>Поддается различным методам переработки (экструзии, прессованию, литью под давлением).</p> <p>Устойчив во многих агрессивных средах</p>	<p>До + 75</p>	<p>0,07</p> <p>1,0</p>	<p>Обечайки, днища и другие детали сварной и клееной технологической аппаратуры, изготавливаемой из листового материала в сочетании с металлическими каркасами, предназначенной для работы со средами средней и повышенной агрессивности.</p> <p>Трубопроводы технологических производств</p> <p>Смотровые окна, люки, бобышки, фланцы</p>

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Сополимеры стирола МС, МСН-Л (ГОСТ 12271)	Более высокая механическая прочность и эластичность, чем у полистирола	До + 85	1,0	Технологическая аппаратура и лабораторное оборудование
Полиизобутилен без наполнителя и полиизобутилен с наполнителем марки ПСГ (листы по ТУ МХП 2987)	<p>Мягкий, эластичный, каучукоподобный, обладающий хорошей адгезией к металлам, дереву, бетону. Легко сваривается в потоке горячего воздуха (без применения присадочного материала) и легко склеивается как между собой, так и с различными конструктивными материалами.</p> <p>Без наполнителя и с наполнителем (марка ПСГ) обладает высокой химической стойкостью во многих агрессивных средах; неустойчив в минеральных и растительных маслах и других органических жидкостях при небольших давлениях (порядка 0,3 МПа).</p> <p>Марки ПТ неэлектропроводен, других марок электропроводен, что затрудняет контроль футеровки электрическими методами и не позволяет применять этот материал для антикоррозионной защиты аппаратов, работающих под электрическим напряжением (электролизеров и др.)</p>	До + 100	—	<p>Для футеровки аппаратуры из стали, алюминия, дерева, бетона и других материалов от воздействия агрессивных сред.</p> <p>Подслой в комбинированных футеровках химической аппаратуры, в которых имеет место сочетание материалов неорганических и органических (например, футеровка с применением керамических плиток на подслое из полиизобутилена)</p>
Фторопласт-3 (ГОСТ 13744)	Обладает высокой химической стойкостью во многих агрессивных средах, но разрушается под воздействием расплавленных щелочных металлов, расплавов едких щелочей, элементарного фтора, олеума	– 195... + 150		
Фторопласт-4 (ГОСТ 10007), фторопласт-4Д (ГОСТ 14906)	Механические свойства существенно зависят от температуры. Под воздействием внешних нагрузок происходит рекристаллизация (явление хладотекучести). Необратимые остаточные деформации появляются при нагрузках выше 3 МПа и температуре 80...100 °С	– 269... + 260		Теплообменники и детали внутренних устройств аппаратов для работы со средами средней и повышенной агрессивности; трубопроводы

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Полиметил-метакрилат (органическое стекло)	Хорошая светопрозрачность, при вытяжке в высокоэластичном состоянии обеспечиваются высокая пластичность, способность выдерживать большие деформации без разрушений. Хорошо склеивается дихлорэтаном, сваривается термическим способом	До + 100	1,0	Прозрачные элементы технологической аппаратуры, лабораторное оборудование и аппаратура при отсутствии воздействия сильных органических растворителей
Капрон (ТУ 6-06-309)	Более высокие механические свойства, чем у других термопластов, хорошие антифрикционные свойства, большое водопоглощение	До + 80	1,0	Элементы антифрикционных пар, бесшумные зубчатые колеса в инертных средах
Полиамиды	Меньшее водопоглощение, чем у капрона			
Стеклонаполненные полиамиды ПА610-ДС; ПА6-210-ДС; ПА-211-ДС; ПА66-Д (ГОСТ 17648)	Прочность в 2-3 раза выше, чем у капрона; менее пластичны, низкий коэффициент трения, стабильность усадки	До + 80	1,6	Корпусы лабораторных установок, внутренние и внешние элементы аппаратуры
Полиакрилат Д-3	Высокие термическая стойкость и жаростойкость	До + 200	1,0	Элементы аппаратуры, испытывающие повышенное термическое воздействие
Полиуретан ПУ-1	Стоек к воздействию разбавленных кислот, щелочей, масел, углеводов, органических кислот	- 60... + 100	1,0	Элементы аппаратуры, испытывающие агрессивное воздействие сред
Полиформальдегид	Один из наиболее жестких полимеров; высокие теплостойкость, морозостойкость, антифрикционные и диэлектрические свойства, химическая стойкость	- 50... + 110	1,0	Ручки аппаратуры и приборов, корпуса лабораторного, технологического оборудования и электроприборов, вкладыши подшипников
Поликарбонат	Высокие теплостойкость и морозостойкость; низкое водопоглощение, хороший диэлектрик	От -50 до +110	1,0	Элементы трубопроводной аппаратуры

**Реактопласты**

Стекловолокнистый материал СВМ-ЭР	Состоит из стеклянных волокон и эпоксидной или фенолформальдегидной смолы. Обладает высокими механическими и электроизоляционными свойствами	До + 200	1,6	Корпусы аппаратуры, работающей в агрессивных средах
-----------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-----	-----------------------------------------------------

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Стекловолок- нит: АГ-4 (ГОСТ 20437)	Состоит из стеклянных волокон и эпоксидной или фенолформальдегидной смолы. Обладает высокими механическими и электроизоляционными свойствами	До + 200	1,6	Корпусы аппаратуры, работающей в агрессивных средах
ДСВ-2-Р-2м (ГОСТ 17478)	Состоит из пропитанных эпоксидной или фенолформальдегидной смолой рубленых стеклянных волокон. Обладает высокими механическими и электроизоляционными свойствами	До + 200	1,6	Сложные детали с тонкими стенками
Графитированный текстолит, асботекстолит	Фрикционный материал. Состоит из асбестовой ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Обладает хорошей теплоустойкостью	До + 400	—	Фрикционные диски, гидравлические передачи

## Материалы на основе каучука

Резина марки 4849	На основе натурального каучука. Отличается удовлетворительной прочностью, хорошей эластичностью и хорошим сопротивлением истиранию, высокой морозостойкостью и теплоустойкостью, хорошей адгезией к металлам.	- 50... + 80	—	Для гуммирования аппаратуры из углеродистой стали, чугуна, алюминия и его сплавов, предназначенной для работы со средами средней и высокой агрессивности. Гуммирование производится на подслое из эбонита
Эбониты марок 1726 и ИРП-1213	Растворяется в бензине, бензоле, хлорированных углеводородах и нестойка к маслам и озону			Для наружного гуммирования аппаратуры того же назначения
Полуэбонит марки ИРП-1212				Подслоя для эбонита марки ИРП-1213
Резина марок 1976-М и 4476	На основе натрийбутиленового каучука. Отличается хорошими эластичностью и адгезией к металлам, высокой морозостойкостью и теплоустойкостью. Резина марки 1976-М вулканизируется паром под давлением, а марки 4476 — открытым способом.	- 40... + 80	—	Для гуммирования аппаратуры из углеродистой стали, чугуна, алюминия и его сплавов, предназначенной для работы со средами средней и высокой агрессивности. Гуммирование производится через подслоя эбонита марки 1814 термопреновым клеем
Полуэбонит марки 1751	Резины растворяются в бензине, бензоле, хлорированных углеводородах и нестойки к маслам			Для наружного гуммирования аппаратуры того же назначения
Эбонит марки 2109				Для гуммирования пробковых кранов (трубопроводной арматуры)

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Резина марок 829 и 2566	На основе натурального и натрийбутадиенового каучуков. Резины мягкие, способные вулканизоваться открытым способом, обладают хорошей адгезией к металлу	- 40... + 80		Для гуммирования аппаратуры из углеродистой стали, чугуна, алюминия и его сплавов, предназначенной для работы со средами средней и высокой агрессивности, Гуммирование производится на подслое из эбонита марки 1814 термопреновым клеем
Эбонит марки 1814	Не обладает химической стойкостью и не применяется как самостоятельное покрытие, но обеспечивает хорошее сцепление с металлом			Подслоя под мягкие химически стойкие резины марок 829, 2566, 1976-М и 4476
Резина марок ИРП-1025 и ИРП-1142	На основе полихлоропренового каучука (наирита) по ТУ 1562-54. Хорошо сопротивляется старению, не воспламеняется. Обладает стойкостью к действию масла и бензина, морозостойкостью до -30 °С и теплостойкостью до 80 °С. При хранении склонны к самовулканизации и кристаллизации (для ликвидации последней применяется подогрев)	- 30... + 80	-	Для гуммирования аппаратуры из стали и чугуна, предназначенной для работы со средами средней и высокой агрессивности. Приклеивается к металлу клеем 200 или клеем «лейконат»
Резина марки 8ЛТИ	На основе бутадиенстирольного каучука. Отличается эластичностью, хорошей сопротивляемостью истиранию, морозостойка до -40 °С, теплостойка до 100 °С. Растворяется в бензине, бензоле, хлорированных углеводородах, нестойка к маслам	- 40... + 100		Для гуммирования аппаратуры из углеродистой стали и чугуна, предназначенной для работы со средами средней и высокой агрессивности. Приклеивается к металлу клеем «лейконат»
Хлоропреновый жидкий каучук (жидкий наирит НТ)	Покрытие вулканизуется при 100 °С. Резина в вулканизованном состоянии отличается хорошей механической прочностью и хорошей устойчивостью к истиранию, обладает хорошей щелочестойкостью и удовлетворительной кислотостойкостью, водостойкостью, бензо- и маслостойкостью и атмосферостойкостью. Удовлетворительно сопротивляется кислородному и тепловому старению, но обладает плохой радиационной устойчивостью	- 30... + 60	-	Для гуммирования аппаратуры из углеродистой стали, предназначенной для работы с кислотами и щелочам при температуре до 60 °С

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
<p>Раствор резиновой смеси:</p> <p>марки ИРП-1257</p> <p>марки ИРП-1258</p>	<p>Отличается повышенной химической стойкостью к кислотам и щелочам</p>	<p>– 30... +60</p>	<p>–</p>	<p>Для гуммирования через хлорнаиритовый или эпоксидный грунт деталей, узлов и аппаратов сложной конфигурации малых размеров, предназначенных для работы с кислотами и щелочами при нормальных и повышенных температурах и подвергающихся динамическим нагрузкам</p>

## Углеродистые материалы

<p>Графит:</p> <p>мелкодисперсный прессованный и пропитанный синтетическими смолами, конструкционный марок МГ; МГ-1; МГ-2 (ТУ 601)</p> <p>мелкозернистый прессованный и пропитанный синтетическими смолами, конструкционный марок МГ-3; МГ3-Л (ТУ 601)</p> <p>плотный прессованный конструкционный марки ППГ (ТУ 601)</p> <p>электродный конструкционный марки ГЭЭ (ТУ 601)</p> <p>Графитированный материал марки АРВ, пропитанный в изделиях фенолформальдегидной смолой (ПТУ 04)</p>	<p>Прессованный и пропитанный синтетическими смолами. Отличается благоприятным сочетанием свойств: высокой прочностью на сжатие в сочетании с высокой тепло- и температуростойкостью, высокими тепло- и электропроводностью, а также химической стойкостью во многих агрессивных средах даже при высоких температурах. Хорошо обрабатывается резанием на обычных металлорежущих станках и склеивается синтетическими клеями и кислотоупорной замазкой арзамит 4 и кислото-щелочестойкой замазкой арзамит 5</p>	<p>– 18... + 150</p>	<p>0,5</p>	<p>Различные детали корпусов и внутренних устройств аппаратов для работы со средами средней и повышенной агрессивности: абсорберов и реакторов, применяемых в производствах бромистоводородной, плавиковой, фосфорной и хлоруксусной кислот, хлора, хлорбензола, тетрахлорэтана и трихлорэтилена; баков и резервуаров, применяемых в производстве соляной кислоты, для хранения фторуксусных, фторбористых и фторфосфорных смесей в производстве плавиковой кислоты и других сред; отмывные колонны, применяемые в производствах соляной и бромистоводородной кислот; теплообменники для нагрева и охлаждения агрессивных сред в производствах серной кислоты, сернистого ангидрида, хлора, хлоратов и других высокоагрессивных химических продуктов</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------	------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Продолжение табл. 1.4.17

1	2	3	4	5
Графитопласт (антегмит): марки АТМ-1 (трубы СТУ 45-ЦЧ-942)	Отличается от графита более высокой прочностью, непроницаемостью для жидкостей и газов по всему объему, но пониженной теплопроводностью.		0,3	Трубные пучки теплообменных аппаратов; патрубки аппаратов; трубопроводы для работы со средами средней и высокой агрессивности
марки АТМ-1 (футеровочные плитки ВТУ 367)	Марки АТМ-1 обладают высокой химической стойкостью во многих минеральных и органических кислотах, щелочах, растворах солей любых концентраций вплоть до высоких температур		-	Для антикоррозионной футеровки стальной химической аппаратуры для работы со средами высокой агрессивности
марок АТМ-1Г и АТМ-10	Отличается от антегмита АТМ-1 значительно более высокой теплостойкостью и теплопроводностью, меньшим коэффициентом температурного расширения и меньшей механической прочностью	- 18... + 115		Детали теплообменной аппаратуры для работы со средами высокой агрессивности; трубы и фасонные части к ним; детали насосов для перекачки агрессивных жидкостей
Литьевые графитопласты марок НЛ, 2ФНЛ, 5ЭФНЛ	Марки НЛ стоек почти во всех кислотах, за исключением сильных окислителей. Марки 2ФНЛ стоек в большинстве неокислительных кислотах, растворителях и растворах солей. Марки 5ЭФНЛ стоек к кислотам и щелочным средам, органическим растворителям, спиртам и углеводородам		0,3	Крупногабаритные литье детали аппаратов для работы со средами средней и повышенной агрессивности (корпусы поглотительных колонн, крыши аппаратов и др.). Литье плиты для футеровки ванн, сборников и различных сосудов
Угольный антифрикционный материал марок АО-600 и АО-1500	Обладает хорошими антифрикционными свойствами. Допустимая удельная нагрузка до 2 МПа. Коэффициент трения после приработки 0,05			Вкладыши подшипников, уплотнительные кольца, детали торцовых уплотнений, работающие в условиях трения без смазочного материала в паре с чугуном
Графитированный антифрикционный материал: марок АТ-600 и АТ-1500	Обладает хорошими антифрикционными свойствами. Допустимая удельная нагрузка до 1,5 МПа. Коэффициент трения после приработки 0,05	-	-	
пропитанный фенолоформальдегидной смолой марки АТ-1500-Ф	Отличается большей прочностью и более высоким значением допустимого удельного давления (до 10 МПа)			Вкладыши подшипников, уплотнительные кольца, детали торцовых уплотнений, работающие в условиях трения без смазочного материала в паре со сталью



## Глава 1.5

## СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ОТ КОРРОЗИИ

К защите химического и нефтехимического оборудования от коррозии прибегают в случаях, когда невозможно или экономически нецелесообразно подобрать конструкционный материал, удовлетворяющий условиям эксплуатации. Выбор метода защиты от коррозии определяется совокупностью ряда факторов, в числе которых главными являются: характер технологической среды, вид оборудования (емкостное, реакционное, колонное, трубопроводы, газоходы и др.), его габаритные размеры и место установки, конфигурация оборудования (сложность геометрической формы, наличие перемешивающих устройств, опор, перего-

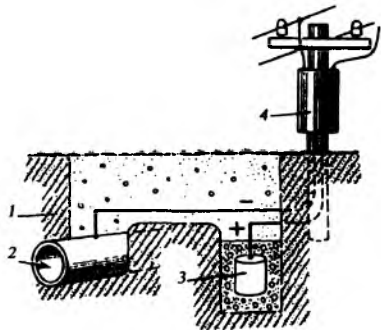


Рис. 1.5.1. Схема катодной защиты трубы с использованием вспомогательного анода и выпрямителя:

- 1 — грунт; 2 — защищаемый трубопровод;  
3 — вспомогательный электрод (стальной лом, графит); 4 — выпрямитель

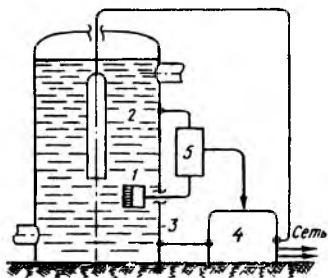


Рис. 1.5.2. Схема анодной электрохимической защиты аппарата:

- 1 — электрод сравнения; 2 — катод; 3 — защищаемая конструкция; 4 — источник поляризующего тока; 5 — прибор для измерения потенциала защищаемой конструкции

родок и других внутренних элементов) и, конечно, химическая стойкость используемых защитных материалов. Помимо этого, учитываются теплофизические, физико-механические и другие характеристики материалов, удовлетворяющие условиям эксплуатации оборудования.

Существуют следующие методы защиты от коррозии: электрохимическая защита; обработка среды с целью снижения агрессивности; нанесение защитных покрытий; комбинированная защита.

**Электрохимическая защита.** Этот метод основан на снижении скорости коррозии металлов путем смещения их электродных потенциалов до значений, соответствующих крайне низким скоростям коррозии. Это достигается путем поляризации металла конструкции от источника постоянного тока или при контакте с добавочным электродом («жертвенным» металлом), являющимся анодом по отношению к защищаемой конструкции. Существуют две принципиальные схемы такой защиты: катодная и анодная.

Сущность катодной защиты заключается в том, что защищаемую конструкцию 1 подсоединяют к отрицательному полюсу постоянного источника тока, положительный полюс которого соединен со вспомогательным электродом 3 (рис. 1.5.1). В результате поляризации вспомогательный электрод будет разрушаться, существенно затормаживая коррозию защищаемой конструкции. Разновидностью катодной защиты является протекторная защита. В этом случае вместо источника постоянного тока к защищаемой конструкции подсоединяют специальный протектор (магниевый, цинковый, алюминиевый), отрицательный потенциал которого больше потенциала металла защищаемой конструкции.

При анодной защите конструкцию 3 подсоединяют к положительному полюсу источника 4 постоянного тока, а его отрицательный полюс — к вспомогательному электроду 2 (рис. 1.5.2). Такой вид защиты применим только для условий, когда металл конструкции можно перевести в пассивное состояние. В противном случае произойдет усиление коррозии.

Электрохимическая защита эффективна только для защиты изделий несложной конфигурации в средах, обладающих высокой электропроводностью. Как правило, это подземные сооружения (трубопроводы, хранилища, фундаменты и др.), оборудование, эксплуатируе-

мое в морской воде. Из химического оборудования для такой защиты пригодны резервуары, теплообменники и др.

Разновидностью электрохимической защиты является кислородная защита, при которой за счет насыщения среды кислородом можно перевести металл конструкции в пассивное состояние.

**Обработка среды.** Снижение агрессивности среды осуществляется удалением из нее веществ, вызывающих коррозию металла, или введением веществ-замедлителей, существенно тормозящих коррозию (ингибиторов). В первом случае эффект достигается несколькими способами:

удалением кислорода деаэрацией (нагреванием до 90 °С), насыщением жидкости азотом или добавлением в нее поглотителей кислорода;

удалением кислот путем их нейтрализации гашеной известью или едким натрием;

удалением солей из воды в теплосиловых установках, в ионообменных фильтрах; вакуумированием.

Во втором случае в технологическую среду вводят ингибиторы коррозии – химические соединения, которые, присутствуя в коррозионной системе в достаточной концентрации, уменьшают скорость коррозии без значительного изменения концентрации любого коррозионного агента. Ингибиторы обычно вводят в среду в небольших количествах. Ингибиторами коррозии могут быть композиции химических соединений.

Ингибиторы коррозии подразделяют:

по механизму действия – на катодные, анодные и смешанные;

по химической природе – на неорганические, органические и летучие;

по сфере влияния – в кислой, щелочной и нейтральной среде.

Наибольшая эффективность ингибиторной защиты достигается при постоянном объеме агрессивной среды, например, при хранении, транспортировке и консервации изделий, при защите стальной арматуры в железобетоне. При добыче, хранении и переработке нефти и т.п.

**Нанесение защитных покрытий.** Защита металлических и других поверхностей может быть осуществлена путем нанесения покрытий из металлических или неметаллических материалов. В любом случае защитный эффект будет определяться прежде всего химической

стойкостью материала, из которого формируется покрытие, его сплошностью, непроницаемостью и другими факторами. В зависимости от степени агрессивности среды и условий эксплуатации различают простые, усиленные и весьма усиленные покрытия.

Для защиты химического оборудования, постоянно контактирующего с агрессивной средой, наиболее приемлемыми являются покрытия, осуществленные методами, обеспечивающими их сплошность. Для защиты химического оборудования более распространенными являются покрытия из различных неметаллических материалов. Из металлических покрытий в этих условиях менее надежными являются гальванические и химические.

В табл. 1.5.1 дана характеристика некоторых способов нанесения металлических покрытий за исключением гальванических, а в табл. 1.5.2 – минимальные толщины покрытий, получаемых гальваническим путем.

Покрытия из неметаллических материалов классифицируют по различным признакам. По толщине их условно можно разделить на тонкостенные (толщиной до 1 мм) и толстостенные (толщиной более 1 мм). Покрытия могут быть адгезированными к защищаемой подложке (собственно покрытия) и не иметь прочного сцепления с ней (футеровки).

Различие конструкций химических аппаратов и их технологического назначения, разнообразие агрессивных сред как по концентрации, так и по температуре, разнообразие материалов и технологий их нанесения на защищаемую поверхность обуславливают множество схем нанесения защитных покрытий, которые с некоторыми допущениями можно отнести к четырем видам:

1) образованию на защищаемой поверхности прочного пленочного защитного покрытия толщиной 0,1...0,5 мм;

2) нанесению на защищаемую поверхность сравнительно толстого слоя (равного или превышающего по толщине стенку защищаемого аппарата) из химически стойкого материала – усиленное защитное покрытие;

3) обкладке или обклейке защищаемой поверхности листами химически стойкого материала;

4) укладке на защищаемую поверхность футеровки из штучных химически стойких изделий (плиток, кирпичей, блоков и др.) на подходящем для условий эксплуатации вяжущем материале.

## 1.5.1. Характеристика некоторых способов нанесения металлических покрытий

Способ нанесения	Материал основы	Металл, образующий покрытие	Толщина наносимого покрытия, мкм
Окунание обрабатываемого предмета в расплавленный металл, предназначенный для покрытия (горячий способ)	Металл, температура плавления которого выше температуры плавления металла покрытия	Легкоплавкий, чаще всего Zn, Al, Sn, Pb	1...150; ограничивается стеканием металла с поверхности
Распыление расплавленного металла при помощи металлизационного пистолета	Любой металл или высокоплавкий неметалл	Любой, чаще всего Zn, Al	50...1000
Диффузионный – нагревание основы с порошком металла-покрытия при температуре, создающей возможность диффузии, в атмосфере паров хлоридов наносимого металла	Чугун и сталь	Zn, Al, Cr	До 100
Вакуумный – образование в вакууме паров металла, которые дают покрытия, оседая на холодных предметах	Любой металл	Любой, в частности благородный	Не более 10
Плакирование – механическое соединение металла покрытия с основой		Большинство металлов и сплавов	Любая
Контактный – вытеснение ионов металла из раствора металлом-основой	Металл, более отрицательный в ряду напряжений, чем металл покрытия	Металл с более высоким электродным потенциалом	Не более 10
Химический – восстановление ионов металла и его осаждение на поверхности металла-основы	Любой металл	Любой, для которого существуют технологически приемлемые реакции осаждения	1...50

## 1.5.2. Необходимая минимальная толщина гальванических покрытий

Покрытие	Основа	Коррозионные условия	Минимальная толщина покрытия, мкм
1	2	3	4
Цинковое	Сталь	Легкие	5
		Умеренные	12
		Тяжелые	25
		Очень тяжелые	40
Кадмиевое	Сталь	Легкие	5
		Умеренные	12
		Тяжелые	25
Никелевое	Сталь	Самые легкие	6
		Легкие	10
		Умеренные	20

Продолжение табл. 1.5.2

1	2	3	4		
Никелевое	Медь и ее сплавы	Легкие	3		
		Умеренные	6		
		Тяжелые	12		
Никель-хромовое	Сталь	Самые легкие Легкие Умеренные Тяжелые Очень тяжелые	Ni	Cr	
			6	0,3	
			10	0,3	
			20	0,3	
			30	0,3	
			40	0,3	
	Медь и ее сплавы	Легкие Умеренные Тяжелые	3	0,3	
			6	0,3	
			12	0,3	
Медно-никель-хромовое	Сталь	Легкие Умеренные Тяжелые Очень тяжелые	Cu	Ni	Cr
			10	5	0,3
			20	10	0,3
			15	25	0,3
			20	30	0,3

Пленочные защитные покрытия наносят одним из следующих способов:

многослойной окраской защищаемой поверхности лаками, красками и битумами с помощью кисти, валика, краскораспылителя или окунанием в них с последующей сушкой каждого слоя;

гуммированием из растворов (герметиком У-30М, наиритом и др.) с последующей вулканизацией;

напылением порошкообразных полимерных материалов методом газопламенного напыления или вихревым способом;

многократным нанесением (окрасочным методом) эмульсии из полимерных материалов с последующей сушкой и спеканием;

нанесением шихты из порошкообразных материалов с последующим спеканием в стекловидное покрытие (кислотоупорную эмаль).

К достоинствам пленочного защитного покрытия следует отнести простоту технологии образования, возможность нанесения на защищаемую поверхность сложной конфигурации, сохранение полезного объема аппарата и его массы. К недостаткам – малую механическую прочность, вследствие чего его нельзя применять при наличии абразивного воздействия среды, а также низкую рабочую температуру среды (исключение составляет лишь кислотоупорная силикатная эмаль).

Пленочное покрытие наиболее часто применяют при защите поверхностей, подвергающихся воздействию агрессивной парогазо-

вой среды (газоприемников, газоходов, крышек аппаратов, вентиляционных установок). Примерами использования пленочного защитного покрытия являются эмалирование и окраска химически стойкими красками поверхностей аппаратуры.

Усиленное защитное покрытие получают нанесением (оштукатуриванием) химически стойкого материала на защищаемую поверхность. Наиболее часто для создания такого покрытия используют термореактивные пластмассы (фаолит, асбовинил) и кислотостойкие замазки (силикатную, типа фаизол и др.). На защищаемую поверхность наносят сырой материал (сырую фаолитовую или асбовиниловую массу, раствор кислотостойкой замазки), который затем при определенных условиях переходит в твердое состояние. Толщина такого покрытия обычно составляет 10...25 мм. Химическая стойкость полимеров при различной температуре разных сред дана в табл. 1.5.3.

Для увеличения механической прочности и адгезии с защищаемой поверхностью в ряде случаев сырую массу наносят на металлическую сетку, прихваченную к защищаемой поверхности точечной электросваркой.

К достоинствам такого покрытия следует отнести возможность нанесения его на защищаемую поверхность сравнительно сложной конфигурации, малое изменение массы защищаемой поверхности, достаточную механическую прочность покрытия, сравнительно несложную технологию. Недостатками покрытия

### 1.5.3. Химическая стойкость полимеров при различных температурах

Среда	Концентрация, % (масс)	Температура среды, °С								
		20	40	60	80	100	120	150	200	250
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Соляная кислота	До 30	1...25, 27...31, 33...40	1...22, 27...31, 31, 33...40	1...20, 27, 29, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 33, 40	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18...20	1...4, 11, 12, 14, 18	1...3, 18	1, 2
	30...37	1...22, 27...31, 31, 33...40	1...22, 27...31, 33...40	1...22, 27, 29, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 33, 40	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18...20	1...4, 11, 12, 14, 18	1...3, 18	1, 2
Серная кислота	До 5	1...25, 27...31, 33...40	1...25, 27...31, 33...40	1...23, 27, 18...20, 23, 27...31	1...12, 14, 15, 18...20, 23, 27...31, 33...40	1...12, 14, 15, 18...20, 23, 27, 33, 40	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 18...20	1...4, 11, 12, 14, 18	1...3, 18	1, 2
	5...40	1...23, 27...31, 33, 36...40	1...22, 27...31, 33, 36...40	1...20, 22, 27...31, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 29, 33	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 33	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18...20	1...4, 11, 12, 14, 18	1 3, 18	1, 2
	40...90	1...23, 28...31, 33	1...22	1...20, 22	1...12, 14, 15	1...5, 7, 8, 10...12, 14, 15	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15	1...4, 11, 12	1...3	1, 2
	90...96	1...20, 33	1...20	1...20	1...12, 14	1...5, 7, 8, 10...12, 14, 15	1...4, 7, 8, 11, 12	1...4, 11, 12	-	-

Серная кислота	Олеум	1...4, 7, 8, 10...13	1...4, 7, 8, 10...13	1...4, 7, 8, 10...13	1...4, 7, 8, 10...12	1, 2	1, 2	1, 2	-	-
Азотная кислота	До 10	1...23, 27...31, 33, 36...40	1...21, 27...31, 33, 36...40	1...21, 27...31, 33	1...12, 14, 15, 18...20, 27	1...12, 14, 15, 18...20, 27	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15	1...4, 12, 18	1...3	1...2
	10...50	1...4, 7, 8, 10...15, 20, 21, 23	1...4, 7, 8, 10...15	1...4, 7, 8, 10...15	1...4, 7, 8, 10...12	1...4, 7, 8, 10...12	1...4, 11, 12	1, 2	1	1
	50...90 и более	1...10	1, 10	1, 10	1	1	-	-	-	-
Фтористо-водородная кислота	До 50	1...4, 11, 12, 14, 15, 20, 21, 23, 27...29, 33, 36...39	1...4, 11, 12, 14, 15, 20, 21, 23, 27...29, 33, 36...39	1...4, 11, 12, 14, 15, 20, 21, 23, 27...29, 33, 36...39	1...4, 11, 12, 20, 27	1...3, 20	1...3, 20	1	1	1
	50...70	1...4, 11, 12, 14, 15, 20, 28, 29, 33, 36...39	1...4, 11, 12, 20, 36...39	1...4, 11, 12, 14, 15, 36...39	1...4, 11, 14	1...4, 14	1...3	1	1	1
	70...100	1, 20, 21, 28, 29, 33, 36...39	1, 14, 36...39	1, 14, 36...39	1, 14	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Фосфорная кислота	До 30	1...23, 28...32, 33, 36...40	1...23, 28...31, 33, 36...40	1...20, 28...31, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 29, 33, 36...40	1...12, 14, 33, 40	1...4, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18...20	1	1	–
	30...60	1...20, 23, 28...31, 33, 36...40	1...20, 28, 29, 33, 36...40	1...20, 28, 29, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 18...20, 29, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 20, 33, 40	1...4	1	1	–
	60...90	1...20, 23, 28, 29, 33, 36...40	1...20, 23, 28, 29, 33, 36...40	1...20, 23, 33, 36...40	1...12, 14, 15, 33, 36...40	1...12, 14, 33	1	1	1	–
Гидроксид	До 40	1...12, 23, 27...31, 38, 39	1...21, 23, 27...31, 38, 39	1...20, 27...31, 38, 39	1...12, 14, 15, 18...20, 27, 38, 39	1...12, 14, 15, 20, 27, 38, 39	1...4, 10...12, 14, 15, 20	1	1	–

Примечания: 1 Цифровые обозначения материалов: 1 – Ф-4(Д); 2 – Ф-50; 3 – Ф-4М(Б); 4 – Ф-40; 5 – Ф-42; 6 – Ф-4Н; 7 – Ф-10; 8 – Ф-100; 9 – Ф-400; 10 – Ф-3(Б); 11 – Ф-3М; 12 – Ф-30; 13 – Ф-32Л; 14 – Ф-2; 15 – Ф-2М; 16 – Ф-26; 17 – Ф-23; 18 – ФБВ; 19 – Ф-1; 20 – ПТ; 21 – ПВХ; 22 – ПВХ (пластикат); 23 – ХПВХ; 24 – ПВДХ; 25 – ВДХ-ВХ (5...20 % ВХ); 26 – ВХ-ВА (15 % ВА); 27 – ПФС; 28 – ПЭВД; 29 – ПЭНД; 30 – СЭП (2...7 % пропилена); 31 – СЭБ (1...3 % бутена-1); 32 – СЭВА (10...14 % ВА); 33 – ПП; 34 – ХПЭ (10...20 % С1); 35 – ХПП (10...30 % С1); 36 – фаолит; 37 – фенолоформальдегидные смолы; 38 – эпоксидные смолы; 39 – фуриловые смолы; 40 – полиэфирные смолы.

2 Буквенные обозначения материалов: ПВХ – поливинилхлорид жесткий (винипласт); ПВХ – поливинилхлорид пластикат; ПЭВД – полиэтилен высокого давления; ПЭНД – полиэтилен низкого давления; ПП – полипропилен; СЭП – сополимер этилена с пропиленом; СЭБ – сополимер этилена с бутиленом; ПП – пентапласт; Ф – фторполимеры (фторопласты).

из термореактивной пластмассы являются: усадка нанесенной на поверхность сырой массы при ее отверждении и вследствие этого возможность образования трещин; необходимость использования специальной полимеризационной камеры для отверждения сырой термореактивной массы, что ограничивает размеры защищаемых изделий; необходимость поддержания специального режима для отверждения сырого слоя в течение продолжительного времени.

Температура среды в аппаратуре с усиленным защитным покрытием из полимерных материалов (асбовинила, фаолита, фаизола) обычно не превышает 120 °С, а из силикатных материалов составляет 300 °С и выше. Такой вид покрытия чаще всего применяют при защите поверхностей крупных газоприемников, крышек химических аппаратов, мешалок и арматуры, работающих в агрессивных средах.

*Листовое покрытие* наносят на защищаемую поверхность наклейкой раскроенных листов полимерных материалов со сваркой стыковых швов, сырой резины с последующей вулканизацией покрытия и простой обкладкой без наклейки. Толщина защитного слоя зависит от толщины наносимого листового материала; для химической аппаратуры она обычно составляет 3...6 мм.

К основным преимуществам листового покрытия относятся: возможность применения готового листового материала, выпускаемого промышленностью в достаточном ассортименте, с различными физико-механическими свойствами и разной химической стойкостью; сравнительно несложная технология производства работ по наклейке листов на защищаемую поверхность.

Однако защищаемая поверхность должна иметь несложную форму. Адгезия листов с металлической поверхностью, обеспечиваемая клеем, часто бывает недостаточной. Ряд клеев не обладает достаточной химической стойкостью, поэтому необходимо сваривать стыковые швы покрытия. Это усложняет технологию образования покрытия. Кроме того, при использовании листового покрытия температура не должна превышать 100 °С для полимерных материалов и 70 °С для резины. Ряд полимерных материалов (полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен и др.) нельзя наклеивать на защищаемую поверхность ввиду их неполярности.

Метод обкладки без наклейки на защищаемую поверхность мало применяют в хими-

ческой аппаратуре, но его успешно используют при футеровке стальных труб пластмассами. Наиболее часто при защите химической аппаратуры листовыми покрытиями на поверхность наносят сырую резину с последующей вулканизацией – гуммированием.

*Футеровка защищаемой поверхности штучными кислотоупорными изделиями.* Для образования этого вида покрытия на защищаемую поверхность укладывают штучные кислотоупорные изделия на специальных вяжущих материалах (химически стойких замазках) с последующей сушкой уложенной футеровки. В качестве штучных кислотоупорных изделий для футеровок чаще всего используют: блоки или специальные штучные изделия из природного камня; плитки, кирпичи или блоки из кислотоупорной керамики; плитки из ситалла, плавленного базальта, стекла, фарфора, пропитанного графита и некоторых полимерных материалов.

К достоинствам футеровки следует отнести:

высокую механическую прочность, позволяющую применять ее при механическом и абразивном воздействии среды;

высокий предел рабочей температуры среды (300...400 °С для жидкости; 1500...1700 °С и выше – для газа);

низкую стоимость футеровки при использовании для покрытий штучных изделий, выпускаемых промышленностью в массовом количестве.

Недостатки футеровок заключаются в следующем. Значительно увеличиваются масса и габаритные размеры аппарата после нанесения футеровки. Футеровку можно наносить на поверхность преимущественно простой геометрической формы. При работе со средами, имеющими высокую температуру, в слоях футеровки возникают большие температурные напряжения, обусловленные различным коэффициентом линейного расширения материалов футеровки и корпуса аппарата. Для обеспечения надежной и длительной работы аппарата в этом случае требуется тщательный расчет возникающих температурных напряжений.

Операции по нанесению футеровки аналогичны операциям строительного производства, но требуют тщательного исполнения и строгого контроля за качеством работ.

В табл. 1.5.4 приведена характеристика футеровочных материалов на основе термопластов, а в табл. 1.5.5 – схемы покрытий и их назначение.



#### 1.5.4. Характеристика футеровочных материалов (листов, пленок) на основе термопластов

Полимер	Марка листа (пленки)	Размеры, мм			Температура эксплуатации, °С
		толщина	ширина	длина	
1	2	3	4	5	6
ПВХ винипласт	ВН, ВНЭ, ВП, ВД	1...20	> 500	> 1300	0...+60
ПВХ пластикат	Пленка каландрованная	0,4...1	600...900	> 1000	-50...+60
	П-57-40-В(КЭ)	0,5...3	700...1200	> 700 (рулон)	-15...+70
	Листовой из отсевов и отходов	1...5	600	800	-15...+60
	ППВ, ПП-КЭ	0,5...5	600	> 800 (рулон)	-20...+70
	ПХ-1, ПХ-2	2,4	1450	6000 (рулон)	-20...+80
ПЭВД	М, С, Н	0,2...0,5	800...3000	> 25000 (рулон)	-60...+60
	Рукава и листы с анкерными ребрами	1,3...2	Диаметр 600	> 6000 (рулон)	-50...+60
ПЭВД*	-	0,8...5	850...1450	700...2000	-50...+60
ПЭВД**	ОКП-ПС	0,2	600	Рулон	-40...+60
ПЭНД*	-	0,8...5	850...1450	700...2000	-40...+70
ПЭНД**	ДП-СПС, ДП-ПС	0,2	600	20000...55000	-50...+80
ПП*	-	0,8...5	850...1450	700...2000	-5...+100
ПП	-	1...8	850 и 1450	1500 и 3500	-5...+100
СЭП	-	0,8...5	850...1450	700...2000	-50...+70
СЭБ	-	0,8...5	850...1450	700...2000	-40...+70
ПТ	ПЛ, ПЛП	1,5...3	1450	2000	+18...+130
Ф-2М	-	1...3	1450	2000	-40...+125
	Пленка рукавная	0,2...0,5	Диаметр 100	> 3000 (рулон)	-40...+120
Ф-4	Строганный	0,5...4	500...900	> 3000 (рулон)	-269...+250
	Прессованный изостатически	10...60	Диаметр 500...1600	Диаметр 500...1600	-269...+250

Ф-4Д	Из труб	3...7	600...1880	1000...3000	-269...+250
	Лакоткань Ф-; Д-Э-01	0,19...0,23	700...900	2000 (рулон до 200 м)	-269...+270
	Лакоткань адгезионноспособная Ф-4Д-Э-01-ЭФ/1	0,19...0,23	850...900	3000 (рулон)	-269...+270
	Лакоткань с липким слоем Ф-4Д-Э-01-Л/1	0,22...0,29	830...850	3000 (рулон)	-60...+250
Ф-4МБ	-	0,6...0,8	200...300	> 2000 (рулон)	-60...+200
	-	0,25...0,6	До 600	> 3000 (рулон)	-60...+200
	Рубашки термосадочные	0,38...0,48	Диаметр 81...106	Рулон до 50 м	-60...+200
Ф-4МД	Лакоткань Ф-4МД-М-1-006	0,07...0,11	700...900	> 1000 (рулон)	-60...+220
Ф-40	-	0,6...0,8	200...300	> 2000 (рулон)	-100...+180
Ф-42	-	0,6...0,8	200...300	> 2000 (рулон)	-60...+110
	-	0,1...0,16	До 550	> 1000 (рулон)	-60...+110
	Фторлоновая лакоткань ФЛТ-42 «А»	0,15	820...1000	> 3000 (рулон)	-50...+100
Ф-32Л	-	0,16...0,4	> 400	> 1000 (рулон)	-60...+60
Ф-26	«А» для эластичных емкостей	0,12...0,24	До 580	> 1000 (рулон)	-100...+80
Ф-10	-	0,1...0,3	> 130	> 1000 (рулон)	-60...+150
Ф-3М	-	0,6...0,8	200...300	> 2000 (рулон)	-60...+150
	-	0,2...0,5	До 170	> 6000 (рулон до 20 м)	-60...+150
Ф-3М**	Оболочки трубчатые	0,1...0,5	Диаметр 100	3000 (рулон)	-60...+150
	АСФ-3М	0,2...0,5	До 170	6000 (рулон до 20 м)	-60...+150

\* Листы выпускаются не дублированными и дублированными различными тканями (стеклотканями, стеклотрикотажем, фланелью, тарной тканью, углеграфитовой тканью).

\*\* Листы и пленки выпускаются только дублированными тканями; ОКП-ПС, ДП-С, ДП-СПС, АСФ-3М дублированы стеклотканью.

## 1.5.5. Схемы защитных покрытий

Схема покрытия	Защита
<i>1</i> – лакокрасочное покрытие на основе перхлорвиниловых, эпоксидных и других смол	От воздействия агрессивных газов. Крышек крупногабаритного наливного оборудования при воздействии слабоагрессивных сред
<i>1</i> – армирование стеклотканью, угольной, хлориновой, полипропиленовой тканями на основе полимерных и совмещенных полимерных смол толщиной 1...2 мм	То же, при наличии эрозионных воздействий и условий повышенной механической прочности покрытия
<i>1</i> – термопласт (пластикат, полипропилен, фторопласт, пентапласт) толщиной 4...5 мм на клеевых композициях и в виде «свободного» вкладыша	Малогабаритных химических аппаратов, травильных и гальванических ванн. Агрессивная среда и температура эксплуатации определяются свойствами термопластов
<i>1</i> – гуммировочное покрытие мягкими резинами, полуэбонитом и эбонитом с открытой и закрытой вулканизацией толщиной 4...5 мм	Малогабаритных химических аппаратов, газопроводов (вулканизация под давлением) и крупногабаритного оборудования (открытая вулканизация). Марка резиновой смеси выбирается в зависимости от условий эксплуатации и методов производства гуммировочных работ
<i>1</i> – футеровка кислотоупорной керамикой на силикатной замазке в один или два слоя; первый слой толщиной 3...5 мм, второй толщиной 18 мм	Оборудования с газообразной агрессивной средой без образования конденсата и без примесей фторсодержащих соединений. Защита аппаратуры для хранения горячего моногидрата серной кислоты или олеума
<i>1</i> – непроницаемый подслоу (гуммирование, полиизобутилен, полан, армированное лакокрасочное покрытие и т.д.); толщиной 3...5 мм; 2 – футеровка штучными кислотоупорными изделиями (керамикой, диабазовой или шлакоситалловой плиткой) толщиной 18 мм на различных химически стойких вяжущих	Реакционной и емкостной аппаратуры, эксплуатируемой при воздействии сильноагрессивных сред, исключая среды с фторсодержащими примесями. Защита шлакоситалловыми плитками на эпоксидных полимер-замазках сооружений и химических аппаратов, эксплуатирующихся в условиях воздействия циансодержащих сред
<i>1</i> – непроницаемый подслоу (гуммирование, полан, полиизобутилен и т.д.) толщиной 4...5 мм; 2 – футеровка плиткой АТМ-1; 3 – футеровка углеграфитовыми блоками (или плиткой спринг-пласт) на замазке арзамит	Реакционной и емкостной аппаратуры, эксплуатирующейся в условиях воздействия фтористоводородной кислоты

Примечание. 1 – 3 – последовательность нанесения слоев на стальной корпус.

**Подготовка поверхности изделия.** Нанесению защитного покрытия предшествует подготовка поверхности изделия, что обеспечивает хорошее сцепление с ней покрытия и качественное его формирование.

Требования к подготовке защищаемой поверхности изложены в ГОСТ 9.402.80 «Еди-

ная система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлической поверхности перед окраской» и в СНиП III-23-76 «Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии».

Подготовка стальной поверхности заключается в следующих операциях: очистке от

окалины, ржавчины и других загрязнений; обезжиривании и нанесении грунтовки.

*Механические способы очистки поверхности.* Очистку поверхности осуществляют механическим путем с помощью металлических щеток ручным способом или электрических и пневматических инструментов. Однако этот способ является трудоемким, создает высокую запыленность рабочего места и уменьшает шероховатость поверхности, что снижает адгезию покрытия.

Более качественной и высокопроизводительной является пескоструйная и дробеструйная очистка поверхности. При этих способах ржавчина и другие загрязнения удаляются с поверхности металлическим песком или дробью, которые выбрасываются из сопла пескоструйного аппарата со скоростью 10...15 м/с. Разрушению слоя загрязнения и его удалению способствует направление струи песка или дроби под углом 75...80° к поверхности на расстоянии 75...150 мм от нее. После такой обработки поверхность очищают сжатым воздухом от пыли и остатков песка.

Песко- и дробеструйную очистку производят в специальной закрытой камере, снабженной вентиляцией. Оператор снабжается индивидуальными средствами защиты. Из соображений безопасности работ применение горного (кварцевого) песка запрещено, так как его пыль опасна для здоровья. При использовании одного пескоструйного аппарата за смену можно обработать 10...30 м<sup>2</sup> поверхности в зависимости от степени ее загрязнения. Отработанный песок и дробь можно повторно использовать после просеивания их через сито.

Гидропескоструйный способ очистки заключается в обработке металлической поверхности суспензией абразива в воде в соотношении 1:6...1:1. В состав суспензии вводятся пассивирующие добавки: до 1 % нитрита натрия, до 2 % тринатрийфосфата или до 0,5 % хром-пика. После гидропескоструйной очистки благодаря действию пассивирующих добавок обеспечивается защита металла от коррозии в течение шести суток.

Подготовленная такими способами поверхность хорошо очищена от загрязнений и обладает шероховатостью, обеспечивающей хорошую адгезию покрытия.

*Химический способ очистки поверхности.* Он заключается в травлении поверхностного слоя растворами кислот или специальными травильными пастами. Этот способ менее опа-

сен для здоровья и более удобен. Технология химической очистки и составы травильных растворов приведены в справочной литературе. Возможна также обработка преобразователями (модификаторами) ржавчины, типа ЭВА-01-ГИСИ, ЭВА-0112, ЭП-0180 и др. При химическом способе на поверхности металла образуется фосфатная пленка, способствующая увеличению адгезии покрытия. При использовании специальных растворов (преобразователей ржавчины или грунтов-модификаторов), взаимодействующих с продуктами коррозии железа, образуются неактивные поверхностные соединения, которые защищают поверхность от коррозии в течение десяти суток при толщине слоя ржавчины до 120 мкм или в течение шести месяцев при толщине до 50 мкм.

Следует отметить, что гидропескоструйный и химический способы трудоемки, требуют многократной обработки поверхности (при химическом способе – в три-четыре приема с интервалом в 1,5...2 ч), промывки, сушки. Использование преобразователей ржавчины требует предварительного снятия скребками или щетками отслаивающихся слоев ржавчины, промывки поверхности поверхностно-активным веществом. Применение этого способа недопустимо при наличии на поверхности металла окалины или старой краски и разрешается только перед защитой наружной поверхности оборудования лакокрасочными составами.

*Термический (газопламенный) способ очистки поверхности.* Это весьма эффективный способ очистки стальной поверхности от окалины, ржавчины и особенно от старого лакокрасочного покрытия. Он основан на значительном различии коэффициентов линейного расширения металла и загрязнения. В результате нагрева и последующего охлаждения окалина растрескивается и отслаивается от металла, что существенно облегчает ее последующее удаление. Одновременно при нагреве сгорают органические загрязнения. Пламенную очистку поверхности производят с помощью керосино-кислородной или ацетилено-кислородной горелки, при этом осуществляют контроль за температурой металла, не допуская его деформации.

Термическим способом очистки удается получить хорошо очищенную шероховатую поверхность, не требующую обезжиривания.

После выполнения очистки металлической поверхности любым из перечисленных способов ее необходимо обезжирить. Эти опе-

рации осуществляют путем протирки поверхности ветошью, смоченной в растворителе (уйт-спирите, бензине и др.).

После выполнения операций очистки и обезжиривания поверхности для ее предохранения от появления ржавчины в период до нанесения защитного покрытия поверхность необходимо грунтовать. Материал грунтовки должен соответствовать материалу и конструкции защитного покрытия. Так, при использовании защиты силикатными штучными материалами применяют грунтовку на основе жидкого стекла с добавлением порошкообразной смеси диабазовой муки с кремнефтористым натром (1 кг смеси на 1 кг жидкого стекла); перед гуммированием поверхность грунтуют в один слой резиновым клеем; перед окраской химически стойкими эмалями или лаками наносят один-два слоя соответствующей грунтовки.

В последнее время перед нанесением системы защитных лакокрасочных покрытий на поверхности металлоконструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, наносят специальные грунтовки-преобразователи ржавчины, что обеспечивает высокое качество последующей защиты поверхностей.

Поверхности бетонных аппаратов и сооружений, предназначенных для антикоррозионной защиты покрытиями, подвергаются проверке и соответствующей подготовке.

Перед началом работ по нанесению антикоррозионного покрытия бетонного аппарата или сооружения необходимо:

проверить качество бетона в соответствии с требованиями строительных норм;

имеющиеся трещины, раковины и другие дефекты поверхности аппарата или сооружения устранить штукатуркой цементно-песчаным раствором, марка которого выше марки основного бетона (наиболее приемлемый способ нанесения раствора – торкрет);

проверить влажность бетона в поверхностном слое толщиной 20 мм (влажность не должна превышать 5...6 %);

испытать аппарат или сооружение, заполнив его водой, при этом наличие течи недопустимо (после испытания аппарат необходимо просушить);

проверить наличие наружной гидроизоляции (от грунтовых вод) для аппаратов, устанавливаемых в грунте.

После проверки качества бетона и исправления дефектов бетонного сооружения поверхность необходимо подготовить для на-

несения на нее защитного покрытия. Очистить ее с помощью проволочных щеток и обдуть после этого сжатым воздухом.

**Комбинированная защита.** Этот способ защиты от коррозии сочетает два или несколько перечисленных выше. В частности, для защиты магистральных нефте- и газопроводов, находящихся в земле, применяют комбинацию усиленного крафт-бумагой битумного покрытия с катодной защитой, которую включают, когда на отдельных участках произошло нарушение покрытия. Часто при длительном хранении различной техники используют ингибиторную защиту наряду с системой лакокрасочных покрытий, нанесенных, как правило, по фосфатированной металлической поверхности или по кадмиевому покрытию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев Ю.И.** и др. Конструирование и расчет машин химических производств / Под ред. Э.Э. Кольман-Иванова. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.

2. **Бондарь В.А., Попов Ю.П.** Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений // Безопасность труда в промышленности. 1997. №10. С. 39–42.

3. **Данилина Л.С., Шубин В.С.** Формирование испытания на надежность оборудования химических производств: Текст лекций. М.: МИХМ, 1989. 48 с.

4. **Джонс Дж. К.** Методы проектирования: Перев. с англ. М.: Мир, 1986. 326 с.

5. **Жилинский И.Б.** и др. Примеры решения задач по расчету надежности оборудования химических производств. Ч. 1. М.: МИХМ, 1977. 80 с.

6. **Защита** химического оборудования неметаллическими покрытиями / Л.Г. Богатков и др. М.: Химия, 1989. 288 с.

7. **Измерение**, контроль, испытания, диагностика. Энциклопедия «Машиностроение» Т. III-7 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2001. 462 с.

8. **Измерение**, контроль, качество. Неразрушающий контроль: Справочник. М.: ИПК. Издательство стандартов, 2002. 708 с.

9. **Калыгин В.Г.** Промышленная экология. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 240 с.

10. **Калыгин В.Г., Попов Ю.П.** Порошковые технологии: Экологическая безопасность и ресурсосбережение. М.: Изд-во МГАХМ, 1996. 212 с.

11. **Кафаров В.В., Ветохин В.Н.** Основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Наука, 1987. 623 с.
12. **Конструкционные материалы:** Справочник / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
13. **Крылова Г.Д.** Основы стандартизации, сертификации, метрологии. Учебник для вузов. М.: Изд. АУДиТ, ЮНИТИ, 1998. 479 с.
14. **Межотраслевые правила** по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ РМ-016–2001. РД 153–34.0–03.150–00.000 «Знак-Б». 2001.
15. **Методические рекомендации** по проведению экспертизы технико-экономических обоснований (проектов) на строительство предприятий, зданий и сооружений производственного назначения МД 11–4.99. Утв. Главгосэкспертизы России. 1997.
16. **Неразрушающий контроль и диагностика:** Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
17. **Неразрушающий контроль.** Контроль проникающими веществами / А.К. Гурвич, Н.Н. Ермолов, С.Г. Сажин; Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1992. 242 с.
18. **Никифоров А.Д., Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф.** Процессы управления объектами машиностроения. М.: Высшая школа. 2001. 455 с.
19. **Общие правила взрывобезопасности** для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств ПБ 09–540–03.
20. **Основы метрологии и электрические измерения:** Учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. 6-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 480 с.
21. **Положение** об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в РФ. Утв. Госкомэкологии России. 2000.
22. **Попов Ю.П.** Экспертиза безопасности оборудования химико-технологических производств. М.: МГАХМ, 1996. 144 с.
23. **Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных ПБ 03–584–03.**
24. **Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов ПБ 03–585–03.** М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. 124 с.
25. **Правила устройства электроустановок.** М.: Главэнергонадзор России, 1998.
26. **Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов СанПиН.** 2001.
27. **Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В.** Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И.В. Семеновой. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
28. **Тимонин А.С.** Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: Справочник. Т. 1. Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2002. 850 с.
29. **Улиг Г.Г., Реви Р.У.** Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия. 1989. 456 с.
30. **Шевченко А.А.** Технологичность химических аппаратов из неметаллических материалов. М.: Изд-во МИХМ, 1984. 88 с.
31. **Шубин В.С.** Надежность оборудования химических производств: Учебное пособие. М.: МИХМ, 1989. 100 с.
32. **Шубин В.С.** Прикладная надежность химического оборудования: Учебное пособие. Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2002. 296 с.
33. **Хоружая Т.А.** Оценка экологической опасности. М.: Книга-сервис, 2002. 208 с.

## РАЗДЕЛ 2

### МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

---

#### Глава 2.1

#### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Оборудование для измельчения материалов по крупности частиц конечного продукта можно разделить на три группы:

- 1) для крупного измельчения (50... 200 мм) – дробилки;
- 2) для среднего измельчения (1...50 мм);
- 3) для тонкого измельчения (менее 1 мм).

##### 2.1.1. ДРОБИЛКИ

Оборудование для крупного измельчения по принципу создания в измельчаемой частице предельных напряжений подразделяют на две группы. В первой группе измельчающих машин разрушение происходит за счет раздавливания, скола, истирания и частичного изгиба. К этой группе дробилок относятся щековые с простым и сложным качаниями щеки, конусные, валковые и зубовалковые дробилки.

Во второй группе измельчающих машин разрушение осуществляется либо свободным, либо стесненным ударом. К этой группе относятся молотковые и роторные дробилки.

Из практики эксплуатации дробильно-размольного оборудования известно, что износ рабочих органов измельчителей пропорционален скорости нагружения измельчаемых материалов в третьей степени. Поэтому при измельчении абразивных материалов (когда их твердость по шкале Мооса более 4,5...5), как

правило, используют дробилки первой группы, у которых скорость нагружения материалов при разрушении менее 1 м/с.

В то же время молотковые и роторные дробилки, у которых скорость ударного нагружения измельчаемых материалов более 20 м/с, а следовательно, скорость износа рабочих органов выше, имеют целый ряд преимуществ перед дробилками первой группы [1, 19].

Они отличаются высокими удельной производительностью и экономичностью. Стоимость их на единицу производительности в 1,5–2 раза (для молотковых) и в 3–3,5 раза (для роторных) ниже, чем у дробилок первой группы, а масса соответственно в 4 и в 4,5 раза меньше. Также соответственно в 1,2–1,5 и в 1,5–2 раза ниже установочная мощность привода. Кроме того, в них достигается значительно большая степень измельчения материалов (в молотковых дробилках с колосниками степень измельчения может быть более 40, в то время как в дробилках первой группы степень измельчения не превышает 10).

В связи с этим, несмотря на быстрый износ при измельчении твердого материала небольших по габаритным размерам рабочих органов, молотковые и роторные дробилки часто используют для измельчения не только мягких материалов, но и материалов средней твердости и твердых.

Под степенью измельчения машины понимается отношение среднего начального размера частиц  $d_n$  к среднему конечному размеру частиц  $d_k$  (размеру частиц продукта):  $i = d_n / d_k$  – степень измельчения.

**Щековые дробилки.** Щековые дробилки классифицируют по различным признакам [12, 27]: по характеру качания подвижной щеки, по методу подвеса подвижной щеки, по конструкции устройства, приводящего в движение подвижную щеку. По характеру качания подвижной щеки они подразделяются на дробилки с простым, сложным и комбинированным движением щеки.

В дробилках с простым качанием подвижной щеки подвижная щека подвешена или сверху, или шарнирно опирается снизу и совершает возвратно-поступательное движение за счет вращения эксцентрикового вала и передачи колебаний шатуном и распорными плитами. Чаще всего применяются щековые дробилки с простым качанием подвижной щеки с верхним ее подвесом.

В дробилках со сложным движением щеки точки поверхности подвижной щеки 3 (рис. 2.1.1) описывают в средней части замкнутые эллипсы, в верхней – кривые, близкие к окружностям, а в нижней – дуги, близкие к прямым линиям. Поэтому в них материал измельчается не только раздавливанием и раскалыванием, но и истиранием с изгибом на ребрах футеровки.

Продольное перемещение подвижной щеки способствует продвижению материала вниз и увеличению производительности дробилки. Такие дробилки имеют значительно меньшие (в 1,5–1,7 раза) габаритные размеры и массу, чем дробилки с простым качанием щеки при одинаковой производительности.

Дробилки с комбинированным движением щеки имеют два эксцентриковых вала: на один надета подвижная щека, а на другой – шатун. Подвижная щека получает не только сложное движение, как у описанной выше дробилки, но и колебательные движения, что увеличивает ее производительность по сравнению с дробилкой со сложным движением на 25 % и снижает интенсивность износа бронифутеровки в 2,5–3 раза. Техническая характеристика щековых дробилок крупного дробления со сложным и простым качанием подвижной щеки представлена в табл. 2.1.1.

**Расчет щековых дробилок.** Ширина загрузочного отверстия  $B$  должна обеспечить свободный прием кусков максимальной крупности  $d_{н\max}$ . Обычно  $B = \frac{d_{н\max}}{0,5 \dots 0,8}$ . Длина рабочей камеры  $L = (1,5 \dots 3,5)B$ ; глубина рабочей камеры принимается  $H = (2,2 \dots 2,7)B$ .

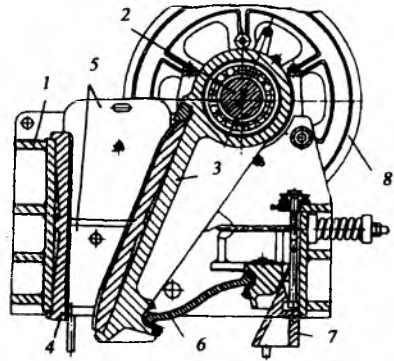


Рис. 2.1.1. Щековая дробилка со сложным качанием щеки:

1 – станина; 2 – эксцентриковый вал; 3 – подвижная щека; 4 – дробящая неподвижная плита; 5 – боковые стальные плиты; 6 – распорная (предохранительная) плита; 7 – регулировочный клин; 8 – маховик

Производительность щековых дробилок можно рассчитать по следующему выражению:

$$Q = \frac{60nd_k s \mu \rho_{об}}{\text{tg} \alpha},$$

где  $n$  – частота вращения вала дробилки, мин<sup>-1</sup>;  $s$  – ход подвижной щеки, м;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий разрыхление материала;  $\mu = 0,25 \dots 0,6$ ;  $\rho_{об}$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – угол наклона подвижной щеки.

Потребляемую мощность, кВт, обычно рассчитывают по одной из эмпирических формул типа:

$$N = cLB,$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от размера загрузочного отверстия;  $L$ ,  $B$  – габаритные размеры входного отверстия, м.

Большим недостатком щековых дробилок является неравномерность работы привода, уменьшить которую можно например путем установки на приводном валу массивных маховика 8 и шкива (см. рис. 2.1.1). Этот недостаток отсутствует у конусных дробилок, в которых разрушение осуществляется непрерывно.

**Конусные дробилки.** Эти дробилки, также как и щековые, применяют для крупного и среднего измельчения материалов твердых и средней твердости [22]. Разрушение материалов в них осуществляется раздавливанием, раскалыванием, истиранием и изгибом между неподвижным и подвижным конусами, футерованными бронеплитами с ребрами, совершающими круговые эксцентричные или вибрационные воздействия.



## 2.1.1. Техническая характеристика щековых дробилок

Показатель	ШДС-1-2,5×4,0	ШДС-1-2,5×9	ШДС-1-4×9	ШДС-11-6×9	ШДП-9×12	ШДП-12×15	ШДП-12×15	ШДП-15×21	ШДП-15×21
Размеры загрузочного отверстия $B \times L$ (ширина и длина), мм	250×400	250×900	400×900	600×900	900×1200	1200×1500	1200×1500	1500×2100	1500×2100
Ширина выходной щели, $b_n$ , мм	20...80	20...60	40...90	75...125	130	150	150	180	180
Частота вращения главного вала $n$ , мин <sup>-1</sup>	275	325	290	250	200±10	150	170±10	125	140±10
Наибольший размер кусков в питании $d_{\text{нmax}}$ , мм	210	210	340	500	750	1000	1000	1300	1300
Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	3,5...14	18	30	62	180	280	310	550	600
Электродвигатель:									
мощность $N$ , кВт	17	37	45	75	90	160	160	250	250
частота вращения $n_{\text{дв}}$ , мин <sup>-1</sup>	1000	1470	980	960	750	730	—	495	500
Масса без электрооборудования, т	2,5	8	12	20	69,5	140,7	140,7	249,9	214,2

Конусные дробилки крупного дробления выполняются двух типов: с верхней опорой подвижного вала и с нижней гидравлической опорой подвижного вала и редукционным приводом. В конусной дробилке среднего дробления ( $d_k \approx 20 \dots 35 \text{ мм}$ ) дробящий конус 5 (в отличие от дробилок крупного дробления) опирается через сферическую опору 8 на опорную чашу 4 (рис. 2.1.2). Ход качаний конуса 5 определяется смещением вертикального вала 7 в эксцентрик 6. Неподвижный конус 10 установлен на корпусе 1 нежестко, с помощью пружин, позволяющих выбрасывать из зазора между конусами недробимые куски.

Техническая характеристика дробилок крупного и среднего дробления представлена в табл. 2.1.2 и табл. 2.1.3.

Производительность конусных дробилок крупного дробления, кг/ч, можно рассчитать по формуле [28]:

$$Q = \frac{188 \mu \rho_n (D_2 - d_k) d_k s n}{\text{tg} \alpha_1 + \text{tg} \alpha_2},$$

где  $\mu$  — коэффициент разрыхления,  $\mu = 0,4 \dots 0,7$ ;  $D_2$  — диаметр нижней части неподвижного конуса, м;  $\alpha_1$  — угол наклона к вертикали неподвижного конуса;  $\alpha_2$  — угол наклона к вертикали вращающегося конуса;  $\rho_n$  — насыпная плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $s$  — радиальный ход конуса, м;  $n$  — частота вращения конуса,  $\text{мин}^{-1}$ .

Потребляемую мощность, кВт, можно рассчитать по формуле Л.Б. Левенсона:

$$N = \frac{n \sigma_p^2 D_2}{748000} (d_n^2 - d_k^2),$$

где  $\sigma_p$  — предел прочности измельчаемых материалов.

Для предварительных расчетов можно использовать следующую формулу:

$$N_{\text{дв}} = 85 D_2^2.$$

Максимальная частота вращения ротора конусных дробилок рассчитывается по уравнению [28]:

$$n = 30 \sqrt{\frac{g(\text{tg} \alpha_1 + \text{tg} \alpha_2)}{2s}}.$$

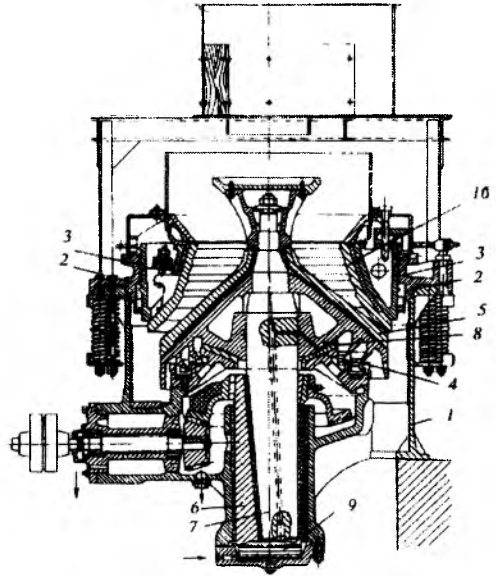


Рис. 2.1.2. Конусная дробилка среднего дробления: 1 — корпус; 2 — опорное кольцо; 3 — регулирующее кольцо; 4 — опорная чаша; 5 — дробящий конус; 6 — эксцентрик; 7 — вертикальный вал; 8 — сферическая опора; 9 — подпятник; 10 — неподвижный конус

**Валковые дробилки.** По конструктивному оформлению валков их можно подразделить на три группы: валковые зубчатые дробилки (зубовалковые); камневыведательные вальцы; валковые дробилки с гладкими валками.

*Валковые зубчатые дробилки* предназначены для крупного и среднего дробления. Наличие зубьев позволяет измельчать крупные куски при сравнительно малом диаметре валка. При этом различают одновалковые и двухвалковые зубчатые дробилки.

В двухвалковой зубчатой дробилке вращение валкам передается от цилиндрического редуктора 4 через открытую зубчатую передачу 3 с удлиненным зубом, позволяющим не выходить из зацепления при выводе недробимых кусков и изменении зазора  $e$  между валками (рис. 2.1.3).

Для дробилок с зубчатыми валками принимают: диаметр валка  $D_B = (1,5 \dots 4,5) d_n$ , длину валка  $L_B = (0,5 \dots 1,3) D_B$ .

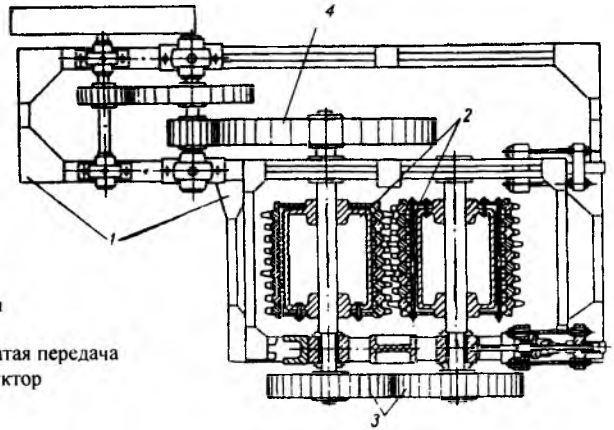
В ряде случаев очень успешно крупное и среднее дробление осуществляется одновалковой зубчатой дробилкой (рис. 2.1.4). Зазор между зубчатым сегментом 2 и неподвижной

2.1.2. Техническая характеристика конусных дробилок крупного дробления с гидравлическим регулированием щели [29]

Показатель	ККД-500/75	ККД-900/140	ККД-1200/150	ККД-1500/160-250	ККД-1500/180	КРД-700/75	КРД-900/100
Диаметр основания дробящего конуса $D$ , мм	1220	1700	1900	2900	2520	2040	2340
Ширина загрузочного отверстия $B$ , мм	500	900	1200	1500	1500	700	900
Ширина загрузочной щели, мм	75	110, 140, 160	130, 150, 180	160, 180, 200, 220, 250	160, 180, 200	75	100
Наибольший начальный размер кусков $d_{\text{нmax}}$ , мм	420	750	1000	1200	1300	550	750
Частота вращения конуса $n$ , мин <sup>-1</sup>	200	140	120	90	110	135	110
Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	200	330, 420, 480	550, 680, 800	1450, 1650, 1850, 2000, 2300	1300, 1450, 1600	400	680
Электродвигатель:							
мощность $N$ , кВт	110	250	320	2×320	400	250	400
частота вращения $n_{\text{дв}}$ , мин <sup>-1</sup>	985	740	590	590	590	960	590
Масса дробилки без электрооборудования $M$ , т.	41,25	148,34	240	520,7	403,2	137,5	254,1

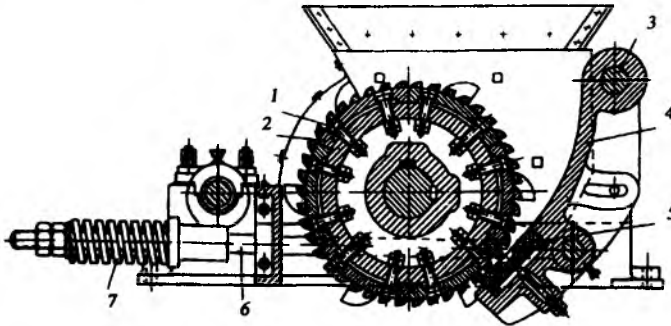
2.1.3. Техническая характеристика конусных дробилок для среднего дробления [29]

Показатель	КСД-600Гр	КСД-900Б	КСД-1200Гр	КСД-1200Т	КСД-1750Гр	КСД-1750Т	КСД-2200Гр	КСД-2200Т	КСД-3000Т
Диаметр основания дробящего конуса $D$ , мм	600	900	1200	1200	1750	1750	2200	2200	3000
Ширина загрузочного отверстия $B$ , мм	100	130	185	120	250	200	350	275	475
Ширина выходной щели, мм	12...35	15...40	20...50	10...25	25...60	15...30	30...60	15...30	25...50
Наибольший начальный размер кусков $d_{\text{нпмах}}$ , мм	60	100	150	100	200	160	300	250	380
Частота вращения конуса $n$ , мин <sup>-1</sup>	350	325	360	260	260	260	242	242	185
Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	19...40	38...57	77...115	42...95	170...320	100...190	360...610	180...360	500, 425...850
Электродвигатель:									
мощность $N$ , кВт	30	55	75	75	160	160	250	250	400
частота вращения $n_{\text{дв}}$ , мин <sup>-1</sup>	1470	1000	735	735	740	740	495	495	590
Масса дробилки без электрооборудования $M$ , т	4,3	11,22	23,206	23,328	48,05	40,09	86,8	87,68	208,1



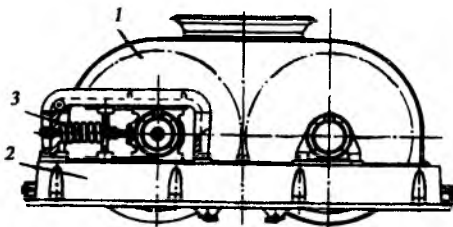
**Рис. 2.1.3. Двухвалковая  
зубчатая дробилка:**

1 – рама; 2 – зубчатые валки; 3 – зубчатая передача  
с удлиненным зубом; 4 – редуктор



**Рис. 2.1.4. Одновалковая зубчатая дробилка:**

1 – крепление дробильного вала; 2 – зубчатый сегмент; 3 – ось; 4 – щека;  
5 – дробящая плита; 6 – тяга; 7 – пружина



**Рис.2.1.5. Валковая дробилка с гладкими  
валками:**

1 – валок; 2 – рама; 3 – пружина, удерживающая  
подшипники подвижного валка

щекой 4 устанавливается с помощью тяги 6, которая крепится к раме дробилки нежестко через пружину 7, позволяющую отклоняться щеке 4 при попадании недробимых тел.

Валковые дробилки с гладкими валками (рис. 2.1.5) применяются, как правило, для среднего измельчения, так как позволяют иметь малый зазор  $e$  между валками, а при

измельчении крупных кусков валки имеют большой диаметр, что следует из условий захвата исходных частиц.

Из условий захвата исходных частиц для гладковалковых дробилок принимают:  $D_B = (18...22)d_H$ . Для дробилок с рифлеными валками  $D_B = (10...12)d_H$ . Техническая характеристика валковых дробилок представлена в табл. 2.1.4.

*Расчет валковых дробилок.* Производительность валковых дробилок ( $m^3/c$ ) можно легко рассчитать из уравнения неразрывности потока:

$$Q = eL_B v',$$

где  $L_B$  – длина валка, м;  $v'$  – линейная скорость вращения валка, м/с.

Выражая линейную скорость через частоту вращения  $n$  и диаметр валка  $D_B$ , можно получить зависимость для определения производительности дробилки:

### 2.1.4. Техническая характеристика валковых дробилок

Показатель	Двухвалковая с гладкими валками				Четырехвал- ковая с гладкими валками	Двухвалковая зубчатая						
	ДГ 400×250	ДГ 600×400	ДГ 1000×550	ДГ 1500×600		ДДЗ-4	ДДЗ-6	ДДЗ-10	ДДЗ-700	ДДЗ-19×9	ДДЗ-15×12	ДДЗ-16
Размер валков (диаметр×длина), мм	400×250	600×400	1000×550	1500×600	900×700	400×600	630×800	1000×1250	1250×1000	900×900	1500×1200	1600×200
Частота вращения валков $n$ , мин <sup>-1</sup>	148; 212; 275	134; 160; 187	112; 89; 63	75,8; 59; 44; 24	Верхних 114, нижних 182,5	66	50	36	170; 200	42	40	41
Наибольший размер кусков в питании $d_{\text{нпак}}$ , мм	20	30	50	75	40	100×200×300	400×500×600	400×600×1000	900	250; 360	900	1200×1300×1300
Ширина щели между валками $b$ , мм	2...12	2...14	4...18	4...20	Нижних 2,5, верхних 10	105	до 150	240	—	—	100	(до 440)
Максимальная крупность кусков дробленого продукта $d_k$ , мм	—	—	—	—	—	25; 50; 75; 100; 125	50; 75; 100; 125; 150	100; 125; 150; 300	250	40; 75; 80; 100	100; 150	200; 300
Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /ч (т/ч)	1,4...15,6	3,0...29,4	11,9...53,5	13...65	(до 16)	(20...100)	(60...150)	(125...525)	(700)	(70; 120)	(до 150)	(800; 1300)
Мощность электродвигателя $N$ , кВт	4	10	40	55	14; 20; 40	13	22	40	30	40	55	250

$$Q = 188L_B e D_B \eta \mu \rho_n,$$

где  $\mu$  – коэффициент разрыхления для твердых материалов, обычно принимают  $\mu = 0,5 \dots 0,6$ .

Предельная частота вращения валков,  $\text{мин}^{-1}$ ,

$$n_{\text{пр}} \leq 20 \sqrt{\frac{f}{\rho_{\text{об}} d_n D_B}},$$

где  $f$  – коэффициент внутреннего трения.

В производстве строительных материалов часто применяют камневывделительные валцы, которые имеют один гладкий валок, а второй – с винтовой поверхностью, по каналу винта которого выводятся камни из измельчаемой глины.

**Дробилки, измельчающие материалы свободным или стесненным ударом.** К дробилкам этого типа относятся молотковые и роторные. В молотковых дробилках разрушение осуществляется молотками, шарнирно закрепленными на вращающемся роторе, а в роторных удары по измельчаемому материалу наносятся рабочими органами – билами, жестко закрепленными на вращающемся роторе. В роторных дробилках может быть передана большая кинетическая энергия, чем в молотковых, в связи с большими инерционными силами вращающегося ротора.

Молотковые и роторные дробилки используются для крупного, среднего и мелкого дробления материалов преимущественно для мягкой и средней твердости, включая влажные глинистые материалы.

Пределом влажности измельчаемого материала в роторных дробилках считают 15%. Однако некоторые конструкции колосниковых решеток позволяют успешно измельчать материалы влажностью до 40% [1].

*Молотковые дробилки классифицируют по следующим признакам:*

по числу роторов – одно- и двухроторные;

по конструкции молотков и привода – реверсивные и неревверсивные;

по наличию классифицирующих устройств – с колосниками и без колосниковых устройств.

Однороторные молотковые дробилки могут быть с колосниковыми решетками и отбойными плитами или только с отбойными плитами. Двухроторные дробилки чаще всего имеют

и колосниковые решетки, и отбойные плиты. Молотковые дробилки без колосниковых решеток используются для крупного и среднего измельчения материалов.

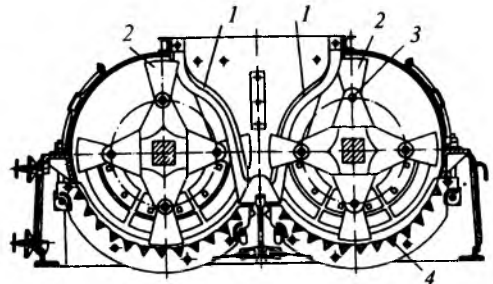
Молотковые дробилки со встроенными в рабочую зону конвейерами тяжелого типа предназначены для измельчения влажных глинистых материалов. Дробилки с колосниковыми решетками и отбойными плитами позволяют получать высокую степень измельчения.

Молотковые дробилки, имеющие только отбойные плиты, применяются при крупном дроблении, а дробилки, имеющие отбойные плиты в виде конвейеров, – при грубом и среднем измельчении влажных материалов. Дробилки с реверсивным направлением вращения ротора позволяют увеличить долговечность работы молотков в 1,7–1,8 раза. Двухроторные молотковые дробилки могут иметь роторы, которые вращаются в одну сторону, а также в противоположные стороны, навстречу друг другу.

У двухроторной молотковой дробилки молотки 2 шарнирно закреплены на стержнях 3 (рис. 2.1.6). Дробилка имеет приемную колосниковую решетку 1, в зазоры которой проходят молотки 2 и ударяют по исходным кускам материала. Из дробилки выгружаются только те частицы, размер которых меньше отверстий или щелей выгрузочной колосниковой решетки 4. Техническая характеристика молотковых дробилок представлена в табл. 2.1.5.

Производительность молотковых дробилок,  $\text{кг/ч}$ , с учетом степени измельчения материалов  $i$  определяют по формуле [1]:

$$Q = \frac{K_0 L_p D_p^2 n^2}{3,6(i-1)},$$



**Рис. 2.1.6. Двухроторная молотковая дробилка:**  
1 – приемная колосниковая решетка; 2 – молотки;  
3 – стержни; 4 – выгрузочная колосниковая решетка

### 2.1.5. Техническая характеристика молотковых дробилок [29]

Показатель	Однороторная нереверсивная				Однороторная реверсивная			Самоочищающаяся		Двухроторная
	М6-4Б (СМД-112)	М8-6Б (СМ-431)	М13-16Б (СМ-170Б)	М20-30Г (СМД-98А)	ДМРЭ 10×10	ДМРИЭ 14,5×13	1500× 1500-1000	СМД-97А	СМД-102	С-599
Размер ротора (диаметр×длина) $D \times L$ , мм	600×400	600×600	1300×1600	2000×3000	1000×1000	1450×1300	1500×1500	2000×2000	2000×2000	700
Частота вращения ротора $n$ , мин <sup>-1</sup>	1250	1000	735	600	750; 1000; 1500	750; 1000	1500; 1000	—	—	—
Наибольший размер кусков в питании $d_{\text{нmax}}$ , мм	150	250	400	60	80	80	120	600	600	100
Крупность дробленого продукта $d_k$ , мм	0...30	0...13	До 8	До 20	5; 3; 2	3	3	20	20...180	2
Производительность $Q$ , т/ч (м <sup>3</sup> /ч)	(12...15) на шлаке	(18...24) на угле	150...200	900...1200	100	До 250	500	600...800 на угле	660 на угле	10 на известняке
Мощность электродвигателя $N$ , кВт	17	55	200	1250	200; 200; 250	400; 500; 630	1000; 800	800	800	55
Масса дробилки, кг	1150	2245	12675	53800	8,9; 9,0; 9,1	18,5; 18,3; 18,2	24,7; 22,5	41200	65200	4425



где  $K_0$  – коэффициент, зависящий от конструкции молотковой дробилки и прочности дробимого материала;  $L_p$ ,  $D_p$  – соответственно длина и диаметр ротора, м;  $n$  – частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>.

Ориентировочное значение производительности молотковой дробилки, м<sup>3</sup>/ч, можно определить по следующим выражениям [1]:

при  $D_p > L_p$

$$Q = 0,1 D_p^2 L_p n,$$

при  $D_p < L_p$

$$Q = 0,1 D_p^2 L_p^2 n.$$

При свободном ударе молотками по измельчаемым кускам диаметр ротора, мм,

$$D_p = 3d_{н\max} + 550;$$

при стесненном ударе

$$D_p = 1,65d_{н\max} + 520;$$

$$L_p = (0,8...1,5) D_p.$$

Линейная скорость молотков составляет 15...35 м/с, масса молотков 20...70 кг. Мощность двигателя ориентировочно может быть определена по эмпирическим зависимостям:

$$N = 7,5 D_p L_p n / 60;$$

$$N = 0,15 D_p^2 L_p n;$$

$$N = (0,1...0,15) Qi,$$

где  $N$  – мощность, кВт;  $Q$  – производительность дробилки, т/ч;  $i$  – степень измельчения.

Более точно потребляемая мощность

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4,$$

где  $N_1$  – мощность, необходимая для восстановления энергии, теряемой всеми молотками при ударах каждого по куску дробимого материала;

$$N_1 = \frac{A_1 zn}{60 \cdot 102},$$

$A_1$  – энергия, теряемая одним молотком;

$$A_1 = \frac{\tau^2 J m_0}{2(J + J_0)},$$

$z$  – число молотков на роторе;  $\tau$  – линейная скорость молотка до удара, м/с;  $J$  и  $J_0$  – момент инерции соответственно молотка и куска, кг·с<sup>2</sup>/м;  $N_2$  – мощность, затрачиваемая на дробление материала истиранием на колосниковой решетке, кВт;  $m_0$  – масса куска;

$$N_2 = \frac{A_2 n}{60 \cdot 102},$$

$A_2$  – работа, необходимая для истирания – транспортирования материала по решетке;  $A_2 = F_{тр} z l$ ,  $F_{тр}$  – сила трения при движении материала по решетке;  $z$  – число молотков в ряду ротора;  $l$  – путь материала по решетке;

$N_3$  – мощность, необходимая на преодоление сил трения в опорах ротора,

$$N_3 = M_{тр} n / 975, \quad M_{тр} = 0,5 G f d_n,$$

$G$  – вес ротора;  $d_n$  – диаметр вала в подшипниках;  $f$  – коэффициент трения в подшипниках;

$N_4$  – мощность, необходимая на создание молотками ротора напора и расхода воздуха,

$$N_4 = Q_v \Delta p / 102,$$

$Q_v$  – расход воздуха, создаваемый ротором дробилки;  $\Delta p$  – вентиляционный напор в дробилке.

*Роторные дробилки* классифицируются по конструктивным признакам:

по числу роторов – одно-, двух- и трехроторные;

по способу разгрузки готового продукта – со свободной разгрузкой (рис. 2.1.7), с разгрузкой через контрольную колосниковую решетку (рис. 2.1.8), с комбинированной разгрузкой (рис. 2.1.9, рис. 2.1.11);

по характеру исполнения отражательных органов – с отражательными плитами (рис. 2.1.7), с отражательными колосниковыми решетками (рис. 2.1.10), с отражательными плитами и колосниковыми решетками (рис. 2.1.9).

Ротор может иметь по окружности два – восемь бил, выполненных из износостойкого материала. Длина бил равна длине ротора. Билы закрепляются жестко, но являются съемными для возможности быстрой их замены вследствие абразивного износа.

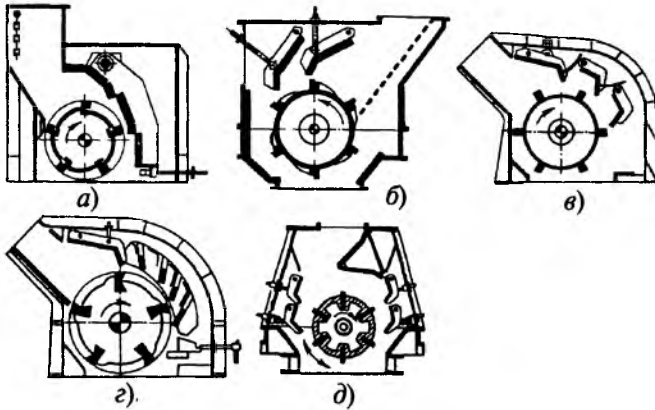


Рис. 2.1.7. Схемы однороторных дробилок со свободной разгрузкой и шарнирной подвеской отражательных плит, поверхность которых выполнена по ломаной линии:  
*a* - однокамерная неревверсивная; *б* - двухкамерная неревверсивная; *в* - трехкамерная неревверсивная; *г* - пятикамерная неревверсивная; *д* - двухкамерная реверсивная

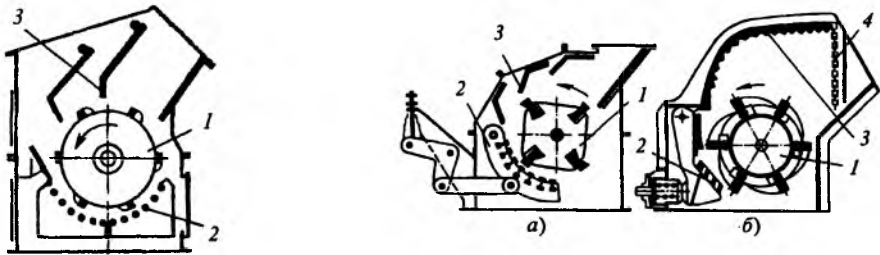


Рис. 2.1.8. Схема однороторной неревверсивной дробилки с разгрузкой через контрольную колосниковую решетку с шарнирной подвеской отражательных плит, поверхность которых выполнена по ломаной линии:  
 1 - ротор; 2 - колосник; 3 - отбойники

Рис. 2.1.9. Схемы однороторных неревверсивных дробилок с комбинированной разгрузкой и комбинированной подвеской отражательных плит:  
*a* - двухкамерная, поверхность плит выполнена по ломаной линии, *б* - однокамерная, поверхность плит криволинейная зубчатая; 1 - ротор; 2 - колосник; 3 - отбойники; 4 - завесная цепь

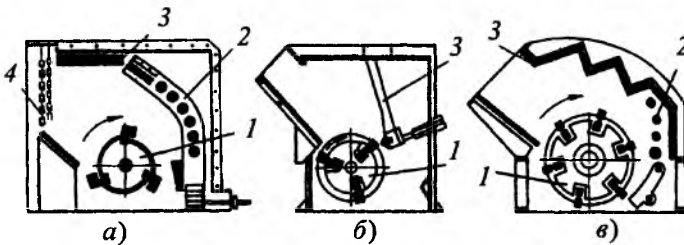
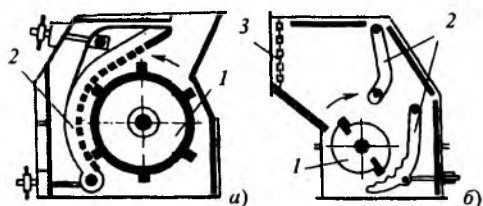


Рис. 2.1.10. Схемы однороторных однокамерных неревверсивных дробилок со свободной разгрузкой, отражательными колосниковыми решетками, комбинированной подвеской отражательных устройств и расположением колосников:

*a* - горизонтальным, отражательные поверхности плоские и криволинейные; *б* - вертикальным, отражательные поверхности выполнены по ломаной линии; *в* - комбинированным, отражательные поверхности выполнены по ломаной линии; 1 - ротор; 2 - отбойник колосникового типа; 3 - отбойники; 4 - цепь

## 2.1.6. Техническая характеристика однороторных дробилок [29]

Показатель	ДРК8×6 (СМД-85)	ДРК12×10 (СМД-86)	ДРК16×12 (СМД-95)	ДРК20×16 (СМД-87)	ДРК10×10 (СМД-75)	ДРК12×12 (СМД-94)
Размеры ротора $D \times L$ , мм	800×600	1250×1000	1600×1200	2000×1600	1000×1000	1250×1250
Частота вращения ротора $n$ , мин <sup>-1</sup>	486; 675; 935	296; 417; 530	239; 316; 418	190; 290; 380	410; 580; 735; 915	306; 367; 440
Линейная скорость бил ротора, м/с	20; 26,5; 35	20; 26,5; 35	20; 26,5; 35	20; 26,5; 35	20; 24; 28,8	20; 24; 28,8
Максимальный размер загружаемых кусков $d_{\text{нпmax}}$ , мм	400	600	800	1100	До 300	375
Зазор между колосни- ками решетки, мм	16...160	25...250	22...320	40...400	16...200	20...250
Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	55	125	200	370	До 125	200
Мощность электро- двигателя $N$ , кВт	40	110	160	250	122	200
Масса дробилки, кг	6000	13850	29830	59380	9170	16750

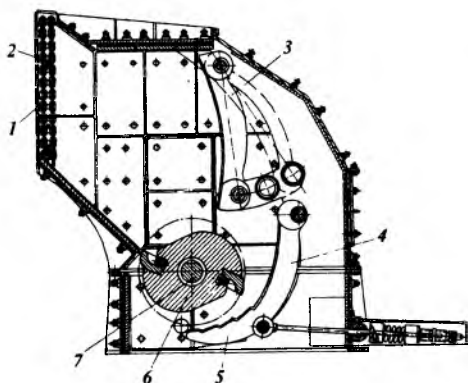


**Рис. 2.1.11. Схемы однороторных нереверсивных дробилок с комбинированной разгрузкой, отражательными колосниковыми решетками с плоскими и криволинейными отражательными поверхностями:**

*а* – однокамерная с шарнирной подвеской отражательных устройств, горизонтальным расположением колосников; *б* – двухкамерная с комбинированной подвеской отражательных устройств, вертикальным расположением колосников; 1 – ротор; 2 – отбойник; 3 – навесная цепь

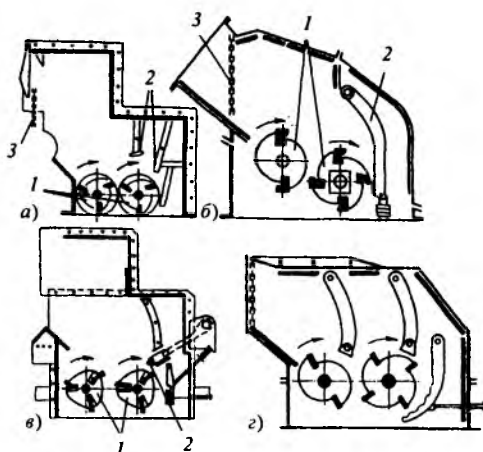
Однороторная дробилка имеет две отбойных колосниковых решетки (рис. 2.1.12): верхнюю 3, которая закреплена шарнирно и может перемещаться влево и вправо в зависимости от максимального размера исходных кусков, и нижнюю 4, положение которой определяет минимальный зазор между билами и решеткой. Техническая характеристика однороторных дробилок приведена в табл. 2.1.6 [29].

У двухроторных дробилок с направлением вращения роторов в одну сторону производительность существенно выше, чем у однороторных при небольшом увеличении степени измельчения (рис. 2.1.13).



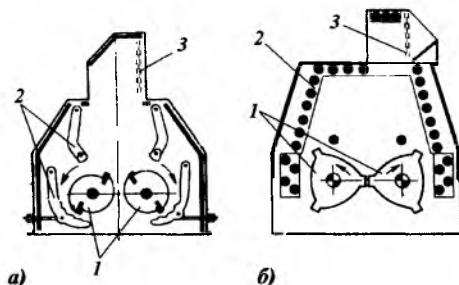
**Рис. 2.1.12. Однороторная дробилка ударного действия:**

1 – загрузочное отверстие; 2 – цепная штора; 3 – верхняя колосниковая решетка; 4 – нижняя колосниковая решетка; 5 – било; 6 – ротор; 7 – вал ротора



**Рис. 2.1.13. Схемы двухроторных дробилок двухступенчатого дробления со свободной разгрузкой, отражательной колосниковой решеткой, комбинированной подвеской отражательных устройств, вертикальным расположением колосников:**

*а* – двухкамерная с объединенными камерами дробления и плоскими отражательными поверхностями; *б* – однокамерная с объединенными камерами дробления и с криволинейными отражательными поверхностями; *в* – двухкамерная с объединенными камерами дробления и криволинейными отражательными поверхностями; *г* – двухкамерная с отдельными камерами дробления, плоской и криволинейной отражательными поверхностями; 1 – роторы; 2 – отбойники; 3 – завесная цепь



**Рис. 2.1.14. Схемы двухроторных двухкамерных дробилок одноступенчатого дробления со свободной разгрузкой, объединенными камерами дробления, отражательной колосниковой решеткой:**

*а* – с криволинейными отражательными поверхностями, комбинированной подвеской колосниковых решеток и вертикальным расположением колосников; *б* – с плоскими отражательными поверхностями, жесткой подвеской колосниковых решеток и горизонтальным расположением колосников; 1 – роторы; 2 – отбойники; 3 – завесная цепь

На рис. 2.1.14 – рис. 2.1.16 показаны схемы двухроторных дробилок с противоположным направлением вращения роторов и разным конструктивным оформлением корпусов, отражательных плит и роторов.

Конструкция роторных дробилок, представленная на рис. 2.1.15, а, часто используется не только для среднего дробления, а также для подсушки измельченного материала. В этом случае в камеру измельчения противотоком (снизу) подается горячий воздух, который после сушки выходит в верхние боковые патрубки дробилки.

Диаметр ротора дробилок крупного дробления определяется главным образом размером наибольших кусков исходного материала:  $D_p = (1,5...3)d_{n\max}$ ; у дробилок среднего дробления  $D_p = (3...10)d_{n\max}$ ; у дробилок мелкого дробления  $D_p \geq 10d_{n\max}$ . Длина ротора  $L_p = (0,5...1,5)D_p$ ; высота бил принимается  $h = (0,1...0,2)D_p$ . Линейная скорость бил ротора  $v_p$  выбирается из условия,

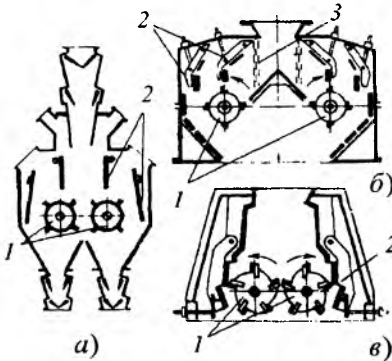


Рис. 2.1.15. Схемы двухроторных двухкамерных дробилок одноступенчатого дробления со свободной разгрузкой и отражательными плитами:

а – с шарнирной подвеской, объединенными камерами дробления, плоскими отражательными поверхностями; б – с шарнирной подвеской, отдельными камерами дробления, отражательными поверхностями, выполненными по ломаной линии; в – с комбинированной подвеской, объединенными камерами дробления и отражательными поверхностями, выполненными по ломаной линии; 1 – роторы; 2 – отбойники; 3 – завесная цепь

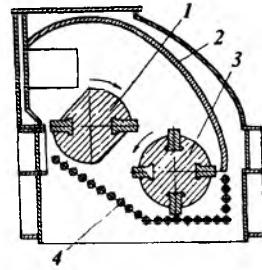


Рис 2.1.16. Двухроторная дробилка с высокой степенью измельчения: 1 – верхний ротор; 2 – отбойная плита; 3 – нижний ротор; 4 – колосниковая решетка

при котором энергия удара должна быть достаточной для разрушения исходных частиц. Она может быть рассчитана по эмпирической формуле В.А. Стрельцова:

$$\tau_p \geq 7,73 \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{\rho_{\text{об}} d_k}\right)^2}$$

Ориентировочно производительность роторной дробилки:

$$Q = 450 \frac{L_p D_p^{1,5}}{\tau_p^{0,25} z^{0,5}}$$

где  $z$  – число бил.

Установочная мощность, кВт, потребляемая роторными дробилками.

$$N = (40...100) D_p L_p.$$

## 2.1.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Оборудование для среднего измельчения можно подразделить на две группы:

1) машины, в которых измельчение осуществляется за счет сжатия, сдвига, среза, истирания и ударного нагружения с небольшой скоростью;

2) машины, в которых разрушение осуществляется свободным или стесненным ударом.

К первой группе измельчителей среднего измельчения относятся конусные и щековые вибрационные дробилки, валковые дробилки – мельницы с гладкими и шероховатыми валками, среднеходные и тихоходные мельницы и ножевые дробилки.

Валковые дробилки – мельницы, а также среднеходные и тихоходные мельницы используются и для тонкого измельчения.

**Конусные виброинерционные дробилки.** Виброинерционные конусные и щековые дробилки типа КИД позволяют эффективно осуществлять среднее и мелкое дробление и даже грубый помол материалов твердых и средней твердости. Эти дробилки отличаются от обычных конусных тем, что конус в них приводится в движение не посредством эксцентрика, а с помощью дебалансного вибровозбудителя 3 (рис. 2.1.17), что позволило перейти от принципа дробления с заданной деформацией материала к принципу дробления с заданной силой. Благодаря более экономичному разрушению твердого материала при более высокой степени измельчения конусные вибрационные дробилки имеют хорошие перспективы развития для среднего измельчения.

В конусной виброинерционной дробилке с верхним расположением привода (рис. 2.1.17, а) вращающий момент передается на вал возбудителя от электродвигателя 5, установленного на опорной раме 6, через карданный вал 4.

Корпус 2 дробилки подвешен к раме на мягких пружинно-тросовых подвесках 7, 8, благодаря чему машина является практически полностью уравновешенной. Такая же цель достигается посредством опирания корпуса на резинопневматические или резинометаллические виброизоляторы 9 (рис. 2.1.17, б).

В конусной виброинерционной дробилке, показанной на рис. 2.1.18, имеются два самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителя 3, которые размещены в корпусе 2 машины. Щековая ударно-вибрационная дробилка, показанная на рис. 2.1.19, также приводится от двух самосинхронизирующихся дебалансных возбудителей.

Дробление материалов осуществляется в кольцевой полости между рабочей частью наружной поверхности конуса и соответствующей частью внутренней поверхности корпуса (в камере дробления); эти поверхности снабжены сменными футеровками.

Техническая характеристика конусных виброинерционных дробилок представлена в табл. 2.1.7.

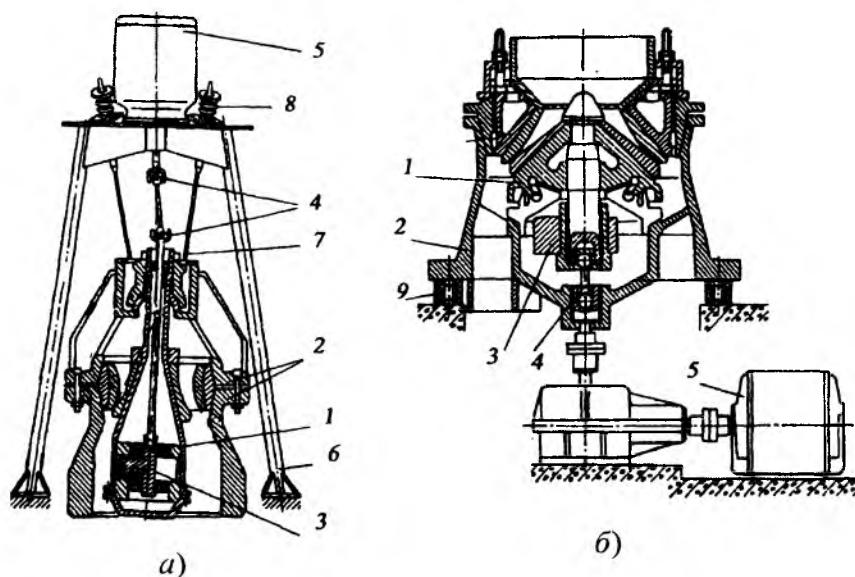


Рис. 2.1.17. Схема конусной виброинерционной дробилки типа КИД:

а – с верхним расположением привода и виброизоляцией посредством использования пружинно-тросовых подвесок; б – с нижним расположением привода и установкой на резинопневматические или резинометаллические виброизоляторы; 1 – дробящий конус; 2 – корпус; 3 – дебалансный вибровозбудитель; 4 – карданный вал; 5 – электродвигатель; 6 – рама; 7, 8 – пружинно-тросовые подвески; 9 – виброизоляторы

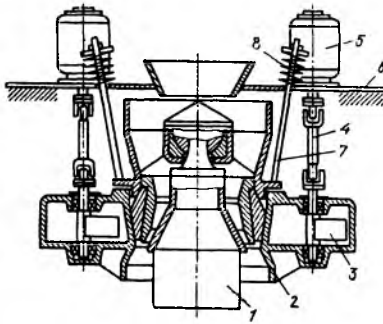


Рис. 2.1.18. Конусная виброинерционная дробилка с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями:

- 1 – дробящий конус; 2 – корпус; 3 – дебалансный вибровозбудитель; 4 – карданный вал;  
5 – электродвигатель; 6 – рама;  
7, 8 – пружинно-тросовые подвески

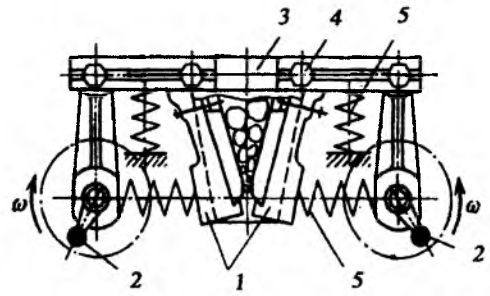


Рис. 2.1.19. Схема щековой виброинерционной дробилки:

- 1 – дробящие щеки; 2 – дебалансные вибровозбудители; 3 – рама; 4 – торсионный упругий элемент;  
5 – пружинный упругий элемент

### 2.1.7. Техническая характеристика конусных виброинерционных дробилок типа КИД

Показатели	КИД-300	КИД-600	КИД-1750	КИД-2200
Диаметр дробящего конуса $D$ , мм	300	600	1750	2200
Наибольший размер кусков в питании $d_{ч \max}$ , мм	20	50	90	110
Производительность при материале средней твердости $Q$ , м <sup>3</sup> /ч, не более	1	18	90	150
Крупность готового продукта $d_k$ , мм	2...0	6...0	10...0	12...0
Электродвигатель главного привода:				
мощность $N$ , кВт	10	75	500	800
частота вращения $n_{дв}$ , мин <sup>-1</sup>	1450	950	590	735
Масса дробилки без электро- и смазочного оборудования, т	1	5,5	90	140

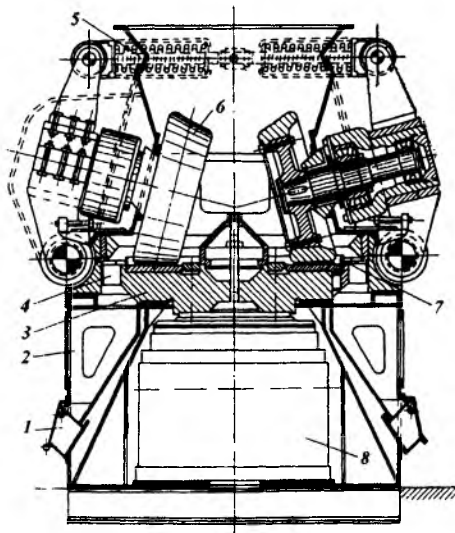
**Среднеходные мельницы.** Частота вращения среднеходных мельниц достигает 80 мин<sup>-1</sup>, в то время как у тихоходных барабанных мельниц она не превышает 21 мин<sup>-1</sup>.

К среднеходным мельницам среднего и тонкого измельчения можно отнести: роликокольцевые, шарокольцевые, роликовые, катковочашечные, катковотарельчатые, бегуны и стругачи. Среднеходные мельницы особенно распространены в энергетике, при производстве композиционных материалов на основе кокса, в производстве огнеупорных и керамических материалов. Измельчение в этих машинах осуществляется раздавливанием и истиранием. Исключение составляют стругачи, у которых глина разрушается ножами. Среднеходные роликовые мельницы используются для среднего размола углей и могут быть рекомендова-

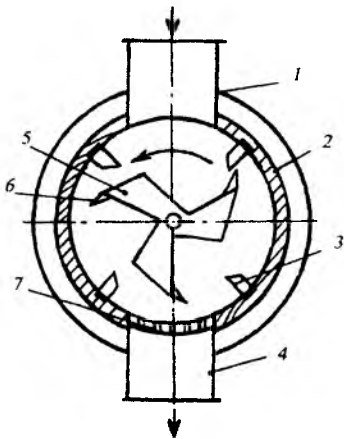
ны для измельчения других аналогичных материалов.

В среднеходной валковой (роликовой) мельнице с горизонтальной тарелкой (рис. 2.1.20) измельчаемый материал поступает в центр вращающейся тарелки 3, откуда направляется на размольный диск, на котором измельчается массой вращающегося вала 6. Сила прижатия валков к тарелке регулируется натяжением пружин 5.

Бегуны могут быть использованы как для сухого, так и для мокрого измельчения. Измельчение в них осуществляется массивными катками, сила прижатия которых к вращающейся чаше регулируется пружинами. Измельченный и гомогенизированный материал выгружается через дырчатые плиты.



**Рис. 2.1.20. Среднеходная валковая (роликовая) мельница с горизонтальной тарелкой:**  
 1 – карманы для отходов; 2 – воздушная коробка;  
 3 – тарелка; 4 – кольцевой канал для прохода воздуха; 5 – пружина для нажатия роликов;  
 6 – валок (ролик); 7 – подпорное кольцо; 8 – редуктор



**Рис. 2.1.21. Схема ножевой дробилки:**  
 1 – патрубок ввода полимерного материала;  
 2 – корпус; 3 – неподвижные ножи; 4 – патрубок выгрузки готового продукта; 5 – ротор;  
 6 – вращающиеся ножи; 7 – решетка

К специальной группе измельчителей среднего измельчения относятся ножевые дробилки, предназначенные в основном для измельчения полимерных материалов и некоторых отходов пластичных материалов. Существующие ножевые дробилки можно разделить на две подгруппы: 1) без классифицирующей

решетки; 2) с классифицирующей решеткой. Как правило, ножевые дробилки имеют ротор 5 с тремя вращающимися ножами 6 (рис. 2.1.21). В корпусе могут быть установлены два либо четыре неподвижных ножа 3. Размеры частиц измельчаемого продукта зависят от зазора между вращающимися и неподвижными ножами и частоты вращения ротора. При наличии классифицирующей решетки 7 размеры частиц готового продукта определяются размерами отверстий в решетке.

### 2.1.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Машины для тонкого измельчения (с частицами готового продукта размером менее 1 мм) обычно называют мельницами.

Как известно, удельные затраты энергии значительно зависят от конечной дисперсности продукта (тонины измельчения): при крупном измельчении они составляют 0,4...8 кВт·ч/т, при среднем измельчении – 10...50 кВт·ч/т, при тонком измельчении – 30...1000 кВт·ч/т, а при сверхтонком ( $d_k < 2$  мкм) – более 1000 кВт·ч/т. Широкий диапазон удельных затрат энергии при тонком измельчении связан, в первую очередь, с большим диапазоном размеров частиц получаемого продукта (0,5...500 мкм) и разными требованиями производств по конечной дисперсности продукта в указанном интервале размеров.

Исследования показали, что удельные затраты энергии на 1 т получаемой продукции также существенно зависят от способа подвода механической энергии к измельчаемым материалам, особенно при тонком и сверхтонком измельчении.

По виду преимущественного нагружения измельчаемых частиц мельницы можно классифицировать на три группы:

1) с низкой скоростью деформирования с преимущественным нагружением раздавливанием, истиранием и низкоскоростным ударом – шаровые, стержневые, бегуны, шарокольецевые, центробежные мельницы с раздавливающими роликами;

2) со средней скоростью деформации, разрушающие частицы в основном стесненным ударом и истиранием – вибрационные, магнитно-вихревые, центробежно-планетарные мельницы;

3) с высокой скоростью нагружения, измельчающие материалы преимущественно



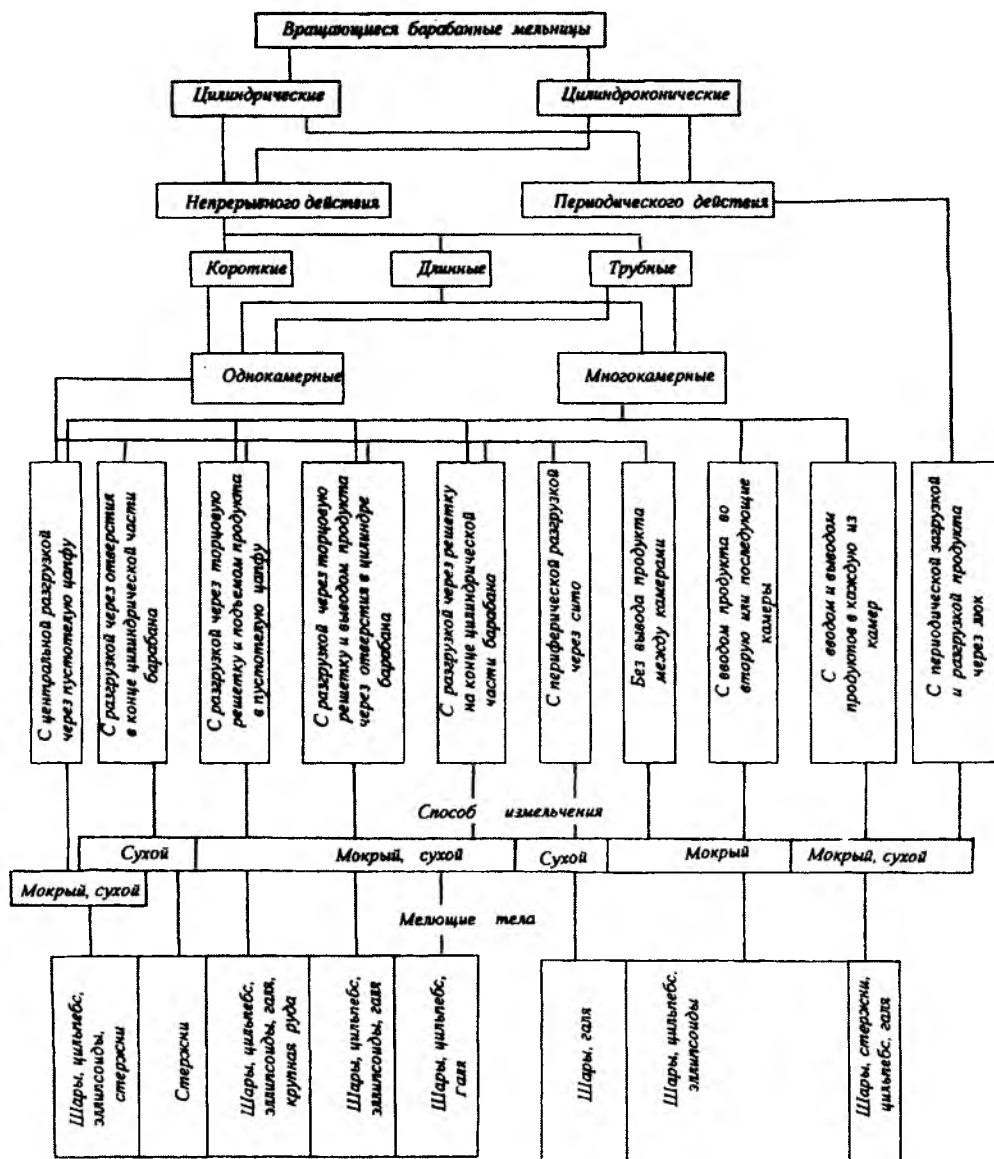


Рис. 2.1.22. Классификация вращающихся барабанных мельниц

свободным ударом – ударно-отражательного действия и ударные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы, молотковые, роторные и струйные мельницы.

В отдельную группу следует отнести мельницы мокрого помола.

Из мельниц первой группы наибольшее применение, особенно в многотоннажных производствах, нашли вращающиеся барабанные

мельницы: в керамических, фарфоровых производствах, в производстве пластмасс и других химических производствах для тонкого помола сырья, пигментов, красителей.

**Вращающиеся барабанные мельницы.** Барабанные мельницы относятся к машинам раздавливающе-истирающе-ударного действия с низкой скоростью нагружения измельчаемых частиц.

Вращающаяся барабанная мельница представляет собой цилиндрический барабан, футерованный изнутри броневыми плитами. Шаровые мельницы периодического действия часто футеруют либо керамикой, либо резиной, особенно при тонком мокром измельчении материалов в производстве фарфора, пигментов, красителей и других веществ. Барабанные мельницы заполняются измельчающими элементами (в основном шарами) на 35...42 % свободного объема мельницы.

Существует большое число типов шаровых измельчителей периодического и непрерывного действия производительностью от нескольких килограммов до сотен тонн в час.

Классификация барабанных мельниц представлена на рис. 2.1.22.

По отношению длины барабана  $L$  к его диаметру  $D$  барабанные мельницы подразделяются на короткие  $L/D < 1$ , длинные  $1 \leq L/D \leq 3$  и трубные  $L/D \geq 3$ . Трубные мельницы могут быть многокамерными, что позволяет увеличить конечную дисперсность.

Техническая характеристика шаровых мельниц периодического действия типа Ш1 представлена в табл. 2.1.8. Эти мельницы осуществляют мокрое измельчение при производстве красителей, пигментов, лаков, эмалей и других химических веществ. Мокрый помол в мельницах позволяет увеличить их производительность и дисперсность и частично исключить нежелательные явления агломерации измельченных частиц.

Шаровые барабанные мельницы типа ШБМ непрерывного действия предназначены для размола до пылевидного состояния антрацита, некоторых сортов каменных и бурых углей, имеют восемь типоразмеров ШБМ производительностью 8...76 т/ч (табл. 2.1.9).

Для грубого и тонкого мокрого измельчения руд, а также горных пород и других материалов предназначены шаровые мельницы типа МШР с разгрузкой через решетку и типа МШЦ с центральной (сливной) разгрузкой (табл. 2.1.10 и табл. 2.1.11).

Типоразмерный ряд мельниц МШР включает десять основных машин с отношением диаметра к длине барабана 900/900...4500/5000 мм производительностью 2,0...150 т/ч.

Измельченный материал, прошедший через решетки с размером щели 30 мм, принудительно выводится наружу с помощью систем элеваторов разгрузочной части.

Типоразмерный ряд мельниц МШЦ включает девять основных машин с отношениями диаметра к длине барабана 900/1800...5500/6500 мм производительностью 1,4...500 т/ч. Продукт из мельниц МШЦ удаляется сливным путем через полуцапфу разгрузочной крышки. Разгрузка производится через отверстия бутары, в которую измельченный материал перемещается спиралями, расположенными в полости цапфы. С целью снижения уровня шума при работе мельницы бутара и часть разгрузочной цапфы закрыты противозвучным экраном.

2.1.8. Техническая характеристика шаровых измельчителей периодического действия

Показатель	Ш1-1.00-В-У-02	Ш1-2.00-В-У-02	Ш1-4.00-В-У-02
Производительность, кг/ч	80...150	100...250	180...400
Номинальный рабочий объем барабана, м <sup>3</sup>	1 0,39	2 0,77	4 1,54
Размер частиц: исходного продукта, мм готового продукта, мкм	1...50 5...40	1...50 5...40	1...50 5...40
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	20	18	16
Мощность электродвигателя, кВт	11	18,5	45
Масса с электродвигателем, кг	5300	8505	15297

**2.1.9. Техническая характеристика вентилируемых шаровых барабанных мельниц сухого помола типа ШБМ при работе в замкнутом цикле с воздушно-проходным сепаратором типа СПЦВ**

Показатель	207/265 (Ш-4)	220/330 (Ш-6)	250/390 (Ш-10)	287/410 (Ш-12)	287/470 (Ш-16)	320/570 (Ш-25А)	340/650 (Ш-32А)	370/850 (Ш-50А)
Диаметр барабана в свету, м	2,07	2,20	2,50	2,87	2,87	3,20	3,40	3,70
Длина барабана, м	2,65	3,30	3,90	4,1	4,70	5,7	6,5	8,5
Объем барабана, м <sup>3</sup>	8,9	12,5	19,2	26,5	30,4	45,8	59,2	91,5
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	23	21,8	20,6	19,2	19,2	17,8	17,2	17,6
Относительная частота вращения	0,78	0,77	0,75	0,77	0,77	0,75	0,75	0,80
Максимальная масса шаровой загрузки, т	10	14	25	30	35	54	66	100
Заполнение барабана шарами	0,23	0,23	0,27	0,23	0,23	0,24	0,23	0,223
Приведенная производительность, т/ч	8	11	17	22	24	35	45	76
Мощность электродвигателя, кВт	125	20	315	400	500	800	1000	1600
КПД привода	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,89	0,92
Масса мельницы без двигателя и шаров, т	25	27	43	59	62	99	154	170

**2.1.10. Техническая характеристика шаровых барабанных мельниц мокрого измельчения с разгрузкой через решетку типа МШР при работе в замкнутом цикле**

Показатель	900×900	1200×1200	1500×1500	2100×1500	2100×2200	2100×3000	2700×2100	2700×2700	2700×3600
Диаметр барабана в свету, м	0,78	1,07	1,36	1,94	1,94	1,94	2,51	2,51	2,51
Длина барабана, м	0,9	1,20	1,50	1,50	2,20	3,0	2,10	2,70	3,6
Объем барабана, м <sup>3</sup>	0,43	1,1	2,2	4,4	6,5	8,8	10	13	18
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	41	35	30	24,4	24,4	24,4	21	21	21
Относительная частота вращения	0,84	0,86	0,83	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79
Максимальная масса шаровой загрузки, т	0,9	2,2	4,6	9,1	13,4	18,3	21,5	29	37
Заполнение барабана шарами	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43	0,45	0,45	0,43
Приведенная производительность, т/ч	0,8	1,8	3,5	7,0	10,5	14	16	21	29
Мощность электродвигателя, кВт	14	28	55	132	160	200	315	380	400
КПД привода	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,92	0,92	0,92
Масса мельницы без двигателя и шаров, т	5,3	10,3	15,4	39	44	49	68	74	78

**2.1.11. Техническая характеристика шаровых барабанных мельниц мокрого измельчения с центральной разгрузкой типа МШЦ при работе в замкнутом цикле**

Показатель	900×1800	1500×3100	2100×2200	2100×3000	2700×3600	3200×3100	3200×4500	3600×5500
Диаметр барабана в свету, м	0,78	1,36	1,94	1,94	2,51	2,99	2,99	3,38
Длина барабана, м	1,8	3,1	2,2	3,0	3,6	3,1	4,5	5,5
Объем барабана, м <sup>3</sup>	0,9	4,4	6,5	8,8	18	22	32	49
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	41	30	24,4	24,4	21	19,8	19,8	18,1
Относительная частота вращения	0,84	0,83	0,80	0,80	0,79	0,81	0,81	0,79
Масса шаровой загрузки (максимальная), т	1,7	8,4	12,5	17,1	34	42	61	95
Заполнение барабана шарами	0,39	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Приведенная производительность, т/ч	1,4	7	10,5	14	29	35	51	78
Мощность электродвигателя N, кВт	22	100	160	200	400	630	900	1250
КПД привода	0,86	0,86	0,86	0,86	0,92	0,92	0,92	0,92
Масса мельницы без двигателя и шаров M, т	5,2	23	40	46,5	76	90	140	170

Показатель	4000×5500	4500×6000	4500×8000	5500×6000	5500×6500	5000×10500	5500×10500	6000×8000	6000×8500
Диаметр барабана в свету, м	3,76	4,26	4,26	5,26	5,26	4,76	5,26	5,76	5,76
Длина барабана, м	5,5	6,0	8,0	6,0	6,5	10,5	10,5	8,0	8,5
Объем барабана, м <sup>3</sup>	61	85	114	130	141	186	228	208	221
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup>	17,4	16,5	16,5	13,6	13,6	15,3	13,6	13,2	13,2
Относительная частота вращения	0,80	0,80	0,80	0,74	0,74	0,78	0,74	0,75	0,75
Масса шаровой загрузки (максимальная), т	118	165	220	255	273	360	440	400	428
Заполнение барабана шарами	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Приведенная производительность, т/ч	98	136	185	210	225	300	368	337	357
Мощность электродвигателя, кВт	2000	2500	3150	3200	4000	–	–	–	–
КПД привода	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	–	–	–	–
Масса мельницы без двигателя и шаров, т	250	355	450	–	690	–	–	–	–

Мелющими телами в шаровых мельницах типов МШР и МШЦ служат литые, кованные или прокатные стальные шары диаметром 30...125 мм. Загрузка внутреннего объема барабана шарами составляет 42...45 %.

Многокамерные трубные мельницы типов МШР и МШЦ выполнены секционированными из нескольких камер (рис. 2.1.23). Многокамерные мельницы имеют перегородки с отверстиями, которые задерживают мелющие шары большего размера, но позволяют перетекать из измельченному материалу.

Повышение производительности трубной шаровой мельницы на 20...25 % при той же мощности привода может быть достигнуто за счет секционированного режима измельчения по всей длине мельницы при интенсивном ударно-истирающем воздействии мелющих тел в камерах грубого помола. Такой режим работы может быть обеспечен при сочетании в трубной шаровой мельнице наклонной межкамерной перегородки (или ее разновидностей) и лопастных эллипсных элементов. С учетом различных физико-химических свойств измельчаемых материалов, способа их измельчения (сухой, мокрый помол), типоразмеров мельниц разработаны различные внутримельничные энергообменные устройства, в том числе наклонные межкамерные перегородки, лопастные эллипсные элементы, винтовые устройства, а также схемы их установки в измельчительных агрегатах.

Следует отметить, что при мокром измельчении в шаровых мельницах не требуется предварительная сушка измельчаемых материалов и отсутствует пылеобразование. Поэтому ряд фирм США, Канады и Германии перешли от сухого измельчения руд в шаровых мельницах к мокрому, что позволило получить определенный экономический эффект.

В модифицированном измельчителе барабан состоит из двух конических днищ, ци-

линдрической и конической частей корпуса. Такая конструкция корпуса так же, как и секционирование трубной шаровой мельницы позволяет устранить застойные зоны и значительно повысить эффективность измельчения при снижении удельных энергозатрат.

Расчет вращающихся барабанных мельниц. Производительность  $B$ , т/ч, шаровой барабанной мельницы находится из выражения

$$BPr = c_m V_6 \Phi_{ш}^{0,65} \psi_6 k_{эк} \rho_{ш}$$

$$\text{где } Pr = \left[ \left( \ln \frac{100}{R_{90}} \right)^q - \left( \frac{90}{d_0} \ln \frac{100}{R_{d0}} \right)^q \right] / (K_{ло} P_{вл}) -$$

коэффициент приведения;  $c_m$  – коэффициент, зависящий от свойств материала;  $V_6$  – полезный (без учета футеровки) объем барабана, м<sup>3</sup>;  $\Phi_{ш} = M_{ш} / (\rho_{ш} V_6)$  – доля объема барабана, занятая шарами;  $M_{ш}$  – масса шаровой загрузки, т;  $\rho_{ш} = 4,9 \text{ т/м}^3$  – плотность шаровой загрузки для стальных шаров;  $\psi_6 = n / n_{кр}$  – относительная частота вращения барабана;  $n$  – фактическая частота вращения барабана, мин<sup>-1</sup>;  $n_{кр} = 42,3 / \sqrt{D}$  – критическая частота вращения, при которой шар начинает «прилипать» к футеровке в верхней точке и находится в ней под действием равных по размеру и противоположно направленных сил тяжести и центробежной, мин<sup>-1</sup>;  $D$  – диаметр барабана в свету, м;  $k_{эк} = 0,9$  – коэффициент, учитывающий снижение производительности в эксплуатационных условиях вследствие износа брони (футеровки), шаров и ряда других причин;  $K_{ло}$  – коэффициент размолоспособности; по данным ВТИ  $K_{ло} = 2,32 [\ln 100 / R_{90}]$ ;

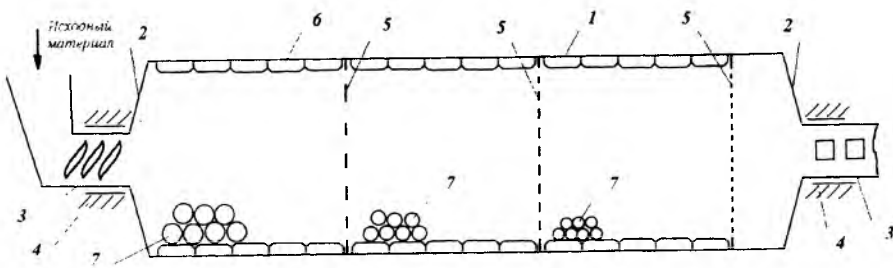


Рис. 2.1.23. Схема многокамерной трубной мельницы:

- 1 – барабан; 2 – днище; 3 – полые цапфы; 4 – самоустанавливающиеся подшипники; 5 – перегородка; 6 – броневи плиты; 7 – шары

$R_{90}$  – содержание класса + 90 мкм в измельченном продукте, %;  $d_0$  – контрольный размер частиц в исходном продукте, мкм;  $R_{d0}$  – содержание класса +  $d_0$  в исходном продукте, %;  $P_{вл}$  – коэффициент, учитывающий влияние влажности размалываемого материала (при сухом помоле);

$$P_{вл} = \sqrt{\frac{1 - 0,85(W_{пл} / W_m)^2}{1 - 0,85(W_a / W_m)^2}}$$

$W_m, W_{пл}$  – влажность соответственно исходного и измельченного материала, %;  $W_a$  – аналитическая (гигроскопическая) влажность материала, %.

Мощность, потребляемая шаровой барабанной мельницей, кВт,

$$N = \frac{V\sqrt{D}\psi_6}{\eta_{пр}} (0,6\rho_{ш}\varphi_{ш}^{0,9} K_{бр} K_m + 1,9/D),$$

где  $V$  – объем барабана, м<sup>3</sup>;  $D$  – диаметр барабана, м;  $K_{бр}$  – коэффициент, учитывающий форму брони;  $K_{бр} = 0,92 \dots 1,0$ ;  $K_m = 1 + 0,25\rho_m/\rho_{ш}$  – коэффициент, учитывающий плотность измельчаемого материала,  $\rho_m$ ;  $\eta_{пр}$  – КПД привода.

**Вибрационные измельчители.** В вибрационных мельницах так же, как в шаровых и центробежно-планетарных для помола мате-

риалов используют мелющие тела разной формы (шары, штиблесты и др.). Принцип измельчения – высокочастотное ударное взаимодействие со скоростями нагружения 1...15 м/с между измельчаемыми частицами и мелющими телами, раздавливание и истирание массой мелющих и быстро перемещающихся тел.

Классифицировать вибрационные мельницы можно в зависимости от количества помольных камер и расположения вибратора относительно них: однокамерные мельницы с центральным расположением вибратора внутри камеры; однокамерные мельницы с одним или несколькими синхронизированными вынесенными вибраторами; двухкамерные мельницы с одним или несколькими синхронизированными вынесенными вибраторами; многокамерные мельницы с двухмассовым вибратором.

Вибрационные мельницы периодического и непрерывного действия используются для тонкого и сверхтонкого сухого и мокрого измельчения.

Корпус вибрационной мельницы закреплен на упругих опорах, и всей массе (с шарами и измельчаемым материалом) сообщаются колебания с амплитудой 2...8 мм и частотой 960...6000 мин<sup>-1</sup>.

Производительность вибрационных мельниц зависит от ее конструкции, дисперсности конечного продукта и типа измельчаемого материала.

Техническая характеристика вибрационных мельниц типа СВМ дана в табл. 2.1.12.

**2.1.12. Техническая характеристика вибрационных мельниц типа СВМ**

Модель	Объем камеры, дм <sup>3</sup>	Количество камер	Мощность двигателя, кВт	Масса, кг	Производительность, кг/ч
СВМ 04	0,05...0,1	1...2	0,37	50	–
СВМ 1	0,1	2	1	50	–
СВМ 2	10	1	2,2	300	–
СВМ 5	10	1	5	300	40...50
СВМ 15	25	1	15	500	50...70
СВМ 30	200	1	30	800	150...200
СВМ 40	400	1	37	1200	800...1000
СВМ 100	300	2	110	5000	600...1200
СВМ 160	500	2	160	8000	1500...2800
СВМ 320	700	2	315	10000	4500...7500

Промышленные мельницы малой мощности (до 10 кВт) типов СВМ 2 и СВМ 5 используют для наработки небольших количеств (1...5 дм<sup>3</sup>) тонкоизмельченного материала. Они состоят из одной помольной камеры, в которой соосно расположен вибровозбудитель. При выгрузке продукта камеру переворачивают. Мельницы предназначены для периодического измельчения материала и снабжены звукоизолирующим кожухом.

Промышленные мельницы средней мощности (до 100 кВт) СВМ 15, СВМ 30 и СВМ 40 производительностью 1 т/ч используют для получения измельченных материалов при удельной затрате энергии 40...60 кВт·ч/т. Мельницы выполнены по однокамерной схеме с вибровозбудителем, расположенным в помольной камере. В этих вибромельницах помольная камера снабжена загрузочным и выгрузочным патрубками. В выгрузочном патрубке установлена решетка, задерживающая мелющие тела.

При периодическом измельчении материала выгрузка производится через нижний патрубок, а при непрерывном материал можно выгружать также через верхний патрубок для поддержания высокой концентрации его в камере.

Промышленные мельницы большой мощности (свыше 100 кВт) имеют две помольные камеры, которые связаны траверсами. Траверсы посредством упругой опоры установлены на основании мельницы. Камеры могут быть расположены одна над другой (что позволяет использовать мельницу как двухстадийную) либо на одном уровне, что повышает пропускную способность, а также дает возможность измельчать два материала. В торцовых крышках камер смонтированы устройства для загрузки и выгрузки.

Загрузочное устройство состоит из цилиндрического переходника, снабженного патрубком, к которому крепится эластичный соединитель. Устройство для выгрузки снабжено решеткой и камерой, в которой установлены заслонки, регулирующие концентрацию материала в камере. Внутренняя поверхность камеры покрыта бронефутеровкой. Между камерами расположен вибровозбудитель, вал которого соединен эластичной муфтой с валом двигателя.

Такие мельницы предназначены для непрерывной работы в составе технологических комплексов, включающих также бункеры ис-

ходных материалов, питатели, устройства для транспортирования продукта, склад, систему автоматического регулирования загрузки.

В зависимости от производительности в вибрационных мельницах возможно получать продукты разной дисперсности.

Производительность, кг/ч	100	100...500	Более 1000
Размер частиц, мкм	20	40	60

Для получения продукта относительно невысокой дисперсности (остаток на сите 0063 10...15 %) используют комплексы открытого цикла. Для получения продукта более высокой дисперсности в комплексы включают классификатор, в который подают продукт, прошедший помольную камеру. Крупный класс продукта возвращается в мельницу для дополнительного измельчения, мелкий класс собирается в емкости готового продукта.

На срок службы и ремонтоспособность мельниц положительно влияют простота их конструкции, отсутствие соединений типа зубчатых передач, редукторов и т.д.

Машины малой производительности выпускаются серийно во многих странах мира, например, мельницы типов VMV (Чехия), «Вибратон» (Австрия). Наибольший интерес представляют мельницы типа VMV, они имеют хорошую техническую характеристику и сравнительно высокую производительность (табл. 2.1.13).

Мельница типа VMV состоит из двух горизонтально расположенных помольных камер, установленных в траверсах, закрепленных на раме посредством упругой опоры из спиральных пружин. В траверсах смонтирован центробежный вибровозбудитель, состоящий из вала, опирающегося на подшипники, внешних и внутренних дебалансов.

В вибрационных мельницах возможно получать более тонкие дисперсные продукты чем в шаровых.

К недостаткам всех вибрационных мельниц необходимо отнести их малую абсолютную производительность даже при непрерывном режиме работы (как правило, двухкорпусных машин), а также сравнительно высокую степень загрязнения измельченных материалов продуктами намола шаров и корпуса.

Мощность двигателя мельницы расходуется на сообщение колебаний системе (мельнице, шарам, измельчаемому материалу) и преодоление сил трения в подшипниках привода вибратора.



## 2.1.13. Техническая характеристика вибрационных мельниц типа VMV

Показатель	1861	1862	1863	1864
Производительность, кг/ч	100...300	300...500	500...1000	1000...2500
Объем камеры, дм <sup>3</sup>	250	500	1000	2000
Диаметр камеры, мм	350	400	500	650
Длина барабана, мм	2×1300	2×2000	2×2500	2×3000
Масса мелющих тел, т:				
стальных	0,92	1,8	3,6	8
керамических	0,42	0,92	1,85	3,7
Размер частиц, мм:				
исходного материала	0...3	0...3	0...3	0...5
продукта	0,1...0,04	0,1...0,04	0,1...0,04	0,1...0,04
Влажность материала, %	До 2	До 2	До 2	До 2
Потребляемая мощность, кВт	20...30	55	75	110
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1450	1450	980	980
Амплитуда колебаний, мм	1...3,5	1...3,5	2...4	2...4
Масса без мелющих тел, т	1,26	2,95	5,62	8

Мощность, необходимая для сообщения колебаний, кВт,

$$N_1 = \frac{KM_B^2 \omega^3 q u}{Gg[1 + q^2(1 + \mu^2)]10^3},$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от степени заполнения мельницы загрузкой и частоты колебаний;  $M_B$  – дебалансный момент вибратора, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вибратора, рад/с;  $q$  – коэффициент, зависящий от вида мелющих тел и измельчаемого материала;  $\mu$  – относительная масса загрузки;  $\mu = (m_{ш} + m_m)/m_k$ ;  $m_{ш}$  – масса шаров;  $m_m$  – масса материала;  $m_k$  – масса корпуса;  $G$  – сила тяжести колеблющихся масс, Н;  $M_B = m_d R$ ;  $m_d$  – масса дебаланса;  $u$  – линейная скорость дебаланса вибратора, м/с.

Мощность, затрачиваемая на трение в подшипниках,

$$N_2 = \frac{fd_n m_d \omega^3 R}{2000},$$

где  $d_n$  – диаметр подшипника, м;  $R$  – радиус центра масс дебаланса, м.

Мощность двигателя мельницы

$$N_{дв} = (N_1 + N_2) / \eta_{пр},$$

где  $\eta_{пр}$  – КПД привода.

**Центробежно-планетарные мельницы** больше известны как измельчители лабораторного типа с большим центробежным ускорением. В измельчителях этого типа барабаны с шарами и измельчаемым материалом совершают два вращения: вокруг осей барабана и вала привода.

В настоящее время известны центробежно-планетарные мельницы с двумя, тремя и четырьмя барабанами. В зависимости от режимов планетарного движения барабанов измельчение может осуществляться за счет как раздавливания и истирания частиц, так и ударного и истирающего воздействия шаров. В работающих машинах развиваются большие ускорения центробежных сил, вследствие чего скорости измельчения в этих мельницах очень высокие. Поэтому габаритные размеры и масса центробежно-планетарных мельниц по сравнению с барабанными при одной и той же производительности более чем в 20 раз меньше [29]. В настоящее время выпускаются центробежно-планетарные машины с тремя барабанами производительностью до 5,5 т/ч, что свидетельствует о хороших перспективах развития мельниц этого типа.

Центробежно-планетарная мельница непрерывного действия, показанная на рис. 2.1.24, имеет четыре рабочих барабана 6, в

которые загружаются измельчающие шары 7. Исходный материал вместе с воздухом поступает в патрубок 1, откуда по разводящим трубам 4 – в рабочие барабаны 6. Барабаны вращаются вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega$  вследствие их фрикционного трения резиновыми кольцами 8 о корпус 12. Резиновые кольца 8 жестко закреплены на барабанах. Кроме того, барабаны вращаются также вокруг оси приводного вала 9 с угловой скоростью  $\Omega$ . При этом  $\omega \approx \Omega R_b / r_6$ , где  $R_b$  – радиус центра оси барабана от оси вала;  $r_6$  – радиус барабана мельницы.

Измельченный материал выносится воздухом по патрубку 3 благодаря разрежению, создаваемому вентилятором 2, и выводится из мельницы через патрубок 13. Передача вращения барабанам осуществляется за счет фрикционной передачи.

К недостаткам такой мельницы необходимо отнести большой износ измельчающих шаров и стенок корпуса, загрязнение измельчаемых материалов продуктами износа, сложность и малую механическую надежность конструкции при большой производительности.

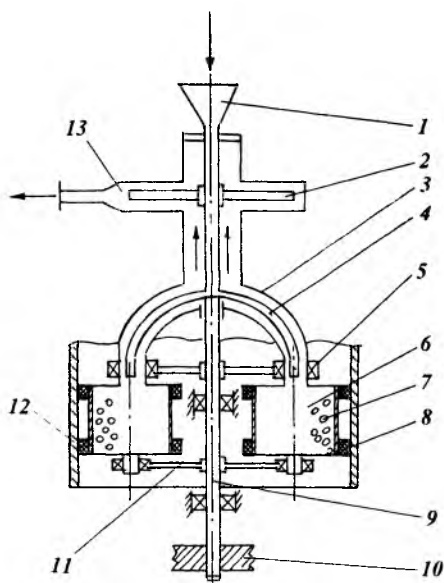
**Мельницы ударного и ударно-отражательного действия.** Особенностью этих мельниц по сравнению с мельницами других типов является непрерывный режим их работы, высокоскоростное ( $v > 80$  м/с) ударное нагружение измельчаемых материалов, что приводит (даже при многократном ударном нагружении частиц) к малому среднему времени пребывания частиц в машинах этого типа (0,5...5 с), а следовательно, к высокой производительности при малых значениях массы и габаритных размерах мельниц.

Мельницы ударного и ударно-отражательного действия подразделяются на две подгруппы:

1) в которых высокоскоростное ударное нагружение измельчаемые частицы получают от вращающихся молотков, ударных элементов или бил;

2) струйной энергии, в которых измельчаемые частицы разгоняются до высоких скоростей (более 100...150 м/с) сжатым газом или паром и сталкиваются друг с другом.

Следует отметить практически полное отсутствие загрязнения готового материала продуктами намола в струйных мельницах и очень небольшое его загрязнение в мельницах роторного типа.



**Рис. 2.1.24. Схема центробежно-планетарной мельницы непрерывного действия**

1 – загрузочный патрубок; 2 – вентилятор; 3 – разгрузочный патрубок; 4 – разводящая труба; 5 – подшипник; 6 – рабочие барабаны; 7 – измельчающие шары; 8 – резиновые кольца; 9 – приводной вал; 10 – шкив; 11 – водило; 12 – корпус; 13 – выходной патрубок

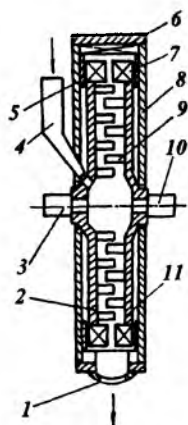
Тонкое и сверхтонкое сухое измельчение без загрязнения измельчаемых материалов и при меньших удельных энергозатратах возможно только в мельницах ударного и ударно-отражательного действия, поэтому предпочтительность их применения в различных производствах очевидна.

К недостаткам измельчителей первой подгруппы необходимо отнести быстрый износ рабочих органов (молотков, бил, ударных элементов) при измельчении твердых материалов.

Мельницы первой подгруппы наиболее распространены при сухом тонком измельчении. В настоящее время в России, Германии, США, Финляндии, Великобритании, Швеции, Швейцарии, Австрии, Чехии и других странах разработаны и выпускаются мелкими сериями десятки конструктивных разновидностей мельниц этого типа.

По реализации процесса внутренней сепарации измельчаемых частиц эти мельницы могут быть подразделены на две группы:

- 1) без развитой внутренней сепарации;
- 2) с развитой внутренней сепарацией.



**Рис. 2.1.25. Схема дезинтегратора с пальцами:**  
 1 – разгрузочный патрубок; 2, 9 – пальцы; 3 – вал первого ротора; 4 – загрузочный патрубок;  
 5 – крышка корпуса; 6 – отбойник; 7 – ударные била; 8 – корпус; 10 – вал второго ротора; 11 – ротор

Мельницы струйной энергии (струйные мельницы) по конструктивному оформлению камеры измельчения и способу разгона измельчаемых частиц до высоких скоростей подразделяются на четыре группы:

- 1) противоточные струйные;
- 2) О-образные или кольцевые струйные;
- 3) с плоской размольной камерой;
- 4) измельчители с псевдооживленным слоем.

К мельницам ударного и ударно-отражательного действия без развитой внутренней сепарации можно отнести: дисмембраторы, дезинтеграторы, молотковые мельницы и центробежные мельницы разного конструктивного оформления. Наиболее простыми мельницами роторного типа ударного действия без развитой сепарации являются дисмембраторы и дезинтеграторы.

В дезинтеграторе два вращающихся навстречу друг другу ротора 11 имеют концентрические ряды пальцев 2 и 9, входящих в межрядные промежутки обоих роторов (рис. 2.1.25). Исходный материал по загрузочному патрубку 4 подается в центр корпуса 8, откуда частицы, перемещаясь под действием сил инерции к патрубку 1, подвергаются многократному ударному нагружению пальцами 2 и 9.

Для увеличения степени измельчения в этой конструкции, в отличие от типовых конструкций дезинтеграторов, на концах дисков роторов имеются ударные била 7, а на корпусе 8 мельницы – отбойники 6.

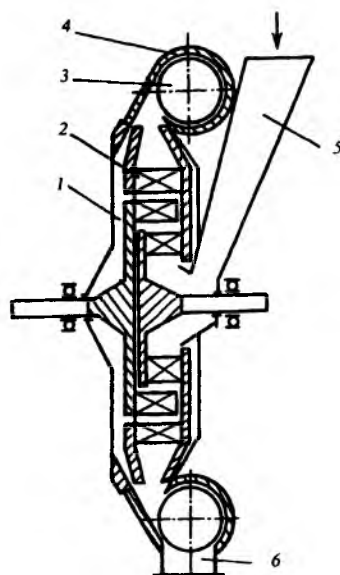
Дисмембратор отличается от описанного выше дезинтегратора тем, что он имеет только один вращающийся ротор с несколькими рядами ударных пальцев. Ответные ряды пальцев (в отличие от пальцев дезинтегратора), закреплены неподвижно на крышке корпуса.

Дисмембраторы и дезинтеграторы выпускаются в России серийно. Характеристика некоторых из них представлена в табл. 2.1.14.

Как правило, типовые дисмембраторы и дезинтеграторы применяются для дезагрегации порошков после сушки коллоидных суспензий.

На рис. 2.1.26 показана схема дезинтегратора [А.с. № 902814 (РФ) БИ № 5], у которого вместо пальцев установлены концентрические ряды плоских ударных бил 2, расположенных не радиально, а под оптимальным для удара углом к радиусу, что позволяет при тех же габаритных размерах машины резко увеличить степень измельчения. Вращающийся элемент 3 позволяет транспортировать к выгрузочному патрубку 5 даже легко налипающие тонкодисперсные материалы. Поэтому подобные машины уже используются для осуществления процесса тонкого измельчения.

Практически без классификации измельчаемых материалов работают типовые молотковые мельницы М-800.



**Рис. 2.1.26. Схема дезинтегратора с плоскими билами:**  
 1 – корпус; 2 – била; 3 – вращающийся элемент;  
 4 – бункер; 5 – патрубок подачи исходного материала; 6 – патрубок выгрузки готового продукта

**2.1.14. Техническая характеристика мельниц ударного и ударно-отражательного действия без развитой внутренней сепарации**

Показатель	Дезинтегратор ДЗГ 630 УО1	Дезинтегратор ДЗГ 630 УВ1	Дисмембратор П1-0,63-0-У-01	Мельница	
				молотковая М-800	трехступенчатая ИГХТУ
Производительность, кг/ч	До 1500	До 1500	500...1500	1000	1500
Размер частиц: исходного продукта, мм готового продукта, мкм	До 10 50...100	До 10 50...100	До 30 50...150	7...10 Не боле 250	До 10 0...50
Температура в камере измельчения, °С	35...50	35...50		До 20	–
Рабочая среда	Нейтральная, невзрывоопасная	Нейтральная, пожаро-, взрывоопасная	–	Токсичная, взрывоопасная	–
Диаметр ротора, мм	630	630	630	800	680
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	1450	1460	3626	1470	3500
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч				2000...5000	800
Электродвигатель привода: число мощность, кВт частота вращения, мин <sup>-1</sup>	2 22 1450	2 22 1460	22	55 1470	1 30 2900
Габаритные размеры, мм	2060 × 1390 × 1375	2060 × 1430 × 1550		2400 × 1490 × 1365	
Масса, кг	1900	2090	1498	2470	800

Пр и м е ч а н и е. Давление в камере измельчения атмосферное.

Типовые молотковые мельницы отличаются от молотковых дробилок значительно меньшим зазором между корпусом и молотками, наличием фигурной или зубчатой бронифутеровки и большими окружными скоростями рабочих элементов (молотков). Окружная скорость концов молотков может превышать 100 м/с (у дробилок линейная скорость не выше 35 м/с).

Большая линейная скорость ударного нагружения при тонком измельчении нужна для того, чтобы каждый удар по измельчаемым частицам был эффективным, т.е. создавал в нагружаемых частицах напряжения выше предела их прочности.

Критическая скорость ударного нагружения зависит от прочности измельчаемых частиц и их размера, причем при уменьшении линейного размера критическая скорость существенно возрастает. Критическая скорость – такая скорость ударного нагружения, при которой реализуется 50 %-ная вероятность разрушения частиц данного размера:

$$v_{кр} = 30 \left( \frac{\tau_{ср}}{\rho_{м}} + 1 \right) / d_{ч}^{0,5},$$

$\rho_{м}$  – плотность материала;  $\tau_{ср}$  – предел прочности частиц на срез;  $d_{ч}$  – диаметр частиц.

Имеется серия многоступенчатых мельниц Ивановского химико-технологического университета (ИГХТУ) ударно-отражательного действия, у которых по мере уменьшения линейных размеров измельчаемых частиц скорость ударного нагружения существенно возрастает. Многоступенчатые измельчители ударно-отражательного действия ИГХТУ работают следующим образом (рис. 2.1.27). Исходный материал с начальным размером менее 10...18 мм из бункера 1 подается в мельницу, ударно нагружается билами 6 двух или трех ступеней измельчителя, жестко закрепленными на дисках 5, и дополнительно ударяется об отбойники 7, отражается от них и снова ударно нагружается билами, постепенно перемещаясь вдоль оси ротора к штуцеру выгрузки 8, под действием небольшого потока воздуха, который нагнетается билами 6. Готовый продукт выгружается воздухом в патрубок 8, который находится на торцевой крышке мельницы на определенном расстоянии от отбойников 7. Наличие мощных центробежных сил не позволяет выводить из мельницы крупные частицы.

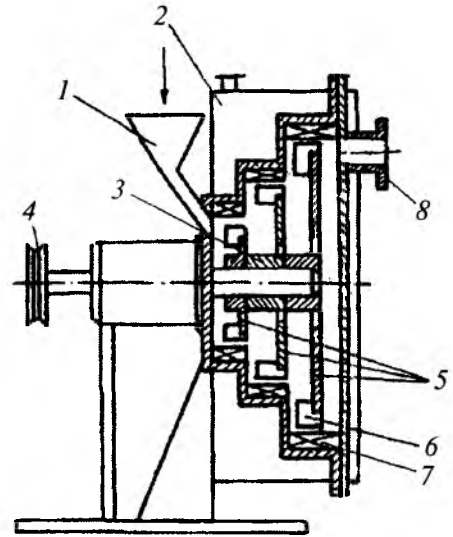


Рис. 2.1.27. Многоступенчатый измельчитель ударно-отражательного действия:

1 – загрузочный бункер; 2 – рубашка; 3 – ротор; 4 – приводной шкиф; 5 – диски ротора; 6 – била; 7 – отбойники; 8 – штуцер выгрузки материала

Линейная скорость ударного нагружения на последней ступени поддерживается выше критической для граничного размера частиц, что гарантирует практически 100 %-ную вероятность разрушения частиц размерами больше граничного.

Ротор мельницы приводится во вращение от двигателя через клиноременную передачу. Готовый продукт нагнетаемым воздухом направляется на разгрузку в циклон и фильтр. Даже без развитой внутренней сепарации в таких мельницах можно достичь высокой степени измельчения  $i = 50...150$  при малых удельных энергозатратах.

Лучшие показатели по степени измельчения имеют мельницы ударно-отражательного действия с внутренней сепарацией измельчаемого материала.

Хорошие показатели имеет аэробильная молотковая мельница МАБ-800 с встроенным сепаратором 6 (рис. 2.1.28). Измельчаемый материал тарельчатым питателем 1 подается в центр ротора 4 с дисками 2, измельчается при многократном ударном нагружении билами 3 и потоком воздуха направляется в сепаратор 6, откуда тонкодисперсный материал с воздухом через вентилятор поступает в пылеулавливающие устройства, а крупные фракции частиц по трубе 5 возвращаются в течку исходного материала.

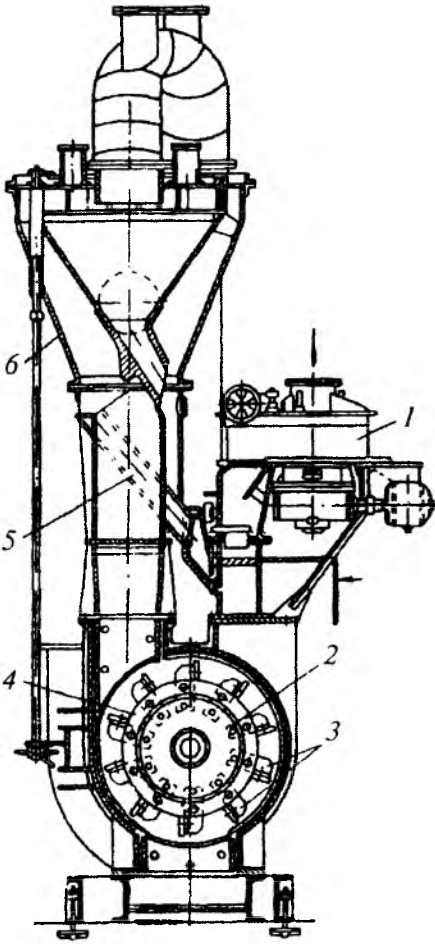


Рис. 2.1.28. Аэробильная молотковая мельница

Одним из самых простых измельчителей со встроенным в корпус машины сепаратором, достаточно широко используемых в химической промышленности России и за рубежом, является мельница ударно-отражательного действия (рис. 2.1.29).

Исходный материал через загрузочную воронку 3 и конус 6 поступает на вращающийся размольный диск 1, разгоняется на нем до больших скоростей, ударяется о бронеплиты корпуса, дополнительно нагружается имеющимися на диске ударными элементами и потоком воздуха направляется на лопасти 4 сепаратора. Крупные частицы отбрасываются в размольную камеру 2, а тонкодисперсные выводятся потоком воздуха через патрубок 5 в пылеотделительные устройства.

Типовой мельницей ударно-отражательного действия со встроенным внутри корпуса машины сепаратором является одна из мельниц, серийно выпускаемых в США и Германии, например, мельница «Пульвокрон» (рис. 3.1.30). Мельница работает следующим образом. Исходный материал 1 по трубопроводу поступает на вход в измельчитель, куда также по воздухопроводу поступает воздух 2. Измельченный билами материал вместе с потоком воздуха направляется на сепаратор 6, откуда крупные фракции по каналу 5 движутся на повторное измельчение, а тонкодисперсный продукт вместе с воздухом выводится по патрубку 4 в пылеотделительные устройства. Поскольку в мельницах такого типа выделяется большое количество теплоты, корпус имеет охлаждающую рубашку, в которую подводится и отводится охлаждающая жидкость 3.

Данные по измельчению различных материалов в мельнице «Пульвокрон» РС 38 приведены в табл. 2.1.15.

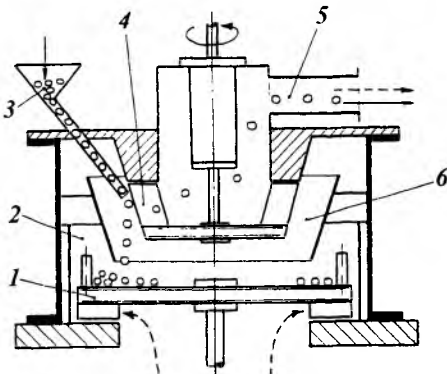


Рис. 2.1.29. Схема измельчителя ударно-отражательного действия со встроенным сепаратором:

----- воздух, ———— продукт

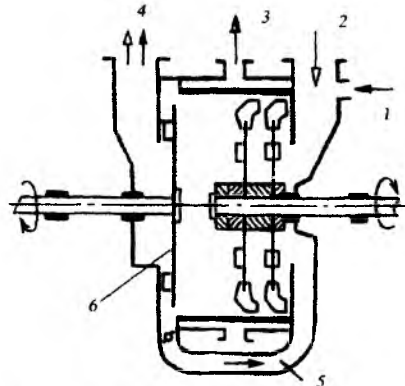
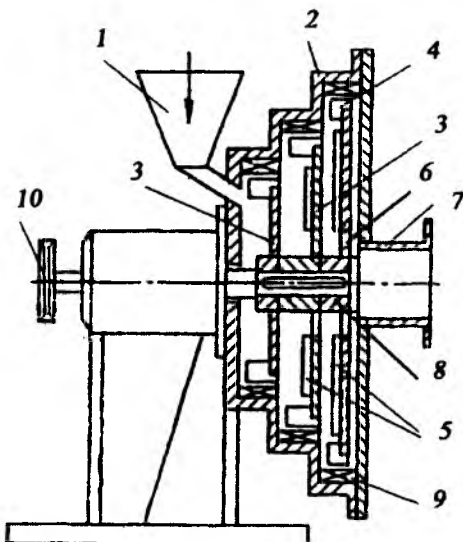


Рис. 2.1.30. Схема мельницы «Пульвокрон»

## 2.1.15. Данные по измельчению различных материалов в мельнице «Пульвокрон» РС 38

Измельчаемый материал	Размер ячейки сита, <sup>1</sup>	Тонина измельчения, мкм	Производительность, т/ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Перхлорат аммония	2	100 % < 35	2,5	46
		100 % < 10	1,3	85
Ацетамид	1	100 % < 20	1,0	110
Бакелит	1	98,5 % < 47	1,2	62
Костяной уголь	2	99,9 % < 10	0,6	185
		99,9 % < 30	1,6	70
Известняк	0,5	99,9 % < 50	4,9	41
Силикат кальция	99,5 % < 44	99,9 % < 20	2	58
Какао	0,3	99,5 % < 43	0,64	120
Декстроза	0,6	96 % < 89	1,5	31
		98 % < 61	0,75	103
Графит	0,9	100 % < 5	0,2	58
Лактоза	0,5	97 % < 50	1,5	51
Параформальдегид	2	99,7 % < 43	1,6	47
Пентахлороформ	0,3	100 % < 147	1,5	31
Твердый каучук	0,4	99,9 % < 147	1,2	92
Фосфат натрия	1	85 % < 61	2,9	39
Хлопья соевых бобов	4	97 % < 74	2,4	46
Стерол	1	100 % < 5	0,9	130
Сахар	0,3	90 % < 147	6,8	9
		97,5 % < 43	2,5	46
		100 % < 25	1	115
		100 % < 5	0,25	455
Тальк	0,7	100% < 10	2,2	51

<sup>1</sup> Проходит 50 % исходного продукта.



← Рис. 2.1.31. Схема многоступенчатой мельницы ИГХТУ с внутренней сепарацией:

1 - бункер; 2 - корпус мельницы; 3 - диски ротора; 4 - била; 5 - лопасти вентилятора; 6 - отверстия; 7 - патрубок вывода тонкоизмельченного продукта; 8 - вал мельницы; 9 - отбойники; 10 - приводной шкив

Как видно из таблицы, удельный расход энергии и производительность даже для одной мельницы очень сильно зависят от свойств измельчаемых материалов и тонины измельчения.

Еще более высокие технико-экономические показатели имеют многоступенчатые мельницы ударно-отражательного действия ИГХТУ с развитой внутренней сепарацией измельчаемых частиц. В таких машинах выгрузочный патрубок 7 готового продукта смещен либо в центр крышки (как показано на рис. 2.1.31), либо к центру от отбойников на опре-

деленное расстояние. Измельченные тонкодисперсные частицы потоком воздуха, создаваемого лопастями 5 вентилятора через отверстия 6 выводятся в патрубок 7. Крупные частицы под действием центробежных сил отбрасываются билами 4 на отбойники 9 и продолжают измельчаться.

В табл. 2.1.16 приведены некоторые технико-экономические показатели мельницы ИГХТУ, которые свидетельствуют о возможности получения сверхтонких порошков и в мельницах ударно-отражательного действия. Как и в других мельницах тонкого помола с увеличением тонины измельчения производительность машины снижается, а удельный расход энергии возрастает. Следует отметить, что в настоящее время не существует надежных методов расчета производительности, гранулометрического состава продуктов и потребляемой мощности мельниц ударно-отражательного действия. Имеются лишь эмпирические зависимости для некоторых конкретных мельниц.

*Струйные мельницы* в виде противоточных наиболее ранних конструкций нашли широкое применение в производстве керамики, огнеупоров, а также строительных материалов. Такие мельницы имеют два эжектора 1 и 7, направленные друг против друга, камеру измельчения 4, футерованную износостойкой броней, сплошные 5 или кольцевые 3 разгонные трубы, сопла 2 и 6 с устройствами для перемещения их вдоль оси, бункера-приемники 9 исходного материала со смотровыми окнами 10 (рис. 2.1.32, а).

Установка с использованием противоточной мельницы СП работает следующим образом (рис. 2.1.32, б). Исходный материал из бункера 15 питателем 14 по трубе 13 подается в вертикальную трубу 21, в которой восходящим потоком материал направляется в центробежный сепаратор 19 с окнами 20. Тонкодисперсные фракции, как готовый продукт, направляются в циклон 18, а крупные частицы по трубам 12 и 22 – в приемники 9, откуда вследствие разрежения, создаваемого эжекторами 1 и 7, частицы попадают в разгонные трубы 3 и 5. В разгонных трубах частицы разгоняются энергоносителем до скорости выше 100 м/с, движутся навстречу друг другу и сталкиваются в камере 4 измельчения. Продукты измельчения поднимаются воздухом по трубе 21 в сепаратор, в котором крупные неизмельченные частицы снова направляются на измельчение. Воздух под давлением 0,6...0,8 МПа поступает в мельницу через штуцера 8 и 23.

Как и в любой струйной мельнице, тонкодисперсные фракции (менее 5 мкм) измельченного материала после прохождения циклона отделяются от воздуха в фильтре 17. Очищенный от пылевидных продуктов воздух выбрасывается хвостовым вентилятором 16 в атмосферу. Удельный расход воздуха зависит от физико-механических свойств измельчаемых материалов и необходимой дисперсности конечного продукта и изменяется в широких пределах (0,1...9 кг/кг).

Производительность работающих в России струйных мельниц типа СП составляет 50...30000 кг/ч. Дисперсность готового продукта 0,5...50 мкм.

**2.1.16. Техническая характеристика мельницы ИГХТУ при работе с различными исходными материалами**

Измельчаемый материал	Размеры исходного материала, мм, не более	Тонина измельчения, мкм (размер готового продукта)	Производительность, кг/ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Мел	8	100 % < 10	500	55
Известняк	5	100 % < 10	600	60
Мрамор	3	100 % < 8	600	68
Гранит	1	100 % < 5	400	55
Кокс	2	95 % < 15	700	47
Сахар	3	100 % < 8	800	85
Тальк	0,5	100 % < 2	300	98



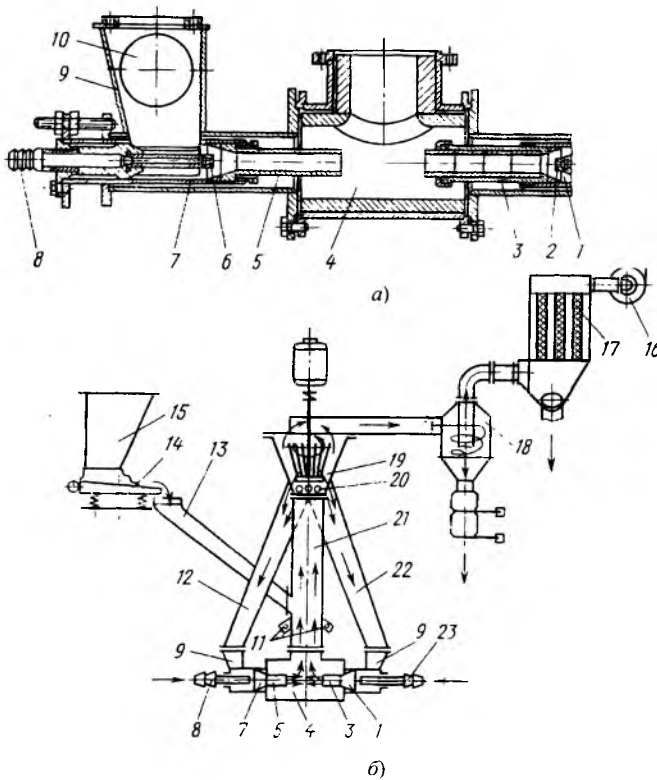


Рис. 2.1.32. Противоточная струйная мельница типа СП (а) и схема помольной установки (б) с этой мельницей

К недостаткам противоточных струйных мельниц по сравнению со струйными мельницами других конструкций необходимо отнести однократное соударение частиц друг с другом и то, что крупность конечного продукта определяется эффективностью работы центробежного сепаратора, который, как показывает практика, не идеален, в связи с чем наблюдается проскок крупных частиц в готовый материал.

Более тонкое измельчение возможно получить в О-образной струйной мельнице, в которой измельчаемые частицы испытывают многократное ударное нагружение как в камере измельчения, так и в зоне восходящего потока в результате турбулентных пульсаций двухфазного потока.

О-образная струйная мельница, или мельница с трубчатой измельчительной камерой работает следующим образом (рис. 2.1.33). Исходный материал (как правило, с частицами размером менее 1 мм) из бункера 8 эжекционным питателем 9 направляется в измельчи-

тельную камеру 10, в нижнюю часть которой через сопла 2 подаются высокоскоростные струи энергоносителя (скорость струй энергоносителя 220...320 м/с). Сопла 2 расположены таким образом, чтобы происходило пересечение струй в объеме измельчительной камеры. Частицы исходного материала, попадая в струи, выходящие из сопел, разгоняются до высоких скоростей и сталкиваются друг с другом. Перемещаясь вдоль измельчительной камеры, частицы испытывают многократное ударное нагружение.

Дополнительное измельчение осуществляется на восходящем участке 3 мельницы за счет мощных турбулентных пульсаций в двухфазном потоке. В верхнем колене 5 мельницы происходит сепарация частиц твердой фазы. Крупные неизмельченные частицы отбрасываются к стенке и по правому вертикальному колену возвращаются в зону измельчения, а мелкие частицы с потоком энергоносителя через инерционный сепаратор 6 выводятся из мельницы через патрубок 7 и трубу 4.

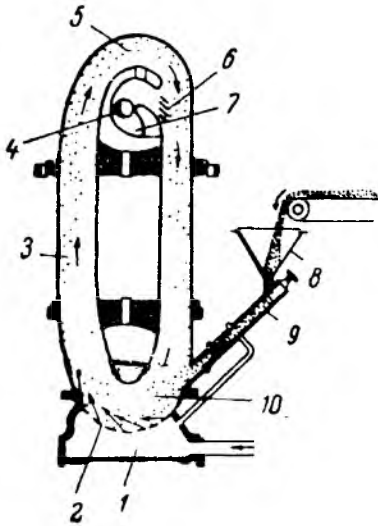


Рис. 2.1.33. Схема О-образной струйной мельницы (с трубчатой измельчительной камерой)

Энергоноситель подается в коллектор 1 или распределительную камеру и в штуцер инжекционного питателя. Благодаря многократному ударному нагружению измельчаемых частиц в камере 10 и в восходящем потоке 3 в струйных мельницах с трубчатой измельчительной камерой удается осуществлять тонкое и сверхтонкое измельчение разных материалов. Струйный измельчитель с плоской размольной камерой отличается от струйной мельницы с трубчатой камерой тем, что у нее сопла 2 расположены равномерно по окружности круглой измельчительной камеры 1 (рис. 2.1.34).

Угол наклона высокоскоростных струй энергоносителя выбран таким, чтобы струи четных и нечетных сопел сталкивались на периферии измельчительной камеры и создавали закрученный поток, в котором происходит сепарация измельчаемых частиц. При такой сепарации крупные частицы отбрасываются к наружным стенкам измельчительной камеры, а тонкодисперсные увлекаются потоками струй энергоносителя и выводятся по патрубку 7. Средние фракции материала выводятся в сборник 8.

В середине 70-х годов XX века в ИГХТУ была разработана струйная мельница, в которой энергия разгоняющихся и сталкивающихся в струях частиц гасилась во взвешенном слое этих же частиц за счет интенсивного их истирания. Серийно подобные мельницы начали выпускаться позднее фирмой Альпине (Германия).

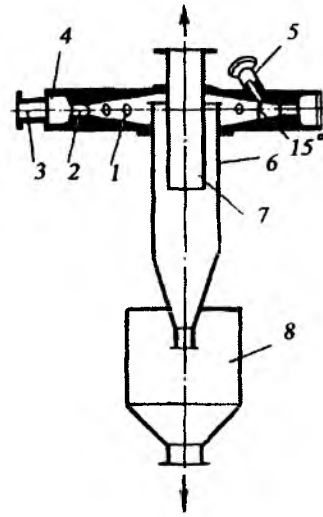


Рис. 2.1.34. Схема струйного измельчителя с плоской размольной камерой:

1 – камера измельчения; 2 – сопла; 3 – штуцер подачи энергоносителя; 4 – газораспределительное кольцо; 5 – штуцер питания; 6 – корпус сепаратора; 7 – труба для вывода тонкой фракции; 8 – сборник крупной фракции

Исходный материал по патрубку 1 поступает в исходный бункер 2, откуда непрерывно шнеком 3 направляется в камеру 4 измельчения, в которой расположены сопла 5 для подачи энергоносителя (рис. 2.1.35). Материал измельчается как во встречных струях в зоне 6, так и в турбулентных потоках над соплами 9. Вверху камеры 4 установлены центробежные сепараторы 7, которые отбрасывают вниз камеры крупные фракции частиц. Измельченный продукт выводится энергоносителем по патрубку 8.

К достоинствам таких струйных мельниц с псевдооживленным слоем измельчаемых частиц необходимо отнести практически полное отсутствие загрязнения измельчаемого материала, так как футеровка у них практически не изнашивается, и меньший удельный расход энергии, а следовательно, энергоносителя, что, в свою очередь, уменьшает габаритные размеры пылеулавливающих устройств.

Техническая характеристика струйных мельниц шести типов AFG представлена в табл. 2.1.17.

Производительность мельницы AFG-400 существенно зависит от типа измельчаемого материала и тонины измельчения (табл. 2.1.18).

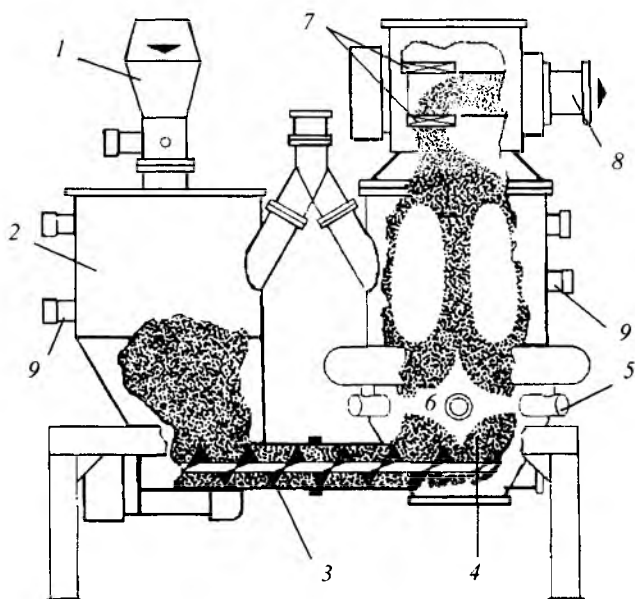


Рис. 2.1.35. Схема струйной мельницы 800 AFG

## 2.1.17. Техническая характеристика струйных мельниц типа AFG

Показатель	100	200	400	630	800	1250
Тонина измельчения, мкм, 97 %, не более	2,5...40	4...50	5,5...80	7...90	7...90	7...90
Расход воздуха при давлении 0,6 МПа, $\text{м}^3/\text{ч}$	50	200	800	2000	5200	10500
Диаметр сопел, мм	2	4	8	11	16	22
Число сопел	3	3	3	4	5	6
Производительность	0,06	0,25	1	2,5	6,25	12,5
Объем рабочего бункера, $\text{дм}^3$	0,85	30	90	340	1250	3400
Объем запасного бункера, $\text{дм}^3$	—	15	55	230	1100	3000
Классификатор «Турбоплекс»:						
тип	50 АТР	100 АТР	200 АТР	315 АТР	3 × 315 АТР	6 × 315 АТР
мощность, кВт	1	3 (4)	5,5	11 (15)	3 × 11 (15)	6 × 11 (15)
частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	22000	11500	6000	4000	4000	4000
Фильтр фирмы Альпине		K6	M12	G20	G48	G104
Циклон фирмы Альпине	GAZ 180	MAE 224	KAZ 315	KAZ 500	KAZ 800	KAZ 1120

Примечание. Производительность дана по отношению к производительности мельницы AFG-400.

**2.1.18. Характеристика струйной мельницы AFG-400 в зависимости от тонины измельчения**

Материал	Производительность, кг/ч	Тонина готового продукта, мкм
Тонер	25...150	5...25
Оксид цинка	30...40	4
Карбид кремния	60...80	10
Карбид кальция	150...200	10
Фунгицид	700	10
Тальк	300...400	20
	100...150	10
Кремниевая кислота	150...200	5

Надежные методы расчета производительности и тонины измельчения в струйных мельницах в настоящее время отсутствуют.

Мокрое измельчение имеет свои достоинства и недостатки перед сухим измельчением. Основные достоинства мокрого тонкого измельчения следующие:

отсутствие пыления;

меньшее загрязнение измельчаемых материалов продуктами намола;

возможность более тонкого измельчения в связи с устранением или резким уменьшением процессов агрегирования тонкодисперсных частиц в процессе измельчения с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ), приводящих к хорошему смачиванию поверхностей измельчаемых частиц и возникновению эффектов расклинивания микро- и макротрещин (эффектов акад. П.А. Ребиндера);

возможность измельчения термолабильных (термочувствительных) материалов.

Основным недостатком процесса мокрого измельчения является необходимость сушки продуктов измельчения в тех случаях, когда необходимо получать сухие тонкодисперсные порошки. Сушка является очень энергоемким процессом, требующим после ее осуществления реализации процесса дезагрегирования в одной из мельниц ударно-отражательного действия.

Недостатком процесса мокрого измельчения может явиться дезактивация поверхностей измельченного материала вследствие сорбции ПАВ или других компонентов жидкостей, в которых осуществляется измельчение. Необходимо отметить, что это явление часто используют в положительных целях для получения новых композиционных тонкодисперсных материалов, «пришивая» на поверхности

частиц в процессе измельчения нужный компонент, так как образующаяся новая поверхность частиц обладает сверхактивными свойствами.

Выделение измельчителей мокрого помола в отдельную группу объясняется следующими фактами. В шаровых, вибрационных и центробежно-планетарных мельницах мокрое измельчение, как правило, осуществляется при больших концентрациях твердой фазы в пастообразном состоянии.

В рассматриваемых ниже измельчителях-диспергаторах концентрация твердой фазы не превышает 20...25 %, поэтому измельчение осуществляется в хорошо текучих суспензиях. По принципу создания разрушающих напряжений измельчители в суспензиях можно условно разделить на три группы: бисерные мельницы, коллоидно-кавитационные мельницы и электрогидравлические и магнитновихревые измельчители.

В бисерных мельницах непрерывного действия (песочных) в цилиндрическом корпусе с большой частотой (500...1500 мин<sup>-1</sup>) вращается один или два вала с многочисленными дисками. Корпус мельницы на 50...60 % заполнен бисером из специальных сортов стекла или песком с округлыми гранями размерами 0,6...2 мм. Измельчение осуществляется истиранием (перетиром) частиц измельчаемого материала стеклянными шариками или частицами песка, которые под действием центробежных сил и вязкого трения отбрасываются к стенкам аппарата и интенсивно циркулируют в зонах между дисками.

Двухроторный бисерный измельчитель имеет два рабочих ротора / с дисками, привод 5, станину 6 и патрубки ввода 7 и вывода 4 суспензии (рис. 2.1.36). Бисерная мельница, как

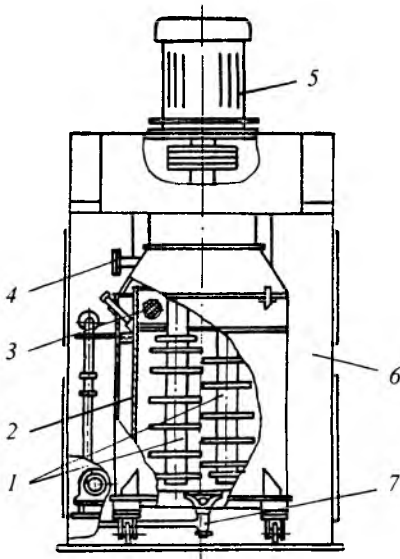


Рис. 2.1.36. Схема двухроторного бисерного измельчителя

и большинство мельниц мокрого помола, работает по многоцикловому режиму измельчения частиц в суспензии, которая прокачивается насосом через измельчитель снизу вверх. Для исключения вывода стеклянных шариков из объема мельницы вверху корпуса 2 мельницы установлена фильтрующая сетка 3.

Благодаря многоцикловому нагружению суспензии в бисерной мельнице удастся осуществить сверхтонкое измельчение многих пигментов и красителей. В ряде случаев достигается дисперсность частиц продуктов с размерами меньше 1 мкм (95...98 %) при сравнительно высокой производительности машин.

В России ОАО «Дмитровградхиммаш» серийно изготавливает четыре типоразмера вертикальных бисерных измельчителей типа Б1 с объемом размольной камеры 5...250 л, снабженных шестеренными насосами для подачи суспензии. Высокими технико-экономическими показателями отличаются разработанные на Украине вертикальные двухроторные бисерные измельчители с размольной камерой объемом 50 и 125 л. В отличие от рассмотренной выше конструкции, вращение роторам передается не от одного, а от двух электродвигателей через клиноременные передачи.

Известно, что производительность этих двухроторных измельчителей при тонком помоле (98 % частиц размером не менее 3 мкм) в 1,5 – 2,5 раза выше, чем у однороторных измельчителей такого же объема.

Фирма Драйсверке GmbH (Германия) расширила типоразмерный ряд бисерных измельчителей, включающий машины с размольной камерой объемом 1; 5; 12,5; 25; 40; 50; 80; 125; 160; 250; 500 и 1000 л. Эти измельчители могут иметь вертикальное или горизонтальное исполнение. При горизонтальном расположении корпуса существенно снижается пусковой момент благодаря равномерному распределению загрузки мелющих тел по длине размольной камеры. В качестве мелющих тел используется силикварцит (тугоплавкое стекло), керамический бисер размером 0,3...3 мм или хроманит (стальные шарики диаметром 2...8 мм).

Фирма Вилли А. Бахофен (Швейцария) первая в Европе серийно начала выпускать горизонтальные бисерные мельницы с размольной камерой объемом 0,15; 0,3; 0,6; 1,4; 5; 49; 115; 180; 215 и 275 л. Горизонтальное расположение корпуса мельницы позволило увеличить степень заполнения размольной камеры мелющими телами до 80...85 %, что, в свою очередь, повысило тонину измельчения при однократном прохождении суспензии через мельницу.

Традиционный недостаток бисерных измельчителей – относительно низкий удельный подвод энергии к обрабатываемой среде, который в значительной мере устранен в измельчителях марки «Cobal-Mill», выпускаемых фирмой Фрум-Машинен (Швейцария). В этих машинах поверхность ротора максимально приближена к корпусу с образованием размольной камеры в виде узкой щели между гладкими (без дисков) коническими поверхностями вращающегося ротора и корпуса.

Плотность подводимой энергии в них достигает 6...8 кВт/дм<sup>3</sup> (по сравнению с 1...2 кВт/дм<sup>3</sup> для традиционных машин с дисковыми роторами). При одинаковых производительностях и тонине измельчения рабочий объем измельчителя «Cobal-Mill» в 3 – 5 раз меньше рабочего объема традиционной мельницы. Соответственно снижаются количество мелющих тел, расход энергии, капиталовложения и стоимость обслуживания. При этом повышается качество продукта в результате снижения продуктов намола мелющих тел. Фирма выпускает шесть моделей таких бисерных измельчителей производительностью 0,01...4 м<sup>3</sup>/ч (по суспензии).

Дисковые, коллоидно-кавитационные и роторно-пульсационные мельницы, или диспергаторы в отличие от бисерных мельниц не имеют мелющих тел и осуществляют тонкое измельчение твердых частиц созданием больших сдвиговых напряжений в узком зазоре между вращающимся ротором и статором, а также наложением на действующие сдвиговые напряжения мощных импульсных напряжений при схлопывании на измельчаемых частицах искусственно создаваемых кавитационных пузырьков.

Зазоры между ротором и статором в таких машинах стремятся выполнять как можно меньше (0,05...1 мм), что позволяет получать в суспензии высокие касательные напряжения сдвига.

Типичной коллоидно-кавитационной мельницей является серийно выпускаемая в России кавитационно-стирающая мельница типа МКИ-160 производительностью по суспензии до 2 м<sup>3</sup>/ч, с наибольшим диаметром конического ротора 160 мм, позволяющая измельчать частицы красителей от 150 (исходный размер) до 20 мкм за один проход через машину. Частота вращения ротора 6350 мин<sup>-1</sup>, масса мельницы с приводом 400 кг.

Принципиальным отличием усовершенствованной мельницы МКИ-160 является наличие на роторе 4 и статоре 5 большого коли-

чества канавок 7 разных размеров и направленной относительно оси вращения (рис. 2.1.37). Мельница также имеет ударный элемент 1 для дезагрегации частиц в суспензиях. Все это позволило существенно увеличить число кавитационных воздействий на измельчаемые частицы и повысить тонину измельчения при одном проходе суспензии через мельницу.

В последние годы стали развиваться роторно-пульсационные аппараты [19], в которых диспергирование мягких материалов в суспензии осуществляется в основном за счет схлопывания и пульсации кавитационных пузырьков.

Иногда диспергирующий узел машины помещают в нижней части аппарата большого объема, благодаря чему происходит интенсивная циркуляция суспензии через измельчающий узел (рис. 2.1.38).

Специальными конструкциями измельчителей мокрого помола являются магнитновихревые и электрогидравлические измельчители твердой фазы в суспензии. В первой группе машин измельчение осуществляется мелющими телами в вихревом слое, создаваемом либо магнитными частицами в электромагнитном поле, либо стальными цилиндриками во вращающемся электромагнитном поле. Подобные измельчители нашли применение в России в процессе приготовления суспензии Ca(OH)<sub>2</sub> для очистки вод от ионов тяжелых металлов.

Электрогидравлическое измельчение находится на стадии лабораторных исследований.

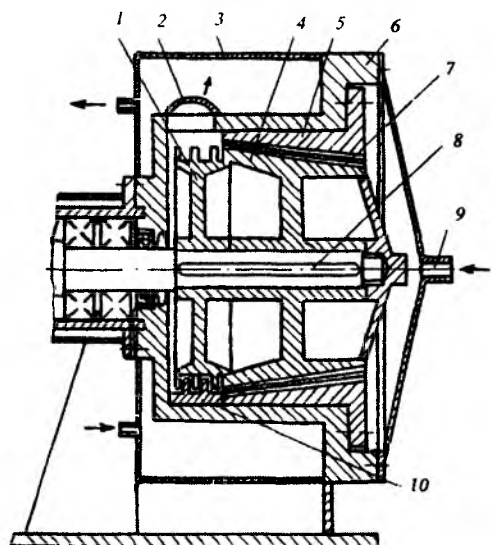


Рис. 2.1.37. Схема

коллоидно-кавитационной мельницы:

- 1 – ударное устройство; 2 – выход суспензии;
- 3 – рубашка охлаждения; 4 – ротор; 5 – статор;
- 6 – корпус; 7 – канавки; 8 – вал; 9 – вход суспензии;
- 10 – контрударники

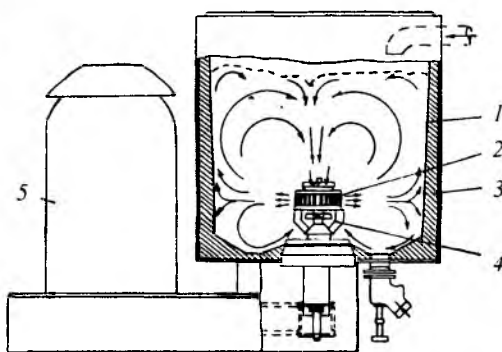


Рис. 2.1.38. Схема измельчителя мокрого помола в аппарате большого объема:

- 1 – корпус; 2 – статор; 3 – рубашка; 4 – нижний лопастно-винтовой насос; 5 – электродвигатель

## Глава 2.2

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ И ДОЗИРОВАНИЯ  
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ2.2.1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

*Под сыпучим материалом* (или сыпучим телом) подразумевают дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. Пространство между частицами в сыпучем материале заполнено газом, а иногда частично и жидкостью.

В зависимости от размера частиц, например от эквивалентного диаметра  $d_n$ , сыпучий материал может быть в следующих состояниях: пылевидном ( $d_n < 0,05$  мм); порошкообразном ( $0,05$  мм  $< d_n < 0,5$  мм); мелкозернистым ( $0,5$  мм  $< d_n < 2$  мм); крупнозернистым ( $2$  мм  $< d_n < 10$  мм); кусковым ( $d_n > 10$  мм).

Сыпучие материалы либо добывают из карьеров, шахт, либо получают измельчением твердых веществ, выделением из суспензий, сжиганием газов, кристаллизацией. Обладая целым рядом свойств твердого материала, например, возможностью воспринимать внешние сжимающие нагрузки, деформироваться под их действием, по некоторым свойствам они аналогичны жидкости: сыпучий материал принимает форму заполняемого им сосуда, движется потоком. Вместе с тем, сыпучий материал по совокупности свойств значительно отличается и от твердых тел, и от жидкостей. К таким свойствам относятся прежде всего гранулометрический состав, влажность, гигроскопичность, насыпная плотность, температуры размягчения, плавления и воспламенения, коррозионная стойкость, взрывоопасность и пожароопасность, а также ряд механических свойств.

**Гранулометрический состав.** Большинство сыпучих материалов – полидисперсные системы. Для их оценки используются различные характеристики: наибольший  $d_{max}$  и наименьший  $d_{min}$  диаметры частиц, отношение  $R = d_{max} / d_{min}$  (размах варьирования), эквивалентный диаметр частиц  $d_n$ , гранулометрический состав, выражаемый тем или иным способом, удельная площадь поверхности частиц  $S$ .

Частицы сыпучего материала имеют неправильную форму, поэтому под их размером

понимают диаметр шара, эквивалентного по объему:

$$d_{nV} = \sqrt[3]{6V/\pi},$$

или по удельной площади поверхности

$$d_{nS} = 6/S,$$

где  $V$  — объем частицы;  $S = S_{пол}/V$  — удельная площадь поверхности;  $S_{пол}$  — полная площадь поверхности частицы.

Величину  $S$  определяют специальным прибором, принцип действия которого основан на измерении сопротивления слоя определенной порции сыпучего материала потоку прокачиваемого через него газа [20]. Она характеризует свойства сыпучего материала в случаях, когда они зависят от площади поверхности его частиц, например, теплопроводность, звукопроницаемость, растворимость, химическая активность.

Значения  $S$  изменяются в большом диапазоне в зависимости от степени дисперсности частиц.

**Гранулометрический или дисперсный состав сыпучего материала** показывает, какую долю или процент массы, объема поверхности или числа частиц во всей массе анализируемой пробы составляют определенные частицы или группы частиц. Для экспериментального определения этой характеристики используют тот или иной метод дисперсионного анализа: ситовой, седиментационный, гидроаэродинамический, микроскопический, электростатический, фотоэлектрический, кондуктометрический и др., представляя полученные данные в виде таблиц, гистограмм или формул (функций распределения).

В полидисперсном сыпучем материале значения  $d_i$  изменяются от  $d_{min}$  до  $d_{max}$  практически непрерывно, что позволяет использовать для описания его гранулометрического состава распределительные функции  $D(d)$  и  $R(d)$ , равные отношению массы частиц, размер которых соответственно меньше и больше  $d$ , к общей их массе. При этом справедливо равенство

$$D(d) + R(d) = 1.$$

Среди различных законов, описывающих аналитически функции распределения частиц сыпучего материала по тому или иному при-

знаку, наиболее распространены законы Розина-Рамлера

$$R(x) = \exp\left[-(d/d_e)^n\right]$$

и нормально-логарифмический

$$\varphi(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp\left[-\frac{(\lg d_i - \lg \bar{d})^2}{2 \lg^2 \sigma}\right],$$

где  $d_e$  – диаметр частиц, при котором масса частиц крупнее  $d_e$  составляет 36,8 %, а меньше – 63,2 %;  $n$  – параметр, характеризующий однородность материала по размерам;  $\varphi(d)$  – частота значений  $d$ ;  $N$  – общее число наблюдений  $d$ ;  $\bar{d}$  – средний диаметр частиц в пробе;  $\sigma$  – среднее квадратическое (стандартное) отклонение значений  $d$  от  $\bar{d}$ .

Величины  $\bar{d}$  и  $\sigma$  рассчитывают по результатам дисперсного анализа пробы сыпучего материала:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^k (d_i G_i)}{\sum_{i=1}^k G_i};$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n [N_i (d_i - \bar{d})^2]},$$

где  $d_i$  и  $G_i$  – соответственно среднее значение диаметра и масса частиц  $i$ -го класса;  $k$  – число классов, на которое разбита шкала значений  $d$ ;  $N_i$  – число наблюдений  $d_i$ .

Степень неравномерности гранулометрического состава характеризуют коэффициентом вариации  $V(d) = 100\sigma/\bar{d}$ , %.

### Основные физические характеристики.

**Плотностью  $\rho$  сыпучего материала** называют массу единицы объема вещества, из которого состоят частицы. Многокомпонентные сыпучие материалы имеют несколько значений  $\rho$ .

**Насыпной плотностью  $\rho_H$  сыпучего материала** называют массу единицы объема, занимаемого сыпучим материалом при свободном засыпании его в измерительный стакан. Значения  $\rho_H$  для одного и того же сыпучего материала изменяются в широком диапазоне в зависимости от гранулометрического состава,

формы частиц, способа укладки их в слое, значений влажности и уплотняющей нагрузки.

Величины  $\rho$  и  $\rho_H$  связаны уравнением

$$\rho_H = \rho(1 - \varepsilon),$$

где  $\varepsilon$  – порозность сыпучего материала, равная отношению объема свободного пространства между частицами к полному объему, занятому сыпучим материалом, и при прочих равных условиях зависящая от способа укладки частиц в слое и внешних воздействий. Для одного и того же сыпучего материала  $\varepsilon$  изменяется в 1,1 – 3 раза.

**Влажность  $W$  (%) и влагосодержание  $U$  (%) сыпучего материала** определяют по формулам:

$$W = \frac{m_B - m_C}{m_B} 100; \quad U = \frac{m_B - m_C}{m_C} 100,$$

где  $m_B$  и  $m_C$  – масса соответственно влажного и абсолютно сухого сыпучего материала, содержащего только химически связанную жидкость.

**Гигроскопичность  $U_n$  (%)** оценивает способность сыпучего материала увлажняться за счет водяных паров окружающего его воздуха. Определяется по данным последвий выдерживания пробы сыпучего материала в течение 1...2 суток в эксикаторе, на дне которого находится раствор серной кислоты:

$$U_n = \frac{m_B - m_C}{m_C - m_B} 100.$$

где  $U_n$  – максимальная гигроскопичность;  $m_B$ ,  $m_C$ ,  $m_B$  – масса пробы сыпучего материала соответственно с бюксом, бюкса с высушенной пробой и отдельно бюкса.

Горючие сыпучие материалы при определенных условиях могут самовозгораться, а в смеси с воздухом – взрываться. Взрыв аэровзвеси происходит только тогда, когда концентрация горючих компонентов в ней находится в диапазоне между нижним и верхним пределами воспламенения. В России за основной критерий взрывоопасности аэровзвеси принят нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ). Взрывоопасными принято считать пылевоздушные смеси, у которых НКПВ  $\leq 65$  г/м<sup>3</sup>. Смеси с НКПВ  $> 65$  г/м<sup>3</sup> считаются пожароопасными.



**Основные механические характеристики.** Между частицами сыпучего материала существуют силы взаимодействия различной природы [10] – аутогезионные силы. Они придают сыпучему материалу способность оказывать сопротивление сдвигающим, сжимающим и разрывным силам.

Механические свойства сыпучих материалов оценивают рядом параметров: углом естественного откоса  $\alpha$ , начальным сопротивлением сдвигу  $\tau_0$ , углом внутреннего трения  $\varphi$ , коэффициентами внутреннего трения  $f$ , внешнего трения  $f_{\text{вн}}$ , бокового давления  $\xi$ , текучести  $k_t$ , размываемости  $k_p$ , модулем деформации и др.

*Угол естественного откоса*  $\alpha$  называют угол наклона образующей конуса из сыпучего материала к горизонтальной подложке, на которую свободно вытекла из воронки определенная порция этого материала. Значения  $\alpha = 25 \dots 44^\circ$ .

Любая деформация сыпучего материала сопровождается сдвигом, т.е. скольжением частиц одного слоя по частицам другого слоя. В отличие от жидкостей сыпучие материалы в состоянии выдерживать определенные силы сдвига. Деформация в них не наступает до тех пор, пока не преодолено некоторое напряжение сдвига  $\tau_\alpha$  – предельное сопротивление сдвигу. Связь между  $\tau_\alpha$  и нормальным давлением  $\sigma_\alpha$  на плоскость скольжения слоев выражается обобщенным законом Кулона:

$$\tau_\alpha = \tau_0 + f\sigma_\alpha,$$

где  $f$  – среднестатистический коэффициент трения между отдельными частицами;  $\tau_0$  – начальное сопротивление сдвигу (удельное значение аутогезионных сил между частицами сыпучего материала).

Для идеально сыпучих материалов  $\tau_0 = 0$  при  $\sigma_\alpha = 0$ . Для большинства связных сыпучих материалов  $\tau_0 \neq 0$  при  $\sigma_\alpha = 0$ .

Значения  $\tau_0$  и  $f$  находят путем обработки графических зависимостей  $\tau_\alpha = \varphi(\sigma_\alpha)$ , построенных по данным испытаний порции сыпучего материала специальными сдвиговыми приборами [10]. Таким же способом определяют и угол внешнего трения  $\varphi_{\text{вн}}$ . При этом величина  $\tau_\alpha$  измеряется при сдвиге слоя сы-

пучего материала по плоской пластине из материала, по отношению к которому находится величина  $\varphi_{\text{вн}}$ . Для стальной пластины значения  $\varphi_{\text{вн}} = 10 \dots 40^\circ$ .

**Коэффициент внешнего трения**  $f_{\text{вн}} = \text{tg } \varphi_{\text{вн}}$ . Изменение структуры слоя под действием сжимающей нагрузки характеризуется коэффициентом уплотнения

$$k_y = \rho_{\text{н1}} / \rho_{\text{н2}},$$

где  $\rho_{\text{н1}}$ ,  $\rho_{\text{н2}}$  – насыпные плотности соответственно до прессования и после него (уплотнения).

Коэффициент текучести  $k_t$  характеризует способность сыпучего материала вытекать из отверстий. Он определяется по времени  $t$  истечения материала из калиброванной воронки. Для металлических порошков значения  $k_t$  берутся из ГОСТ 20899–98.

Для связных сыпучих материалов существует минимальный диаметр отверстия, при котором над ним образуется устойчивый свод из частиц сыпучего материала, препятствующий их истечению из отверстия. Значение этого диаметра [13]

$$D_c = 5,2 \tau_0 / \rho_{\text{н}} (1 - 0,78 \text{tg } \varphi).$$

**Слеживаемость** называют свойство сыпучего материала терять текучесть при длительном хранении в неподвижном состоянии с образованием конгломератов или даже единого монолита. Можно выделить две основные причины появления слеживаемости:

рост аутогезионных сил за счет увеличения площади контакта между частицами, появление капиллярных сил при повышении влажности сыпучего материала;

возникновение кристаллизационных мостиков между частицами в результате кристаллизации растворенных в воде веществ.

Для уменьшения слеживаемости рекомендуется:

не допускать увеличения влажности хранимого сыпучего материала, периодически подсушивая его, пропитывая водоотталкивающими жидкостями, используя герметическую тару;

уменьшать число частиц и площадь контакта между ними, гранулируя сыпучий материал, периодически перемешивая его, используя низкие слои;

создавать на частицах тонкие защитные пленки из веществ, не растворимых в воде.

Слеживаемость сыпучих материалов можно оценивать по нескольким методикам [11]. Наиболее точные результаты получаются при использовании методики, основанной на измерении сопротивления специально подготовленного спрессованного образца сыпучего материала раздавливанию. По напряжению раздавливания  $\sigma_p$  все сыпучие материалы классифицируют на пять категорий: неслеживаемые ( $\sigma_p < 0,1$  МПа); слегка слеживаемые ( $\sigma_p = 0,1 \dots 0,2$  МПа); слеживаемые ( $\sigma_p = 0,2 \dots 0,7$  МПа); сильно слеживаемые ( $\sigma_p = 0,7 \dots 1,5$  МПа); очень сильно слеживаемые ( $\sigma_p > 1,5$  МПа).

*Модуль деформации E сыпучего материала* рассчитывают по результатам компрессионных испытаний на специальном приборе по формуле

$$E = k \sigma_z / \Delta l,$$

где  $k$  – коэффициент (постоянный для данного прибора);  $\Delta l$  – относительная деформация образца;  $\sigma_z$  – нормальное давление в слое сыпучего материала.

*Коэффициент Пуассона  $\nu$*  приближенно определяют по коэффициенту  $\xi$  бокового давления:

$$\nu = \xi / (1 + \xi).$$

Коэффициент  $\xi$  при условии одноосного сжатия сыпучего материала без возможности бокового расширения равен отношению  $\sigma_x / \sigma_z$  (где  $\sigma_x$  – боковое давление в слое сыпучего материала). При относительно малых значениях  $\sigma_z = 0,2 \dots 4,2$  МПа для большинства порошкообразных материалов коэффициент  $\xi = 0,3 \dots 0,4$ .

Распределение давлений сыпучего материала на стенки емкости (бункера) рассчитывают по формуле Янсена [13]:

$$\sigma_x = \xi \sigma_z = (D \rho_i / 4 f_{вн}) [1 - \exp(-4 f_{вн} \xi h / D)],$$

где  $D$  – внутренний диаметр цилиндрической емкости;  $h$  – высота слоя сыпучего материала от плоскости выпускного отверстия до плоскости измерения  $\sigma_x$ ;  $f_{вн}$  – коэффициент трения

сыпучего материала об ограждающую поверхность.

При выпуске сыпучего материала из емкости боковое давление в нижней ее части возрастает примерно в 1,3 раза по сравнению с рассчитанным по формуле Янсена, что необходимо учитывать при расчетах ее корпуса.

Наиболее полный расчет размеров выпускной частоты дозировочных устройств может быть проведен по методу Дженике, суть которого состоит в теоретическом и экспериментальном определении напряжений свободного истечения  $\bar{\sigma}_1$  и предела прочности образца на поверхности свода  $\sigma_c$ . Равенство этих напряжений определяет критическое состояние сыпучей среды, т.е. состояние предельного равновесия. Это соотношение также называют критерием «истечения – отсутствия истечения», так как при  $\bar{\sigma}_1 > \sigma_c$  происходит устойчивое истечение, а при  $\bar{\sigma}_1 < \sigma_c$  истечение отсутствует. Такой метод особенно эффективен для связанных материалов, склонных к уплотнению в процессе хранения.

## 2.2.2. СМЕСИТЕЛИ

**Общие сведения о процессах смешивания.** Процессы смешивания сыпучих материалов используются во многих химических производствах, в том числе в таких крупнотоннажных, как производства сложных удобрений, моющих средств, красителей, инсектофунгицидов, пластмасс, химикатов, резинотехнических изделий и т.д. Основная цель процесса смешивания – получение однородной смеси из отдельных компонентов. Соотношение масс компонентов, входящих в смесь, изменяется в различных производствах в широком диапазоне (иногда в соотношении 1:10<sup>6</sup> и более).

Обратный процессу смешивания является процесс сегрегации, приводящий к разделению смеси на отдельные фракции или компоненты. Процессы смешивания и сегрегации могут протекать одновременно в одном аппарате, но с разными скоростями.

В результате перемещений частиц отдельных компонентов внутри смешиваемого объема возможно бесконечное разнообразие их сочетаний в микрообъемах смеси, что позволяет считать соотношение компонентов величиной случайной. Поэтому большая часть известных методов оценки однородности (каче-

ства) смеси основаны на методах статистического анализа [20]. Для упрощения расчетов многие исследователи процессов смешивания все смеси считают условно двухкомпонентными, состоящими из так называемого ключевого компонента и условного, включающего все остальные компоненты смеси. Это позволяет оценивать однородность смеси параметрами распределения одной случайной величины – содержанием ключевого компонента в пробах смеси. В качестве ключевого компонента выбирают такой компонент, который либо легко анализируется, либо его распределение в смеси особенно важно по техническим требованиям.

Для оценки однородности смеси предположено несколько десятков критериев [6, 20], отличающихся входящими в них параметрами. Однако в большинстве из них присутствует в той или иной интерпретации статистический результат пробоотбора смеси: размах значений концентраций компонентов, дисперсия значений концентраций ключевого компонента, вероятность отклонения значений концентрации от среднего значения, информационная энтропия, фрактальная размерность и т.д.

Наиболее часто для оценки однородности смеси используется коэффициент вариации, %,

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2},$$

где  $\bar{c}$  – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех  $n$  пробах смеси, %;  $c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -й пробе.

Коэффициент вариации  $V_c$  часто называют коэффициентом неоднородности, так как его увеличение связано с понижением однородности смеси. Смесь сыпучих материалов высокого качества оценивается значениями  $V_c = 0,5 \dots 2,5$  %; среднего качества  $V_c = 2,5 \dots 4$  %; низкого качества  $V_c > 4$  %. Однако подобное деление следует считать условным, так как качество смеси, ее необходимая однородность определяются техническими условиями на готовую смесь.

Необходимое количество проб, отбираемых случайным образом из смеси для анализа ее однородности, можно назначить, используя неравенство

$$n \geq t_{\alpha}^2 V_c^2 / \varepsilon^2,$$

где  $t_{\alpha}$  – нормированное отклонение функции Лапласа для заданной вероятности  $\alpha$  оценки однородности смеси;  $\varepsilon$  – относительная предельная погрешность определения действительной средней концентрации ключевого компонента  $c_0$  в смеси по выборочной средней  $\bar{c}$ , %.

Значение  $V_c$  перед исследованием нового типа смесителя обычно неизвестно, в этом случае его можно принять  $V_c = 20$  %. В ранее обследованных смесителях величина  $V_c$  должна быть известна.

Минимально допустимая масса пробы [12]  $m$ , г,

$$m \approx 1,26 \cdot 10^4 d_{\text{H}}^3 \rho_{\text{H}} / c_0.$$

где  $c_0$  – концентрация ключевого компонента во всей смеси, %.

**Классификация смесителей.** Процессы смешивания различных рабочих сред производят в машинах или аппаратах, называемых смесителями.

Ниже рассматриваются смесители только для сыпучих материалов и сыпучих материалов с небольшими добавками жидких компонентов. Следует отметить, что в различных отраслях промышленности используется свой отраслевой набор конструкций смесителей. Ниже рассматриваются конструкции смесителей, которые наиболее часто используются в химических и смежных с ней отраслях промышленности и изготавливаемые заводами химического машиностроения.

Смесители для сыпучих материалов классифицируют по многим признакам, чаще всего по конструктивному [6, 12].

Принципиальные различия в организационно-технической структуре процессов периодического и непрерывного смешивания сыпучих материалов заставляют рассматривать смесители периодического и непрерывного действия отдельно.

В каталогах на смесительное оборудование, используемое в России, принято следующее условное обозначение смесителей [30]. **Первые буквы – тип смесителя; цифры после тире – рабочий объем** (дм<sup>3</sup>) для смесителей периодического действия, **номинальный диаметр рабочего органа** (мм) для смесителей непрерывного действия; **последние буквы – исполнение смесителя** по виду электрообору-

дования, обогрева и материалу деталей, соприкасающихся с рабочей средой (*B* – взрывозащищенное; *H* – невзрывозащищенное; *P* – с рубашкой; *B* – без рубашки; *Э* – с электрическим обогревом; *K* – коррозионная сталь; *У* – углеродистая сталь; *T* – титановый сплав; цифры в конце обозначения – номер модели).

**Смесители периодического действия.** В химическом производстве используются в основном смесители периодического действия. Это объясняется тем, что, во-первых, при периодическом смешивании можно обеспечить точное соотношение между компонентами (их часто загружают в смеситель по массе), а, во-вторых, при большом числе компонентов их дозирование в смеситель непрерывного действия затруднено.

По механике переноса смешиваемой массы внутри смесителя их можно разделить на три группы: циркуляционные, объемного и диффузионного смешивания. Подобная классификация позволяет создать единые методики расчета кинетики процесса смешивания для смесителей конструктивно различных, но с одинаковым механизмом процесса перераспределения частиц в рабочем объеме смесителя.

В циркуляционных смесителях характерно движение (циркуляция) основного потока материала по замкнутому контуру различной сложности. Движение сыпучего материала по циркуляционному контуру обеспечивает либо перемешивающий орган, либо специальные конвейеры.

В смесителях объемного смешивания смешиваемый материал перемещается рабочим органом хаотически по всему рабочему объему смесителя.

В смесителях с диффузионным механизмом смешивания частицы отдельных компонентов под действием внешних сил начинают перераспределяться наподобие молекул при диффузии в газах. В этом случае необходимо создать разреженные слои смешиваемого материала путем вибрации или псевдооживления.

**Кинетику процесса смешивания в смесителях периодического действия** можно отразить типичной кривой, представленной на рис. 2.2.1. Эту кривую условно можно разделить на три участка (периода). В периоде *I* преобладает конвективное смешивание, приводящее к уменьшению объемов блоков из частиц отдельных компонентов и их разносу рабочими органами смесителя по внутреннему его объему. Этот период характеризуется резким снижением значений коэффициента  $V_c$ . После

разрушения блоков из одинаковых частиц процесс смешивания идет уже на уровне отдельных частиц компонентов. Этот период перераспределения частиц аналогичен процессу диффузии молекул газа, поэтому его называют периодом диффузионного смешивания. В периоде *III* суммарная скорость процессов конвективного и диффузионного смешивания становится равной скорости сегрегации частиц в силовом поле, поэтому коэффициент неоднородности  $V_c$  становится величиной постоянной. Время наступления этого момента является оптимальным временем смешивания  $t_{см}$  для данного типа смесителя, его режима работы и конкретной характеристики физико-механических свойств смеси.

Период *II* является переходным от периода *I* к *III*.

Предельно достижимое значение коэффициента  $V_c$  определяется экспериментально. Теоретически его рассчитать не удалось до настоящего времени.

Кинетику процесса периодического смешивания чаще всего описывают уравнением типа

$$V_c(t) = aV_{сн}e^{-bt}.$$

где  $V_c(t)$  – коэффициент неоднородности к моменту времени смешивания  $t$ , %;  $V_{сн} = 100\sqrt{p(1-p)}/p$  – коэффициент неоднородности смеси в начальный момент смешивания, %;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $t$  – время смешивания, с;  $p$  – доля ключевого компонента в смеси.

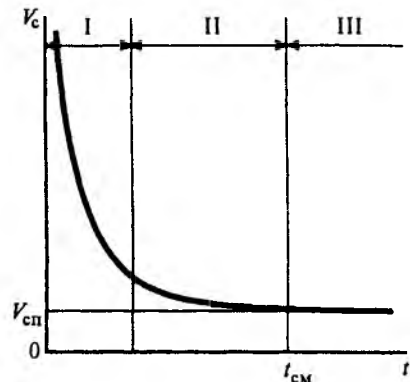


Рис. 2.2.1. Кривая кинетики процесса смешивания сыпучих материалов в смесителях периодического действия

Среди циркуляционных смесителей наибольшее распространение получили планетарно-шнековые, центробежные лопастные, центробежные волчковые, шнековые с центральной циркуляционной трубой.

Они используются для смешивания легкоподвижных несвязных и связно-сыпучих материалов, а также для смешивания сыпучих материалов с небольшим количеством жидкости.

Смеситель с планетарно-шнековой мешалкой типа ПШ-630 показан на рис. 2.2.2. Шнек 7, получающий вращение вокруг собственной оси от мотор-редуктора (привода) 3 через две конические зубчатые пары, находящиеся в коробках передач 5 и 6, совершает планетарное вращение вокруг оси корпуса смесителя. Вращение водила 10, обеспечивающего планетарное вращение шнеку 7, осуществляется от мотор-редуктора 2 через червячный редуктор и конические зубчатые пары. Верхний конец вала шнека 7 имеет опору в коробке передач 6, а нижний – в шарнирной опоре, закрепленной в нижней части корпуса 1.

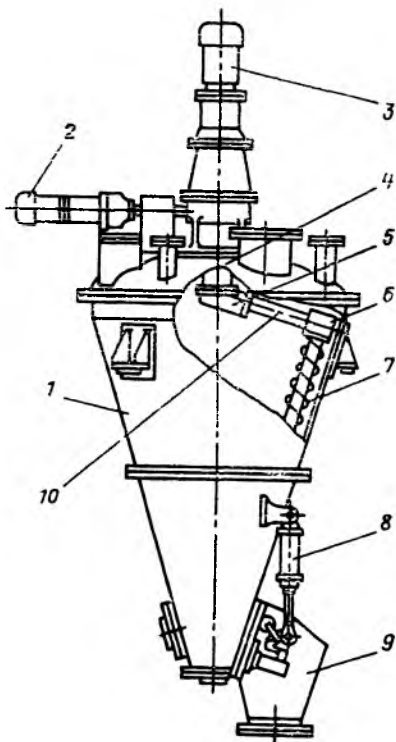


Рис. 2.2.2. Планетарно-шнековой смеситель типа ПШ-630

Шарнирная опора вала шнека является одним из ответственных узлов смесителя типа ПШ. Размещена она в сыпучем материале, поэтому ее конструкция должна обеспечить работу шнека без смазочного материала и предотвратить истирание частицами сыпучего материала шейки вала шнека [12]. Приводы шнека 7 и водила 10 смонтированы на крышке 4 корпуса смесителя. Крышка имеет ряд технологических штуцеров для загрузки компонентов смеси, подачи инертного газа, установки взрывной мембраны, для отбора проб, установки термометра и лаз для осмотра внутренней части корпуса. На коническом корпусе 1, состоящим из двух частей, соединяемых с помощью фланцев, имеется люк для осмотра шарнирной опоры и коробки 9 для выпуска готовой смеси. Отверстие, через которое готовая смесь выходит во внутреннюю часть коробки 9, прикрыто клапаном, имеющим шарнирную опору. Клапан приводится в движение от механизма 8, состоящего из пневмо- или гидроцилиндра и рычажной передачи.

Подлежащий смешиванию сыпучий материал загружается через верхний штуцер в крышке 4 в необходимом количестве. При вращении шнека 7 материал поднимается его витками вверх вдоль стенок корпуса, затем движется к оси корпуса, где образуется нисходящий его поток. В узкой части корпуса материал снова захватывается витками шнека и поднимается вверх. Движение сыпучего материала вверх в отдельных зонах около стенок корпуса прерывистое; оно происходит только в моменты прохождения шнека 7 через эти зоны.

Для увеличения скорости циркуляции материала в смесителях с большим объемом корпуса (ПШ-1600, ПШ-6300, ПШ-10000) смонтирован добавочный шнек, ось которого совпадает с осью корпуса. Его консольная часть с витками достигает примерно середины корпуса смесителя. Этот шнек увеличивает скорость опускания смешиваемого материала вниз. После завершения процесса смешивания клапан открывает отверстие в корпусе смесителя и готовая смесь высыпается в коробку 9, а затем в приемную емкость. Выпуск смеси из корпуса производится при вращающихся шнеках.

Экспериментально установлены наиболее рациональные геометрические и режимные параметры смесителей типа ПШ:

$$d_{\text{ш}} = 0,2 D_6; \quad t_{\text{ш}}/d_{\text{ш}} = 0,8; \quad \psi = 0,8;$$

$$\omega_{\text{ш}}/\omega_{\text{в}} = 40; \quad u = 1 \text{ м/с}; \quad \alpha = 34^\circ;$$

$$t_{\text{см}} \approx 20 \text{ мин},$$

где  $d_{\text{ш}}$  – диаметр витков шнека;  $D_6$  – наибольший внутренний диаметр корпуса;  $t_{\text{ш}}$  – шаг витков шнека;  $\psi$  – коэффициент заполнения корпуса смесью;  $\omega_{\text{ш}}$ ,  $\omega_{\text{в}}$  – угловая скорость соответственно шнека и вала;  $u$  – окружная скорость наружных витков шнека.

Мощность на валу планетарно вращающегося шнека, кВт,

$$N = 1,15 C_1 \rho_{\text{н}} n_{\text{ш}} L_{\text{р}}^2 F_{\text{уд}}^2 (4 \sin^2 \alpha + 1),$$

где  $C_1$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси (табл. 2.2.1);  $n_{\text{ш}}$  – частота вращения шнека вокруг собственной оси, мин<sup>-1</sup>;  $L_{\text{р}}$  – часть шнека, находя-

щегося в смеси, м;  $F_{\text{уд}} = (2F_1 + F_2)/t_{\text{ш}}$  – удельная площадь поверхности шнека, м<sup>2</sup>/м;  $F_1$  и  $F_2$  – площадь поверхности соответственно одной стороны витка шнека и вала на длине шнека в один шаг, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол конусности корпуса, °;  $t_{\text{ш}}$  – шаг шнека, м.

Предусмотрено несколько типоразмеров смесителей типа ПШ с различным объемом, м<sup>3</sup>: 0,04; 0,1; 0,25; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 3,2; 4,0; 6,3; 10,0; 16,0. Некоторые смесители типа ПШ из этого ряда выпускаются отечественными заводами химического машиностроения в нескольких исполнениях: НБУ, НБК, ВБУ, ВБК. Из конструкций смесителей с планетарно-шнековой мешалкой, выпускаемых за рубежом, наибольшее распространение получил смеситель типа «Наута» (Голландия), выпускаемый в трех модификациях: с нижним (модель  $M_a$ ), верхним (модель  $M_b$ ) и раздельным (модель  $M_{ax}$ ) приводом планетарного вращения шнека [1].

### 2.2.1. Значения коэффициентов $C_1$ , $C_2$ и $C_3$ для некоторых сыпучих материалов

Материал	Насыпная плотность $\rho_{\text{н}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Дисперсность частиц, мм	$C_1 \cdot 10^6$	$C_2 \cdot 10^4$	$C_3 \cdot 10^6$
Речной песок	1330	0,2...0,5	0,9	8,24	11,9
Поваренная соль	1070	1...2	1,27	39	–
	970	0,2...0,5	0,9	3,4	5,5
	1100	0,01...0,2	2,5	2,68	1,1
Кальцинированная сода	505	0,01...0,1	2,3	2,24	3,8
Железные опилки	2400	0,25...1	–	95,5	11,4
Гранулированный графит	1070	0,2...0,5	0,8	38	8,8
Каолин	272	0...0,07	0,94	3,3	2,65
Цемент	980	0,01...0,1	2,1	2,84	2,2
Полиэтилен:					
	порошкообразный	240	0...0,02	–	3,93
гранулированный	561	3...5	–	8,5	–
Поливинилхлорид	481	0...0,02	–	5,9	–

Центробежный лопастной смеситель типа ЦЛ относится к циркуляционным смесителям с быстровращающимся рабочим органом, переводящим смешиваемый материал в псевдооживленное состояние. В качестве рабочего органа в этих смесителях используются мешалки, выполненные в виде радиальных лопастей, пропеллеров или дисков. Конструкции некоторых из этих рабочих органов представлены на рис. 2.2.3.

Смесители типа ЦЛ предназначены для смешивания сыпучих материалов с  $\rho_n \leq 1300 \text{ кг/м}^3$ , а также сыпучих материалов с небольшими добавками жидких компонентов при условии, что смесь остается сыпучей. Время смешивания у них короткое (15...25 мин). Для большинства промышленных смесей в них достигается однородность  $V_c = 1,2...2,5 \%$ .

Смешивание компонентов в смесителях типа ЦЛ происходит при циркуляции псевдооживленной массы частиц вверх по стенкам и вниз по центру корпуса. В смесителях, имеющих верхнюю мешалку, циркуляция по указанному контуру увеличивается.

Отечественной промышленностью химического машиностроения выпускаются центробежные лопастные смесители типа ЦЛ, состоящие из следующих основных узлов (рис. 2.2.4): вертикального цилиндрического корпуса 1 с рубашкой и плоским отбортованным днищем; крышки 2; рабочего органа с

верхней 3 и нижней 4 лопастными мешалками; электродвигателя 5, вращающего вал мешалок через поликлиновый ремень 6; станины 7. В нижней части корпуса крепится разгрузочный патрубок 8 с клапаном, перекрывающим отверстие в корпусе и приводимый в действие от двух пневмоцилиндров с автоматизированным управлением. На крышке 2 сварены несколько технологических штуцеров (для загрузки компонентов, установки разрывной мембраны и резервных).

Экспериментально установлены следующие оптимальные геометрические и режимные параметры смесителей типа ЦЛ:

высота смесительной камеры  $H = (0,7...0,9) D$ , где  $D$  – диаметр смесительной камеры, определяемый с учетом полного внутреннего объема  $V_{\text{п}}$  смесителя,  $D = 1,15 \sqrt[3]{V_{\text{п}}}$ , и аппаратов стандартных диаметров, регламентированных ГОСТ 9931;

линейная скорость вращения нижней мешалки в зависимости от физико-механических свойств смешиваемого материала  $u_{\text{кр}} = 5...8 \text{ м/с}$ ;

диаметр верхней лопасти  $d_{\text{вц}} = (0,85...0,9) D$  для смесителей с цилиндрическим корпусом и  $d_{\text{вк}} = (0,5...0,6) D$  для смесителей с коническим корпусом; диаметр нижней лопасти  $d_{\text{н}} = (0,85...0,9) D$ ;

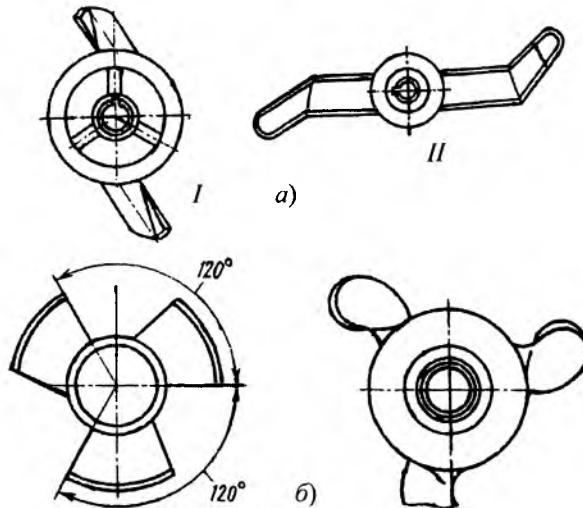


Рис. 2.2.3. Мешалки смесителя типа ЦЛ для сыпучих материалов:

а – для которых измельчение частиц недопустимо; б – для которых допустимо измельчение частиц; I – верхняя; II – нижняя

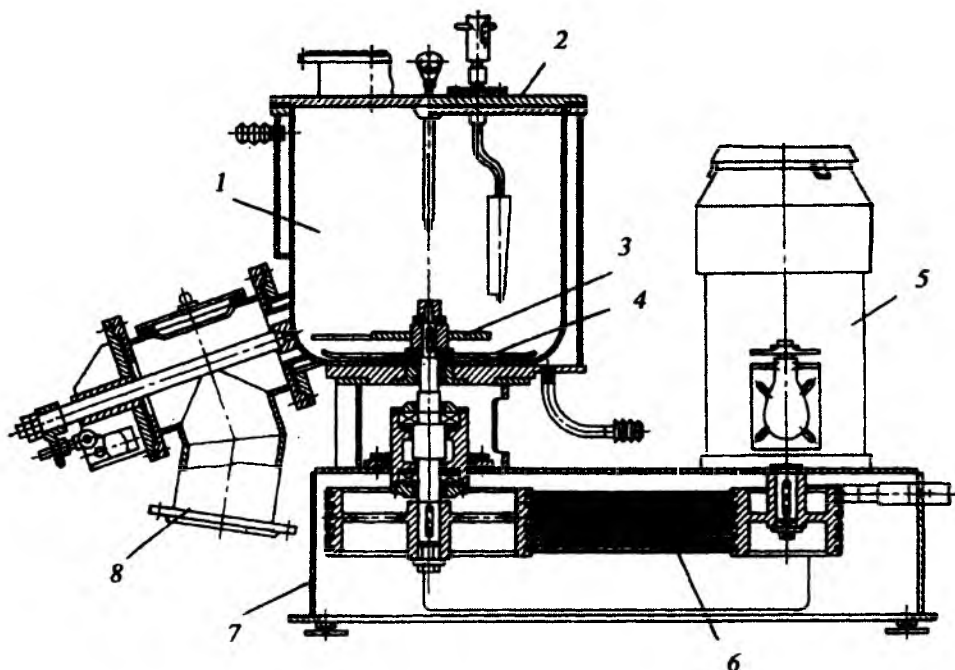


Рис. 2.2.4. Центробежный лопастной смеситель типа ЦЛ

расстояние между лопастями  $h_{л1} = 0,12D$  для смесителей с цилиндрическим корпусом и  $h_{лк} = 0,2D$  для смесителей с коническим корпусом;

высота лопастей  $b = (0,13...0,15)D$ ;

коэффициент заполнения корпуса сыпучим материалом  $\psi = 0,65$ .

Мощность, необходимая для перемешивания сыпучих материалов в смесителях типа ЦЛ с использованием мешалок, показанных на рис. 2.2.3, кВт,

$$N = C_2 K_{\phi} \rho_n (L\omega^2) H_c^{0,63} b^{0,6} S^{0,2} \sin \alpha,$$

где  $C_2$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смешиваемого материала (см. табл. 1.2.1);  $K_{\phi}$  – коэффициент формы лопастей мешалок; для прямых лопастей  $K_{\phi} = 1$ , для спиральных  $K_{\phi} = 1,06$ , а для серийно выпускаемых смесителей  $K_{\phi} = 0,72$ ;  $L$  и  $b$  – соответственно длина и высота лопастей мешалки, м;  $H_c$  – высота слоя материала над нижней лопастью, м;  $\alpha$  – угол наклона лопа-

стей мешалок к горизонтали, °;  $S$  – радиальный зазор между краем лопасти нижней мешалки и стенкой корпуса, м;  $\omega$  – частота вращения мешалок,  $c^{-1}$ .

К отечественным смесителям типа ЦЛ относятся: ЦЛ-6; ЦЛ-25; ЦЛ-100; ЦЛ-160; ЦЛ-250; ЦЛ-400; ЦЛ-630 (цифра соответствует рабочему объему смесителя в литрах). Из зарубежных центробежных лопастных смесителей наибольшее распространение получили смесители типа TS фирм Гюнтер-Папенмайер и Ангер и типа FM фирмы Хеншель (Германия) [1].

Для процессов приготовления смесей, требующих различия в температурных режимах во время их смешивания, используются комбинированный смеситель типа  $K_M$  [32]. Он состоит из двух центробежных лопастных смесителей: верхнего с обогревающей рубашкой (типа ЦЛ-10) и нижнего с охлаждающей рубашкой (типа ЦЛ-25). Смесью, нагретая в верхнем смесителе, охлаждается в нижнем. В нижней части корпусов этих смесителей расположены разгрузочные коробки с клапанами. Смесители, установленные на общей раме на разных уровнях, соединены между собой патрубком. Внутри рамы расположен маслянагреватель для обогрева верхнего смесителя. Каж-



дый смеситель имеет индивидуальный привод: нижний от электродвигателя и редуктора, верхний – от электродвигателя и вариатора с механизмом управления.

Исходная смесь загружается в верхний смеситель, смешивается там заданное время с нагревом, затем выгружается в нижний смеситель, домешивается и охлаждается. По завершении процесса смешивания готовая смесь выгружается из нижнего смесителя через разгрузочную коробку при открытом клапане.

Подобный смеситель типа  $K_M$  используется, например, для смешивания термопластичных порошкообразных пластмасс с добавлением жидких пластификаторов. Суммарная установочная мощность этого комбинированного смесителя составляет 10,1 кВт (с учетом привода смесителей и электронагревателя).

*Центробежный волчковый смеситель типа ЦВ* работает следующим образом (рис. 2.2.5). При вращении конуса 1 сыпучий материал, находящийся в корпусе 2 смесителя, начинает циркулировать по контуру: поднимается по внутренней поверхности вращающегося конуса, затем сбрасывается с него в кольцевое пространство между конусом и корпусом смесителя, опускается там вниз и через два окна 6 в нижней части конуса поступает внутрь конуса, замыкая циркуляционный контур.

Для материалов с плохой сыпучестью в корпусе устанавливают свободно вращающуюся раму 12 с двумя лопастями, расположенными в кольцевом зазоре между конусом и корпусом, и скребком, входящим внутрь конуса. Рама под действием сил со стороны сыпучего

материала на скребок и лопасти начинает влекаться во вращение. Частота вращения рамы регулируется ленточным тормозом 13. Вследствие устанавливаемой с помощью тормоза разности частот вращения рамы и конуса сыпучий материал заталкивается лопастями в окна 6, а залипающий на внутренней поверхности конуса счищается скребком рамы. К нижней части конуса жестко прикреплена лопастная мешалка 5, которая увеличивает подвижность сыпучего материала в нижней части корпуса, способствуя процессу смешивания.

Приводной вал 3 конуса приводится во вращение от электродвигателя 10 через клиноременную передачу 11.

Компоненты смеси загружаются через штуцер 7 в крышке 4. Готовая смесь выпускается из корпуса через отверстие в днище корпуса, прикрываемое клапаном, в разгрузочную камеру 8. Клапан приводится в движение с помощью гидроцилиндра. Корпус смесителя установлен на подставке 9.

В центробежном волчковом смесителе ЦВ-630 конус вращается от электродвигателя через трехскоростной редуктор, а корпус смесителя имеет рубашку.

Для смесителей типа ЦВ экспериментально установлены следующие оптимальные значения основных параметров:

коэффициент заполнения корпуса сыпучим материалом  $\psi = 0,5...0,8$  (меньшие значения рекомендуются для случая смешивания тяжелых компонентов, а большие – для легких);

угол раструба конуса  $\alpha = 60^\circ$ ;

угол наклона нижней лопасти 5 к горизонту  $45^\circ$ ;

частота вращения конуса  $\omega$  определяется значением  $\omega^2 R = 200 \text{ м/с}^2$ , где  $R$  – наибольший наружный радиус конуса, м;

время смешивания  $\tau_{см} = 15...20 \text{ мин.}$

В смесителях типа ЦВ можно получать смеси, однородность которых  $V_c = 1,5\%$ . Они могут быть использованы для смешивания компонентов с большой разностью плотностей частиц. Их нельзя использовать, если недопустимо дробление частиц.

Мощность привода конуса, кВт,

$$N = 1,25C_3 K_{\phi} \rho_n L b^{0,6} H \omega^{1,67},$$

где  $C_3$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси (см. табл. 2.2.1);

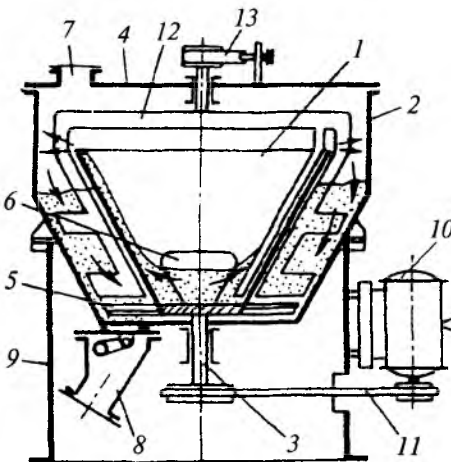


Рис. 2.2.5. Центробежный волчковый смеситель типа ЦВ

$K_{\phi}$  – коэффициент формы мешалки ротора; для мешалки с прямыми лопастями  $K_{\phi} = 1$ , для мешалки спиральной формы  $K_{\phi} = 0,7$ ;  $L$  – размах лопастей мешалки, м;  $\omega$  – частота вращения конуса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $H$  – высота слоя материала над нижней кромкой лопасти мешалки, м;  $b$  – высота мешалки, м.

Удельные затраты энергии смесителей типа ЦВ составляют  $6,5 \dots 15,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ .

Из зарубежных смесителей типа ЦВ наибольшее распространение получили смесители фирмы Петцольд (Германия), которые можно использовать и для получения паст.

В смесителях с центральной циркуляционной трубой типа ЦЦТ циркуляция смешиваемого сыпучего материала осуществляется с помощью шнека, заключенного в трубу, установленную неподвижно в корпусе смесителя вдоль его оси. Их часто используют для усреднения больших партий сыпучих материалов (до  $100 \text{ м}^3$ ).

Загрузка компонентов смеси осуществляется через штуцер, вваренный в крышку корпуса или так, как показано на рис. 2.2.6. При вращении шнека 3 сыпучий материал поднимается по трубе 6 вверх, сбрасывается в кольцевое пространство между трубой и корпусом 4 смесителя, опускается вниз и снова поступает в центральную трубу. Образующиеся в процессе смешивания комки сыпучего материала, проходя через диски 9 и 8, разрушаются. Нижний диск 8 закреплен на валу шнека 3. В некоторых конструкциях смесителей типа ЦЦТ диски отсутствуют, а в нижней конической части 5 корпуса на валу шнека закреплена лопасть, увеличивающая подвижность сыпучего материала в заборной части шнека.

Экспериментально установлено [20], что наилучшие показатели процесса смешивания достигаются в смесителях типа ЦЦТ при следующих параметрах: длине шнека, не ограниченного трубой  $h_0 = 1,3 d_{\text{ш}}$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\tau_{\text{см}} = 20 \dots 60 \text{ мин}$ ;  $\theta = 30$ ;  $u = 1 \text{ м/с}$ ;  $\psi = 0,5$ ;  $t_{\text{ш}}/d_{\text{ш}} = 0,5$ , где  $d_{\text{ш}}$  – диаметр шнека;  $t_{\text{ш}}$  – шаг витков шнека;  $\tau_{\text{см}}$  – время смешивания;  $\theta = G_1/G_2$  – кратность циркуляции;  $G_1$  – масса материала, прошедшая за время  $\tau_{\text{см}}$  через трубу;  $G_2$  – масса загружаемого в смеситель материала;  $\psi$  – коэффициент заполне-

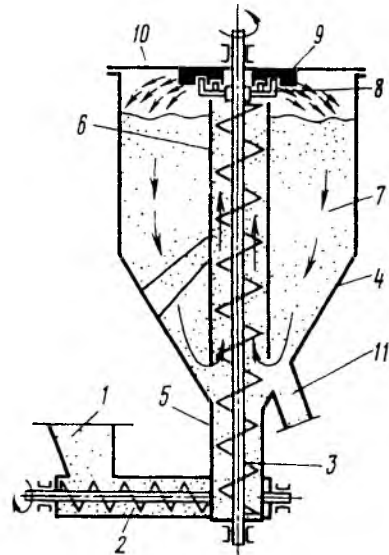


Рис. 2.2.6. Схема смесителя типа ЦЦТ:

1 – штуцер для загрузки материала; 2, 3 – шнеки; 4 – корпус; 5 – нижняя часть корпуса; 6 – центральная труба; 7 – смешиваемый материал; 8 – разбрасывающий диск; 9 – неподвижный диск; 10 – крышка; 11 – штуцер для выгрузки материала

ния витков шнека;  $u = 1,2 \text{ м/с}$  – линейная скорость наружных витков шнека;  $\alpha$  – угол конусности корпуса.

В смесителях типа ЦЦТ удельные энергозатраты составляют  $2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$ , возможно достижение значения  $V_c = 5\%$ .

Из зарубежных смесителей типа ЦЦТ наибольшему известности получили смесители типа «Вертамикс» (Великобритания).

**Смесители объемного смешивания** перемещают смесь рабочими поверхностями мешалки по всему внутреннему рабочему объему хаотически. Скорость процесса смешивания зависит в основном от количества одновременно существующих поверхностей сдвига в массе сыпучего материала и скорости относительного перемещения материала в месте сдвига. В качестве мешалки в смесителях объемного смешивания используют спиральные ленты, многолопастные мешалки, которые ометывают практически весь рабочий объем смесителя. Для уменьшения энергозатрат мешалкам придают небольшую частоту вращения. Кинетическая кривая процесса смешивания для смесителей объемного смешивания аналогична представленной на рис. 2.2.1.

К наиболее распространенным смесителям объемного смешивания относятся ленточные смесители типа Лн, плужные типа ПЖ, двухроторные типа ЗЛ и ЗШ, барабанные и планетарно-лопастные типа ПЛ.

Рекомендуемая область применения смесителей объемного смешивания – смешивание связных малоподвижных сыпучих материалов, а также сыпучих материалов с добавками жидкостей. Барабанные смесители этой группы, не имеющие внутренних мешалок, используются в основном для смешивания абразивных и взрывоопасных сыпучих материалов.

*Ленточный смеситель типа Лн-2,0*, конструкция которого типична для ленточных смесителей, состоит из следующих основных узлов (рис. 2.2.7): корпуса 1; ротора 6, состоящего из приводного вала 2, на котором закреплены спиральные ленты большого и малого диаметра; привода ротора, состоящего из электродвигателя 7 и редуктора 8, сварной станины 5; разгрузочной коробки 4 с клапаном, приводимым в действие через рычажный механизм от пневмоцилиндра 3. Для осмотра внутренней части разгрузочной коробки служит люк Л. Спиральные ленты разделены на две части: право- и левозаходную.

В процессе работы спиральная лента большого диаметра перемещает материал в центральную часть корпуса, а спиральная лента малого диаметра – к его торцам. Корпус

имеет цилиндрическую форму с плоской крышкой в верхней части. На ней находятся два люка А и З для осмотра и чистки внутренней части смесителя и ряд технологических штуцеров (Б и Ж – для подачи жидких добавок, В – для отсоса воздуха в моменты загрузки компонентов в смеситель, Е – для загрузки сыпучего материала, М – для спуска промывной жидкости, Л – для осмотра клапана, К – для выгрузки готовой смеси, И – для обдувки клапана).

Процесс смешивания в смесителе типа Лн происходит при хаотическом перемещении лентами ротора сыпучего материала по рабочему объему смесителя. Способность спиральных лент транспортировать материал в осевом направлении ограничена. Вследствие этого удовлетворительная однородность смеси в этих смесителях достигается за длительное время смешивания ( $\tau_{см} = 1...2$  ч). Частота вращения приводного вала принимается с таким расчетом, чтобы линейная скорость наружной кромки ленты большого диаметра была равна 1,2 м/с.

Зазор между наружными кромками ленты большого диаметра и внутренней поверхностью корпуса устанавливают в пределах 1...2 мм, что обеспечивает очистку внутренней поверхности корпуса.

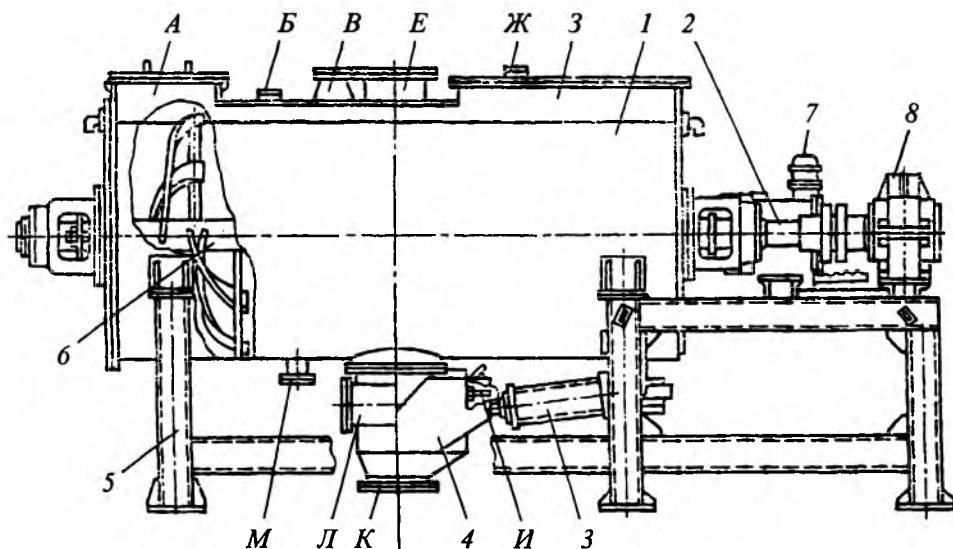


Рис. 2.2.7. Ленточный смеситель типа Лн-2,0

Отечественной промышленностью выпускаются четыре типа ленточных смесителей, основные показатели которых приведены ниже.

Смеситель .....	Лн-1,0	Лн-1,6	Лн-3,2	Лн-10
Рабочий объем смесительной камеры, м <sup>3</sup> .....	0,63	1	2	6,3
Установочная мощность привода, кВт .....	5,5	7,5	11	16,6

В этих смесителях допускается в рабочей камере температура  $t_p \leq 45$  °С и давление  $p_p = 0,1$  МПа. Выпускаются они в двух исполнениях: ВУ (для некоррозионной и невзрывоопасной среды) и ВК (для коррозионной и взрывоопасной среды).

Интересное конструктивное оформление ленточного смесителя предложено фирмой Спангерберг (Германия). В отличие от обычных ленточных смесителей в нем ротор со спиральными мешалками может выдвигаться вместе с одной из торцовых стенок корпуса. Это значительно облегчает чистку и осмотр смесителя.

*Плужные смесители* (плужковые смесители) предназначены для смешивания увлажненных, сильно налипающих и комкующихся сыпучих материалов.

Типичный смеситель этого типа ПЖ-630 состоит из следующих основных узлов (рис. 2.2.8): горизонтального корпуса 3 цилиндрической формы с плоскими торцовыми крышками, опирающимися на станину 9 и подставку 6; ротора, состоящего из приводного вала 4 и лемехообразных лопастей (плужков) 5; электродвигателя 1 и редуктора 2 привода ротора; двух ножевых головок 8 с индивидуальными приводами от электродвигателей; разгрузочной коробки 7 с клапаном. Корпус имеет несколько технологических штуцеров для загрузки компонентов смеси, выгрузки готовой смеси, установки терпары, разрывной мембраны, ножевых головок и люка для осмотра и чистки смесительной камеры. Некоторые типы смесителей типа ПЖ имеют на корпусе рубашку для нагрева или охлаждения смешиваемой массы, например, смеситель ПЖ-250.

Готовая смесь выгружается через разгрузочную коробку 7, в которой имеется клапан, прикрывающий отверстие в корпусе во время загрузки и смешивания материала. Привод клапана этого смесителя ручной, через рычаж-

ный механизм (в смесителе типа ПЖ-250 – от пневмоцилиндра).

Образующиеся в процессе смешивания агломераты разрушаются двумя быстровращающимися ножевыми головками 8 (в смесителе типа ПЖ-250 установлена одна ножевая головка). При вращении приводного вала смешиваемые компоненты перемещаются плужками 5 по сложной траектории: от стенок к оси корпуса. Масса материала движется от одного плужка к другому, меняя траекторию движения. Плужки смонтированы на приводном валу со смещением относительно друг друга на 90 или 180°. В результате этих перемещений происходит процесс смешивания загруженных в корпус компонентов смеси. Линейная скорость плужков  $u = 1,2$  м/с. Время смешивания в смесителях типа ПЖ  $\tau_{см} = 1...2$  ч. Рекомендуемый коэффициент заполнения материалом корпуса  $\psi = 0,6$ . Установочная мощность привода смесителей типа ПЖ колеблется в зависимости от физико-механических свойств смешиваемой массы и объема смесительной камеры в пределах 70...150 кВт/м<sup>3</sup> рабочего объема корпуса. Достаточно точные формулы для расчета потребляемой плужными смесителями энергии отсутствуют.

Разработан ряд отечественных смесителей типа ПЖ на рабочий объем корпуса от 5 до 800 л. Из зарубежных плужных смесителей наибольшее распространение получили смесители, выпускаемые фирмой Ледиге (Германия) и Ледиге-Мортон (Шотландия).

*Двухроторные смесители с Z-образными лопастями типа 3Л* предназначены главным образом для приготовления липких пастообразных смесей динамической вязкостью

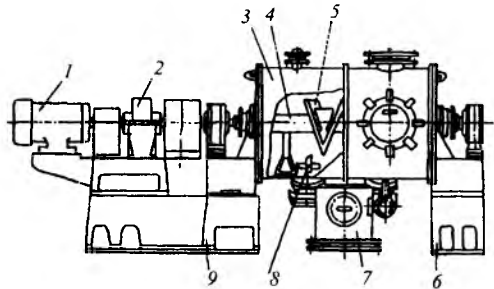


Рис. 2.2.8. Плужный смеситель типа ПЖ-630 для исполнения НБК ( $L = 4030$  мм,  $B = 1690$  мм) и ВБК ( $L = 4115$  мм,  $B = 1170$  мм)

$10^3 \dots 10^5$  Па·с, хотя в них могут быть смешаны и сухие сыпучие материалы. Рабочим органом в них являются два ротора с Z-образными лопастями.

Смеситель типа ЗЛ-250-01 состоит из следующих основных узлов (рис. 2.2.9): корпуса 1 корытообразной формы с рубашкой для нагрева или охлаждения смеси; двух роторов с Z-образными лопастями 3; крышки 2, в которую вварены технологические штуцера; привода роторов, состоящего из электродвигателя 5 и редуктора 4; станины; насосной станции 6, обеспечивающей подачу смазочного материала в подшипниковые узлы роторов; механизма 7 опрокидывания корпуса.

Роторы вращаются навстречу друг другу с различной частотой. Один из них приводится во вращение от электродвигателя 5 через редуктор 4 (а в некоторых типоразмерах смесителей типа ЗЛ – от мотор-редуктора через цепную передачу), а другой – через передачу от первого. Смешиваемые компоненты загружают в смеситель при открытой крышке или через штуцер в крышке корпуса. Для выгрузки готовой смеси корпус опрокидывается через ось одного из роторов с помощью червячного, винтового или гидравлического механизма (в зависимости от типоразмера смесителя). Крышка прикреплена к корпусу шарнирно и уравновешена противовесом.

Предусмотрены 13 типоразмеров смесителей типа ЗЛ с рабочим объемом смесительной камеры  $0,004 \dots 1,6$  м<sup>3</sup>. Основные показатели некоторых типоразмеров смесителей из этого ряда приведены в табл. 2.2.2.

В смесителях типа ЗЛ-10-01, ЗЛ-25-01, ЗЛ-63-01 рабочее давление в смесительной камере  $p_p = 0,001$  МПа, а в рубашке  $p_p = 0,6$  МПа. Рабочая температура в смесительной камере может изменяться от  $-20$  до  $+160$  °С.

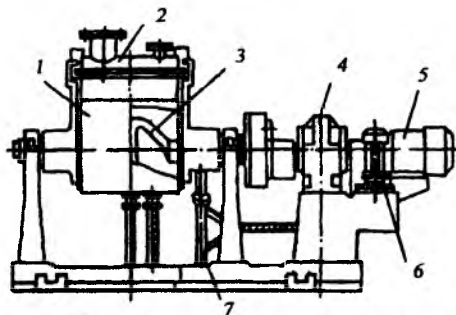


Рис. 2.2.9. Смеситель с Z-образными лопастями типа ЗЛ-250-01 для исполнений типов НРУ, ВРУ и ВРК

### 2.2.2. Основные показатели некоторых отечественных двухроторных смесителей с Z-образными лопастями типа ЗЛ

Тип смесителя	Рабочий объем смесительной камеры, м <sup>3</sup>	Установочная мощность электродвигателя привода роторов и насосной станции, кВт
ЗЛ-10-01	0,01	1,5
ЗЛ-25-01	0,025	3
ЗЛ-63-01	0,063	4,75
ЗЛ-100-02	0,1	8,25
ЗЛ-100 НЭУ-02	0,1	11,75; 11,52*
ЗЛ-250-01	0,25	16,1
ЗЛ-400-02	0,4	24,2
ЗЛ-400	0,4	32,2; 30,2*
ЗЛ-630-01	0,63	32,2

\* Мощность электронагревателя.

В смесителях других типоразмеров  $p_p = 0,1$  МПа. Смеситель ЗЛ-400 НЭУ-01 снабжен электронагревателем, с помощью которого верхний предел рабочей температуры в смесительной камере достигает  $+300$  °С. Смеситель ЗЛ-400-03 изготавливают только в исполнениях НРУ и ВРУ, остальные смесители типа ЗЛ – в исполнениях НРУ, НРК, ВРУ, ВРК и НЗУ (Э – с электрообогревом).

Для улучшения процесса смешивания компонентов в смесительной камере и облегчения выгрузки готовой смеси разработаны двухроторные смесители с Z-образными лопастями и реверсивным шнеком.

В смесителе типа ЗШ (ЗШ-400-02) компоненты загружаются в смесительную камеру через загрузочную коробку 6 с клапаном, приводимым в действие пневмоцилиндром (рис. 2.2.10). Готовая смесь выгружается через разгрузочную коробку 5 с клапаном, приводимым в действие пневмоцилиндром. Подача смеси в разгрузочную коробку производится шнеком 1, установленным в углублении нижней части смесительной камеры вдоль оси роторов и приводимым во вращение электродвигателем 2 через редуктор 3 и зубчатую передачу 4. В некоторых смесителях типа ЗШ шнек имеет реверсивное вращение: в моменты разгрузки он гонит смесь к разгрузочной коробке, а во время смешивания смеси он вращается в противоположную сторону, способствуя лучшему смешиванию компонентов.

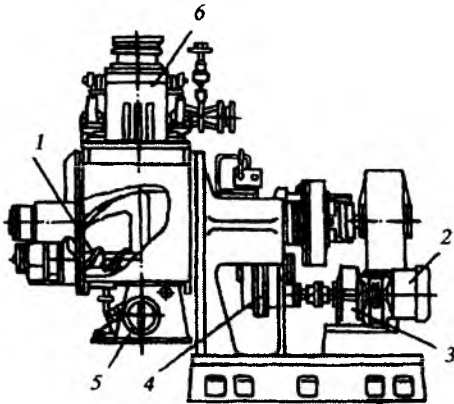


Рис. 2.2.10. Смеситель типа ЗШ

### 2.2.3. Основные показатели смесителей типа ЗШ

Тип смесителя	Тип исполнения	Рабочий объем смесительной камеры, м <sup>3</sup>	Установочная мощность электродвигателя, кВт
ЗШ-4 ВРК-01	НРК	0,004	1,3
ЗШ-25 ВРК-01		0,025	3,7
ЗШ-400-02	НРУ,	0,4	33
ЗШ-360	НРК,	0,63	43
ЗШ-1000	ВРУ	1	73,5
ЗШ-200 НРУ		2	140

Смесители типа ЗШ предназначены главным образом для приготовления сыпучих материалов с липкими жидкими добавками или паст. В некоторых из них может проводиться вакуумная сушка смеси при снижении частоты вращения роторов. Основные показатели смесителей типа ЗШ приведены в табл. 2.2.3.

Пределы рабочих температур и давлений в смесительной камере смесителей типа ЗШ те же, что и у смесителей типа ЗЛ. В смесителе ЗШ-1000 в смесительной камере может быть создан вакуум не более 0,0789 МПа.

В зависимости от физико-механических свойств смешиваемого материала смесители типа ЗЛ и ЗШ комплектуются валками различной конфигурации (рис. 2.2.11): тип А используется в основном для смешивания высоковязких жидкостей, резины; тип Б – для смешивания влажных и пастообразных материалов; тип В – для смешивания сыпучих сухих и увлажненных материалов.

Планетарно-лопастные смесители типа ПЛ для смешивания сухих сыпучих материалов используются реже, чем для смешивания паст и высоковязких жидкостей. Рабочим органом этих смесителей являются несколько лопастных мешалок импеллерного типа, вращающихся вокруг собственной оси при одновременном вращении мешалок вокруг оси корпуса аппарата (чаще цилиндрической формы). Привод мешалок осуществляется от электродвигателя через редуктор и планетарную передачу, он закреплен на верхней плите, имеющей поступательное движение вверх и вниз, что необходимо для очистки и осмотра внутренней части корпуса и мешалок. Механизм подъема плиты размещен в стойке, его привод осуществляется через редуктор от электродвигателя.

Выпуск готовой продукции из корпуса производится через разгрузочную коробку с клапаном, расположенную в нижней части корпуса, а загрузка компонентов производится через штуцер, находящийся на крышке корпуса. На крышке размещены и другие технологические штуцера: для подвода инертного газа; для отвода паров и воздуха, предохранительной мембраны, манометра, термопары. Корпус часто выполняется с рубашкой для охлаждения или нагрева смеси.

Планетарно-лопастные смесители имеют большое разнообразие по числу мешалок и

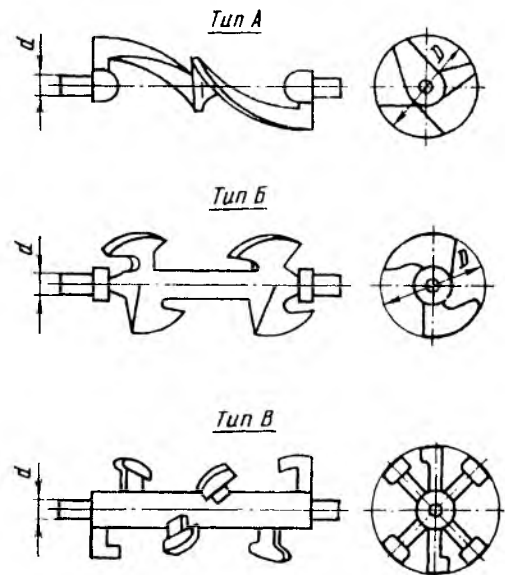


Рис. 2.2.11. Валки в смесителях типов ЗЛ и ЗШ

конструктивному исполнению привода. Условно их можно разделить на две группы [4]: смесители с принудительным режимом работы мешалок, законы движения которых определяются на стадии проектирования и не изменяются во время эксплуатации; смесители с адаптивным (самонастраивающимся) режимом работы мешалок, законы движения которых определяются сопротивлением смешиваемой массы движению мешалок (мешалки вращаются чаще там, где сопротивление смешиваемой массы мешалкам наибольшее).

Разработанный ряд отечественных смесителей типа ПЛ имеет рабочий объем корпуса в пределах  $0,006...1 \text{ м}^3$ .

В табл. 2.2.4 приведены основные показатели лопастных смесителей типа ПЛ.

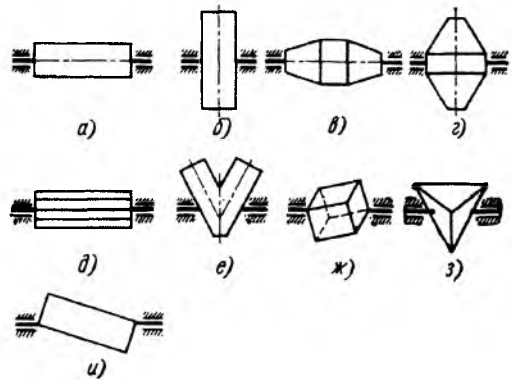
Фирмой Млын (Белоруссия) разработан ряд помольно-смесительных аппаратов, основным рабочим элементом в которых используются пружины (винты). Эти аппараты имеют высокую удельную производительность и малые энергетические затраты, просты в эксплуатации. Помимо смешивания этот рабочий орган способен одновременно измельчать частицы компонентов: при вращении изогнутой пружины вокруг своей оси на внешнем радиусе изгиба витки разомкнуты и образуют сходящиеся клиновидные пространства, в которых происходит захват частиц и их измельчение. Планетарное вращение пружины обеспечивает смешивание компонентов смеси в рабочем объеме корпуса смесителя.

*Барабанные смесители* часто используются для смешивания сухих сыпучих, абразивных и взрывоопасных материалов, когда не требуется высокая однородность смеси. Различаются они формой вращающегося корпуса (рис. 2.2.12).

**2.2.4. Основные показатели планетарно-лопастных смесителей типа ПЛ**

Тип смесителя	Объем смесительной камеры, $\text{м}^3$	Установочная мощность электродвигателя, кВт
ПЛ-0,01	0,01	1
ПЛ-0,04	0,04	2,45
ПЛ-0,16	0,16	6,6

Примечание. Рабочая температура в смесительной камере  $-20...+130 \text{ }^\circ\text{C}$ , а давление не более  $0,02 \text{ МПа}$ .



**Рис. 2.2.12. Основные схемы корпусов барабанных смесителей периодического действия:**

*a* – цилиндрический; *б* – цилиндрический с осью вращения, перпендикулярной к оси цилиндра; *в* – биконический горизонтальный; *г* – биконический вертикальный; *д* – горизонтальный граненый; *е* – бицилиндрический; *з* – тетраэдрический; *ж* – кубический; *и* – типа «пьяная бочка»

Барабанные смесители относятся к тихоходным машинам: окружная скорость корпуса у них составляет  $0,17...1 \text{ м/с}$  при коэффициенте заполнения корпуса смесью  $\psi = 0,5$ .

Результаты сравнительных испытаний барабанных смесителей объемом  $16 \text{ л}$  показали [12], что наиболее эффективными являются смесители, корпуса которых обеспечивают при их вращении многократное разъединение и объединение скользящих слоев материала по граням корпуса (рис. 2.2.12, *г, е – з*).

Корпуса барабанных смесителей снабжаются цапфами, которые устанавливаются в подшипники скольжения или качения, закрепляемые на стойках. Привод корпусов барабанных смесителей осуществляется от электродвигателя через редуктор и клиноременную передачу. В некоторых конструкциях этих смесителей имеется вспомогательный мотор-редуктор, с помощью которого корпус смесителя может устанавливаться в вертикальном положении при разгрузке и загрузке сыпучего материала.

К преимуществам барабанных смесителей можно отнести:

- простоту конструкции и надежность в эксплуатации;
- возможность смешивания абразивных и взрывоопасных материалов;
- возможность смешивания материалов без разрушения частиц;
- широкий диапазон рабочих объемов (от  $1 \text{ л}$  до  $150 \text{ м}^3$ ).

К их недостаткам относятся:

низкое качество готовой смеси;  
длительность процесса смешивания (более 1 ч);

значительные удельные затраты энергии;  
образование комочков при введении в смесь жидких добавок.

Отечественной промышленностью выпускаются барабанные двухконусные смесители типа БК: БК-1,6 и БК-25 номинальным объемом корпуса соответственно 1,6 и 2,5 м<sup>3</sup> и установочной мощностью электродвигателей 15,75 и 23,1 кВт.

Барабанные смесители с биконическим корпусом выпускаются во многих странах. Наиболее известны барабанные смесители фирмы Пфаудлер (США), которая имеет отделения во многих странах мира.

Некоторые зарубежные фирмы выпускают барабанные смесители типа «Турбула» с корпусом (контейнером) различной формы, закрепляемым в зажимах механизма, который позволяет вращать корпус в трех плоскостях. При подобном вращении улучшается качество смеси, уменьшается время смешивания, появляется возможность без пересыпаний закончить процесс смешивания в транспортной таре (контейнере).

**Смесители с диффузионным смешиванием** благодаря созданию разреженных слоев смешиваемого сыпучего материала и увеличению его порозности обеспечивают более свободное перемещение твердых частиц в рабочем объеме. Это достигается либо с помощью наложения на слой дисперсного материала вибраций, либо путем псевдооживления слоя.

В вибрационных смесителях вибрации передаются смешиваемому материалу чаще всего через корпус. Вибрационные смесители периодического действия в промышленности практически не используются.

В пневмосмесителях смешивание материала достигается путем вдува в слой частиц газа. Пневмосмесители можно разделить на две подгруппы: струйные и с псевдооживленным слоем [2].

В струйных пневмосмесителях, например в пневмосмесителе типа ПС-100, сжатый газ (азот или воздух) подается внутрь корпуса импульсно через ряд сопел с перекрещивающимися осями, создавая соответствующую циркуляцию частиц (циркуляционные смесители) или их хаотическое перемещение внутри слоя (смесители объемного смешивания).

В пневмосмесителях с псевдооживленным слоем частиц газ подается внутрь корпуса под решетку (сетку), на которой находится смеси-

ваемый материал. В качестве решетки часто используется пористая керамика [2]. В псевдооживленном слое частицы хаотично перемешаются относительно друг друга, происходит взаимный «диффузионный» обмен частицами микрообъемов смеси.

Известны случаи использования пневмосмесителей диффузионного смешивания для усреднения больших партий сыпучего материала (до 200 м<sup>3</sup>) в производстве пластмасс [12]. В большинстве пневмосмесителей не удается достичь хорошего качества смеси. Объясняется это следующим. Во-первых, в аппаратах с отношением высоты слоя  $H_c$  материала над решеткой к внутреннему диаметру  $D$  корпуса, равным 0,25, возникает несколько «очагов» циркуляции частиц (до шести). Частицы медленно перемещаются из одного очага в другие. Для сокращения числа очагов следует увеличивать высоту слоя. При  $H_c = D$  создается один очаг, что более благоприятно для процесса смешивания. При  $H_c < D$  следует в центр решетки подавать газ в большем количестве, чем на периферии. Это позволяет создать одноочаговый режим псевдооживления.

Во-вторых, в псевдооживленных слоях происходит быстрая сепарация частиц по размерам и массе. Поэтому процесс смешивания не следует вести дольше определенного времени. Следует отметить, что оптимальное время продувки слоя газом, с точки зрения сепарации, не всегда совпадает с оптимальным временем смешивания.

В-третьих, в результате каналообразования пылевидные материалы плохо псевдооживляются и почти не перемещаются по объему смесителя. В этих случаях около решетки размещают вращающуюся лопастную мешалку, которая препятствует образованию каналов, по которым проходит основная масса газа. Все это следует учитывать при конструировании пневмосмесителей с псевдооживленными слоями.

К достоинствам пневмосмесителей следует отнести простоту их конструкции и низкие удельные энергозатраты, а к недостаткам – значительную эрозию внутренних поверхностей корпуса, истирание частиц компонентов, появление электростатического заряда, который может возникнуть при смешивании диэлектрических материалов, низкое качество смеси, необходимость очистки отходящего газа.



Пневмосмесители снабжаются пылеулавливающими устройствами (рукавными фильтрами, циклонами, роторными пылеуловителями и пр.).

#### Смесители непрерывного действия.

Смесители этого типа по сравнению со смесителями периодического действия имеют более высокую производительность при одновременном снижении удельных энергозатрат, металлоемкости, себестоимости готового продукта, более широкие возможности по автоматизации процесса и улучшению условий труда. Однако широкого распространения в промышленности они еще не получили. Это объясняется тем, что при получении многокомпонентных смесей не удается обеспечить на заданном уровне функционирование блока дозирующих устройств, которые будут выдавать потоки материала в смеситель с минимальными флуктуациями в заданном соотношении компонентов, особенно если блок составлен из объемных дозаторов. При этом оснащение блока автоматическими весовыми дозирующими устройствами часто бывает экономически неоправданным.

В таких смесителях возможно проведение совмещенных процессов: смешивания, сушки, измельчения, гранулирования, увлажнения и т.д.

Подача компонентов смеси в смеситель производится отдельными питателями (дозаторами). Как бы не был точен промышленный питатель, подача им сыпучего материала в каждые мгновения изменяется во времени случайным образом или по какому-то закону. Кроме колебаний в массовой подаче сыпучего материала могут возникнуть ее отклонения из-за

возникших особых условий на входе в питатель: зависания материала в бункере; снижения частоты вращения электродвигателя привода питателей из-за временных падений напряжения в сети и т.п.

Представим потоки (сигналы) материала, проходящие смеситель непрерывного действия, в виде схемы (рис. 2.2.13. а). Регулируемыми параметрами  $x$  можно считать массовые подачи материала каждым из  $n$  питателей (или концентрации отдельных компонентов во входном потоке), а выходными  $y$  – массовые подачи каждого из  $n$  компонентов на выходе из смесителя (или концентрации отдельных компонентов в выходном потоке). К возмущающим параметрам  $\xi$  можно отнести случайные колебания потоков на входе в смеситель, колебания которых во времени нельзя предсказать. Нерегулируемые параметры  $u$  системы можно измерить, но воздействовать на них в ходе процесса смешивания нельзя. К таким параметрам можно отнести физико-механические свойства материала (влажность, гранулометрический состав, коэффициенты внутреннего и внешнего трения).

Для упрощения анализа системы с таким большим количеством параметров будем считать, во-первых, что параметры  $u$  и  $\xi$  отсутствуют, во-вторых, в качестве параметров  $x$  и  $y$  принимаем мгновенные значения концентрации ключевого компонента в потоке материала соответственно на входе в смеситель и выходе из него. Тогда с учетом этих допущений система упрощается (рис. 1.2.13, б).

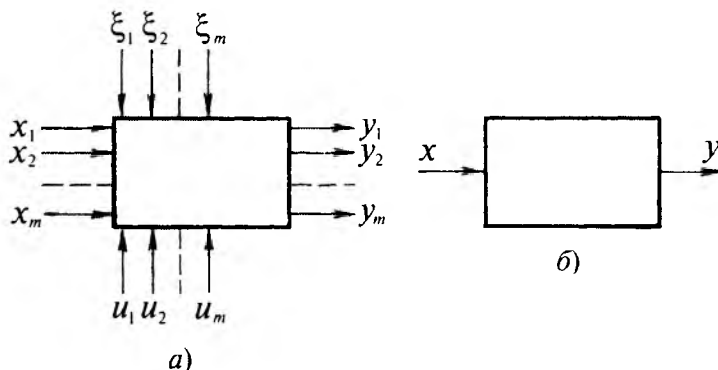


Рис. 2.2.13. Схемы потоков смесителя непрерывного действия: а – полная; б – упрощенная

Входной и выходной сигналы для большинства промышленных питателей и смесителей непрерывного действия описываются случайными функциями: в нашем случае соответственно  $c(t)_x$  и  $c(t)_y$ . Смесители непрерывного действия можно рассматривать как линейные преобразователи сигналов, для которых можно записать

$$c(t)_y = A[c(t)_x],$$

где  $A$  – оператор преобразования сигналов, под которым понимаются определенные преобразования случайных функций или сложные математические модели, описываемые системами дифференциальных или алгебраических уравнений;  $c(t)_y$ ,  $c(t)_x$  – случайные функции, описывающие мгновенные значения концентрации ключевого компонента в потоке материала соответственно на выходе из смесителя и на его входе.

Оператор  $A$  зависит от механизма перемещения частиц компонентов смеси рабочими органами внутри смесителя. В практике моделирования динамики процесса смешивания внутри смесителя непрерывного действия, т.е. определение формы записи оператора  $A$ , используются несколько подходов: эмпирические методы; методы, основанные на анализе структуры потоков с помощью функции распределения времени пребывания частиц (ФРВП) внутри смесителя (кибернетические методы); вероятностно-статистические методы; методы механики сплошных сред.

*Эмпирические методы* широко используются для описания процессов смешивания. Они основаны на опытных данных, полученных на лабораторных или опытных смесителях. Экспериментальные данные обрабатываются и изучаются с целью установления зависимости между параметрами случайной функции (например, дисперсией или коэффициентом  $V_c$ ), временем смешивания, конструктивными и режимными параметрами рабочего органа смесителя, потребляемой энергией, свойствами смешиваемых материалов. Эти зависимости, как правило, имеют вид регрессионных или критериальных уравнений, не раскрывающих физическую сторону процесса и влияние дозирующих устройств на процессы смешивания. Они описывают работу только конкретного смесителя в исследованных диапазонах изменения конструктивных и режим-

ных его параметров при использовании конкретных дозирующих устройств.

*Кибернетические методы*, основанные на анализе структуры потоков смешиваемых масс с помощью ФРВП, получили широкое распространение. Особенности гидродинамической структуры потоков при этих методах проявляются в характере ФРВП в смесителе. Для определения ФРВП на входной питающий поток искусственно наносится возмущение той или иной формы, а затем на выходе из смесителя исследуются результаты этого возмущения: строится кривая отклика на возмущение. В случае, когда используется возмущение в виде единичного импульса индикатора, можно записать

$$c(t)_y = c(S)_x H(S),$$

где  $c(S)_y$ ,  $c(S)_x$  – изображение по Лапласу соответственно выходного и входного сигналов;  $H(S)$  – преобразованная по Лапласу импульсная переходная функция смесителя.

Очевидно, что качество смеси на выходе из смесителя зависит не только от процесса смешивания в смесителе, определяемого через ФРВП, но и входного сигнала, формируемого питателями компонентов. Смеситель непрерывного действия должен выполнять две функции: смешивать поступающие в него компоненты и снижать (сглаживать) флуктуации питающих потоков до необходимого уровня, определяемого техническими условиями на готовую смесь.

При этом методе можно представить смеситель непрерывного действия в виде идеализированных структур (например, из ячеек идеального смешения), связанных между собой потоком смешиваемого материала. Подобрать модели для типовых структур, можно составить результирующую модель для всего смесителя с учетом топологии связи этих идеализированных структур между собой.

*Вероятностно-статистические методы* моделирования процесса смешивания компонентов в рассматриваемых смесителях основаны на предположении, что отдельные частицы перемещаются в рабочем объеме смесителя случайным образом. Для описания подобного процесса наиболее эффективно применять теорию дискретных в пространстве и непрерывных во времени марковских процессов. Для описания таких процессов применяют диффе-

ренициально-разностные уравнения А.Н. Колмагорова. Конечные уравнения процесса смешивания содержат коэффициенты продольного и поперечного смешивания (диффузии). Их определение производится экспериментально на конкретном смесителе при определенном режиме его работы на смеси с заданными физико-механическими свойствами.

*Методы механики сплошных сред* применительно к описанию динамики смешивания сыпучих материалов не нашли широкого применения в связи с трудностями решения системы уравнений механики многофазных сред, вызванных турбулентным и трехмерным характером движения фаз, часто происходящих в разреженных, а не в сплошных слоях. Кроме того, при этом подходе не учитывается влияние пульсаций питающих потоков на однородность смеси, выходящей из смесителя.

Подводя итоги краткого анализа наиболее часто используемых методов математического моделирования процессов смешивания в смесителях непрерывного действия можно сделать следующие выводы: во-первых, все они требуют экспериментальных определений тех или иных параметров модели; во-вторых, наиболее эффективно исследование процессов смешивания можно проводить на математических моделях, построенных с использованием кибернетических методов.

*Классификация смесителей непрерывного действия*, наиболее часто встречающаяся в технической литературе – по конструктивному признаку (червячно-лопастные, барабанные, спирально-винтовые, роторные, одновалные и т.д.), не является научной: она не позволяет создать единые методики расчета для отдельных групп смесителей, подчас имеющих разные конструктивные особенности, но одинаковый механизм смешивания компонентов смеси. Более целесообразно производить классификацию смесителей непрерывного действия по механизму смешивания:

- с преимущественно радиальным процессом смешивания и поршневым движением материала вдоль корпуса (прямоточные смесители);

- с радиально-продольным процессом смешивания и хаотическим движением материала в рабочем объеме (смесители объемного смешивания);

- с радиально-продольным процессом смешивания и почти поршневым движением материала вдоль оси корпуса (смесители размывно-го действия).

**В прямоточных смесителях** смешиваемый материал движется вдоль корпуса без продольного смешивания частиц компонентов (поршневой режим движения материала). Процесс смешивания обеспечивается только радиальным перераспределением частиц. При таком режиме движения смешиваемого материала смеситель непрерывного действия не способен сглаживать входные флуктуации потоков компонентов и он должен комплектоваться дозаторами повышенной точности.

К наиболее типичным прямоточным смесителям этого типа можно отнести ленточные, спиральные, центробежные и вибрационные.

*В ленточном смесителе непрерывного действия типа НД* (рис. 2.2.14) подлежащие смешиванию компоненты поступают в корпус 1 через вваренный в крышку штуцер, а выгружаются через разгрузочную камеру 8. Смешивание материала и перемещение его вдоль корпуса производится сначала лопатками 9, а затем спиральными лентами 11, закрепленными на валах 10 с помощью штифтов. Валы приводятся во вращение от электродвигателя 4 через редуктор 3, муфту и зубчатую пару 2. В разгрузочной камере установлен рыхлитель 6, приводимый во вращение от электродвигателя 5. Смеситель и его привод смонтированы на раме 7.

Смесители типа НД выпускаются в трех исполнениях [4]: НД-650 14У производительностью 10 т/ч, рабочим давлением в смесительной камере не более 0,005 МПа, установочной мощностью привода валов  $N_{уст} = 22$  кВт и рыхлителя  $N_{уст} = 2,2$  кВт, частотой вращения привода валов 47 мин<sup>-1</sup> и рыхлителя 940 мин<sup>-1</sup>, габаритными размерами 6430 × 2156 × 1910 мм; с некоррозионной, взрывоопасной средой в смесительной камере; НД-650 14 К, смешивающего коррозионную среду; НД-650 13 Т, отличающегося от смесителя НД-650 14 К наличием рубашки.

Смесители типа НД рекомендуются для смешивания только сыпучих материалов насыпной плотностью  $\rho_n = 1500$  кг/м<sup>3</sup>, а также сыпучих материалов с небольшим количеством жидких компонентов при условии, что готовая смесь сохраняет сыпучесть. При комплектации этих смесителей дозаторами высокой точности в них можно получить смеси с величиной  $V_c = 3...5$  %.

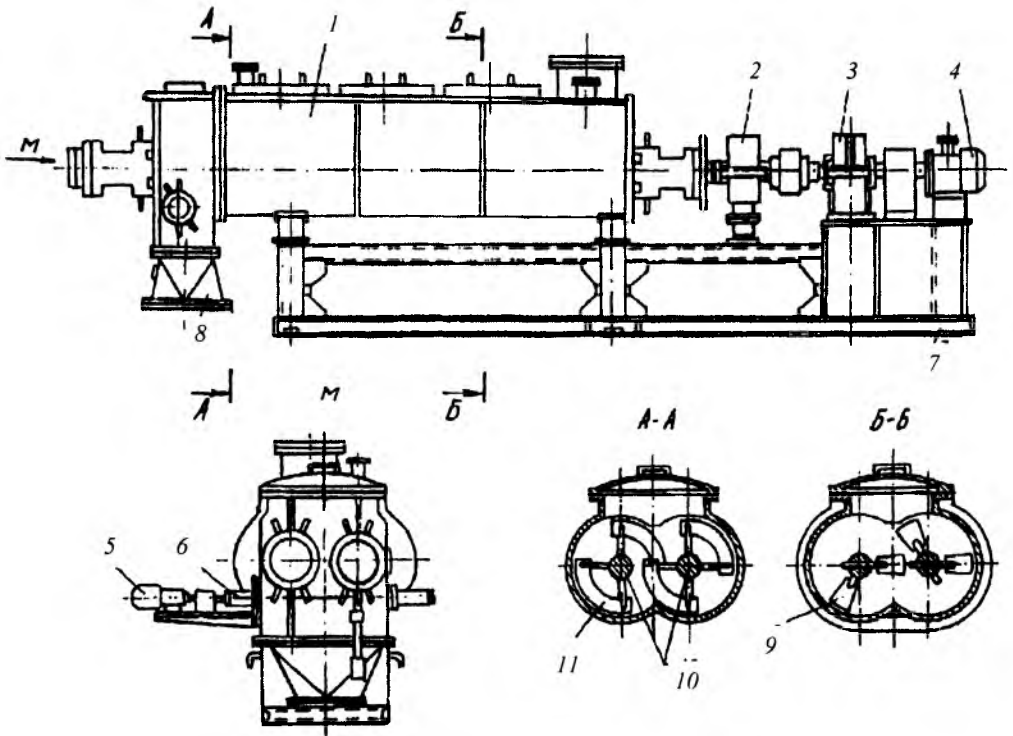


Рис. 2.2.14. Ленточный смеситель непрерывного действия

Спирально-винтовые смесители непрерывного действия аналогичны по конструкции со смесителями типа НД. Однако вместо лопаток и спиральных лент в корпусе спирально-винтового смесителя установлена спираль. В смесителях с двумя спиралями спираль большого диаметра проталкивает смесь вдоль корпуса к выпускному патрубку, а спираль малого диаметра, установленная соосно со спиралью большого диаметра, возвращает частично материал назад. При двух спиралях смеситель имеет продольное смешивание, поэтому двухспиральные смесители следует отнести к группе смесителей размывного действия.

Центробежный прямоточный смеситель конструкции А.М. Ластовцева состоит из следующих основных элементов (рис. 2.2.15): корпуса 5 цилиндрической формы, составленного из нескольких царг, со штуцерами 1 и 6; вала 3, на котором закреплены конуса 2; конических пересыпных воронок 4, закрепленных внутри корпуса; привода вала, состоящего из электродвигателя 8 и клиноременной передачи; радиальной лопасти 7.

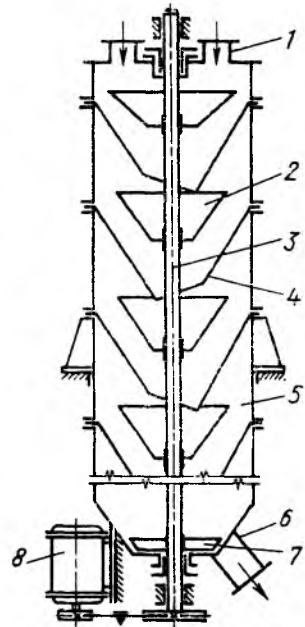


Рис. 2.2.15. Схема центробежного прямоточного смесителя конструкции А.М. Ластовцева

Подлежащий смешиванию материал вводится через штуцер 1 внутрь первого вращающегося конуса, под действием центробежных сил поднимается по внутренней поверхности конуса и сбрасывается с его края в виде пылевидного факела. После удара о стенку корпуса частицы материала оседают в неподвижной воронке 4 и по ней сыпаются в нижележащий вращающийся корпус. Процесс повторяется на каждой паре конус – воронка. Разгрузка готовой смеси происходит через штуцер 6 с помощью вращающейся лопасти 7, закрепленной на валу.

Экспериментально установлено [20], что для порошкообразных материалов центробежное ускорение на краю конусов должно быть равным  $\omega^2 R = 300 \text{ м/с}^2$ , где  $\omega$  – частота вращения конуса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – наибольший радиус конуса, м. При высокой точности дозаторов в этом смесителе возможно получение смеси с  $V_c = 2...3\%$ .

Количество секций  $m$  (конус – воронка) может быть назначено с учетом необходимой однородности смеси:

$$V_c = \frac{26,5}{m} + 1,6\%.$$

Пропускная способность смесителя может быть принята равной  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$  площади кольцевого сечения между внутренней стенкой корпуса и верхней кромкой конуса.

В вибрационных проточных смесителях смешиваемая масса непрерывно перемещается вдоль вибрирующего корпуса смесителя со сравнительно большой амплитудой колебаний (3...4 мм) и относительно малой частотой (20...330 Гц).

Вибрационный двухвальный смеситель типа ДВС-Н состоит из следующих основных узлов (рис. 2.2.16): корпуса 1 овальной формы; двух валов 6 с лопатками 7; сварной рамы 2, пружинных амортизаторов 5; вращающегося вала 4 с дебалансом; противовеса 3. Валы вращаются навстречу друг другу. Одна часть лопаток, закрепленных на валах, имеет угол атаки  $90^\circ$ , а другая –  $45^\circ$ . Первые лопатки перемешивают материал, а вторые продвигают смешиваемые компоненты вдоль корпуса смесителя к выпускному штуцеру. Валы 6 приводятся во вращение с частотой  $150...200 \text{ мин}^{-1}$  от электродвигателя через редуктор, выходной вал которого соединен с одним из лопастных валов резиновой муфтой. Второй вал имеет привод от первого вала через зубчатую пару. Вал 4 приводится во вращение либо от самостоятельного электродвигателя, либо от электродвигателя, вращающего лопастные валы, с помощью клиноременной передачи.

Смесители типа ДВС-Н используются для смешивания увлажненных сыпучих материалов с частицами более  $10 \text{ мкм}$ . При высокой точности дозирования исходных компонентов возможно достижение однородности смеси с  $V_c \leq 3\%$ .

Установочная мощность одного электродвигателя смесителя типа ДВС-150 Н равна  $1,5 \text{ кВт}$  с дебалансным моментом  $7,2 \text{ Н}\cdot\text{см}$ ; двух электродвигателей смесителя типа ДВС-200 Н –  $4,5 \text{ кВт}$  с дебалансным моментом  $9,0...19,5 \text{ Н}\cdot\text{см}$ .

Трубные проточные вибрационные смесители типа ИСмА [20] используются для смешивания сухих сыпучих материалов. В корпусе 1 такого смесителя размещена труба 2, внутри которой вращается вал 3 с дебалансами 5

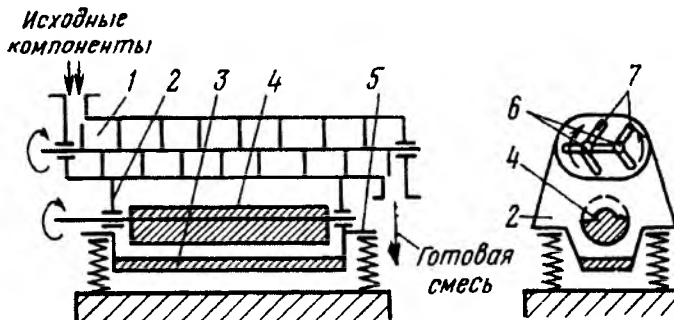


Рис. 2.2.16. Схема вибрационного двухвального смесителя непрерывного действия

(рис. 2.2.17). Вал приводится во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу. Электродвигатель закреплен на станине 7. Корпус 1 опирается на восемь пар цилиндрических пружин 4, которые через резиновые амортизаторы опираются на станину 7. Сыпучие компоненты загружаются непрерывно в корпус через штуцер 9, а выгружаются через штуцер 6.

Основная масса смешиваемого материала циркулирует в поперечных сечениях корпуса в сторону, обратную вращению вала. Коэффициент заполнения корпуса материалом равен 0,8. Продольное пробковое перемещение сыпучего материала вдоль корпуса обеспечивается за счет разницы в высотах слоя в местах загрузки и выгрузки.

В смесителе типа ИСиА возможно при высокой точности дозирования достичь качества смеси с  $V_c \approx 3\%$  за 10...20 с пребывания компонентов в корпусе, что обеспечивает большую его производительность.

Промышленный образец смесителя ИСиА имеет длину трубного корпуса 4100 мм, установочную мощность электродвигателя  $N_{yc} = 28$  кВт, дебалансовый момент 97,6 Н·см, амплитуду колебаний корпуса 4 мм, частоту колебаний корпуса 37 Гц, производительность до  $28 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В прямоточных центробежных смесителях «Интолетор» типа Н и «Бретбери» типа  $M_k$  (Великобритания) смешиваемые компоненты проходят через быстровращающийся ротор,

имеющий специальные устройства для смешивания. В смесителях типа Н такими устройствами являются ряд штырей, закрепленных на вращающихся дисках (рис. 2.2.18), а в смесителях типа  $M_k$  смешивающее устройство выполнено в виде нескольких рядов круглых бил, смонтированных на одном валу, проходящем по оси вертикального корпуса цилиндрической формы.

Смесители этих типов отличаются малыми габаритными размерами, низкими удельными энергозатратами (до 1,1 кВт·ч/т), простой конструкции, имеют высокую производительность (2...7 т/ч у смесителей типа  $M_k$ , 150...450 т/ч у для смесителей типа  $M_r$ ). К их недостаткам можно отнести: необходимость использования для ротора высокопрочных металлов, установки дозаторов повышенной точности, низкое качество смеси ( $V_c \approx 5\%$ ) и дробление частиц при ударе с большой скоростью о корпус.

**В смесителях размывного действия** смешиваемый материал перемешивается рабочими органами вдоль корпуса почти в поршневом режиме. Однако в отличие от прямоточных смесителей в них обеспечивается продольное смешивание частиц: некоторые частицы движутся со скоростью либо меньше, либо больше средней скорости движения материала вдоль корпуса смесителя. Благодаря этому происходит как бы размыв частиц в движущихся элементарных объемах материала, образованных

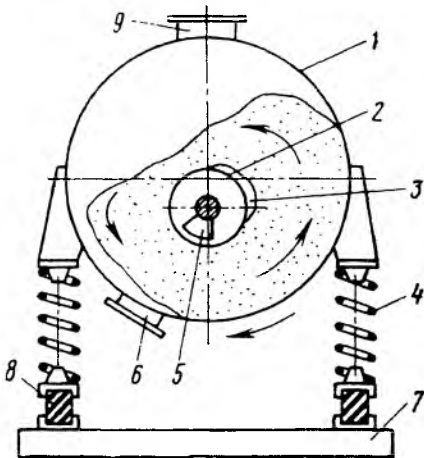


Рис. 2.2.17. Схема прямоточного вибрационного смесителя типа ИСиА

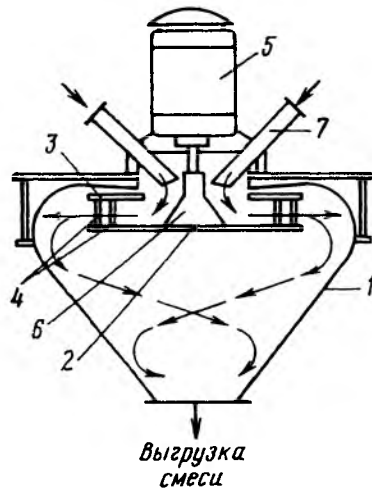


Рис. 2.2.18. Схема смесителя «Интолетор»: 1 — корпус; 2 — нижний диск ротора; 3 — верхний диск ротора; 4 — штыри; 5 — электродвигатель; 6 — ступица ротора; 7 — штуцер

поперечными сечениями потока на входе в смеситель за промежуток времени  $\Delta t$  и состоящих из частиц одного компонента: часть частиц при движении элементарного объема вдоль корпуса смесителя переходит в соседние элементарные объемы, а их место занимают частицы других компонентов из соседних элементарных объемов. Как уже отмечалось, для более свободного перемещения частиц вдоль потока необходимо создать в смесителях этой группы разреженные слои смешиваемого материала.

К размывным смесителям непрерывного действия можно отнести центробежные, вибрационные и многоспиральные барабанные смесители.

*Центробежный смеситель типа НДЦ* выполнен на основе волчкового смесителя периодического действия типа ЦВ. Но вместо свободно подвешенной рамы с лопастями и скребком в нем смонтирован шнек 2 (рис. 2.2.19), входящий внутрь конуса 3. Направление вращения шнека вокруг собственной оси обратное направлению движения частиц по внутренней поверхности конуса. Благодаря этому часть материала перемещается в нижнюю часть конуса, увеличивая сглаживающую способность смесителя за счет появления продольного процесса смешивания. Выброшенная из конуса масса сыпучего материала опускается в кольцевое пространство между конусом и корпусом, а затем выгалькивается радиальной лопастью, закрепленной на доньшке конуса, в

штуцер 4. Вал конуса приводится во вращение от электродвигателя 1 через клиноременную передачу.

Серийно выпускается только один тип подобного смесителя: НДЦ-25 (производительностью до 1500 кг/ч, установочной мощностью привода ротора  $N_{уст} = 1,1$  кВт, шнека  $N_{уст} = 0,55$  кВт, рабочим давлением в корпусе  $p_p = 0,002$  МПа).

Мощность привода ротора смесителя НДЦ, Вт,

$$N = 14 \cdot 10^{-3} K \rho_n \omega^2 \times \\ \times (Q + V \omega / 2\pi)(3D - 4/\sin \alpha)^2,$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала относительно конуса;

$K = \exp[-0,04 \omega \exp(-10^{-3} \rho_n)]$ ;  $l$  – длина образующей конуса, м;  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса к горизонту, °;  $\omega$  – частота вращения конуса,  $c^{-1}$ ;  $D$  – наибольший диаметр конуса, м;  $V$  – запас материала в смесителе,  $m^3$ ;  $Q$  – производительность смесителя,  $m^3/c$ .

С целью увеличения сглаживающей способности смесителей непрерывного действия в их конструкциях стали организовывать контуры внутренней и внешней циркуляции потоков смешиваемых материалов. На рис. 2.2.20 показана схема центробежного смесителя непрерывного действия с внутренней и внешней циркуляцией, разработанного в Кемеровском технологическом институте пищевой промышленности. Компоненты, подлежащие смешиванию, поступают через патрубок 4 в воронку 2, сползают по ней внутрь вращающегося конуса 10. Часть материала через отверстия 13 поступает в средний конус 11, а другая часть выбрасывается на торообразный отражатель 14. Через окна 15 в отражателе материал частично поступает в верхнюю часть среднего конуса 11, наслаиваясь на поток материала, поднимающийся по нему вверх, а другая часть материала отражателем 14 возвращается внутрь конуса 10.

Подобным образом осуществляется процесс и в среднем конусе 11. Таким образом на конусах 10 и 11 ротора 9 смесителя происходит внутренняя рециркуляция смеси. Внешним конусом 12 часть материала, поступившего в него из конуса 11, выбрасывается внутрь корпуса 1, а другая – через окна 17 поступает в распределительную воронку 2 и накладывается

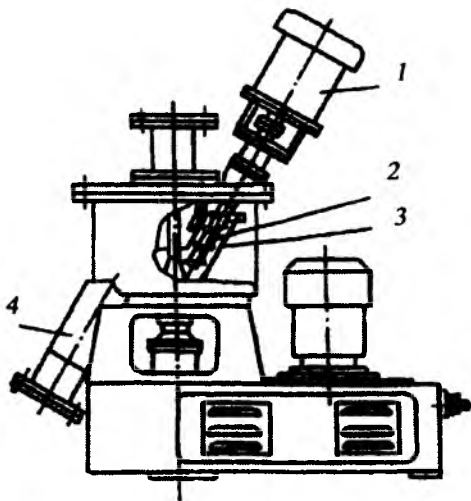


Рис. 2.2.19. Схема смесителя типа НДЦ

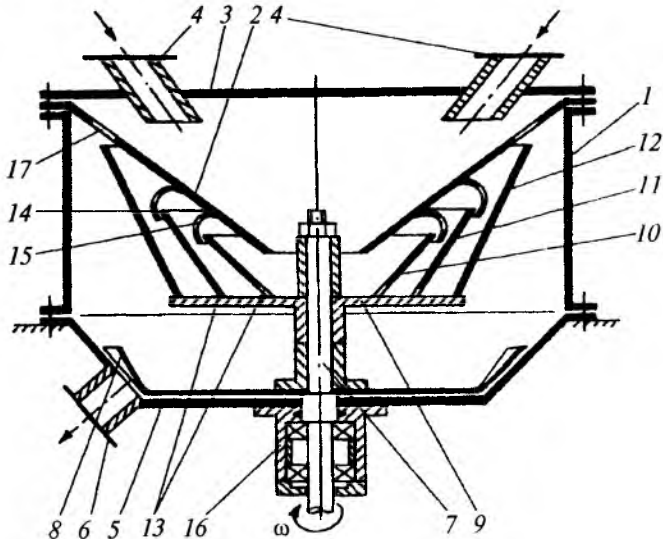


Рис. 2.2.20. Схема центробежного смесителя непрерывного действия с внешней и внутренней циркуляцией потоков смешиваемых материалов

на сползающий по ней сыпучий материал. Так образуется контур внешнего рецикла. Смесь, сыпавшаяся на днище 5, выводится из корпуса смесителя через патрубок 6 с помощью радиальной лопастной мешалки 7.

В вибрационном смесителе непрерывного действия, разработанном этим же институтом, поступающие на смешивание компоненты попадают на вибрирующий от вибратора 3 лоток 2 с отверстиями (рис. 2.2.21). Через эти отверстия смешиваемый материал опускается вниз, к выходному патрубку корпуса 1. Часть частиц, не прошедшая через отверстия на витках лотка, поднимается лотком вверх, обеспечивая продольное смешивание и достаточно высокое качество смеси при невысокой точности подачи компонентов смеси дозаторами. Величина рециркуляции материала может регулироваться с помощью пластины, перекрывающей часть отверстий в лотке. Корпус смесителя и вибратор смонтированы на раме 4.

В двухспиральном смесителе непрерывного действия, по конструкции аналогичном односпиральному прямоточному смесителю, в корпусе установлены две цилиндрические винтовые спирали: одна большого диаметра, а другая соосно малого диаметра. Их изготавливают из стальной или бронзовой пружинной проволоки. Спирали имеют противоположную навивку витков. Спираль большого диаметра

осуществляет транспортировку и смешивание компонентов. Направление ее вращения назначается таким образом, чтобы смешиваемый материал перемещался от загрузочного патрубка к зоне выгрузки из корпуса. Спираль малого диаметра может вращаться либо в том же направлении, что и спираль большого диаметра, либо в противоположном. В обоих случаях, имея значительно меньшую транспортирующую производительность, малая спираль

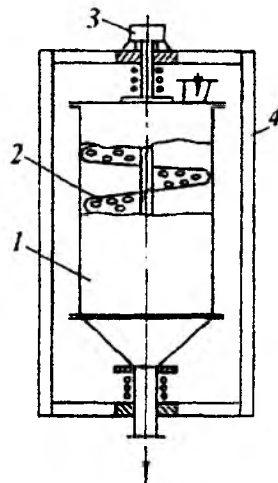


Рис. 2.2.21. Схема вибрационного смесителя непрерывного действия



обеспечивает продольное перемешивание частиц сыпучего материала. Это позволяет комплектовать такие смесители объемными дозаторами пониженной точности.

Математическая модель процесса смешивания в двухспиральных смесителях непрерывного действия приводится в [14].

*Барабанные смесители непрерывного действия* характеризуются простотой конструкции и универсальностью: в них можно одновременно с процессом смешивания проводить сушку, прокаливание, пропитку жидкими компонентами, химические реакции, гранулирование.

Основным рабочим органом таких смесителей является полый вращающийся барабан (корпус) цилиндрической или цилиндроконической формы. В некоторых конструкциях этих смесителей барабан имеет на концах цапфы, которые входят в подшипниковые опоры. Одна цапфа соединена с приводом, состоящим из электродвигателя, редуктора и клиноременной передачи.

Для поддержания необходимого уровня материала внутри барабана (при рекомендуемом коэффициенте заполнения барабана  $\psi = 0,1 \dots 0,3$ ) в его конце вварено подпорное кольцо, через которое смесь попадает в разгрузочную камеру смесителя. Внутри барабана, ось которого имеет небольшой наклон к горизонтали в сторону выгрузки (примерно  $4^\circ$ ), монтируют насадку из спиральных лент и продольно расположенных планок. При вращении барабана насадка и его уклон к горизонтали обеспечивают продольное и поперечное смешивание компонентов, поступающих внутрь смесителя непрерывно или порционно.

В некоторых конструкциях барабанных смесителей внутри нижней части барабана установлен шнек или лопастной вал, вращающийся от индивидуального привода и выполняющий ту же функцию, что и винтовая насадка.

Барабанные смесители непрерывного действия Уральского завода тяжелого машиностроения имеют техническую характеристику, приведенную в табл. 2.2.5 [20].

*Смесители объемного смешивания* – смесители, у которых поступающие сыпучие компоненты рабочими органами разносятся хаотически по всему рабочему объему. Часто их образуют путем последовательного соединения нескольких (двух, трех) смесителей периодического действия объемного смешивания. Среди смесителей этой группы наибольшее распространение получили пневмосмесители с псевдооживленными слоями сыпучего материала. Непрерывно или порционно поступающие компоненты смеси путем подачи газа через пористое днище находятся в псевдооживленном состоянии. Непрерывный отбор смеси производится через штуцер, находящийся вдали от входного штуцера, с верхнего слоя.

Недостатками пневмосмесителей с псевдооживленными слоями являются: необходимость установки улавливающих устройств на выходе из корпуса (циклонов, рукавных фильтров, ротационных пылеуловителей и др.); низкое качество смеси ( $V_c = 4 \dots 5\%$ ), возможность сегрегации частиц по массе; истирание недостаточно прочных частиц; значительная механическая эрозия внутренних поверхностей аппарата.

К преимуществам этих аппаратов следует отнести простоту конструкции (без движущихся конструктивных элементов), низкие удельные энергозатраты.

Скорость подачи газа в псевдооживленный слой должна обеспечить однородность псевдооживления, что соответствует значению критерия Фруда  $Fr = w^2 / (gd_r) < 0,13$ , где  $w$  и  $d_r$  – соответственно скорость газа и диаметр частиц [2]. Следует отметить, что такие смесители серийно не выпускаются.

### 2.2.5. Техническая характеристика барабанных смесителей непрерывного действия

Тип смесителя	Диаметр барабана, м	Длина барабана, м	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Коэффициент заполнения $\psi$	Установочная мощность, кВт		Производительность, т/ч
					привода барабана	шнека	
СНД 2,5 × 5	2,5	5	8	0,1	40	–	270
СНД 2,8 × 6	2,8	6	4,3...8,7	0,06...0,1	35...70	28	135...270

## 2.2.3. ДОЗАТОРЫ, ПИТАТЕЛИ

**Дозатором** является устройство, обеспечивающее отмеривание или отвешивание определенного количества (дозы) материала и перемещение этой дозы к рабочим органам машины или аппарата, выполняющим технологические операции (смещение, упаковку, затаривание и др.). Дозирование материалов осуществляется с помощью механических и автоматических устройств, которые широко используются в периодических и непрерывных технологических процессах. Величиной, характеризующей процесс дозирования, является расход дозируемого материала (объемный или массовый).

Дозатор, используемый в качестве устройства для равномерной подачи материала к транспортирующим или смесительным устройствам, обычно называют питателем.

Одна из наиболее важных характеристик дозировочных устройств – точность дозирования – подача дозируемого материала в соответствии с заданной регламентацией отклонения весовой производительности.

**Классификация дозировочных устройств.** До настоящего времени не существует регламентированной классификации дозировочных устройств. Наиболее общей и практически применимой можно считать следующую классификацию дозаторов [13]:

в соответствии со структурой технологического процесса – дискретного, непрерывного и непрерывно-циклического действия;

по принципу работы – объемного и весового дозирования;

по конструктивным признакам.

Классификация по конструктивным признакам является наиболее обширной и подразделяет дозировочные устройства в зависимости от типа привода, расположения дозировочных емкостей, вида движения рабочих органов, их типа и т.д. Наиболее существенной в этом случае является классификация дозаторов по виду движения и типу рабочих органов дозировочных устройств:

без движущегося рабочего органа – гравитационные, пневматические;

с поступательным движением – ленточные, пластинчатые;

с вращательным движением – шлюзовые, лопастные, червячные, тарельчатые, дисковые, роторные, трубчатые;

с возвратно-поступательным движением – плунжерные, маятниковые;

с колебательным движением – вибрационные.

**Особенности конструктивного исполнения питателей и дозаторов.** *Дозаторы без движущегося рабочего органа* – гравитационные и аэрационные. Гравитационные питатели наиболее простые в конструктивном исполнении и наименее энергоемкие. Типичный такой дозатор предназначен для загрузки сыпучих материалов в герметические емкости (рис. 2.2.22). Он состоит из герметического бункера 1, соединенного шлюфоном 2 через кольцевое уплотнение 3 с загрузочной емкостью 4. Для обеспечения герметичности соединения предусмотрено подключение кольцевого уплотнения к вакуум-наосу через патрубок 5. Прекращение цикла дозирования осуществляется затвором 6.

Основной недостаток дозаторов (питателей) гравитационного типа – ограниченная возможность регулирования расхода сыпучего материала с одновременным обеспечением заданной точности.

Типы аэрационных дозаторов (питателей) приведены на рис. 2.2.23. Специальными элементами конструкций являются аэроднище 2, труба с отверстиями 3, пневмоподушка 4 и пневматическое сопло 5.

К дозаторам с вращающимся рабочим органом относятся шлюзовой, дисковый и трубчатый питатели. Наиболее распространенным является шлюзовой питатель (рис. 2.2.24), состоящий из корпуса 1 с загрузочным и разгрузочным штуцерами, ротора 2 с ячейками и привода 3.

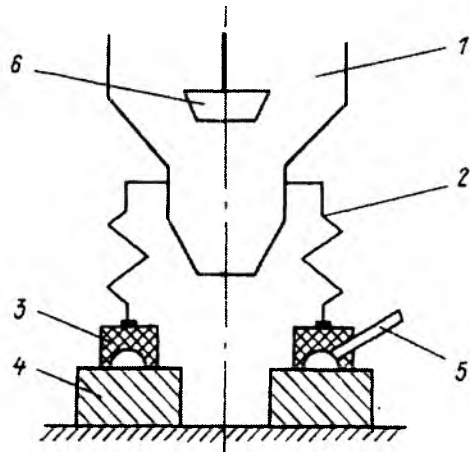


Рис. 2.2.22. Схема дозатора для загрузки сыпучих материалов

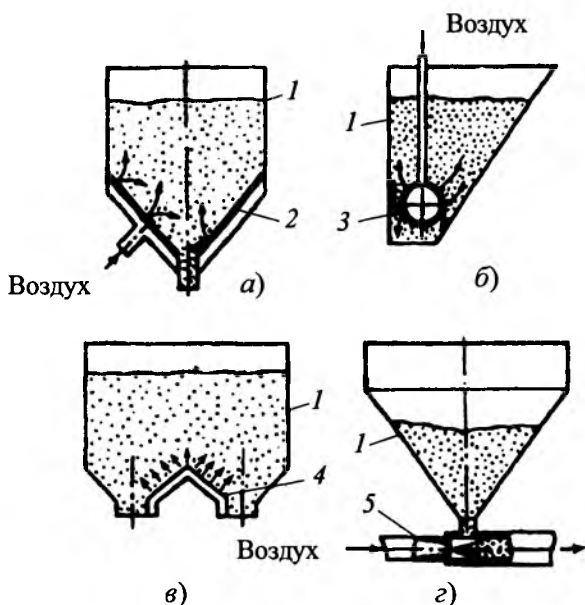


Рис. 2.2.23. Схемы азрационных питателей:  
 а – с аэроднищем; б – с трубой с отверстиями; в – с пневмоподушкой; г – с соплом;  
 1 – бункер; 2 – аэроднище; 3 – труба с отверстиями; 4 – пневмоподушка; 5 – сопло

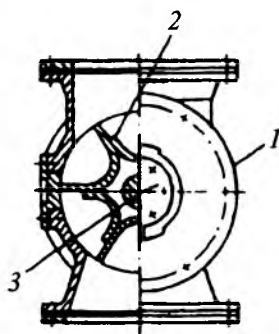


Рис. 2.2.24. Шлюзовый (ротаторный) питатель

Дисковый питатель состоит из вращающегося диска 1, мерных цилиндров 2 и бункера 3 (рис. 2.2.25). В неподвижном столе 4 имеется направляющая воронка 5, через которую осуществляется загрузка порций материала, сформированных в объеме мерных цилиндров 2.

На рис. 2.2.26 представлена схема трубчатого питателя, применяемого для дозирования хорошо сыпучего материала. Питатель снабжен электродвигателем 1 с редуктором 2, обеспечивающим за счет цепной передачи 3 вращение транспортирующей трубы 4. В бункере 5 установлен ворошитель 6. Диаметр транспортирующей трубы такого питателя 0,04...0,1 м.

*Дозатор с поступательным движением рабочего органа* – весовой дозатор непрерывного действия.

Дозируемый материал через выпускное отверстие бункера 1 по ленте питателя 2 подается на весоизмеритель 4 с датчиком 6 (рис. 2.2.27). Лента питателя движется с постоянной скоростью, обеспечивая постоянное количество контролируемого материала при установившемся режиме работы питателя 2. Сигнал с выхода датчика 6 подается на элемент сравнения 7 для сравнения с сигналом задатчика 5.

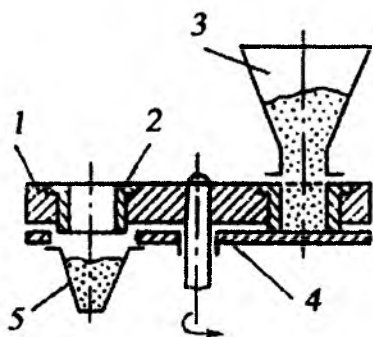


Рис. 2.2.25. Схема дискового питателя с мерными цилиндрами

Сигнал отклонения, пропорциональный отклонению фактической производительности от заданной, вырабатываемый элементом сравнения 7 как разность сигналов задатчика 5 и сигнала датчика 6, поступает в регулятор 8, вырабатывающий сигнал управления. Этот сигнал подается в сумматор 9, в который также поступает сигнал от измерителя 3 отклонения плотности, что является основой выработки корректирующего сигнала.

Скорректированный сигнал управления по плотности материала на выходе питателя 2 снимается с выхода сумматора 9 и подается через усилитель 10 на вход привода питателя 11, изменяющего скорость движения ленты до момента устранения разности сигналов задатчика 5 и датчика 6 силоизмерителя.

Для случаев с пониженными требованиями к стабильности подаваемого потока (при загрузке емкостей, бункеров-накопителей и т.д.) используются ленточные конвейеры.

*Вибрационные дозаторы* имеют невысокую металлоемкость, а их удельные энергозатраты практически не зависят от производительности. Конструкции вибрационных дозаторов просты и надежны, отличаются небольшими габаритными размерами и отсутствием вращающихся частей.

Наиболее распространенными являются вибрационные дозаторы с активатором (рис. 2.2.28). К корпусу 1 на упругих резиновых амортизаторах 9 при помощи подвесок 8 прикреплено виброднище 7 с активатором 6. Обечайки корпуса и виброднища соединены с эластичным рукавом 4. На несущем фланце виброднища установлен регулируемый вибратор 5, вал которого приводится во вращение от электродвигателя 2 через эластичную муфту 3. Регулировка производительности осуществляется изменением угла развода дебалансов вибратора.

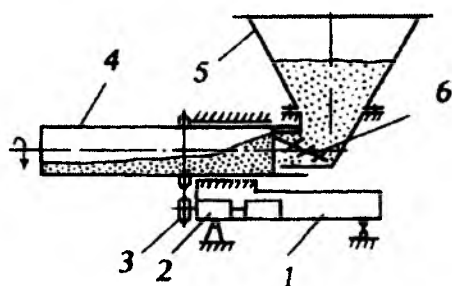


Рис. 2.2.26. Схема трубчатого питателя с неподвижным бункером

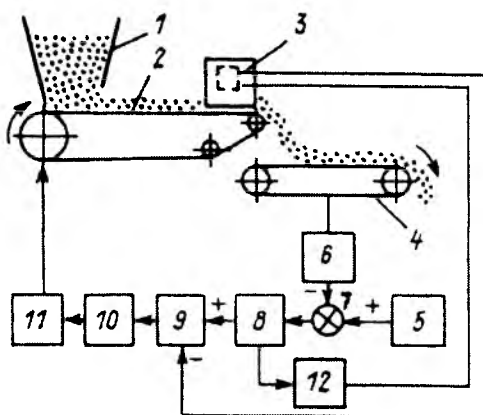


Рис. 2.2.27. Функциональная схема весового дозатора

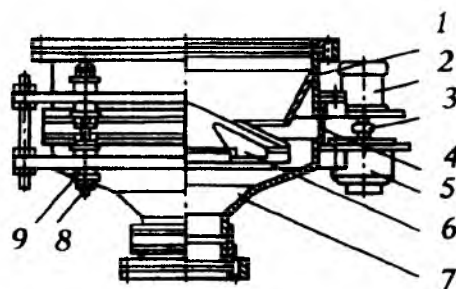


Рис. 2.2.28. Вибрационный дозатор с активатором

При дозировании связных сыпучих материалов, обладающих ограниченной газопроницаемостью, под слоем (в зоне выпуска) возникает разрежение с наступлением неустойчивого режима работы дозатора. Для устранения

этого недостатка используют различные усреднители потока материала в зоне выпуска. На рис. 2.2.29 представлена схема дозатора, содержащая неподвижно установленную под бункером 1 дозирочную камеру с ферромагнитными телами 2 и сеткой 4 в нижней части. Выпуск материала осуществляется за счет колебательного движения этих тел в переменном магнитном поле индукционной катушки 3.

*Многокомпонентные дозирочные устройства.* Во многих технологических процессах возникает необходимость дозирования нескольких сыпучих компонентов одновременно. При этом возможно предварительное смешение исходных компонентов в процессе движения к основному технологическому аппарату либо непосредственное дозирование продуктов в зону контактирования.

Первый вариант используется в том случае, когда получаемая смесь сыпучих продуктов содержит все необходимые компоненты готового продукта (сложные минеральные удобрения, формовочные смеси, адсорбенты, теплоносители и т.д.). Один из вариантов гравитационного устройства для дозирования по такой схеме представлен на рис. 2.2.30. В верхней части устройства расположены загрузочные воронки 1, в которые поступают дозируемые компоненты  $g_i(t)$  из дозирочных устройств (не показаны). Потоки компонентов  $g_i(t)$  смешиваются за счет гравитационного пересыпания на наклонных полках 2 и конусных вставках 3.

Стабильность потоков обеспечивается соотношением геометрических параметров вы-

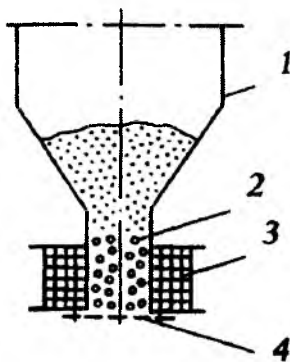


Рис. 2.2.29. Схема электромагнитного устройства для дозирования сыпучих материалов

пускных воронок, зависящих от физико-математических характеристик дозируемых материалов.

Типичными для такой схемы дозирования являются дозирочные установки типа Р1, разработанные на Украине и предназначенные для дозирования и распределения суперконцентрата красителей в гранулированном термопласте (полиэтилене, полипропилене и др.) и подачи смеси в литьевые машины. Они используются при переработке термопластов в различных отраслях промышленности и могут работать в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. Принцип дозирования основан на получении заданной порции материала с помощью объемных дозаторов. Цикл каждого дозатора выдерживается по реле времени в зависимости от величины дозы, заданной технологическим регламентом.

Установка (рис. 2.2.31) включает бункер 2 распределителя, внутри которого смонтирована мешалка 1. На крышке бункера установлены два роторных дозатора 4 для суперконцентрата красителей, дозатор 12 для термопласта и привод с электродвигателем и червячным редуктором 3. Регулирование работы установки осуществляется с пульта управления.

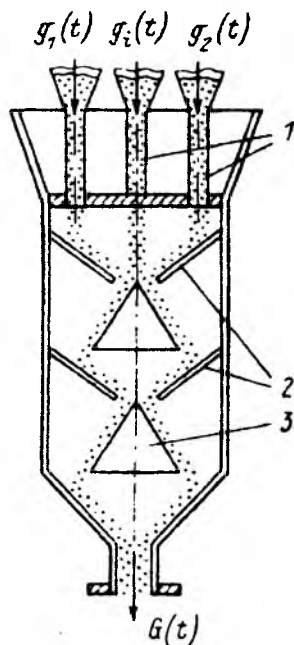


Рис. 2.2.30. Схема гравитационной дозирочно-смесительной установки

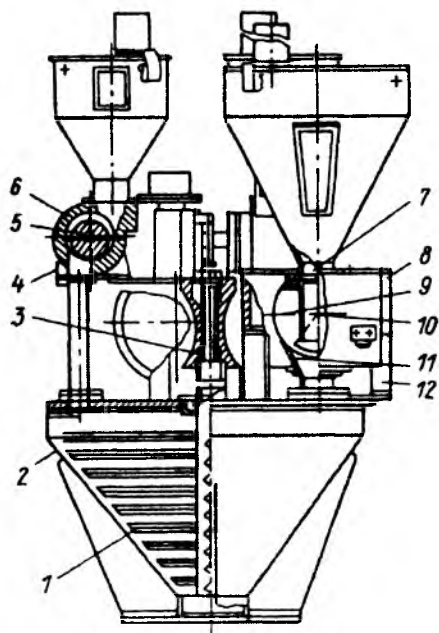


Рис. 2.2.31. Дозировочная установка P1

Внутри корпуса 8 дозатора в камере 9 на валу 10 закреплена заслонка 11, управляемая электромагнитами 7. Роторный дозатор состоит из ротора 5 с ячейками, корпуса 6 и электродвигателя. Ротор смонтирован эксцентрично относительно корпуса. По условиям эксплуатации установка выполнена в коррозионно-стойком исполнении. Материал деталей, соприкасающихся с продуктом, — сталь 08Х13.

Техническая характеристика типоразмерного ряда представлена в табл. 2.2.6.

Дозирование непосредственно в зону контактирования используется в том случае, когда дозируемые компоненты являются до-

бавками к основному продукту, перерабатываемому в технологическом объеме.

При этом выбор дозаторов для формирования потоков  $g_i(t)$  определяется свойствами дозируемых материалов и технологическими требованиями производства.

**Рекомендации по выбору дозировочного оборудования.** Довольно часто выбор дозировочного оборудования осуществляется на основе опыта проектировщиков или результатов сравнительных испытаний моделей на заданных продуктах. В первом случае возможны грубые ошибки, приводящие к ухудшению качества продукции, увеличению сроков освоения и снижению проектной мощности основного технологического оборудования; во втором случае испытания моделей весьма трудоемки и могут быть проведены только в специализированных лабораториях.

При выборе дозаторов сыпучих материалов химической промышленности необходимо учитывать:

- 1) комплексные показатели, отражающие влияние физико-механических характеристик сыпучих материалов на процесс дозирования;
- 2) технологические требования к процессу дозирования;
- 3) условия эксплуатации оборудования;
- 4) технико-экономические показатели.

Исполнение дозатора зависит от условий эксплуатации и особых свойств сыпучего материала:

- 1) для токсичных веществ и при дозировании в аппарат с давлением, отличным от атмосферного, — герметичное;
- 2) для взрывоопасных и способных накапливать статическое электричество — взрывозащищенное и т. д.

### 2.2.6. Техническая характеристика установок P1

Типоразмер установки	Объем распределителя, м <sup>3</sup>	Расчетная производительность, м <sup>3</sup>	Частота вращения мешалки, мин <sup>-1</sup>	Расчетная производительность, м <sup>3</sup> /ч		Суммарная мощность привода, кВт, не более
				роторного дозатора	дозатора термопласта	
P1-3-04K-01	$4 \cdot 10^{-3}$	0,1...0,3	75	$5 \cdot 10^{-3}$	1,8	0,17
P1-3-16K-01	$16 \cdot 10^{-3}$	0,1...0,3	46	$5 \cdot 10^{-3}$	1,8	0,42
P1-3-63K-01	$63 \cdot 10^{-3}$	0,3...0,6	70	$1 \cdot 10^{-2}$	1,3	1,5

Примечание. В условном обозначении дозировочной установки P1 обозначает ее тип (дозировочная с распределителем), а К — коррозионно-стойкое исполнение.

Основными показателями, определяющими эффективность использования дозаторов, являются: производительность, диапазон ее регулирования, погрешность дозирования, равномерность подачи.

Наиболее эффективный вариант применения дозирочного оборудования определяется подсчетом суммы баллов по представленной карте выбора [13]. Целесообразность использования оборудования для тех или иных условий эксплуатации оценивается следующим образом: 5 – рекомендуется к применению; 3 – применение допустимо; 0 – не рекомендуется.

При одинаковой сумме баллов выбор оборудования осуществляется на основании сравнения технико-экономических показателей.

#### 2.2.4. БУНКЕРА И ЗАТВОРЫ

**Бункера.** При расчете и конструировании бункерного устройства можно выделить следующие этапы:

1) задание технических требований к бункеру, как к звену в технологическом процессе (объем, ориентировочные геометрические размеры, значение массового расхода сыпучего материала, максимальная длительность хранения и т.д.);

2) определение физико-механических характеристик сыпучего материала;

3) выбор формы бункера, определение угла наклона стенок, размера и формы выпускного отверстия в зависимости от физико-механических характеристик сыпучего материала и материала стенок бункера, оценка ожидаемого массового расхода;

4) прочностной расчет бункера;

5) определение необходимости применения побудителя истечения, обоснование его типа и энергетических возможностей.

Содержание первого этапа определяется конкретными условиями производства. Решение последующих этапов составляет задачи методов расчета бункерного оборудования [11].

**Типы бункеров.** Установлено, что в зависимости от свойств сыпучего материала, а также формы и размеров емкости возникают различные виды движения сыпучего материала (рис. 2.2.32). Первой формой истечения – истечения с трубообразованием (funnel flow) называется образование над выпускным отверстием узкой зоны движения, вокруг которой сыпучий материал неподвижен. Второй формой истечения (mass flow) называют процесс, когда сыпучий материал образует область малоподвижного или полностью неподвижного материала только в нижней зоне аппарата. Между указанными предельными состояниями возникают промежуточные, которые могут существовать длительное время. Вследствие этого многочисленные экспериментальные данные по исследованию движущегося слоя сыпучего материала достаточно разноречивы.

Возникновение той или иной формы движения материала непосредственно связано с напряженным состоянием в емкости перед выпуском сыпучей среды. Первая форма движения возникает в начальный период выпуска из плотного зернистого слоя, а возникновению второй способствует разрыхление слоя, например при длительном выпуске материала в условиях его рециркуляции.

Верхняя часть бункера обычно представляет призму или цилиндр, а нижняя – сужающуюся воронку в виде конуса, призмы или полусферы (рис. 2.2.33). На практике встречаются бункера без верхней цилиндрической части (2.2.33,  $\delta - \varepsilon$ ), которые отличаются небольшой глубиной и незначительным объемом.

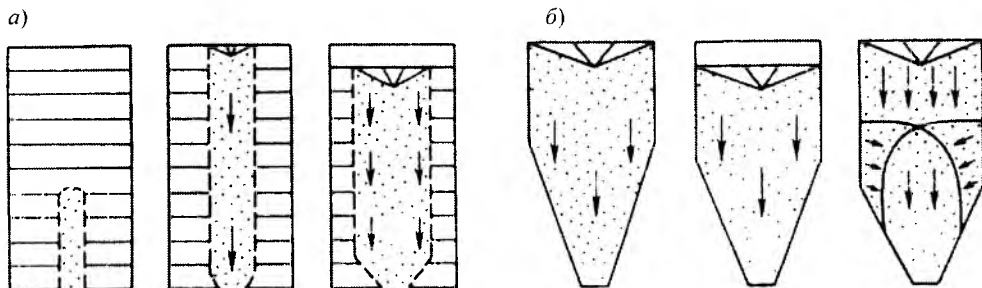


Рис. 2.2.32. Формы движения сыпучего материала в бункере:  
а – истечение с трубообразованием; б – массовое истечение

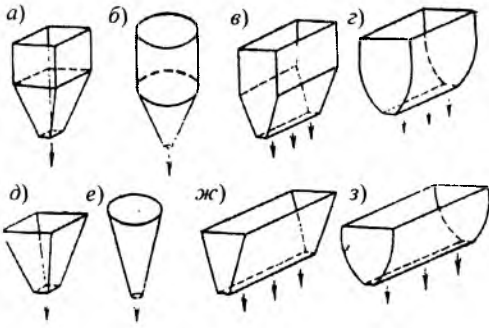


Рис. 2.2.33. Типичные формы бункеров

Минимальный размер выпускного отверстия для обеспечения устойчивого истечения оценивается по формуле Р.Л. Зенкова [26].

$$A = \frac{2\tau_0(1 + \sin \varphi_{вн})}{\rho_n g}$$

где  $\tau_0$  – начальное сопротивление сдвигу.

**Затворы.** Выпускные отверстия бункеров перекрывают затворами для частичного или полного прекращения истечения материала при гравитационном опорожнении бункеров.

Затвор должен быстро открываться и закрываться (четкость отсечки) при наименьших усилиях, не должно происходить его самооткрывание. Открывание выпускного отверстия с помощью затвора должно свободно регулироваться, а следовательно, регулироваться и интенсивность потока. Затвор должен быть рассчитан на максимальную нагрузку, быть надежным в эксплуатации и обеспечивать удобное обслуживание.

Наибольшее распространение получили плоские (шиберные), секторные и клапанные затворы (рис. 2.2.34). Шиберные затворы применяются для хорошо сыпучих материалов (порошкообразных и мелкокусковых), секторные – при работе с молотыми и мелкокусковыми материалами, клапанные (наиболее простые) – для бункеров небольшой емкости с выпускными отверстиями малых размеров.

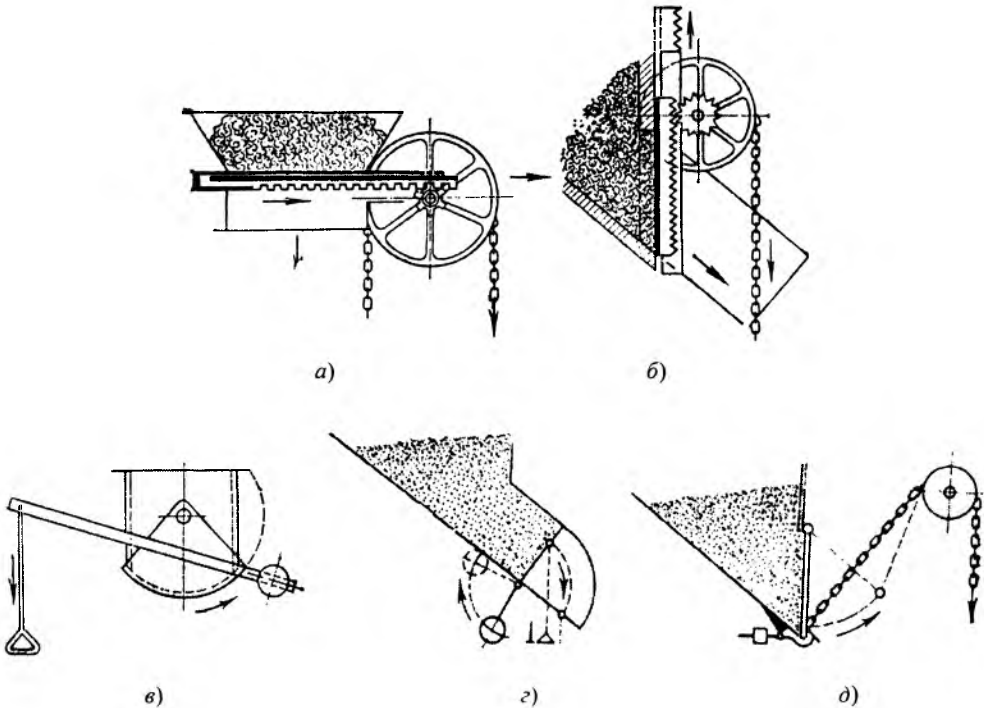


Рис. 2.2.34. Затворы:

а, б – плоские (шиберные) соответственно горизонтальный и вертикальный;  
в – одинарный секторный; г, д – клапанные соответственно откидной и прижимной



## Глава 2.3

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

## 2.3.1. ПРОЦЕСС КЛАССИФИКАЦИИ, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Под *классификацией смеси частиц* по некоторому признаку в широком смысле слова понимается процесс разделения смеси на две или более частей с существенно различным содержанием этого признака. Признаком классификации может быть крупность частиц, их плотность, форма, диэлектрические и магнитные свойства и пр.

В механических процессах химического производства признаком классификации является в основном разделение частиц по их крупности. При классификации по крупности исходный массопоток сыпучего материала  $B_1$  с гранулометрическим составом  $f_1(x)$ , где  $x$  – размер частиц, разделяется на массопотоки мелкого  $B_3$  и крупного  $B_2$  продуктов с гранулометрическими составами соответственно  $f_3(x)$  и  $f_2(x)$  (рис. 2.3.1). При этом, в виду погрешности разделения часть мелких частиц может попасть в крупный продукт, а часть крупных – в мелкий. Размер фракции, частицы которой поровну распределяются между крупным и мелким продуктом, называется *границным размером классификации*  $x_c$ .

Наиболее информативной характеристикой процесса классификации является кривая разделения  $C(x)$  (рис. 2.3.2, а), связывающая степень извлечения  $C(x)$  узкого класса  $[x, x + dx]$  в один из продуктов (обычно в мелкий) с его размером  $x$ . По кривой разделения могут быть определены гранулометрические составы продуктов разделения, отнесенные к единице массы исходного материала, и полные выходы этих продуктов  $\varphi_3$  и  $\varphi_2$ :

$$f_3(x) = C(x) f_1(x); \quad f_2(x) = (1 - C(x)) f_1(x);$$

$$\varphi_3 = \int_0^{\infty} C(x) f_1(x) dx; \quad \varphi_2 = 1 - \varphi_3.$$

Для получения нормированных гранулометрических составов необходимо разделить  $f_3(x)$  и  $f_2(x)$  соответственно на  $\varphi_3$  и  $\varphi_2$ .

При идеальной классификации все частицы мельче  $x_c$  попадают в мелкий продукт, а все частицы крупнее  $x_c$  – в крупный. Кривая разделения идеального классификатора показана на рис. 2.3.2, а штриховой линией. Наиболее распространенным критерием степени отклонения реальной кривой разделения от идеальной является *острота разделения*

$$K_{75/25} = x_{75} / x_{25},$$

где  $x_{75}$  и  $x_{25}$  – размеры узких фракций, направляемых в мелкий продукт соответственно на 75 и 25 % (иногда используют другие значения процентов, например, 80 и 20 %).

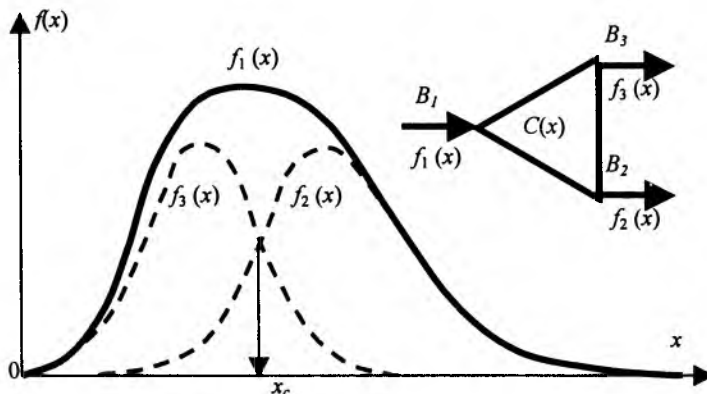


Рис. 2.3.1. Гранулометрические составы исходного  $f_1(x)$ , крупного  $f_2(x)$  и мелкого  $f_3(x)$  продуктов

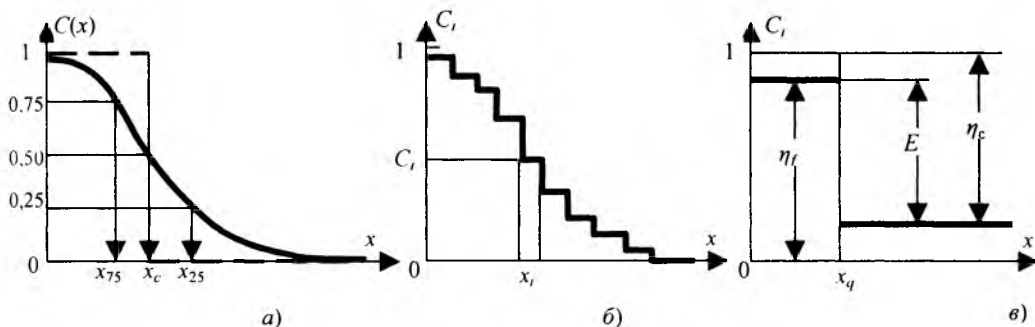


Рис.2.3.2. Кривые разделения при непрерывном (а), дискретном (б) и бинарном (в) представлении granulометрического состава

В практической работе чаще оперируют не непрерывной плотностью распределения частиц по размерам  $f(x)$ , а массовым содержанием фракций конечной (иногда большой) ширины со средними размерами  $x_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  – число наблюдаемых фракций,  $i = 1$  соответствует самой крупной фракции, а  $i = m$  – самой мелкой. При таком подходе granulометрический состав представлен набором чисел  $f_1, f_2, \dots, f_m$ , а кривая разделения становится ступенчатой (рис. 2.3.2, б). В этом случае granulометрические составы удобно представить векторами-столбцами, а кривую разделения – диагональной матрицей классификации:

$$f = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{Bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & C_m \end{bmatrix}$$

Тогда преобразование granulометрического состава при классификации может быть описано матричными равенствами:

$$f_3 = C f_1, \quad f_2 = (I - C) f_1,$$

$$\Phi_3 = \text{sum}(f_3), \quad \Phi_2 = 1 - \Phi_3,$$

где  $I$  – единичная матрица; **sum** – операция суммирования всех элементов вектора.

Матричное представление процесса особенно удобно при применении современных средств компьютерной поддержки инженерных расчетов и расчете каскадов классификаторов.

В промышленных условиях часто контролируют процесс всего по одному контрольному размеру  $x_q$ , обычно разному в разных

отраслях. В этом случае материал представлен бинарной смесью крупной и мелкой фракций, а кривая разделения приобретает вид, показанный на рис. 2.3.2, в. Два значения кривой разделения непосредственно связаны с критериями его эффективности:  $\eta_f = C_2$  – степень извлечения мелких (по отношению к  $x_q$ ) частиц в мелкий продукт,  $\eta_c = 1 - C_1$  – степень извлечения крупных частиц в крупный продукт. Разность  $C_2 - C_1 = \eta_f + \eta_c - 1 = E$  называется критерием Луйкена – Ханкока. При идеальной классификации  $\eta_f = C_2 = 1$ ,  $C_1 = 0$ ,  $\eta_c = 1$ ,  $E = 1$ .

В последнее время для повышения эффективности разделения и достижения других технологических целей все чаще используют каскады классификаторов – совокупность разделительных аппаратов, тем или иным образом связанных между собой массопотоками материала. Для расчета разделения в каскаде при известных кривых разделения (матрица классификации) отдельных аппаратов необходимо составить матрицу каскада  $C_k$ , процедура построения которой показана на примере каскада, представленного на рис. 2.3.3. При таком последовательном соединении трех классификаторов крупный продукт из классификатора 3 направляется на вход классификатора 2, а крупный продукт из классификатора 2 – на

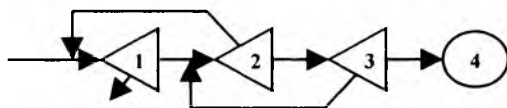


Рис. 2.3.3. Схема расчета разделения в каскаде классификаторов

вход классификатора 1. Мелкий продукт всего каскада выходит из классификатора 3, а крупный – из классификатора 1.

На выходе продукта, гранулометрический состав которого является целью расчета, следует дополнительно разместить коллектор частиц (их может быть несколько) и пронумеровать все аппараты каскада, включая коллектор. Матрица каскада – квадратная блочная матрица размером, равным числу аппаратов в каскаде. Ее элементами являются матрицы. На главной ее диагонали следует расположить со знаком минус единичные матрицы такого же

размера, что и матрицы классификации отдельных аппаратов. Каждый столбец матрицы принадлежит пронумерованному аппарату. В нем следует расположить матрицу классификации  $C$  этого аппарата в строке с номером аппарата, в который из него подается мелкий продукт разделения, и матрицу  $I - C$  в строке с номером аппарата, в который из него подается крупный продукт. Все остальные элементы – нулевые матрицы такого же размера, как и остальные. Построенная таким образом матрица каскада входит в матричное уравнение

$$F_1 = C_k F_0,$$

или

$$\begin{Bmatrix} f_1^{(1)} \\ f_1^{(2)} \\ f_1^{(3)} \\ f_1^{(4)} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} -I & I - C^{(2)} & 0 & 0 \\ C^{(1)} & -I & I - C^{(3)} & 0 \\ 0 & C^{(2)} & -I & 0 \\ 0 & 0 & C^{(3)} & -I \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} f_1^{(1)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.3.1)$$

где  $F_1$  – блочный вектор-столбец, состоящий из последовательно расположенных друг под другом векторов  $f_1$  гранулометрического состава материала на входе в каждый из аппаратов каскада;  $F_0$  – блочный вектор-столбец, состоящий из последовательно расположенных друг под другом векторов  $f_0$  гранулометрического состава исходного материала, подаваемого в каскад (в данном каскаде материал подается только в первый аппарат и во всех остальных строках расположены нулевые векторы такого же размера, как и  $f_0$ ); верхний индекс «-1» означает обращение матрицы  $C_k$ .

Выполняя действия, предусмотренные (2.3.1), можно рассчитать все гранулометрические составы материала в различных точках каскада, в том числе вектор  $f_1^{(4)}$ , описывающий гранулометрический состав на выходе из каскада.

Несмотря на разнообразие признаков классификации и принципов действия отдельных типов классификаторов, в основе их работы лежит выявление и использование альтер-

нативных сил, по крайней мере одна из которых достаточно сильно зависит от того свойства частиц, по которому осуществляется классификация (например, от размера частицы).

Различают классификаторы непрерывного и периодического действия. Наиболее распространены первые; вторые в основном используются в лабораторных исследованиях и при дисперсном анализе сыпучих материалов.

По размерности процесса классификации аппараты делятся на поверхностные, объемные и комбинированные. В поверхностных аппаратах собственно классификация происходит при достижении частицей некоторой контрольной поверхности, например, поверхности сита. В объемных аппаратах разделение частиц реализуется в некотором объеме, называемом зоной разделения, за счет организации в ней силовых воздействий на частицы. В комбинированных аппаратах разделение в объеме дополняется разделением на поверхности, ограничивающей зону разделения.

По способу транспортирования сыпучей среды вдоль разделяющей поверхности или в объеме зоны разделения различают механические, пневматические и гидравлические классификаторы.

2.3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

**Грохочением** называется процесс механической классификации частиц по крупности просеиванием их через колосники или решетки, установленные неподвижно или совершающие колебательное движение. Грохоты относятся к аппаратам поверхностного типа непрерывного действия. В качестве рабочей классифицирующей поверхности используют проволочные или резиновые сита (из струн или отдельных литых секций), стальные листы – решета со сверленными или штампованными отверстиями либо колосниковые решетки с параллельным или веерообразным расположением колосников. Примеры тканых из проволоки и штампованных сит показаны на рис. 2.3.4.

В процессах грохочения мелкие частицы материала размером меньше размера  $w$  ячейки сита обычно называют подрешетным продуктом или нижним классом, большего размера – надрешетным продуктом или верхним классом. Классификация происходит путем многократного случайного сравнения размера каждой частицы  $x$  с размером ячейки сита  $w$  (рис. 2.3.5). Особое место занимают частицы размером, близким к размеру ячейки сита  $x \approx w$ , называемые «трудными». Поскольку обычно частицы имеют неправильную форму, трудные частицы проходят сквозь сито только после многократных попыток, а чаще заклиниваются в нем, вследствие чего сито требует периодической очистки. Заклинившиеся в отверстиях трудные частицы снижают эффективную площадь поверхности сита, а следовательно, эффективность классификации (грохочения). Особенно сильно она снижается при грохочении влажных и липких материалов, замазывающих поверхность грохота, а также материалов с существенно неправильной формой частиц.

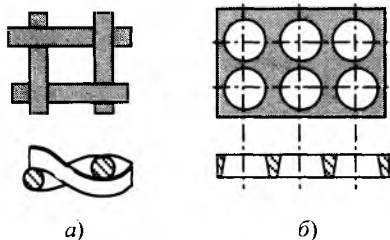


Рис. 2.3.4. Схемы тканого из проволоки (а) и штампованного (б) сит

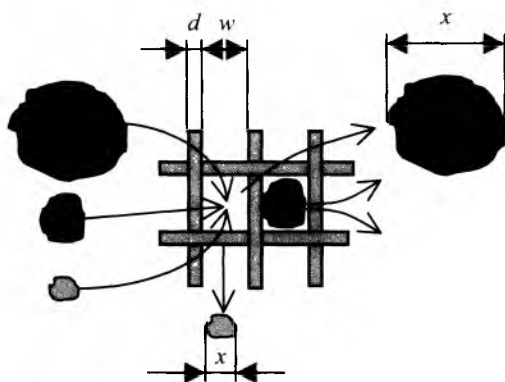


Рис. 2.3.5. Схема взаимодействия частиц различной крупности с ячейкой сита

При расчете эффективности классификации редко оценивают выход разных более или менее узких фракций материала, а материал представляют бинарной смесью надрешетной ( $x > w$ ) и подрешетной ( $x < w$ ) фракций. Интегральной характеристикой эффективности классификации является степень извлечения подрешетной фракции в подрешетный (мелкий) продукт классификации:

$$\epsilon = \frac{\Phi_3}{f_2^{(1)}} = \frac{\Phi_3}{1 - R_1(w)} = \eta_f$$

где  $\eta_f = C_2$  (см. рис. 2.3.2, в). При исправном (не порванном) сите  $C_1 = 0$  и  $\eta_c = 1$ .

При расчете пропускной способности одного отверстия сита считается, что отношение высоты  $H$  арки материала над отверстием к размеру отверстия не зависит от последнего, т.е.  $H \propto w$  (рис. 2.3.6). Тогда скорость прохождения частицы через отверстие равна скорости ее свободного падения на уровне плоскости сита

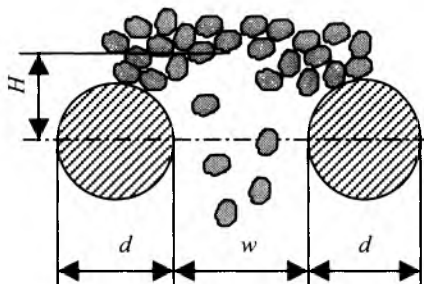


Рис. 2.3.6. Схема расчета удельной пропускной способности ячейки сита

та  $v = \sqrt{2gH}$ , или  $v \propto \sqrt{gw}$ , а поток объема материала через отверстие  $q_w = w^2v$  или  $q_w \propto g^{1/2}w^{5/2}$ . Поскольку число отверстий на единицу площади обратно пропорционально размеру отверстия в квадрате, удельная (на единицу площади поверхности сита) объемная пропускная способность сита  $q_S \propto \sqrt{gw}$ .

Однако при расчетах обычно используют удельную объемную производительность по исходному материалу  $q_0$ , связь которой с  $q_S$  зависит от большого числа факторов и не устанавливается теоретически. Поэтому для расчета конструктивных параметров грохотов и их эффективности используют обобщение опытных данных, а теория служит только для выявления качественных соотношений между основными характеристиками.

Эффективность грохочения находится в противоречии с производительностью и размерами грохота. Наиболее эффективная классификация достигается при движении частиц по поверхности сита монослоем, но при значительной производительности это приводит к большой ширине грохота. При движении материала в несколько слоев частицам подрешетной фракции требуется время, чтобы достичь поверхности сита, что приводит к необходимости его большой длины. При заданных размерах поверхности грохота степень извлечения зависит от производительности по исходному материалу и падает с ее ростом.

Типичный колосниковый грохот с неподвижной просеивающей поверхностью (рис.

2.3.7, а) состоит из параллельно расположенных на общей раме стальных полос или труб. Движение материала вдоль грохота осуществляется за счет сил тяжести частиц, поэтому угол наклона поверхности  $\beta$  должен быть не меньше угла естественного откоса материала.

При грохочении влажных и липких материалов возможна подача в полые колосники горячего теплоносителя. Ширина грохота  $b$  должна составлять не менее трех размеров максимального исходного куска ( $b \geq 3x_{\max}$ ), длина  $L = 3 \dots 4b$ . Неподвижные грохоты редко используются при размере щелей между колосниками менее 25 мм. Эффективность классификации колеблется от 0,5...0,6 при больших нагрузках, до 0,65...0,70 при малых.

Объемная производительность грохота

$$Q = q_0 F, \quad (2.3.2)$$

где  $F$  – площадь колосниковой решетки,  $m^2$ ;  $q_0$  – удельная объемная производительность по питанию,  $m^3/(m^2 \cdot ч)$ , зависящая от ширины щели  $w$  и требуемой эффективности. Для ориентировочных расчетов при определении  $q_0$  можно воспользоваться рис. 2.3.7, б.

Барабанный грохот представляет собой вращающийся цилиндр с отверстиями (рис. 2.3.8). Движение материала вдоль него происходит благодаря наклону оси вращения  $\beta$  к горизонту и напорному действию подаваемого материала. Поперечные движения материала при его пересыпании вследствие вращения барабана интенсифицируют движение мелких частиц к просеивающей поверхности.

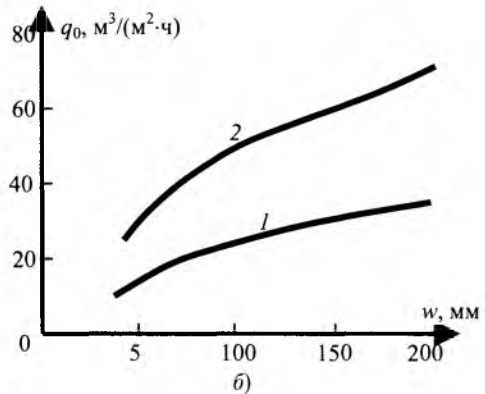
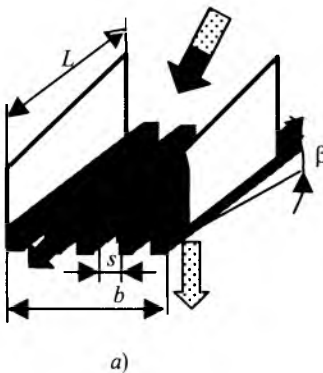


Рис. 2.3.7. Схема колосникового грохота (а) и зависимость его удельной производительности от ширины щели (б) при различных значениях  $\varepsilon$ :

1 –  $\varepsilon = 0,65 \dots 0,7$ ; 2 –  $\varepsilon = 0,50 \dots 0,60$

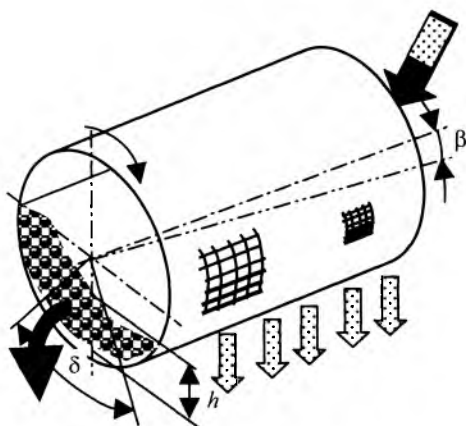


Рис. 2.3.8. Схема и основные размеры барабанного грохота

Основные геометрические размеры барабанного грохота определяются следующими соотношениями:

$$D \geq 14x_{\max}; \quad h \leq 2x_{\max}; \quad \beta_{\max} \leq 90^\circ.$$

Частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ , составляет 0,3...0,45 критической частоты вращения:

$$n = \frac{13}{\sqrt{D}} \dots \frac{20}{\sqrt{D}},$$

где  $D$  – диаметр барабана, м.

Ориентировочная объемная производительность определяется по формуле (2.3.2), где  $F$  – площадь просеивающей поверхности,  $\text{м}^2$ ; удельная объемная производительность

$$q_0 = \begin{cases} 0,05w & \text{при } \varepsilon = 0,75 \dots 0,88; \\ 0,2w & \text{при } \varepsilon = 0,50 \dots 0,60, \end{cases}$$

где  $w$  – диаметр отверстий в просеивающей поверхности, мм.

Барабанные грохоты применяются и для мокрого грохочения. При этом расход воды составляет 1,5...2,5  $\text{м}^3$  на 1  $\text{м}^3$  загружаемого материала. В последнее время в подготовительных процессах все чаще применяют барабанные грохоты-дробилки, сочетающие дробление и грохочение материала в одном агрегате.

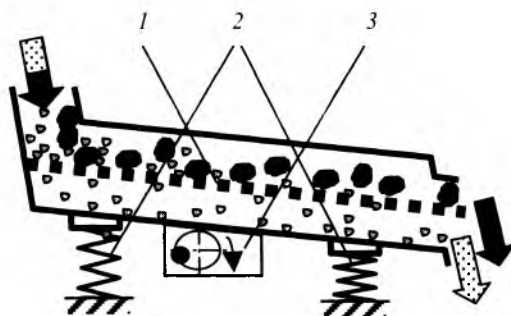


Рис. 2.3.9. Схема вибрационного грохота: 1 – сито; 2 – упругие опоры; 3 – дебалансный вибратор

*Вибрационный грохот.* Для более тонкой классификации используются грохоты с колеблющейся классифицирующей поверхностью с кинематическим возбуждением колебаний (качающиеся или гирационные) или с динамическим, осуществляемым различными вибраторами, (вибрационные).

Схема вибрационного грохота показана на рис. 2.3.9. Эффективность классификации достигает 0,9 и выше. Нижний предел амплитуды колебаний грохота выбирается по эмпирической формуле

$$r \geq mw + 1,$$

где  $r$  – амплитуда, мм;  $w$  – диаметр отверстий сита, мм;  $m$  – коэффициент, выбираемый по табл. 2.3.1.

**2.3.1. Значения параметров вибрационного грохота в зависимости от размера отверстий сита**

Диаметр отверстий сита $w$ , мм	$m$	$2rn$
	мм/мин	
3	0,3	6000
3...12	0,3	8000
12...25	0,25	10000
25...60	0,15	10000
60	0,1	12000

Ориентировочно объемную производительность грохотов с колеблющейся поверхностью можно рассчитать по формуле (2.3.2), где

$$q_0 = q_{\text{баз}} K_0;$$

$q_{\text{баз}}$  – базовое значение удельной объемной производительности;  $K_0 = K_1 \dots K_n$  – суммарный поправочный коэффициент, представляющий собой произведение совокупности отдельных поправочных коэффициентов, учитывающих различные факторы, влияющие на процесс.

Значение величины  $q_{\text{баз}}$  можно оценить при эффективности грохочения  $\varepsilon = 0,9$  по формуле

$$q_{\text{баз}} = \begin{cases} 1,43w + 2,7 & \text{при } w < 18 \text{ мм;} \\ 0,44w + 20 & \text{при } w \geq 18 \text{ мм.} \end{cases}$$

Среди поправочных коэффициентов наиболее существенно влияние коэффициента, учитывающего эффективность классификации  $\varepsilon$  [29],

$$K_\varepsilon = 1 + 5(0,9 - \varepsilon),$$

и коэффициента, учитывающего интенсивность механического режима;

$$K_M = 0,7 + 0,5(2rn - 6000)/10000,$$

где  $2rn$  – произведение двойной амплитуды на частоту  $n$  вращения привода, позволяющее по известной амплитуде рассчитать частоту вращения вала.

В вибрационных грохотах с большой эластичной поверхностью сита иногда применяют непосредственное возбуждение его колебаний электромагнитными вибраторами. При этом снижается мощность привода, расходуемая на возбуждение колебаний рамы, а также появляется возможность создания колебаний более сложных форм, что позволяет увеличить эффективность классификации, особенно по мелким границам разделения.

Для увеличения пропускной способности сита, а также для разделения склонных к адгезии частиц механическое грохочение может быть дополнено применением воздушных или жидкостных струй (рис. 2.3.10). Исходный материал просасывается сквозь круглое сито 4 потоком воздуха. Для предотвращения забива-

ния сита крупными частицами оно продувается встречными локальными струями воздуха высокого давления, подаваемого через вращающийся коленчатый патрубок. Грохот применяется для разделения пластмассовых порошков.

Фирма Альпине (Австрия) выпускает струйные пневматические грохоты типа LS трех типоразмеров для широкого спектра разделяемых материалов производительностью по исходному продукту 60...1060 кг/ч в зависимости от материала и требуемой границы разделения. Минимальный размер ячейки сита 25 мкм. Организация замкнутой циркуляции газа позволяет применять вместо воздуха инертный газ, что необходимо при грохочении пожаро- и взрывоопасных материалов. Одним из недостатков перехода к пневматическому грохочению является потребность во вспомогательном оборудовании (вентиляторах, циклонах и др.).

Гидравлический дуговой грохот сочетает интенсификацию процесса путем применения струи жидкости (обычно воды) с увеличением сил инерции криволинейного движения, действующих на частицы в направлении поверхности грохочения 4 (рис. 2.3.11). Размер щели в

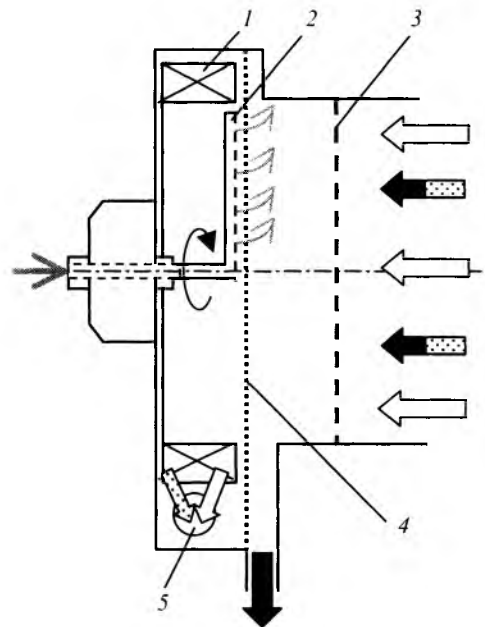


Рис. 2.3.10. Схема пневматического грохота:

1 – лопасти вентилятора; 2 – вращающийся коленчатый патрубок; 3 – предохранительное сито; 4 – основное сито, 5 – выход мелкого продукта

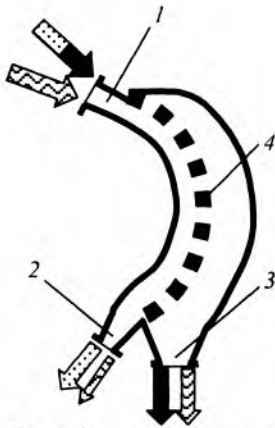


Рис. 2.3.11. Схема гидравлического дугового грохота:

- 1 – подача исходного материала и воды;
- 2, 3 – выход соответственно крупного и мелкого продукта; 4 – дуговое сито

в этих грохотах принимается в 1,5 – 2 раза больше номинальной граничной крупности разделения. Ориентировочная формула для расчета объемной производительности имеет вид

$$Q = 160F_{ж}v,$$

где  $F_{ж}$  – площадь живого сечения сита;  $v$  – скорость подачи пульпы.

При грохочении исходный материал относительно просто разделить на несколько фракций, расположив просеивающие поверхности одна под другой по мере убывания размера ячейки.

Расчет мощности привода грохотов зависит от конкретной конструкции агрегата [29]. Следует отметить, что в крупнотоннажных производствах использование грохота как классификатора сопряжено с рядом таких отрицательных явлений, как производственный шум и запыленность помещений, снижение или устранение которых существенно повышает стоимость механической классификации. Поэтому при проектировании новых технологических линий для разделения по крупности менее 3... 5 мм следует ориентироваться на аппараты пневматического типа.

### 2.3.3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Пневмокласификаторы относятся к аппаратам объемного типа преимущественно непрерывного действия. В отдельных редких случаях они дополняются поверхностной классификацией частиц на границах зоны разделения. В основе процесса пневмокласификации лежит движение частиц в зоне разделения под действием альтернативных сил классификации, по-разному зависящих от размера этих частиц. Одной из альтернативных сил является сила аэродинамического сопротивления при относительном движении частиц в потоке газа. Если другой силой оказывается сила тяжести, то классификатор относится к гравитационным, если сила инерции, – к инерционным. В зависимости от взаимной ориентации альтернативных сил различают классификаторы противоположные (силы направлены в противоположные стороны) и с «косым» потоком. Кроме того, в зависимости от характера движения несущего газа они подразделяются на проходные и замкнутые (циркуляционные). В последних материал загружается и выгружается из классификатора механическим способом.

Важной характеристикой процесса и аппарата является размер равновесной частицы  $x_c$ , совпадающий с граничным размером разделения или близким к нему. Такая частица покоится в восходящем потоке при равенстве сил тяжести и аэродинамического сопротивления:

$$mg = F_d$$

или

$$\rho_p \frac{\pi x_c^3}{6} g = c_w \frac{\pi x_c^2}{4} \rho_g \frac{W^2}{2},$$

где  $\rho_p$  и  $\rho_g$  – плотность соответственно частиц и газа;  $c_w$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, зависящий от числа Рейнольдса обтекающего ее потока  $Re = Wx_c/\nu$ ,  $W$  – скорость газа;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа;

$$c_w = \frac{a}{Re^n} \begin{cases} a = 24, n = 1, & \text{при } Re \leq 1 \text{ – закон Стокса;} \\ a = 13, n = 0,5, & \text{при } 1 < Re \leq 10^3 \text{ – закон Аллена;} \\ a = 0,48, n = 0, & \text{при } Re > 10^3 \text{ – закон Ньютона.} \end{cases}$$



Откуда

$$x_e = \left( \frac{3 \alpha v^n \rho_g}{4 g \rho_p} \right)^{1/(1+n)} W^{(2-n)/(1+n)}$$

Для условий промышленной классификации наиболее характерен диапазон чисел Рейнольдса, соответствующий закону сопротивления Аллена, при котором

$$x_e = \left( \frac{39 \sqrt{v} \rho_g}{4 g \rho_p} \right)^{2/3} W \quad (2.3.3)$$

По формуле (2.3.3) можно рассчитать скорость газа  $W$ , обеспечивающую требуемую границу разделения  $x_c = x_e$ . Необходимый расход газа  $Q$  при заданной крупности разделения можно приблизительно оценить по исходной производительности  $B_1$  сыпучего материала и его допустимой массовой концентрации  $\mu$  (кг/кг) в зоне разделения:

$$Q = B_1 / (\mu \rho_g) \quad (2.3.4)$$

В гравитационных классификаторах верхний предел эффективного разделения достигается при  $\mu = 2 \dots 2,5$  кг/кг. Площадь проходного сечения классификатора рассчитывают по формуле

$$F = Q / W$$

Если площадь получается слишком большой, то трудно сохранить приемлемую равномерность потока по сечению. Тогда прибегают к продольному секционированию аппарата, выполняя его из нескольких однотипных колонок.

Среди гравитационных противоточных классификаторов наибольшее распространение получили аппараты «Zigzag» фирмы Альпине (Мультиплекс Zigzag MZM и MZF). Аппарат представляет собой набор параллельно соединенных колонок, одна из которых показана на рис. 2.3.12, а. Производительность такого аппарата по исходному материалу достигает 200 т/ч. Его отличают малый износ корпуса, защита от перегрузок, низкая чувствительность характеристик процесса к гранулометрическому составу исходного материала, возможность плавного регулирования граничного размера дроссельными заслонками, высокие надеж-

ность и ремонтпригодность. При граничном размере более 200 мкм обеспечивается высокая острота разделения. Аппарат удобен для обеспыливания кокса, мела, удобрений, бокситов, пластиковых гранул, применяется для разделения пищевых материалов, например, при переработке сои. В последнее время широко используется при переработке предварительно измельченных старых кабелей и другого электрического и электронного лома для выделения ценных металлов и отделения пластмассы.

В отечественной промышленности более распространен классификатор с пересыпными полками, аналогичный по принципам обеспечения эффективного разделения (рис. 2.3.12, б). Более подробные сведения о расчете гравитационных пневмоклассификаторов можно найти в [3, 21].

Переход к более низким границам разделения при сохранении высокой производительности требует уровня массовых сил, превышающих уровень сил тяжести. Это обеспечивают центробежные классификаторы. Классификация в них происходит в закрученном (вихревом) потоке с центральным стоком (рис. 2.3.13). Сила аэродинамического сопротивления  $F_d$  увлекает частицу к центру к разгрузочному патрубку, а центробежная сила инерции  $F_m$  стремится отбросить ее к периферии. Обе силы по-разному зависят от размера частицы. Если эти силы равны, то частица вращается по равновесной траектории – окружности

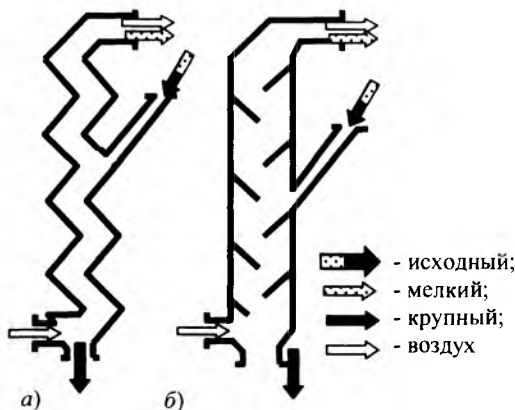


Рис. 2.3.12. Схемы гравитационного классификатора «Zigzag» (а) и классификатора с пересыпными полками (б)

радиуса  $r$ . Чем больше размер частицы, тем больше радиус ее равновесной траектории. Таким образом, в центробежном классификаторе имеется спектр размеров равновесных частиц  $x_e$ .

За характерный размер разделения обычно выбирают размер частицы  $x_{e1}$ , имеющей равновесие на внешнем радиусе зоны разделения  $R_1$ . Условие этого равновесия имеет вид

$$\rho_p \frac{\pi x_{e1}^3}{6} \frac{W_{\phi 1}^2}{R_1} = c_w \frac{\pi x_{e1}^2}{4} \rho_g \frac{W_{r1}^2}{2},$$

где  $W_{r1}$  и  $W_{\phi 1}$  – соответственно радиальная и окружная скорость газа на внешнем радиусе. Если поток закручивается лопатками, установленными под углом  $\alpha$  к радиусу, то  $W_{\phi 1} = W_{r1} \operatorname{tg} \alpha$ . Формула для расчета размера этой равновесной частицы имеет вид

$$x_{e1} = \left( \frac{3 \alpha v^n \rho_g R_1}{4 W_{r1}^n \rho_p \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)^{1/(1+n)}$$

откуда также можно рассчитать необходимую радиальную скорость газа  $W_{r1}$  и угол закрутки потока  $\alpha$  по требуемой характерной крупности разделения. (Реальный граничный размер центробежной классификации находится между размерами  $x_{e1}$  и  $x_{e2}$ , где  $x_{e2}$  – размер частицы, имеющей равновесие на радиусе  $R_2$ ; оба размера связаны соотношением, учитывающим затухание угла закрутки потока  $\alpha$  по радиусу зоны разделения [21].)

Расход газа выбирают по соотношению (2.3.4) с учетом того, что предельная массовая концентрация материала в газе, совместимая с достаточно высокой эффективностью разделения, составляет в центробежных классификаторах 1...1,5 кг/кг. Высота зоны разделения

$$H = \frac{Q}{2\pi R_1 W_{r1}}$$

При прочих равных условиях в геометрически подобных центробежных классификаторах величина  $x_{e1}$  остается неизменной, если

$$R_1^{(2n+1)/n} / Q = \text{idem}.$$

Для типичных для центробежной классификации мелких частиц, сопротивление кото-

рых подчиняется закону Стокса с  $n = 1$ , имеем условие подобия

$$V/Q = \text{idem},$$

где  $V$  – объем классификатора.

Более подробные сведения о расчете центробежных пневмокласификаторов можно найти в [21. 33].

Несмотря на аналогичность принципа действия, известно большое число разнообразных конструкций центробежных классификаторов. Некоторые из аэродинамических схем классификаторов, не содержащих вращающихся элементов в зоне разделения, показаны на рис. 2.3.14.

Перед центробежными проходными аппаратами (рис. 2.3.14, а, б) установлена гравитационно-инерционная ступень предварительного разделения. Классификатор конструкции ТКЗ-ВТИ выпускается отечественной промышленностью с диаметром типажного ряда 2,6...4,75 м, производительностью по исходному материалу до 100 т/ч, а по мелкому при  $R_3(0,09) = 7\%$  – до 50 т/ч, с граничным размером разделения 20...100 мкм. Здесь  $R_3(0,09) = 7\%$  при остатке в мелком продукте на сите частиц диаметром 0,09 мм, равным 7%. Индекс при  $R$  означает отношение соответственно к исходному (1), крупному (2) и мелкому (3) продуктам. Выбор типоразмера классификатора осуществляется по желаемой тонкости мелкого продукта  $R_3(0,09)$  через величину  $H_V = Q/V$  ( $Q$  – расход газа в м<sup>3</sup>/ч), называемую напряжением объема классификатора. По  $H_V$  находят объем аппарата  $V = Q/H_V$ , а затем – необходимый диаметр  $D_1 = (V/0,435)^{1/3}$ .

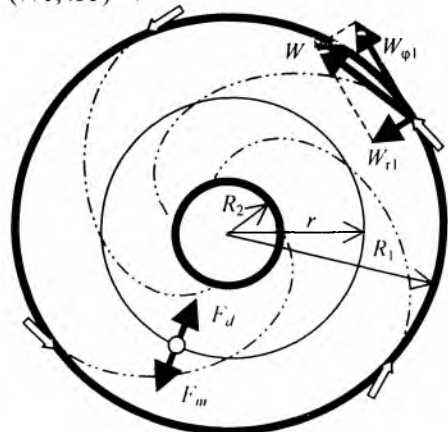


Рис. 2.3.13. Схема центробежной зоны классификации

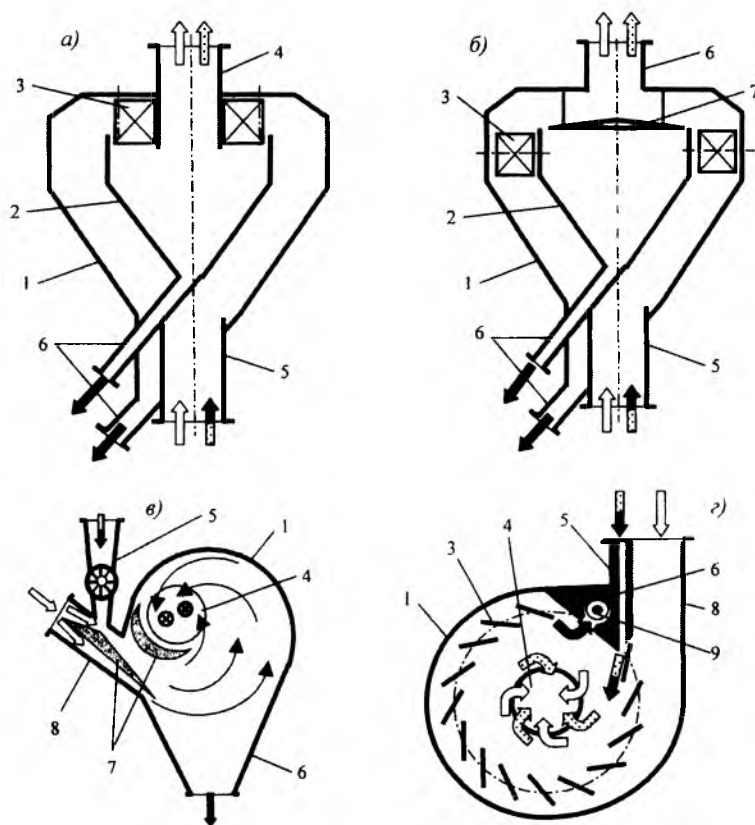


Рис. 2.3.14. Схемы классификаторов с неподвижной центробежной зоной разделения:

*а* – ТКЗ-ВТИ; *б* – ИГЭУ; *в* – ЕС фирмы Ларокс; *г* – «Микроплекс»;

1 – наружный корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – закручивающие лопатки; 4 – разгрузочный патрубок мелкого продукта; 5 – загрузочный патрубок; 6 – разгрузочный патрубок крупного продукта; 7 – аэродинамическая перегородка; 8 – патрубок подачи воздуха; 9 – разгрузочный шнек

Соотношения тонкости мелкого продукта  $R_3(0,09)$  и напряжения объема  $H_V$  при выборе типоразмера классификатора ТКЗ-ВТИ приведены ниже.

$R_3(0,09),\%$ ...	4...6	6...15	15...28	28...40
$H_V, 1/ч$ ...	2000	2500	3500	4500

Особенностью конструкции такого классификатора является подача материала в аппарат вместе с несущим газом в состоянии аэросмеси, что делает их употребительными в замкнутых циклах измельчения с вентилируемыми мельницами. Однако такой аппарат имеет ограниченную эффективность разделения, поскольку в центробежной зоне реализуется широкий спектр взаимных ориентаций альтернативных сил классификации и разделение носит циклонный характер.

В классификаторе конструкции ИГЭУ (рис. 2.3.14, б) во второй ступени реализуется чистое центробежно-противоточное разделение, в результате чего эффективность разделения в нем выше. Замена классификатора ТКЗ-ВТИ на классификатор ИГЭУ в замкнутых схемах измельчения позволяет в зависимости от тонкости помола повысить производительность на 5...25 %.

Увеличение высоты зоны разделения позволяет проводить эффективную классификацию по границам до 5 мкм, однако при больших высотах необходимо секционировать зону разделения кольцевыми вставками для сохранения плоского вихревого потока. В первом приближении диаметр такого классификатора можно выбирать по той же методике, что и классификатора ТКЗ-ВТИ.

Центробежные классификаторы с горизонтальной осью зоны разделения широко используются в зарубежной промышленности (рис. 2.3.14, в, з). Механическая загрузка исходного материала легко осуществляется из промежуточного бункера. Классификатор ЕС фирмы Ларокс (Финляндия) имеет внутри зоны разделения специальные вставки, создающие необходимую структуру вихревого потока (рис. 2.3.14, в). Производительность этих аппаратов по мелкому продукту составляет 3...100 т/ч при границе разделения 30...100 мкм. Классификаторы содержат вентиляционную установку и систему улавливания мелкого продукта из несущего газа.

Спиральный классификатор «Микроплекс» фирмы Альпине снабжен встроенным вентилятором, а отвод улавливаемого на периферии крупного продукта производится шнеком. Кроме того, одна из торцовых стенок зоны разделения выполнена вращающейся для того, чтобы снизить неоднородность несущего газового потока. Наличие встроенного вентилятора повышает автономность аппарата, но приводит к интенсивному износу лопастей вентилятора, через которые проходит весь мелкий продукт.

В воздушно-проходных классификаторах с неподвижной зоной разделения вихревой поток адаптируется к условиям протекания процесса (свободный вихрь), и его параметры могут существенно меняться с изменением, например, производительности. Поэтому характеристики классификации являются относительно нестабильными. Этот недостаток отсутствует у классификаторов с роторами (корзинками), вращающимися внутри зоны разделения, создающими стабильный вынужденный вихревой поток и одновременно отбивающими крупные частицы.

В классификаторе MS (Micron Separator) фирмы Хосокава исходный материал вместе с воздухом подается в зону разделения к верхней части вращающегося конического ротора с отбойными лопатками (рис. 2.3.15). Мелкие частицы просасываются сквозь лопатки и выводятся через центральную часть ротора вместе с воздухом. Для повышения эффективности разделения предусмотрена подача вторичного воздуха в различные зоны классификации. Одна его часть подается в окрестности середины ротора, а другая – в нижнюю часть окружающего ротор конического внутреннего корпуса, чтобы предотвратить попадание оставшихся мелких частиц в крупный продукт.

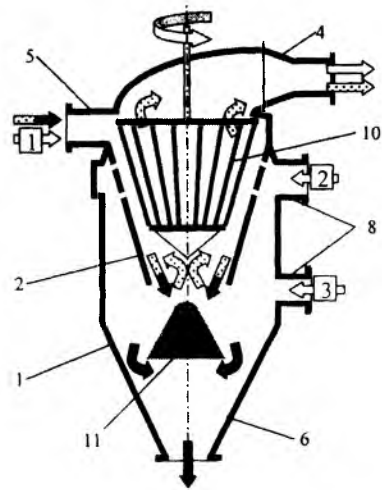


Рис. 2.3.15. Центробежный классификатор MS с вертикальным вращающимся ротором: 1 – 9 – см. рис. 2.3.14; 10 – вертикальный классифицирующий ротор; 11 – распределительный конус

Классификаторы MS производятся шести типоразмеров MS-1...MS-6 с отношением диаметра к длине  $D/L = 700/1500...2800/7000$  мм с частотами вращения ротора соответственно 2300...300 мин<sup>-1</sup>. Для классификации по особо тонким граничным размерам (менее 5 мкм) предусмотрена повышенная (примерно в 2 раза) частота вращения.

При повышенных скоростях достигается эффективное разделение до  $d_{97} = 2$  мкм, где  $d_{97}$  – размер фракции, выносимой в мелкий продукт на 97%. Такие классификаторы широко применяются для удаления мелких частиц перед мельницами, для обеспыливания порошков и гранул, для удаления крупных и примесных частиц, в ряде случаев – для разделения материалов по плотности.

В отличие от других аппаратов этого типа классификаторы для сверхтонкого разделения «Турбоплекс» ATP-GS и ATP-S/GS фирмы Альпине имеют горизонтально расположенный ротор, ось которого ориентирована перпендикулярно потоку газа с частицами (рис. 2.3.16). Основной рабочий диапазон крупности разделения  $d_{97} = 4...200$  мкм. Классификатор выпускается с одним, тремя, четырьмя и шестью роторами, изготовленными из стали или керамики. Частота вращения составляет от 11500 мин<sup>-1</sup> у малых типоразмеров (диаметр

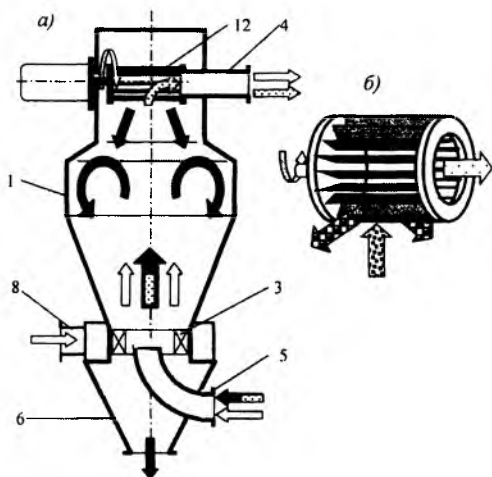


Рис. 2.3.16. Схема центробежного классификатора «Турбоплекс» с горизонтальным вращающимся ротором (а) и схема конструкции ротора (б): 1 – 11 – см. рис. 2.3.15; 12 – горизонтальный классифицирующий ротор

ротора 100 мм) до  $1200 \text{ мин}^{-1}$  у больших (диаметр ротора 1000 мм). Для керамических роторов частота вращения несколько меньше. При  $d_{97} = 10 \text{ мкм}$  производительность по мелкому продукту составляет  $45 \dots 2500 \text{ кг/ч}$ .

Классификатор успешно применяется для разделения минералов, абразивов, пигментов, металлических порошков, тонеров, фармацевтических и пищевых материалов. Используется как мельничный классификатор с малотоннажными мельницами, например, с противоточной струйной мельницей 100 AFG фирмы Альпине.

В пневмоклассификаторах с внутренней циркуляцией несущего газа улавливание мелкого продукта происходит непосредственно внутри классификатора. Существуют циркуляционные классификаторы с выносными вентиляторами и циклонами [21, 33].

Воздушно-замкнутый классификатор «Вентоплекс» фирмы Альпине является типичным представителем аппаратов этого типа (рис. 2.3.17).

Исходный материал подается на вращающуюся распределительную тарелку 14, и частицы движутся к ее периферии. Крупные частицы падают вниз, а мелкие классифицируются в коническом вихревом потоке над тарелкой, создаваемом встроенным вентилятором 13. Параметры потока изменяются в зависимости от частоты вращения вентилятора и положения по высоте всей роторной системы. Гра-

ничный размер в таких классификаторах составляет  $30 \dots 200 \text{ мкм}$ .

Относительно низкие скорости движения газа способствуют малому износу элементов конструкции, но не обеспечивают эффективное диспергирование частиц, вследствие чего острота разделения в этих аппаратах относительно невысокая. Отсутствие необходимости в дополнительном оборудовании (вентиляторах, циклонах) делают их особенно удобным для технологий, в которых классификация является относительно независимой операцией, а также в замкнутых циклах измельчения с неvented мельницами.

Размеры классификатора (диаметр  $\times$  высота) в зависимости от типоразмера составляют от  $1200 \times 2800 \text{ мм}$  (у модели V12) до  $3600 \times 6670 \text{ мм}$  (у модели V36), а частота вращения ротора  $640 \dots 210 \text{ мин}^{-1}$ , производительность по исходному материалу  $1,5 \dots 5 \text{ т/ч}$  для модели V12 и  $20 \dots 80 \text{ т/ч}$  для модели V36. Производительность по мелкому продукту классификации зависит от его требуемой тонкости: для модели V12 она изменяется от  $0,5 \dots 0,8 \text{ т/ч}$  при  $d_{97} = 50 \text{ мкм}$  до  $1,5 \dots 2 \text{ т/ч}$  при  $d_{97} = 150 \text{ мкм}$  (для известняка). Классификатор успешно при-

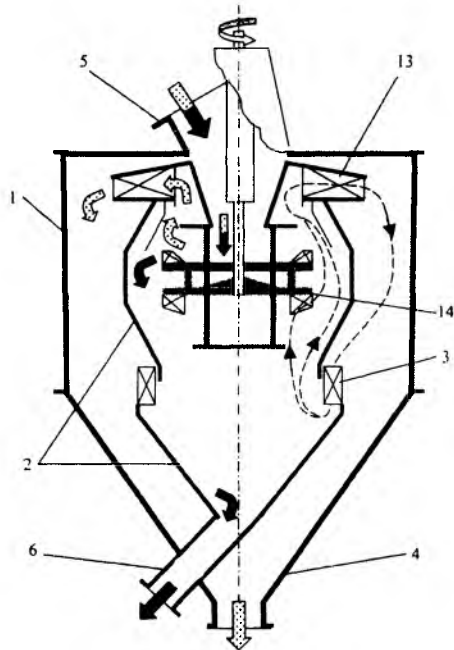


Рис. 2.3.17. Циркуляционный центробежный классификатор «Вентоплекс»: 1 – 12 – см. рис. 2.3.16; 13 – встроенный вентилятор; 14 – распределительная тарелка

меняется для разделения частиц известняка, полевого шпата, фосфатов, коалинового сырья, глины, гипса, различных руд, стеклянных порошков, абразивов, пищевых и кормовых продуктов.

Пневмокласификаторы могут использоваться и для многопродуктового разделения. На рис. 2.3.18 приведены аэродинамические схемы классификаторов для разделения на три фракции: а) центробежно-противоточного разделения; б) инерционного. В последнем более мелкие частицы, ввиду малой инерционности, движутся по траекториям с меньшим радиусом кривизны, а более крупные – с большим, в результате чего они попадают в разные патрубки отвода фракций.

Пневмокласификаторы имеют более широкие возможности регулирования параметров процесса, чем грохоты, в которых граничный размер идеальной классификации равен размеру ячеек сита и может только уменьшаться при одновременном снижении эффективности.

В общем случае параметры пневмокласификации регулируются изменением уровня движущих сил и сил аэродинамического сопротивления, а также их взаимной ориентации

(последнее сопряжено с потерей эффективности и применяется редко). В этом смысле наиболее эффективны центробежные классификаторы, поскольку в гравитационных аппаратах ускорение свободного падения частиц постоянно. В центробежных аппаратах уровень движущих сил изменяют, меняя крутку потока, в первую очередь, изменением угла установки закручивающих лопаток.

Регулирование граничной крупности в проходных классификаторах за счет расхода несущего газа, как правило, имеет ограниченные пределы, так как этот расход обычно связан с установленным последовательно с классификатором другим технологическим оборудованием (вентилируемых мельниц, системы пылеулавливания).

В циркуляционных классификаторах изменение расхода вентилярующего газа достигается изменением частоты вращения крыльчатки встроенного вентилятора, которое в аппаратах для крупнотоннажных производств бывает преимущественно дискретным вследствие изменения передаточного отношения привода рабочего вала классификатора.

Разнообразие аэродинамических схем пневмокласификации и сложность движения и разделения частиц в газопылевом потоке обуславливают отсутствие в настоящее время надежных универсальных методов технологического расчета пневмокласификаторов и приводит к необходимости использования опытных зависимостей.

На рис. 2.3.19 показаны области рационального применения различных механических и пневматических классификаторов. Расширенные области, отмеченные штриховыми стрелками, относятся к перспективным конструкциям, еще не получившим широкого промышленного освоения.

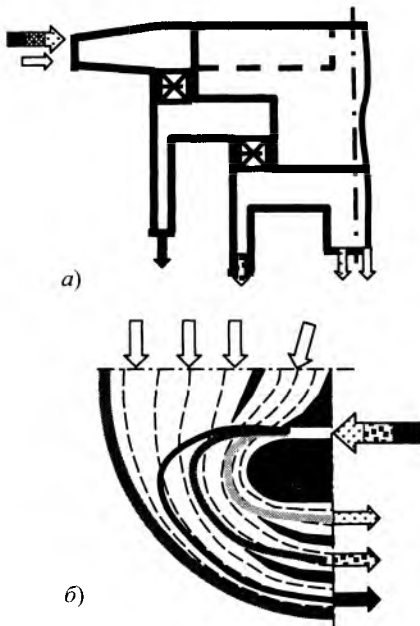


Рис. 2.3.18. Схемы центробежного (а) и инерционного (б) классификаторов для многопродуктового разделения

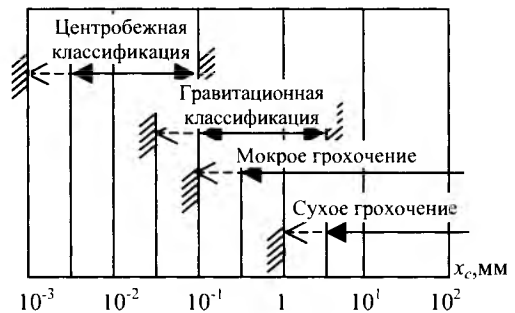


Рис. 2.3.19. Области преимущественного применения различных классификаторов

### 2.3.4. МАГНИТНЫЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Большинство природных минералов являются слабыми парамагнетиками, а некоторые – слабыми диамагнетиками. В магнитных классификаторах происходит отделение частиц с относительно более высокой магнитной восприимчивостью от частиц с менее высокой. Напряженность применяемого магнитного поля и крупность частиц определяют пределы производительности магнитных классификаторов, которая изменяться от нескольких килограммов до сотен тонн в 1 ч, а различие в магнитной восприимчивости разделяемых компонентов – пределы эффективности разделения.

Классификация происходит под действием на частицы магнитных сил с одной стороны и сил веса или аэродинамического (гидравлического) сопротивления – с другой. Равновесие этих сил организуют таким образом, чтобы частицы с большей магнитной восприимчивостью («магнитные») двигались в сторону действия магнитной силы, а с меньшей («немагнитные») – в противоположную ей сторону. Ферромагнитные и парамагнитные частицы перемещаются вдоль силовых линий магнитного поля в сторону возрастания его напряженности, а диамагнитные – выталкиваются в сторону его убывания.

Магнитные свойства вещества определяются из соотношений, связывающих напряженность приложенного магнитного поля  $H$  и индукцию магнитного поля  $B$  в находящемся в нем веществе. Для этого используют две характеристики: относительную магнитную проницаемость  $\mu$  и магнитную восприимчивость  $\chi$ :

$$B = \mu \mu_0 H ;$$

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H (1 + \chi) ,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $M$  – напряженность магнитного поля в веществе, индуцированного внешним полем  $H$ ;  $\chi = M/H$  – магнитная восприимчивость вещества.

Иногда используют удельную магнитную восприимчивость  $\phi = \chi/\rho$ , где  $\rho$  – плотность вещества.

Если  $\chi > 0$  (соответственно  $\mu > 1$ ), то индуцированное в веществе магнитное поле добавляется к внешнему, и такое вещество называют парамагнетиком. Если  $\chi < 0$  ( $\mu < 1$ ), то

индуцированное в веществе поле ослабляет внешнее, а вещество называют диамагнетиком.

Намагничивание различных материалов зависит от их магнитной восприимчивости и напряженности приложенного магнитного поля. Ферромагнитные материалы легко намагничиваются, но после определенного значения  $H$  происходит насыщение, и дальнейшее увеличение напряженности не приводит к увеличению намагничивания. Индуцированное магнитное поле в парамагнетиках гораздо слабее, но практически не насыщается.

Данные по магнитной восприимчивости ряда минералов приведены в табл. 2.3.2.

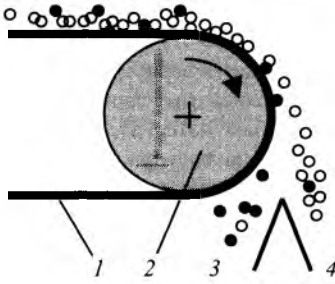
Магнитные классификаторы (сепараторы) используются главным образом в следующих случаях: 1) для удаления крупных (более 3 мм) кусков ферромагнитных материалов с целью защиты последующего технологического оборудования; 2) для получения магнитных концентратов и очистки от примесей.

Простейший магнитный сепаратор для удаления крупных кусков железа представляет собой ленточный конвейер 1 со шкивом 2, выполненным в виде постоянного или электрического магнита (рис. 2.3.20). Ферромагнитные куски удерживаются магнитом до тех пор, пока под действием веса и центробежной силы не начнут падать в бункер 3, смещенный относительно бункера 4 для основного немагнитного материала.

**2.3.2. Магнитная восприимчивость ряда минералов**

Минерал	Магнитная восприимчивость
Апатит	$2,64 \cdot 10^{-6}^*$
Графит	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Доломит	$1 \cdot 10^{-6}^*$
Известняк	$6 \cdot 10^{-6}$
Ильменит	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Кальцит	$-3,63 \cdot 10^{-7}$
Корунд	$3,4 \cdot 10^{-7}$
Кварц	$(1,75 \dots 4,38)10^{-6}$
Магнетит	$0,12 \dots 3,07$
Пирит	$(0,2 \dots 1,5)10^{-4}$
Циркон	$-1,7 \cdot 10^{-7}$
Рубин	$4,7 \cdot 10^{-7}^*$
Рутил	$1,96 \cdot 10^{-6}$
Топаз	$4,2 \cdot 10^{-7}^*$

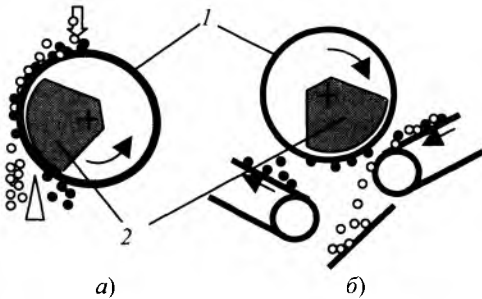
\* Удельное значение.



**Рис. 2.3.20.** Схема магнитного сепаратора для отделения магнитных (черные точки) от немагнитных (белые точки) частиц

Магниты в этих сепараторах могут быть подвесными и размещаться над лентой конвейера. В этом случае необходимо создание более сильного магнитного поля и решение проблемы очистки поверхности магнита от накопленных кусков. Для этого обычно используют дополнительную конвейерную ленту, движущуюся по поверхности магнита. Когда лента покидает зону магнитного поля, куски железа падают с нее в бункер.

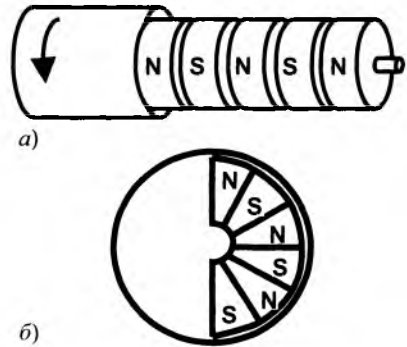
Если установка магнитных шкивов или подвесных магнитов неприемлема, то используют магнитные барабаны, в которых неподвижный магнит 2 занимает часть вращающегося тонкостенного барабана 1 (рис. 2.3.21). Куски ферромагнитного материала притягиваются магнитом к поверхности барабана и удерживаются на ней, пока они движутся над поверхностью магнита, а затем падают в бункер. Подача исходного материала может осуществляться сверху непосредственно на барабан (рис. 2.3.21, а), или барабан может быть установлен над поверхностью транспортируемого сырья (рис. 2.3.21, б).



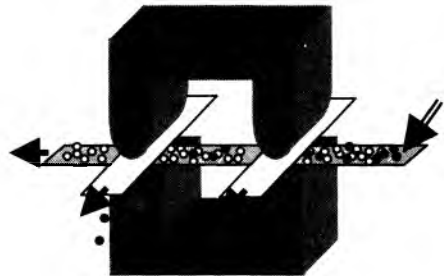
**Рис. 2.3.21.** Схемы магнитных сепараторов с магнитными барабанами с подачей исходного материала на барабан (а) и ленточной транспортировкой материала (б)

Для сухого обогащения и очистки применяют магнитные барабаны с чередующимися полюсами вдоль оси барабана и вдоль его окружности. Барабан с осевым чередованием полюсов может применяться для удаления кусков железа размером до 300 мм (рис. 2.3.22, а). Барабан, в котором полюса чередуются по окружности, показан на рис. 2.3.22, б. Прохода над чередующимися полюсами, парамагнитные частицы периодически переориентируются, что увеличивает их подвижность в сыпучем материале и повышает эффективность разделения.

Для разделения слабо парамагнитных материалов применяют высокоинтенсивный магнитный классификатор с перекрестным движением конвейерных лент (рис. 2.3.23). Смесь движется тонким слоем по основной конвейерной ленте и попадает в зону сильного магнитного поля в зазоре между полюсами. Парамагнитные частицы притягиваются верхним полюсом и попадают с нижней стороны на другую конвейерную ленту, движущуюся перпендикулярно первой. После выхода из магнитного поля частицы падают с нее в бункер. Для получения магнитного поля с большим гради-



**Рис. 2.3.22.** Схемы магнитных барабанов с осевым (а) и окружным (б) чередованием полюсов



**Рис. 2.3.23.** Схема магнитного классификатора с перекрестным движением конвейерных лент



ентом напряженности верхнему полюсу придают специальную форму. Этот же принцип используется в высокоинтенсивном дисковом магнитном сепараторе, в котором вместо второй ленты используется вращающийся диск.

Аналогичные принципы и схемы используются в магнитных сепараторах, работающих по мокрой технологии.

Магнитные классификаторы нашли широкое применение в промышленной практике. Они используются для удаления кусков железа в химической, горной, пищевой и других отраслях промышленности, а также для выделения ферромагнетиков из отходов. Применяются для обогащения и очистки минерального сырья при производстве алюминия, никеля, молибдена и многих других металлов, причем спектр разделяемых материалов непрерывно расширяется. При работе по мокрой технологии они используются также в качестве магнитных фильтров.

### 2.3.5. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Несмотря на многообразие видов электростатических классификаторов, в основу их работы положено одно общее свойство зарядов противоположного знака – притягивать друг друга. Электростатическая классификация, при которой заряд передается частицам, называется *электрофорезом*. Разделение при электрофорезе основано на разной электропроводности частиц или различии их трибоэлектрических свойств в исходном материале. Если частица в целом остается нейтральной, но поляризуется, т.е. приобретает дипольный момент, то в неоднородном электрическом поле она втягивается в область возрастания напряженности электрического поля. Это явление называется *дизлектрофорезом*. Разделение частиц в этом случае основано на разнице приобретаемых частицами дипольных моментов (поляризуемости), которые зависят от диэлектрических свойств и структуры материала, а также от формы частиц. Основные принципы электростатической классификации и их технологической реализации показаны в табл. 2.3.3.

При электрофорезе заряд может быть передан частице тремя основными способами: ионной бомбардировкой, индукцией и кон-

тактным взаимодействием (трибоэлектрический заряд).

*Ионная бомбардировка* является наиболее распространенным способом заряда частиц. 1. Исходный материал, содержащий проводящие и непроводящие частицы, подается на заземленную поверхность (валок), который движется под коронирующим электродом, расположенным над этой поверхностью. Оборудованием для создания коронного разряда является высоковольтный источник электрической энергии и специальный образец изготовленный электрод. 2. В короне заряжаются как проводящие, так и непроводящие частицы, но проводящие при контакте с заземленной несущей поверхностью теряют свой заряд, а непроводящие сохраняют и притягиваются к ней. 3. Силы тяжести отрывают частицы от поверхности, но в разных местах (заряженные непроводящие отрываются позже), и направляют их в разные бункера.

Сравнительно новым достижением в электростатической классификации с ионной бомбардировкой является разделение частиц по их форме, определяемой коэффициентом «плоскостности»  $k = L/H$ , где размеры  $L$  и  $H$  берутся для покоящейся на плоскости частицы (рис. 2.3.24). В этих классификаторах использован валок специальной конструкции и техника контролируемого заряда, в большей степени зависящего от формы частиц, чем от их электропроводности. Эффективное разделение частиц возможно, если  $k_1/k_2 > 2$ .

В табл. 2.3.4 показаны диапазоны размеров частиц, которые можно разделить по размерам и форме методом электростатической классификации.

*Классификаторы с индуцированным зарядом* (см. табл. 2.3.3) в целом подобны аппаратам с ионной бомбардировкой, но частицы получают гораздо меньший заряд и требуется значительное различие в поверхностной электропроводности компонентов для эффективного разделения. 1. Материал также подается по заземленной поверхности под высоковольтный, но не коронирующий электрод. Проводящие частицы, находящиеся в контакте с заземленной поверхностью, приобретают такой же заряд. 2. В электрическом поле между электродом и поверхностью на них начинает действовать сила, направленная в сторону электрода.

2.3.3. Основные принципы электростатической классификации

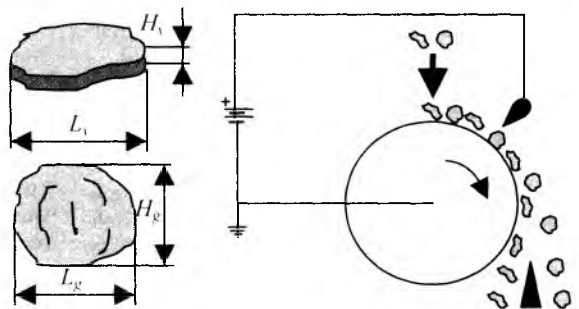
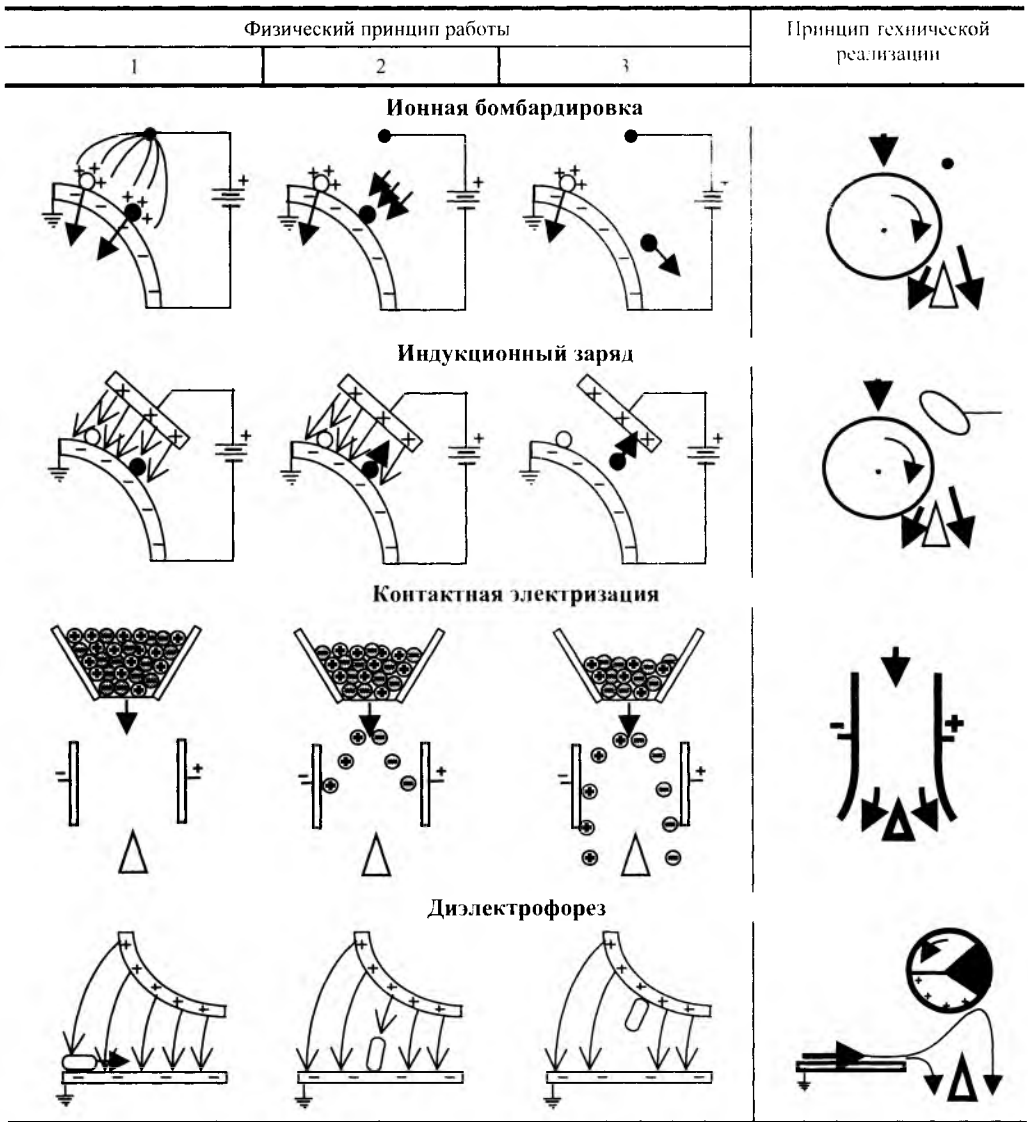


Рис. 2.3.24. Схема электростатического классификатора для разделения частиц по их форме

## 2.3.4. Диапазон размеров частиц при электростатической классификации

Диапазон размеров:	10    10    1.0    0.1
мм	
мкм	
<b>Электрофорез</b>	
Ионная бомбардировка	
Индукцированный заряд	
Трибоэлектрический (контактный заряд)	
<b>Диэлектрофорез</b>	

Примечание. Обозначение: а – сухое разделение, расширенный диапазон для ряда специальных материалов; б – сухое разделение, стандартный диапазон; в – мокрое разделение, стандартный диапазон.

3. Преодолевая силу тяжести, эта сила поднимает частицы с поверхности, и они направляются в свой бункер. Параметры электрического поля подбирают таким образом, чтобы для непроводящих или менее проводящих компонентов возникающей электростатической силы было недостаточно для подъема этих частиц с поверхности и они транспортировались в другой бункер. Такие классификаторы, иногда называемые экранными или пластинчатыми, нашли промышленное применение для окончательной очистки некоторых видов минерального сырья, например, рутила и циркона.

*Контактная электризация* (см. табл. 2.3.3) – один из старейших методов, используемых при электростатической классификации непроводящих минералов. 1. Если два диэлектрика привести в соприкосновение, а затем разъединить, то материал с более высокой диэлектрической восприимчивостью оказывается заряженным положительно, а другой – отрицательно. 2. Если затем предоставить частицам возможность свободно падать в поперечном электростатическом поле, то частицы с зарядами разного знака будут отклоняться в противоположные стороны. 3. Таким образом, первичное разделение происходит по диэлектрическим характеристикам компонентов в смеси.

Однако приобретаемый частицей контактным способом заряд обычно мал и быстро рассеивается при столкновениях с другими частицами и колебаниях влажности. Для преодоления этого отрицательного явления применяют химическое кондиционирование поверхности частиц, обычно парами специально подобранного вещества. Например, при сухом электростатическом обогащении силвина и

галита (каменной соли) используют пары трихлорацетата или салициловой кислоты, а при электростатическом выделении неорганической серы из тонко измельченного угля – пары аммиака.

*При диэлектрофорезе* (см. табл. 2.3.3) частицы в целом остаются нейтральными, но поляризуются и движутся в *неоднородном* электростатическом поле. Обычно такая классификация проводится в жидкости. Движение частиц не зависит от направления поля, вследствие чего для его создания возможно использование переменного тока. Эффект взаимодействия частиц с полем пропорционален их объему и гораздо сильнее проявляется при разделении относительно крупных частиц. Диэлектрофорез как способ классификации требует сильно расходящегося электростатического поля относительно высокой напряженности. В средах с невысокой диэлектрической проницаемостью (2...7) это обычно  $10^4$  В/м, но при высокой проницаемости (например, 80, как у воды) возможно снижение напряженности до 500 В/м. При использовании электрофореза требуемая напряженность значительно меньше. Кроме того, применение диэлектрофореза требует заметной разницы в диэлектрических проницаемостях частиц и среды, в которой проводится разделение (не менее 1).

В электростатическом классификаторе, использующем диэлектрофорез, на поверхности вращающегося барабана параллельно его оси расположены проволочные электроды 1 (рис. 2.3.25). Ниже барабана в жидкости расположен экраный электрод 2. Электроды подключены к высоковольтному источнику переменного тока. Частицы с большей диэлектрической проницаемостью с большей силой

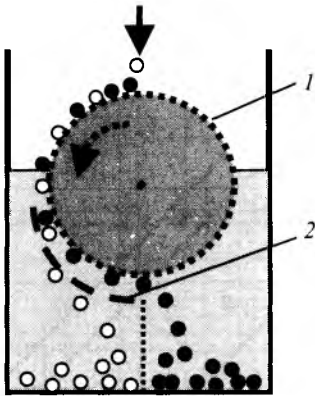


Рис. 2.3.25. Схема электрического классификатора, использующего диэлектрорез

увлекаются в сторону возрастания электрического поля, т.е. в сторону проволочных электродов барабана. После прохождения над экраном электродом они падают в бункер.

Несмотря на большие потенциальные возможности, применение диэлектрореза все еще ограничено в большинстве случаев лабораторными и пилотными установками. В промышленности такие классификаторы нашли применение в качестве фильтров для диэлектрических жидкостей и для удаления примесей из пищевых полуфабрикатов. В качестве среды для диэлектрической классификации используют нитробензин, керосин, ксилен, этанол и пропанол. При классификации в воздухе в большей степени влияют форма, плотность и дипольный момент частиц. Поэтому потенциальное использование этих классификаторов связано с разделением волокнистых материалов и частиц по их коэффициенту «плоскостности».

## Глава 2.4

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМОБРАЗОВАНИЯ

Для повышения реакционной способности в процессах переработки минерального сырья или создания материалов с новыми функциональными свойствами в химической и смежных отраслях промышленности приходится переводить обрабатываемые вещества в мелкодисперсное сыпучее состояние или в расплавы, пасты и др.

В последующих стадиях переработки или реализации материала как товарного продукта указанные состояния часто неприемлемы и тогда реализуется новая стадия процесса переработки – формообразование.

Наиболее часто для этих целей используют гранулирование, таблетирование и прессование.

#### 2.4.1. ГРАНУЛЯТОРЫ

Методы гранулирования предназначены для изготовления частиц определенных размеров, удовлетворяющих требованиям по форме, прочности, плотности и т.д. В химической промышленности по объемам производства гранулирование доминирует над прессованием и таблетированием.

В основе способов гранулирования лежит использование различных физико-механических и физико-химических процессов:

- 1) получение укрупненных дискретных частиц – гранул из мелкодисперсного материала, связыванием исходных частиц различными механизмами сцепления, агрегирующими частицы в гранулу;
- 2) деление исходного материала, находящегося в жидкой фазе на отдельные капли, с последующим отверждением в процессе кристаллизации или сушки;
- 3) деление струи высоковязких материалов путем продавливания через калиброванные отверстия;
- 4) деление крупного куска материала на отдельные мелкие части методами дробления, резки, фрезерования и пр.

Наряду с химической промышленностью методы гранулирования широко используются в горнорудной, цементной, фармацевтической, пищевой промышленности; промышленности строительных материалов и др.

Первый способ гранулирования превосходит по объемам производства остальные и достигает в химической и горнорудной промышленности сотен миллионов тонн в год.

Целями использования гранулированных материалов являются:

уменьшение пыления, что частично исключает их унос, значительно сокращает расходы на воздухоочистку, уменьшает опасность отравления ядовитой или раздражающей пылью;

свободная текучесть, что облегчает рассев, транспортировку и дает равномерную укладку в случае загрузки в пресс-формы, позволяет применять для гранулированных материалов объемное дозирование и дозирование по времени истечения;

уменьшение слеживаемости во время хранения вследствие уменьшения числа контактов;

возможность создания многокомпонентных, многослойных гранул;

увеличение насыпного веса гранулированного материала, что снижает транспортные затраты;

облегчение усреднения многокомпонентных смесей;

увеличение проницаемости газа или жидкости через слой гранулированного материала;

удлинение продолжительности растворения отдельных гранул, что особо важно в сельском хозяйстве для увеличения периода подкормки растений удобрениями и т.д.

Классификация оборудования для гранулирования производится в первую очередь по основному способу формирования гранул (1...4), а внутри группы машин – по обрабатываемому материалу.

**Грануляторы окатывания для мелкодисперсных материалов.** Такие грануляторы осуществляют первый способ гранулообразования. При проектировании или выборе грануляторов мелкодисперсных материалов основную роль играет подбор механизма связывания исходного материала для получения необходимой прочности. Для выбора такого механизма используют диаграмму (рис. 2.4.1), связывающую прочность гранул  $\sigma$  с размерами исходных частиц  $d_{ср}$  при различных механизмах связывания: *A* – связывание мостиками из твердого тела, как результат спекания, сплавления, отвердевания связующего, кристаллизации, химического взаимодействия и т.д.; *B* – капиллярный силами сцепления на границе раздела фаз; *B* – силами адгезии и когезии; *Г* – молекулярными силами Ван-дер-Ваальса и электростатического притяжения.

**Грануляторы барабанного типа.** Рабочим органом гранулятора барабанного типа является вращающийся цилиндр, в котором под действием массовых сил и сил инерции происходит формирование из мелкодисперсного материала и связующего гранул по форме близких к сферическим, обладающих определенной прочностью и плотностью. Для сцепления частиц исходного материала используют

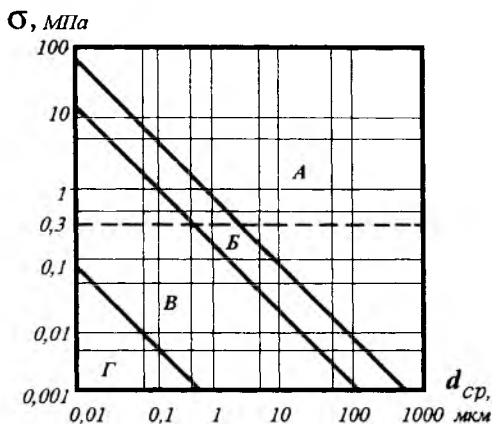


Рис. 2.4.1. Диаграмма для выбора механизма сцепления гранул

обычно два механизма, вначале капиллярный *B*, затем, по мере удаления влаги, один из способов механизма *A*.

Характер движения материала во вращающемся барабане показан на рис. 2.4.2 [9]. В наклонном вращающемся барабане слой материала делится на две зоны. Ниже поверхности раздела *NDLL'D'N'* находится зона подъема материала, в которой материал поднимается вместе с барабаном, без проскальзывания слоев и смещения одной частицы относительно другой. Выше поверхности раздела образуется зона скатывания. В этой зоне частицы движутся вниз, вращаются вокруг собственной оси и взаимно перемещаются. В непрерывно действующих грануляторах барабан установлен под некоторым углом к горизонту  $\alpha$  и тогда частицы смещаются по линии максимального ската с шагом  $h$  (линия, по которой перемещаются частицы на криволинейной поверхности под действием сил гравитации, есть линия минимальной потенциальной энергии).

Практически процесс гранулообразования происходит только в зоне скатывания; его интенсивность обусловлена размерами зоны, частотой входа частиц в эту зону, порозностью материала в зоне и т. д. Перемещение материала от загрузочного конца к разгрузочному происходит по кривой  $n'l', \dots, l''n''$  пути, проходимого каждой частицей материала.

Возможны барабаны с внутренними устройствами, но процесс формообразования остается неизменным.

Схема барабанного гранулятора представлена на рис. 2.4.3. Вращающийся корпус *1* с надетыми на него бандажами *2* установлен на

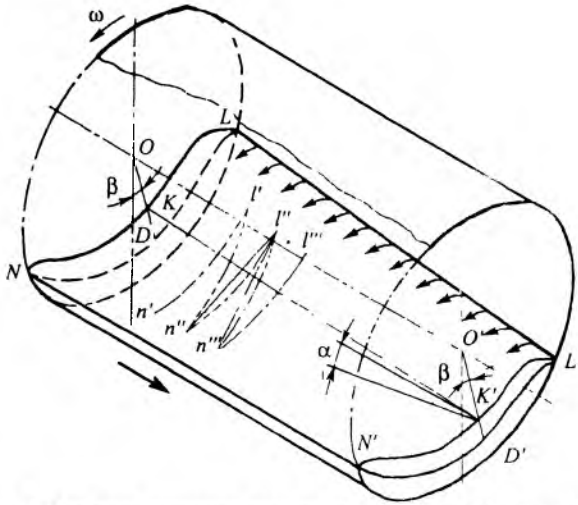


Рис. 2.4.2. Схема движения материала в барабанном грануляторе

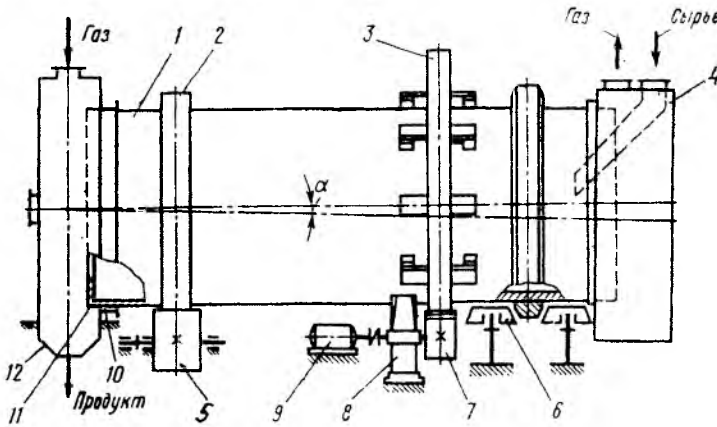


Рис. 2.4.3. Схема барабанного гранулятора:

- 1 – корпус; 2 – бандаж; 3 – венцовое колесо; 4 – загрузочная камера; 5 – роликовые опоры; 6 – упорный (контрольный) ролик; 7 – приводная шестерня; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – уплотнение; 11 – подпорное кольцо; 12 – разгрузочная камера

роликовых опор 5 (в каждой опоре по два ролика). Привод барабана осуществляется от электродвигателя 9 через редуктор 8 и открытую зубчатую пару, состоящую из шестерни 7 и венцового колеса 3 с эластичным креплением к барабану через пакеты рессор. Конструкция исключает передачу температурной деформации корпуса на зубчатое зацепление и выбирает несоосность колеса и бандажей. Угол наклона барабана к горизонтали  $\alpha = 1..3^\circ$ . Для кон-

троля положения барабана и частичного предотвращения его сползания с опорных роликов предназначены упорные (контрольные) ролики 6.

Через загрузочную камеру 4 в барабан поступает обрабатываемый материал. Разгрузочная камера 12 служит для вывода гранулированного продукта и монтажа некоторых устройств. Участок барабана, входящий в разгрузочную камеру, снабжен подпорным кольцом

11. Конструкция камер и тип уплотнений 10 определяются технологическим процессом гранулирования.

По такой схеме работают классические барабаны-окатыватели без внутренних устройств диаметром  $D = 1,6...3,5$  м, длиной  $L = 8...16$  м. Внутренняя поверхность барабана футерована листами резины, прикрепленными к барабану по шести образующим. При вращении листы резины в верхних квадрантах изменяют кривизну и таким образом очищаются от налипшего материала. Ввод связующего организуется через форсунки на движущийся слой материала или предварительно в смесителе.

К барабанам-окатывателям относятся также грануляторы для производства сажи как мокрым (типа БАС-20), так и сухим способом гранулирования (типа АСА). При сухом способе гранулирования сажи, характеризующейся микронным и субмикронным размером исходных частиц, реализуется способ сцепления частиц сажи за счет сил Ван-дер-Ваальса.

При конструировании узлов барабанных грануляторов используются отраслевые стандарты и стандарты предприятий-изготовителей.

Установка гранулятора под углом наклона  $\alpha = 1...3^\circ$  вызывает появление осевой составляющей от силы тяжести барабана на опорных роликах, вследствие чего при вращении барабан начинает сползать с роликов. Для предотвращения этого одну пару опорных роликов перекашивают в одну сторону. Для опорных роликов больших машин характерно применение спаренных осевых подшипников, воспринимающих осевую составляющую веса или составляющую силы трения (при неправильном перекосе роликов). В первом случае нагрузка на правый осевой подшипник  $P_{ос} = Q_p \sin \alpha$ , где  $Q_p$  – радиальная нагрузка на ролик, во втором случае нагрузка на левый осевой подшипник  $P_{ос} = f Q_p$ , где  $f$  – коэффициент трения между бандажом и роликом. Радиальные подшипники в этом случае от осевых нагрузок освобождаются.

Аммонизатор-гранулятор предназначен для ведения процесса грануляции и аммонизации сложных удобрений, при которой окончательно достигается требуемая прочность гра-

нул. В зависимости от реализуемого способа получения сложного удобрения в аммонизатор-гранулятор вводятся: плав аммиачной селитры, раствор моноаммонийфосфата, хлористый калий, внешний ретур (ретурность достигает отношения 1:4) и газообразный аммиак, в тех или иных соотношениях. Это – машина большой единичной производительности, с пропускной способностью  $Q = 100...500$  т/ч, диаметром барабана обычно  $D = 3,5; 4; 4,5$  м, длиной  $L = 8...16$  м, частотой вращения  $n = 8...12$  мин<sup>-1</sup>.

Аммонизаторы-грануляторы работают при нормальной температуре. Материал немного подогревается только за счет теплоты экзотермической реакции аммонизации и иногда при подаче пара для улучшения грануляции.

Корпус 1 аммонизатора-гранулятора установлен на станциях опорно-упорной 3 и опорной 7 с упором-предохранителем (рис. 2.4.4). Высокоагрессивная среда (фосфорная кислота, аммиак) внутри барабана определяет изготовление его из двухслойной стали СтЗсп + 10Х17Н13М2Т. Бандажи скреплены жестко с барабаном клиновыми башмаками, привариваемыми после монтажа, с установкой дополнительных упоров. Свободно надетые бандажи не применяют, так как большая масса барабана и материала внутри него при высокой угловой скорости  $(0,4...0,5)\omega_{кр}$  приводит к значительному «раскатыванию» внутреннего диаметра бандажа.

Опоры выполнены по схеме барабана-окатывателя. Привод отличается от рассмотренного тем, что зубчатый венец 5 крепится на барабане жестко при помощи фланцевого соединения 6, а эластичность зубчатого зацепления достигается за счет подпружиненной подвенцовой шестерни. С моторно-редукторной группой подвенцовая шестерня соединена карданным валом 4.

Барабанный гранулятор-сушилка типа БГ предназначен для производства сложных удобрений (аммофоса, нитрофоски и др.) методом наращивания удобрения из пульпы на частицы ретура. На рис. 2.4.5 показан корпус гранулятора-сушилки типа БГ 4,5 × 16 (диаметром  $D = 4,5$  м и длиной  $L = 16$  м).

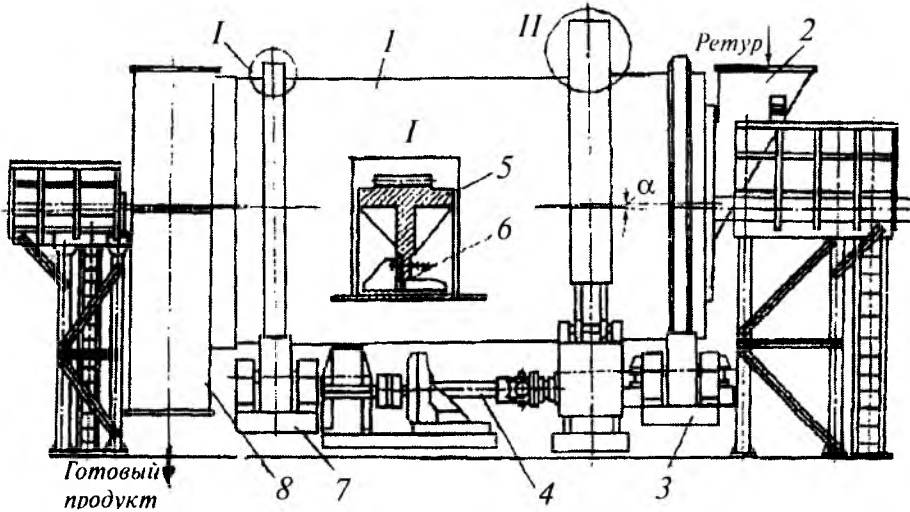


Рис. 2.4.4. Аммонизатор-гранулятор:

1 – корпус; 2 – загрузочная течка; 3 – опорно-упорная станция; 4 – карданный вал; 5 – зубчатый венец; 6 – фланцевое соединение; 7 – опорная станция; 8 – разгрузочная головка

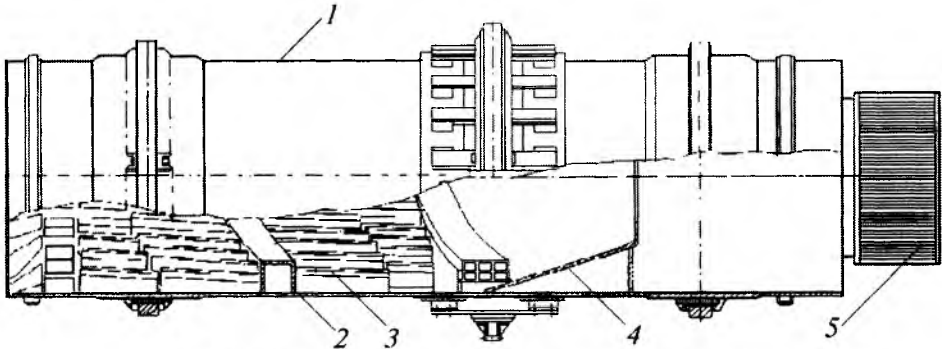


Рис. 2.4.5. Корпус барабанного гранулятора-сушилки типа БГ

Загрузочный (левый) конец барабана 1 входит в загрузочную головку, из которой в барабан поступают внешний ретур, пульпа гранулируемого удобрения из пневматической форсунки и сушильный агент (топочные газы). Пульпа распыливается на плотную завесу частиц ретура, создаваемую подъемно-лопастной насадкой 3. В циклах подъем – скатывание по лопастям – полет гранулы наращиваются до нужного размера, формируются и сушатся.

В отличие от зарубежных сферодайзеров такая сушилка оборудована системой внутреннего ретура, состоящей из классифицирующего

конуса 4 и обратного шнека 2. Работа классифицирующего конуса основана на эффекте сепарации полидисперсного слоя во вращающемся барабане: крупные частицы двигаются по внешним траекториям. Таким образом конус пропускает крупные частицы, а мелкие зачерпываются обратным шнеком. На разгрузочном конце барабана смонтирован классификатор 5, убирающий из общего потока крупные (аварийные) агломераты.

Барабанный гранулятор-сушилка 4,5 × 16 при производстве сложных удобрений имеет техническую характеристику, приведенную ниже.



Производительность по готовому продукту, т/ч.....	45
Температура сушильного агента, °С	
на входе .....	200... 500
на выходе .....	100
Частота вращения барабана, мин <sup>-1</sup> .....	4,5
Мощность двигателя, кВт .....	320
Масса, т .....	227

*Технологический расчет барабанного гранулятора.* Основные параметры, связывающие процесс гранулирования с размерами и режимами работы гранулятора, – производительность  $Q$  и длина пути  $S$  материала в барабане. Для грануляторов без внутренних устройств

$$Q = F_1(D, L, \alpha, \omega, \Phi, f);$$

$$S = F_2(D, L, \alpha, \omega, \Phi, f),$$

где  $\omega$  – рабочая угловая скорость барабана;  $\Phi$  – коэффициент заполнения;  $f$  – коэффициент внутреннего трения обрабатываемого материала;  $\alpha$  – угол наклона барабана.

Если допустить, что радиус подпорного кольца равен расстоянию от центра барабана до центра масс сегмента загрузки материала, то производительность  $Q$ , осевая скорость перемещения материала  $v_{oc}$  и длина пути  $S$  описываются уравнениями:

$$Q = v_{oc} F_m \rho;$$

$$v_{oc} = \omega R(1 - \Phi)(\operatorname{tg} \varphi / \sin \beta) \{ \operatorname{tg} \alpha + [(0,364\Phi - 0,0066)R/L + (0,02\Phi + 0,009)] \cos \varphi \};$$

$$S = 2(1 - \Phi)\omega R(L/v_{oc}) \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $F_m = \pi \Phi D^2 / 4$  – площадь сегмента загрузки;  $\operatorname{tg} \varphi = f$ ;  $\varphi$  – угол естественного откоса материала;  $\beta = \varphi + (\omega^2 R/g) \times (1 - 1,8\Phi) \sin \varphi$  – угол подъема центра масс материала;  $R = D_{вн}/2$  – внутренний радиус барабана.

Для барабанного гранулятора-сушилки зависимость значительно сложнее ввиду большего количества размеров внутренних устройств и при этом одновременно необходимо корреспондировать результаты с тепловым расчетом.

*Прочностной расчет барабанного гранулятора.* Корпус (барабан) грануляторов рассчитывают на прочность, как балку кольцевого сечения на двух опорах, нагруженную системой распределенных сил от массы обечайки, материала в барабане, внутренних устройств и сосредоточенной силы от массы венцовой шестерни. Осевой момент сопротивления поперечного сечения обечайки  $W$  принимают как момент сопротивления тонкого кольца:

$$W = \pi(D/2)^2 \delta,$$

где  $\delta$  – толщина стенки барабана.

Допускаемые напряжения изгиба  $[\sigma_{из}]$  для корпуса гранулятора барабанного типа, изготовленного из сварных обечайек (стали типа Ст3), с учетом концентрации напряжений, не должны превышать 30 МПа.

Бандажи изготавливают из стали 25, 35, 45 литыми или коваными для барабанов диаметром 4...4,5 м. Бандажи рассчитывают на прочность при изгибе и на допускаемые контактные напряжения. Нагруженный бандаж – статически неопределимая конструкция под действием распределенной нагрузки (рис. 2.4.6):

$$q = 2P \cos \alpha / (\pi R);$$

для свободно надетого бандажа и для жестко скрепленного с корпусом бандажа  $q = P / (2\pi R)$ .

Максимальные значения изгибающих моментов, используемые в расчетах, для свободно надетого бандажа

$$M_{\max} = 0,0633 PR;$$

для жестко закрепленного

$$M_{\max} = 0,0857 PR,$$

где  $P$  – реакция в опоре;  $R$  – средний радиус бандажа.

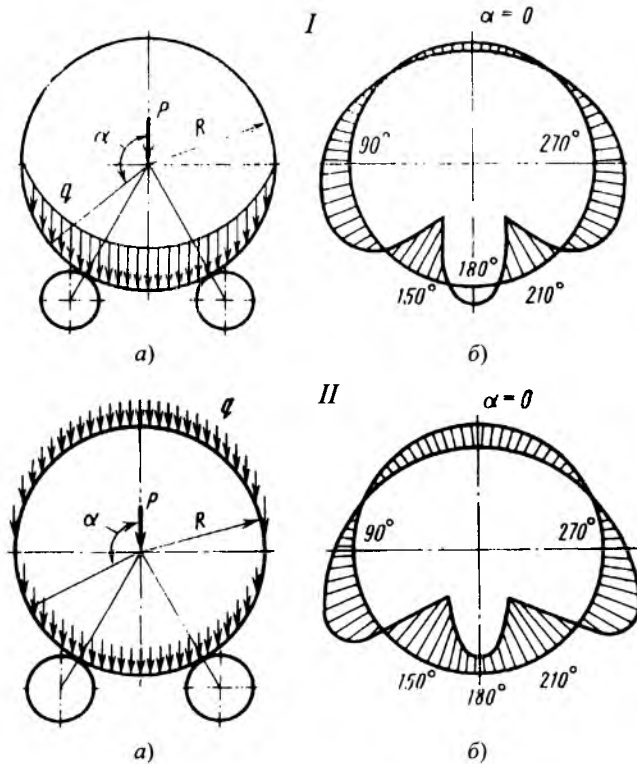


Рис. 2.4.6. Схемы нагружения (а) и эпюры изгибающих моментов (б) бандажа: I – свободно надетого; II – жестко закрепленного

Допускаемые напряжения изгиба выбирают с учетом знакопеременного цикла нагружения.

Контактные напряжения  $\sigma_k$  определяют по формуле Г. Герца для материалов с одинаковым модулем упругости  $E$ :

$$\sigma_k = 0,418 \sqrt{\frac{PE(R+r)}{BRr}}$$

где  $R$  и  $r$  – наружный радиус соответственно бандажа и ролика;  $B$  – ширина бандажа.

Расчетные значения  $\sigma_k$  не должны превышать допускаемых  $[\sigma_k]$ . Для бандажей и роликов из стали 25, 35, 45 рекомендуются следующие значения  $[\sigma_k]$  соответственно 400, 500, 600 МПа.

Расчет упорного ролика барабанного гранулятора. Для реализации качения упорного ролика по скошенной боковой поверхности бандажа без проскальзывания вершина конической поверхности ролика должна находиться

на оси барабана (рис. 2.4.7). Если упорный ролик удерживает барабан от сползания с опорных роликов, то нагрузка  $A$ , действующая на него, является осевой составляющей силы тяжести  $G$  наклонно расположенного барабана:

$$A = G \sin \alpha .$$

Сила, нормальная к боковой поверхности ролика,

$$T_2 = A / \cos(\gamma/2) .$$

где  $\gamma$  – угол при вершине конуса;  $\gamma/2 = \arctg d_{yp} / D_{cp}$ ;  $d_{yp}$  – средний диаметр упорного ролика;  $D_{cp}$  – диаметр бандажа в месте его касания середины ширины упорного ролика.

Упорный ролик рассчитывают на контактные напряжения по формуле

$$\sigma_k = 0,418 \sqrt{\frac{T_2 E}{h_{yp} (D_{cp}/2) \sin(\gamma/2)}} .$$

где  $h_{yp}$  – высота упорного ролика.

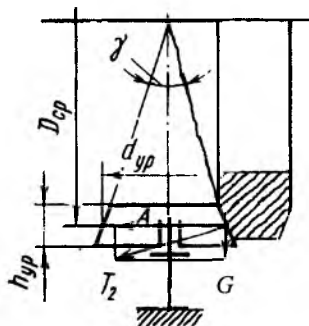


Рис. 2.4.7. Схема действия сил на упорный ролик

Рекомендации по выбору  $[\sigma_k]$  приведены выше.

Расчет остальных узлов грануляторов достаточно прост.

#### Тарельчатые (дисковые) грануляторы.

Рабочим органом тарельчатого гранулятора является вращающийся диск с бортами, ось вращения которого наклонена под углом  $45...65^\circ$  к горизонту и может изменяться в процессе эксплуатации. В химической промышленности диаметр диска гранулятора достигает 4,5 м. Исходный материал подается на диск, вовлекается в циркуляцию (подъем без взаимного перемещения и скатывание по свободной поверхности диска), в процессе которой материал увлажняется из форсунок, аг-

ломерируется и под действием массовых и центробежных сил формируется в гранулы.

Слой поднимающегося материала представляет собой цилиндрическое копыто, на поверхности которого в результате сегрегации оказываются готовые крупные гранулы, идущие через борт на выгрузку. Таким образом, выход товарной фракции у тарельчатого гранулятора выше, чем у барабанного, но требуются большие размеры помещения для тарельчатого гранулятора, кроме того, трудности соблюдения экологических требований из-за уноса пыли (трудности герметизации) ограничивает его широкое распространение в химической промышленности. Тарельчатые грануляторы широко используются в производстве железорудных концентратов, диаметр диска у них достигает 7,5 м.

Установлено, что площадь поверхности тарелки, необходимая для получения 1 т продукта в 1 ч, должна составлять  $1,1...1,3 \text{ м}^2$ .

Тарельчатый гранулятор типа ОТ состоит из наклонно расположенного вращающегося диска 1, вал которого закреплен в опорной раме 6, представляющую собой жесткую сварную конструкцию (рис. 2.4.8). Привод 9 тарелки осуществляется от электродвигателя, расположенного на передвижной плите, через клиноременную передачу, редуктор 10 и коническое колесо 8.

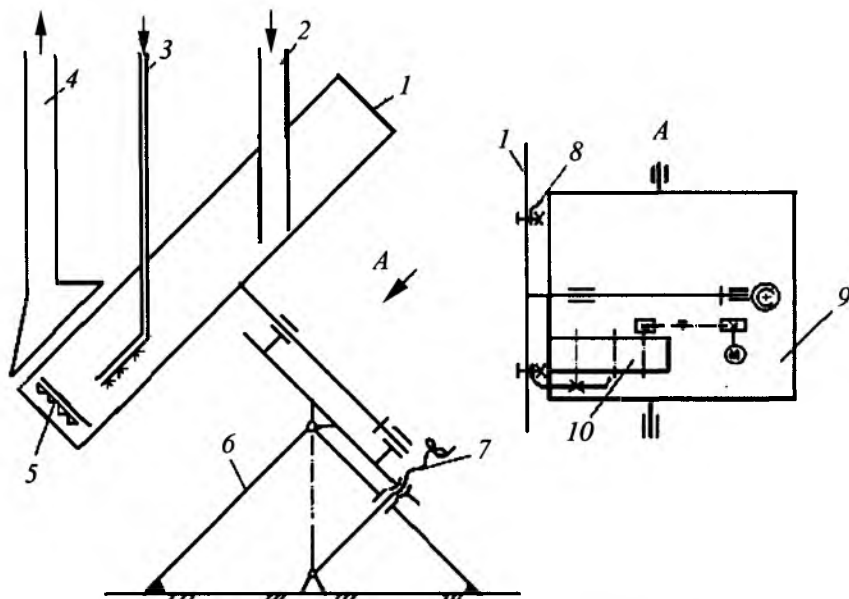


Рис. 2.4.8. Схема тарельчатого гранулятора типа ОТ

К центральной стойке гранулятора прикреплены кронштейны с ножами 5 для очистки дна и бортов тарелки. Угол тарелки изменяется с помощью регулятора 7 угла наклона. Материал на гранулирование подается через течку 2, жидкие компоненты – через распределитель 3, для удаления пыли предназначен зонтик 4. На рис. 2.4.9 показаны механизмы вращения и изменения угла наклона тарельчатого гранулятора типа ОТ диаметром 2 м. На главном валу 1 закрепляется тарель (не показана) и коническая шестерня 2; винт 3 закреплен в шарнирной опоре 5. При вращении винта гайка 4 изменяет угол наклона тарелки.

Механические расчеты тарельчатых грануляторов не представляют трудности, а технологические носят характер обработки экспериментальных данных [8, 15].

К грануляторам окатывания можно отнести машины с неподвижным цилиндрическим корпусом (вертикальные и горизонтальные), в которых перекачивание гранул осуществляется лопастями, насаженными на центральный быстровращающийся вал. Машины оказались энергоемки и широкого применения в многотоннажном производстве не нашли.

**Грануляторы расплавов.** Основным процессом получения гранул из материала, находящегося в жидкой фазе, является гранулирование разбрызгиванием плава в свободный объем, что нашло широкое применение для получения гранул из высококонцентрированных плавов удобрений (аммиачной селитры и карбамида, а также некоторых сложных удобрений) [15, 18]. Процесс осуществляют в высоких полых грануляционных башнях, в которых падающие капли охлаждаются встречным потоком воздуха. На рис. 2.4.10 показана схема грануляционной башни для аммиачной селитры. Обычно две башни объединяют в единую секцию с аппаратурой подготовки исходного материала. Аммиачную селитру гранулируют в башнях высотой 20...60 м, карбамид – в башнях высотой около 50 м, а сложные удобрения – в башнях до 66 м.

Такой способ позволяет гранулировать любые удобрения, имеющие четко определенную температуру плавления и относительно низкую вязкость.

Механизм гранулообразования заключается в распаде истекающих из диспергирующего устройства струй на капли, которые, охлаждаясь во встречном потоке воздуха, превращаются в гранулы. При охлаждении кристаллизация

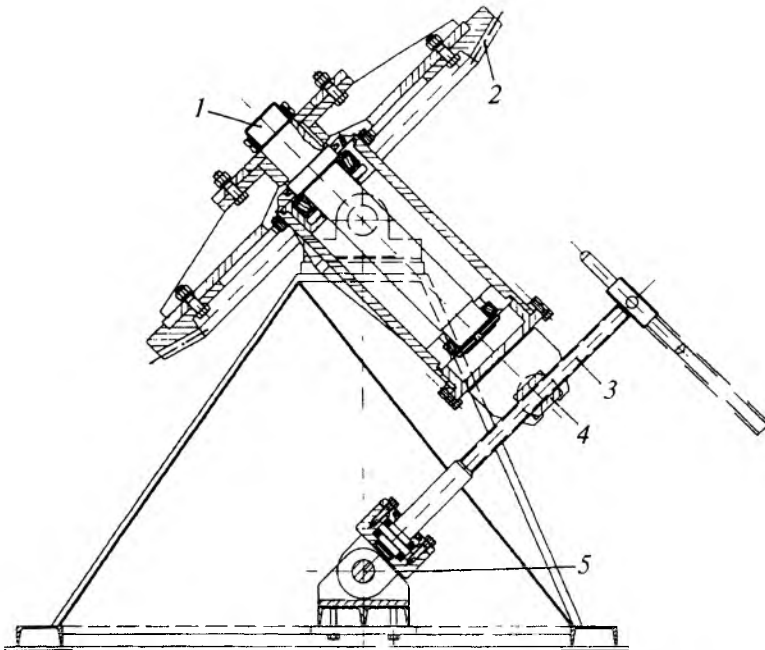


Рис. 2.4.9. Механизмы вращения и изменения угла наклона тарельчатого гранулятора

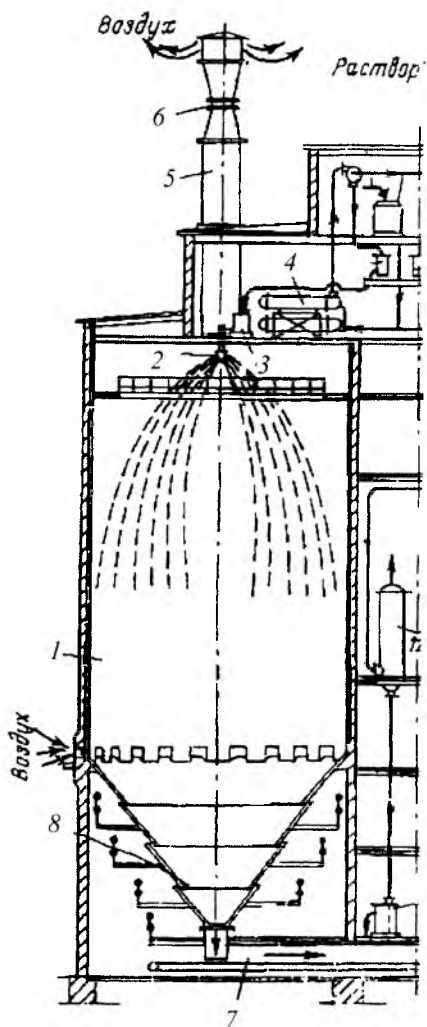


Рис. 2.4.10. Схема грануляционной башни для производства аммиачной селитры

плава начинается с поверхности, происходит образование твердой оболочки, толщина которой по мере движения капли (гранулы) увеличивается. Таким образом, гранулирование происходит по второму способу, с механизмом связывания А.

Грануляционная башня для производства аммиачной селитры представляет собой цилиндрический корпус диаметром 12 м и высотой 39 м или диаметром 16 м и высотой 40,5 м. Грануляционную башню 1 выполняют из монолитного железобетона (толщиной стенки 400 мм) и футеруют с внутренней стороны кислотоупорным кирпичом, уложенным на

диабазовой замазке. Днище грануляционной башни выполняется из бетона и усеченных конусов 8 из углеродистой стали. Обычно на наружной поверхности конусов устанавливают электровибраторы. Для обеспечения прохода воздуха и удобства очистки конусов от налипшей селитры между ними имеются зазоры (щели).

Башня имеет плоскую крышку и потолочное перекрытие. Плоская крышка башни, через которую проходит вал гранулятора 2, изнутри защищен листовой коррозионно-стойкой сталью. На потолочном перекрытии сборки из двух башен смонтированы баки 3 для плава, выпарные аппараты 4, вытяжные трубы 5 и вентиляторы 6. Вывод готовых гранул осуществляет конвейер 7. Здесь же установлены три-четыре вентилятора осевого типа производительностью  $1 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$  каждый, создающий разрежение порядка 0,4...0,6 кПа (40...60 мм вод. ст.) для прокачивания охлаждающего агента (воздуха) из башен. Воздух поступает в башню через 28 окон, расположенных внизу по всему периметру цилиндрического корпуса, а также через зазоры конусов. В каждую башню подается  $(200...300) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха.

При гранулировании разбрызгиванием плава в инертную среду основным аппаратом, определяющим размер и форму гранул, является гранулятор (разбрызгиватель). От качества его работы зависит не только равномерность размеров полученных гранул, но и допустимые плотность орошения, скорость воздуха и высота полета гранул. По методу диспергирования разбрызгиватели делятся на центробежные, статистические и вибрационные.

Центробежный гранулятор разбрызгивания типа РЦ [15] представляет собой конический тонкостенный перфорированный стакан 1, подвешенный вершиной книзу на вертикальном валу 2, соединенном с электродвигателем 3 (рис. 2.4.11). Наиболее распространены конусы с основанием диаметром 300...350 мм и высотой 370...400 мм. Боковая поверхность разбита на несколько поясов; отверстия с основания конуса от пояса к поясу уменьшаются от 2,5 до 1 мм.

Плав из трубопроводов поступает открытой струей через широкую горловину в крышке и истекает через отверстия вращающегося конуса. С увеличением частоты вращения увеличивается зона орошения и уменьшается размер капель.

При конструировании разбрызгивателей следует создавать условия ламинарного истечения струи, для чего принимают отношение длины к диаметру канала истечения не менее 4...5 и тщательно обрабатывают его внутреннюю поверхность и кромки.

Конструкция имеет ряд недостатков: широкий спектр размеров гранул; неравномерное орошение сечения башни (до 30 % почти неорошаемой поверхности и двукратное превышение максимальной плотности орошения над средней) и сегрегацию гранул по размерам по сечению башни, что вследствие ухудшения теплообмена приводит к необходимости снижения производительности; различный напор плава у отверстий, находящихся на разных уровнях, и высокие скорости вылета (более 5 м/с), что ухудшает равномерность дробления струи; выход струи по касательной к поверхности вращающегося конуса, одностороннее ее сжатие и вихревое движение воздуха вблизи разбрызгивателя, усложняющие условия разрыва струи.

Более равномерный гранулометрический состав дает статический напорный гранулятор разбрызгивания типа РН (рис. 2.4.12). Для таких разбрызгивателей рекомендуются выпуклые днища диаметром 0,4...0,5 м. При статическом напоре плава 1,1 м скорость истечения достигает 5 м/с, а диаметр орошаемой площади составляет 3...3,5 м. Для обслуживания одной грануляционной башни в ее верхней части устанавливают пять – шесть напорных грануляторов. Такая компоновка позволяет улучшить равномерность орошения и довести его до 500...600 кг/(м<sup>2</sup>·ч), а также дает возможность чистить последовательно по одному разбрызгивателю без остановки башни.

Равномерность дробления струи увеличивается при наложении вибраций определенных параметров на корпус гранулятора и жидкость или воздушную среду, в которой происходит дробление струй.

Затвердевшие гранулы, достигая низа башни, ударяются о коническую часть и скатываются на днище, а затем перемещаются к выгрузочной щели. Для уменьшения налипания незатвердевшего материала на стенки и конусы башни их футеруют полимерными пленками или листами фторопласта. Применяют также вибрационные устройства. В нижней части башни устанавливают специальный металлический каркас, не соединенный с ее корпусом. На таком каркасе монтируют стальной

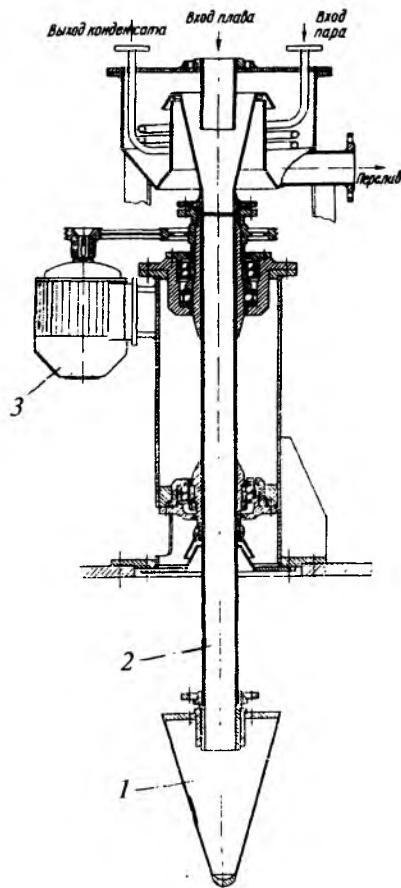


Рис. 2.4.11. Центробежный гранулятор разбрызгивания

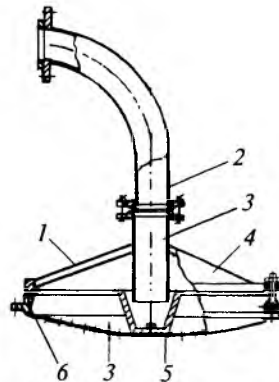


Рис. 2.4.12. Напорный гранулятор разбрызгивания типа РН:  
 1 – теплоизолирующая рубашка;  
 2 – плавоподводящий патрубок; 3 – штуцер;  
 4 – корпус; 5 – распределитель;  
 6 – разбрызгиватель расплава

конус, состоящий из четырех поясов, каждый из которых закреплен на каркасе подвесками. На трех верхних конусах имеются вибраторы, на участках наибольшего налипания на конус укладывают металлический прут, отбивающий наросты при включении вибраторов. Применение виброконуса позволяет значительно упростить эксплуатацию башен.

К основным недостаткам грануляционных башен относятся: сравнительно высокая температура гранул на выходе из башни (до охлаждения); возможность использования их объема примерно только на 50 %; большие капитальные затраты на строительство; громоздкость и др.

При производстве азотных удобрений успешно используют башню, в нижней части которой встроен аппарат с псевдоожиженным слоем, что позволяет сократить в 1,5 раза высоту полета гранул, повысить в 5 – 8 раз плотность орошения и устранить налипание продукта. Подача воздуха через псевдоожиженный слой позволяет к тому же равномерно распределять его по сечению башни. Полузатвердевшие гранулы попадают на поверхность псевдоожиженного слоя, в котором охлаждаются до требуемой температуры и выгружаются из аппарата. Для интенсификации процесса охлаждения снижают высоту падения гранул и увеличивают скорость воздуха, который используют сначала для прохождения через псевдоожиженный слой, а затем для омыwania падающих гранул.

С применением псевдоожиженного слоя возрастает унос пыли, из-за увеличения скорости воздуха, что влечет за собой ухудшение экологии и увеличение затрат на улавливание пыли. Следует отметить, что при возрастающих требованиях по экологии окружающей среды к конструкциям грануляционных башен предъявляются дополнительные требования по прочности и жесткости корпуса, так как на верхних отметках необходимо размещать пылеулавливающие системы типа скрубберов водной очистки. Размещение скрубберов внизу требует больших затрат на воздухопроводы и транспорт газа.

Технологический расчет грануляционной башни заключается в определении ее диаметра и высоты, исходя из допустимой средней плотности орошения и термодинамических параметров образования гранул [15].

Сравнение некоторых экономических показателей производства комплексных удобрений в грануляционных аппаратах разного типа свидетельствует о том, что процесс в грануляционной башне с воздушным охлаждением более прост, экономичен и идет с незначительным выделением пыли и ретур. Потребление электроэнергии и теплоты меньше при производстве сложных удобрений, чем в процессах с гранулированием в аммонизаторе-грануляторе; капитальные затраты на 5 % ниже, чем для других процессов.

**Прессующие шнековые грануляторы.** Метод гранулирования, при котором шнековый механизм транспортирует исходный материал к фильтрам и продавливает его с образованием гранул, широко используется в химической промышленности при гранулировании пастообразных и термопластичных полимерных материалов. При этом транспортная операция в шнековой зоне часто совмещена с операциями перемешивания, нагревания, последующего охлаждения, пластикации и др.

Для гранулирования пастообразных материалов применяют одношнековые грануляторы типа ФШ (формования шнековые) с диаметром шнека 100, 150, 200 [31]. Производительность этих машин 400...1500 кг/ч при частоте вращения 19...50 мин<sup>-1</sup>. При работе продукт непрерывно поступает в загрузочную камеру, захватывается транспортно-прессовой частью шнека, уплотняется, а затем продавливается через фильтрованную решетку с помощью протирочной головки. Получаемые (шнуры) жгуты под действием собственного веса обламываются, падают на движущуюся ленту конвейера-раскладчика, а затем направляются на сушку. Все грануляторы типа ФШ снабжаются загрузочными нагнетателями по типу двуххвостового Z-образного смесителя.

Для этой же цели служат реакторно-смесительные двухшнековые установки типа СН: СН100 – СН400, с диаметрами шнеков 100...400 мм, частотой вращения 200...30 мин<sup>-1</sup> и производительностью 50...1500 кг/ч. На установках типа СН перерабатываются и гранулируются анодные массы, синтетические моющие средства, пигменты, ускорители вулканизации резины, пигменты, катализаторы и др.

Для липких паст разработаны конструкции, в которых шнек кроме вращения совершает и возвратно-поступательное (осциллирующее) движение. Пальцы, укрепленные на кор-

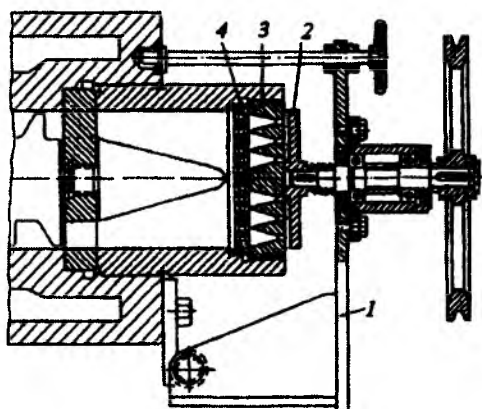


Рис. 2.4.13. Гранулирующая головка для горячего гранулирования

пусе и совпадающие с разрывами в винтовой нарезке, способствуют турбулизации потока материала и ликвидации возможного проскальзывания между материалом и корпусом установки.

В прессующих грануляторах пастообразных материалов происходит гранулирование по третьему способу и связывание частиц механизмами типа *A*. Исходными материалами могут быть порошки и связующее или различные твердые ингредиенты. В последнем случае в машине кроме смешивания происходят пластикация и, как заключительная стадия, гранулирование.

Второй процесс наиболее полно исследован в производстве и переработке полимерных материалов.

Выбор экструдера полностью определяется свойствами перерабатываемого материала. Промышленность предлагает одно-, двух- и четырехвальные экструдеры с диаметром червяков 63...400 мм, производительностью до 15 т/ч.

Следует отметить многообразие конструкций экструдеров. Существуют два метода гранулирования термопластичных материалов: горячее и холодное. В гранулирующей головке для горячего гранулирования через решетку 4 и мундштук 3 выдавливаются шнуры (жгуты), которые режутся непосредственно у профилирующей головки вращающимися ножами 2 на гранулы (рис. 2.4.13). Вращение ножей осуществляется от двигателя через клиноременную передачу. Для обслуживания головки узел ножей отводится поворотным кронштейном 1. Торцевая рабочая поверхность головки подвергается

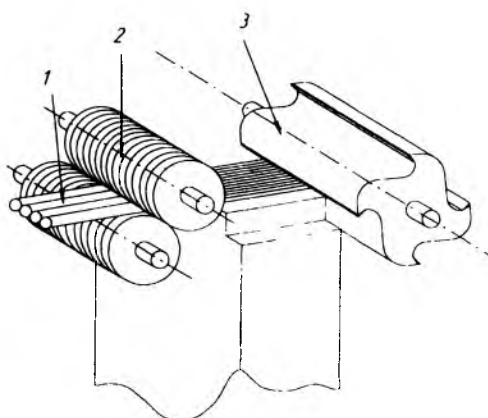


Рис. 2.4.14. Механизм резки жгутов: 1 – жгут; 2 – направляющий механизм; 3 – роторный нож

термической обработке и полировке. Кроме того, формующая плита с отверстиями должна быть достаточно жесткой, в противном случае при ее деформации образуется зазор, в который попадает материал, который замазывает торцы и ломает ножи.

Метод холодного гранулирования заключается в резке материала, находящегося в твердом состоянии, для чего после выхода из аналогичной головки без ножей шнуры (жгуты) протягиваются через охлаждающую ванну с водой. Метод холодного гранулирования предпочтителен для низковязких материалов (полистирола, полиамидов). На рис. 2.4.14 показан механизм резки жгутов.

**Валковые прессы для гранулирования сыпучих материалов.** Большая группа сыпучих материалов не позволяет использовать механизмы связывания, основанные на капиллярных силах сцепления (область *B*, см. рис. 2.4.1). К таким материалам относятся сильные электролиты (хлорсодержащие удобрения, сульфат аммония и т.д.). Для таких материалов оптимальным является применение прессового оборудования большой производительности – валковых прессов.

При прессовании без связующего независимо от размеров исходных частиц прочность полученных гранул только за счет межзатомного взаимодействия будет не ниже 0,3 МПа (выше штриховой линия на рис. 2.4.1). При введении небольшого количества связующего возможна реализация химического взаимодействия или оплавления границ зерен за счет высокого давления и температуры с после-



дующим отверждением и образованием связи кристаллизационного типа.

Процесс вальцевания широко применяется в химической, металлургической, электроугольной промышленности, керамическом и стекольном производствах.

Технология получения гранул из сыпучих материалов методом вальцевания включает как минимум три основных процесса: вальцевание исходного порошка и получение плитки, дробление плитки и классификацию полученного гранулированного материала с целью выделения товарной фракции.

В типовой технологической схеме получения гранулированных удобрений методом вальцевания из сухих порошков без ввода связующих веществ исходные сухие порошковые компоненты подаются из смесителя 1 на прессование в валковый пресс 2 (рис. 2.4.15) [8]. На вибросите 3 происходит отделение пресованного материала от просыпи. Измельченный в дробилке 4 материал рассеивается на виброгрохоте 5. Мелкая фракция после вибросита 3 и виброгрохота 5 вновь подается на прессование, а крупная – в дробилку 6, после чего повторно рассеивается.

В технологической схеме производства гранулированных фосфорно-калийных удобрений вальцеванием с вводом вязущих растворов соль калия и томасшлак загружаются в бункеры-накопители. Из бункеров порошки дозируются в смеситель, в который при пере-

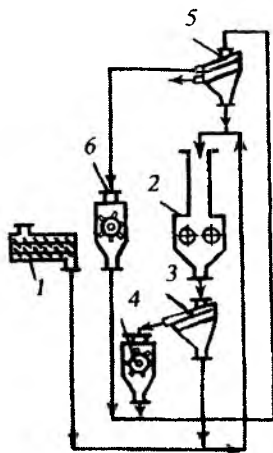


Рис. 2.4.15. Технологическая схема получения гранулированных минеральных удобрений методом вальцевания без ввода связующих

мешиванию добавляется вода. После смесителя шихта влажностью 5...9 % прессуется в валковом прессе. Спрессованный материал направляется в сушильный барабан, а затем в дробилку. Измельченный продукт рассеивается на грохоте. Мелкая фракция возвращается в общий поток и поступает в смеситель, крупная фракция – на повторное измельчение в дробилку.

Анализ материальных потоков в действующих промышленных установках гранулирования, например, хлористого калия, показывает, что выход спрессованного продукта по отношению к подаваемому в валковый пресс порошку составляет 40...60 %, а выход товарных гранул – 30...35 %.

Основным оборудованием, на котором основывается процесс гранулирования, является валковый пресс (рис. 2.4.16) [8]. Два цилиндрических вала 1 и 2 валкового пресса установлены в опорах 5 и 6 на станине 4. Между вращающимися в противоположных направлениях валами имеется регулируемый зазор. Опоры 5 одного из валков установлены на станине с возможностью относительного перемещения, подпружинены или поджаты гидроцилиндрами. Перерабатываемый порошковый материал подается в бункер 3 пресса и из него на валки, затягивается между ними в зазор, соответствующий выбранной толщине и плотности плитки.

Производительность валкового пресса регулируется изменением частоты вращения валков. Требуемое давление прессования обеспе-

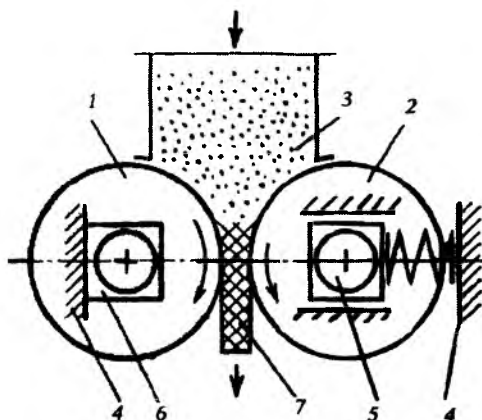


Рис. 2.4.16. Кинематическая схема валкового пресса

чивается (см. выше) с помощью пакетов пружин или гидравлической системы. Для равномерной подачи материала в зазор между валками и предотвращения образования недостаточно плотной и компактной плитки, а также просыпи порошкового материала служит бункер 3, с боковыми неподвижными стенками. Торцовые стенки бункера прижаты к торцам валков и сделаны с запасом по ширине, который выбирается при перемещении подвижного валка. Для лучшего захвата порошка валками и повышения плотности плитки в бункерах могут быть установлены подпрессовывающие устройства в виде конического шнека или дополнительной пары валков.

В зависимости от назначения и свойств прессуемого материала конструкции валковых прессов, используемых в производстве минеральных удобрений, отличаются компоновкой комплектующего оборудования, геометрией прессующих валков, приводом, производительностью и потребляемой энергией.

Валки прессов имеют гладкую, волнистую или рифленую поверхность, что дает возможность получать спрессованные удобрения в виде плитки, ленты, отдельных листов и брикетов разной формы и размеров.

В зависимости от силы прессования валковые прессы можно разделить на три категории:

низкого давления – с распределенной силой прессования, т.е. силой, действующей на валок, отнесенной к единице ширины прессуемой плитки материала, до 1,5 МН/м;

среднего давления – с распределенной силой прессования до 4...5 МН/м;

высокого давления – то же, до 20 МН/м.

При прессовании материала в виде пластин или лент зазор между валками составляет 5...12 мм, а при изготовлении отдельных брикетов – 1...2 мм. Величина этого зазора определяется плотностью получаемого продукта и зависит от диаметра валков, ширины плитки, физико-механических свойств уплотняемого материала и т.д.

Если необходимо при вальцевании увеличить плотность плитки, то для этого повышают силу прессования и уменьшают ширину рабочей поверхности валков. С уменьшением ширины валков снижается производительность установки, что можно частично компенсировать увеличением частоты вращения валков.

Если установка вальцевания оснащена загрузочным устройством с подпрессовывателем, то снижение производительности для порошковых продуктов может быть компенсировано предварительным уплотнением материала и лучшей загрузкой уплотняющих валков.

Валки прессов обычно изготавливают из легированного чугуна, содержащего около 3 % хрома. Наружная поверхность валков закаливается на глубину 18...25 мм, внутренняя полость валка имеет меньшую твердость для поглощения ударов и вибраций.

Для дробления в описанных технологических схемах используют валковые дробилки с рефлеными или зубчатыми валками либо роторные, рассмотренные выше.

Для классификации используют грохоты с вибраторами кругового или прямолинейного движения.

Результатами аналитических исследований по определению основных функциональных параметров валковых прессов являются сила прессования, плотность и толщина плитки [7]. Определяется также мощность двигателя валкового пресса.

## 2.4.2. ТАБЛЕТОЧНЫЕ МАШИНЫ

Таблетирование предназначено для получения компактных изделий или полуфабрикатов в виде таблеток или брикетов из сыпучих или волокнистых материалов. Таблетирование в химической промышленности широко применяется в процессах переработки пластмасс, при изготовлении катализаторов, асбестоцементных изделий, продуктов бытовой химии, некоторых видов удобрений и т.д.

Как и при гранулировании, таблетки (брикеты) используются, как готовый продукт (катализаторные кольца, в бытовой химии, медицинские препараты и др.) либо как промежуточный полупродукт, который подвергается последующей переработке. В первом случае таблеточные машины (машины-автоматы) имеют высокую производительность благодаря снижению времени, затрачиваемого на вспомогательные операции, меньшую себестоимость и лучшую стабильность готовых изделий и т.д. Кроме того, таблеточные машины могут изготавливать одновременно изделия различной конфигурации.

Во втором случае преимущества таблетированного материала перед сыпучим аналогичны преимуществам гранулированного, кроме того решена важная проблема дозирования, так как таблетка-полуфабрикат определенной массы позволяет организовать в последующих стадиях процесса безотходную технологию.

В процессах таблетирования (брикетирования) прочность таблеток мало зависит от размера исходных частиц, так как высокое давление способствует гомогенизации исходных смесей, уменьшению пористости, а следовательно количества связующего. Для прессовок без связующего, например, металлических порошков, механизм сцепления объясняется механическим сцеплением, электростатическими силами и силами трения; таблетирование с использованием связующего может быть описано механизмом *A* (см. рис. 2.4.1).

По характеру взаимодействия рабочих органов и объектов обработки таблеточные машины относятся к машинным агрегатам, в которых осуществляется прерывно-операционные (дискретные) технологические процессы. Сложность операций, из которых состоит технологический процесс, определяет конструкцию исполнительных органов таблеточной машины, ее кинематическую схему и общую компоновку.

Для классификации машин-автоматов, к которым относятся таблеточные машины, используют предложенную Л.Н. Кошкиным градацию на четыре класса по характеру соотношения технологического и транспортного движения исполнительного органа и объекта обработки.

К машинам первого класса относятся те, в которых исполнительный орган машины выполняют операции при неподвижном объекте обработки (транспортное движение объекта обработки отсутствует). Таким образом, транспортные и рабочие перемещения находятся в противоречии, каждое из них занимает определенное место в балансе времени, составляющем технологический, а также рабочий цикл  $T_p$ , что ограничивает возможности по повышению производительности агрегата.

Машины этого класса предназначены для производства штучной продукции. Это различного типа гидравлические и кривошипные (эксцентрикковые) таблеточные машины, литьевые машины для переработки полимерных материалов, упаковочные машины и пр. Большинство этих машин – автоматы и полуавтоматы.

В машинах второго класса для осуществления технологического процесса необходимо обеспечить заданные значения скоростей вспомогательных органов по величине и направлению. Обычно транспортное движение объекта обработки совпадает с рабочим движением исполнительного органа машины. Такие машины служат для выпуска как штучной, так и нештучной продукции; их производительность определяется оптимальной скоростью выполнения рабочей операции.

К машинам такого класса относятся, например, вальцы, червячные прессы в производстве керамических материалов и переработке пластмасс, оплеточные машины кабельного производства и др. Некоторые из этих машин – автоматического действия.

В машинах третьего класса скорость транспортного перемещения объекта обработки не зависит от скорости рабочего перемещения исполнительного органа машины. Это позволяет теоретически получить сколь угодно высокую производительность агрегата.

К машинам этого класса относятся роторные таблеточные машины, роторные прессы для производства кирпича и других керамических материалов.

В машинах четвертого класса исполнительный орган неподвижен, осуществляется лишь транспортное перемещение объекта обработки. Машина, по сути дела, вырождается в аппарат.

Таблеточные машины относятся к первому и третьему классу. Основными производителями таблеточных машин являются фирмы: Стокс (США), Манести (Великобритания), В. Фетте, Киллиан, Хорн (Германия), «Металлист» (Россия), Мариупольский завод технологического оборудования (Украина).

**Кривошипные таблеточные машины.** Эти машины-автоматы первого класса с жесткой программой имеют периодическое перемещение объекта обработки, однопозиционное, могут быть одно- и двухпоточными (в последнем случае используется двухкривошипный главный вал) с одногнездным или многогнездным инструментом.

Они применяются для производства штучной продукции: при переработке терморезистивных композиций, в химико-фармацевтической промышленности, для производства металлокерамических изделий и т.д. Таблетирование позволяет получить из порошка компактную таблетку определенной массы и

прочности. Процесс состоит из четырех операций: объемного дозирования порошка в матрицу, прессования порошка с образованием таблетки, выталкивания таблетки из матрицы и перемещения ее в тару. Точность дозирования в таблеточных машинах – до 2 % массы дозы.

Технологический процесс таблетирования начинается с операции дозирования (рис. 2.4.17), при выполнении которой башмак 1 питателя-дозатора находится над матрицей 2, установленной в столе пресса. Глубина  $H$  заполнения матрицы определяется положением нижнего пуансона 4. Затем башмак питателя-дозатора отводится в сторону, а верхний пуансон 3, перемещающийся вертикально, осуществляет прессование порошка. Конечная высота таблетки  $h$ ; если нижний пуансон при прессовании не перемещается, то путь верхнего пуансона в матрице  $H - h$ . В некоторых таблеточных машинах перед прессованием нижний пуансон немного смещается вниз, чтобы не происходило «выплескивания» порошка из матрицы при входе в нее верхнего пуансона.

Дозирование сыпучего материала (отделение дозы порошка от остальной его массы) следует отнести к основным операциям. Аналогично классифицируется и операция прессования.

Выталкивание таблетки из матрицы в кривошипной таблеточной машине осуществляется вверх до уровня поверхности стола с помощью нижнего пуансона 4. При очередном перемещении в позицию дозирования башмак

питателя-дозатора передней кромкой перемещает таблетку, вытолкнутую из матрицы, по поверхности стола на наклонной лоток, который направляет ее в тару.

Операция выталкивания и перемещение таблетки – вспомогательные операции.

Опускание нижнего пуансона и заполнение матрицы следующей дозой порошка начинается только после того, как башмак перекроет отверстие матрицы. Это позволяет снизить разброс массы таблеток при дозировании.

На станине 1 установлен корпус 4 кривошипной таблеточной машины, в котором размещены все исполнительные механизмы (рис. 2.4.18). От электродвигателя 2 при помощи клиноременной передачи 3 вращение передается шкиву-маховику 5, установленному на промежуточном валу, который через зубчатую передачу приводит во вращение распределительный вал – главный вал машины.

На главном валу закреплены кривошип механизма прессования 7 и кулачки механизмов дозирования и выталкивания. Механизм дозирования состоит из кулачка, от которого приводится коромысло 8 рычажной кинематической цепи. Питатель-дозатор 6 с башмаком 9 совершают возвратно-поступательное движение над поверхностью стола.

Вытолкнутая на поверхность стола таблетка перемещается башмаком 9 на наклонный лоток 10, а оттуда – в тару, устанавливаемую на подставку 11.

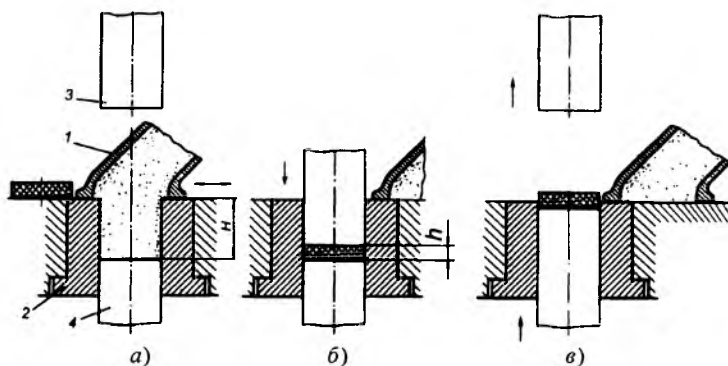


Рис. 2.4.17. Операции технологического процесса таблетирования:

*a* – дозирование порошка (перемещение таблетки);

*б* – прессование порошка; *в* – выталкивание таблетки;

1 – башмак; 2 – матрица; 3 – верхний пуансон; 4 – нижний пуансон

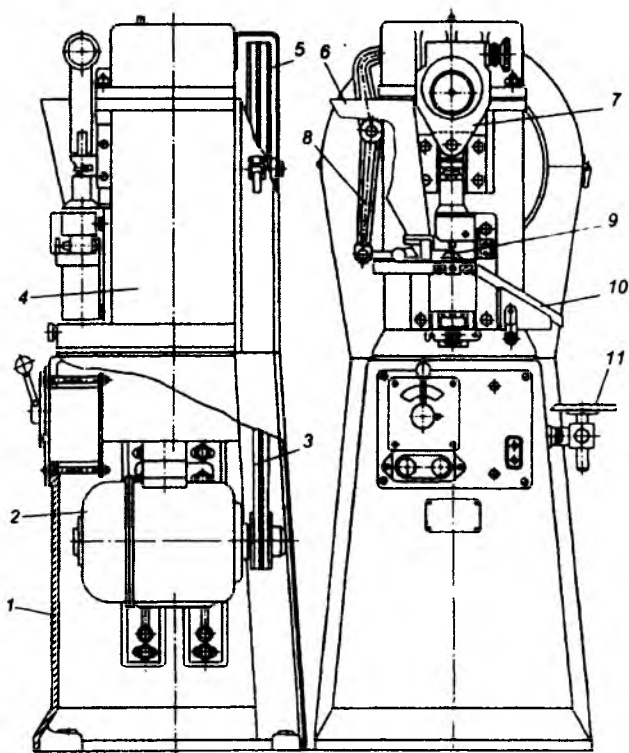


Рис. 2.4.18. Кривошипная таблеточная машина

В кривошипно-ползунном механизме прессования (рис. 2.4.19) предусмотрена регулировка длины шатуна, что позволяет менять глубину захода верхнего пуансона в матрицу, т.е. степень уплотнения порошка при прессовании. С этой целью в корпусе шатуна 3 установлена эксцентриковая втулка 5, которая может поворачиваться относительно корпуса шатуна при помощи червяка 4. Распределительный вал 1 образует с эксцентриковой втулкой вращательную цилиндрическую кинематическую пару. Другим шарниром шатун соединен с ползуном 7, в котором закреплен толкатель верхнего пуансона 9. При повороте втулки 5 изменяется нижнее крайнее положение ползуна 7.

Дисковые пазовые кулачки механизмов выталкивания и дозирования конструктивно объединены в одну деталь 2. Механизм выталкивания состоит из кулачка и штанги-толкателя 8, на одном конце которой закреплен ролик 6, а на другом – вилка 16. При подъеме штанги вилка 16, охватывая проточку корпуса 14 нижнего пуансона 13, поднимает его вверх, осуществляя выталкивание таблетки из

матрицы 17. Нижнее положение пуансона 13 регулируется винтовым механизмом; при повороте гайки 15 изменяется по высоте положение нижнего пуансона и, следовательно, глубина заполнения матрицы 17.

Башмак механизма дозирования имеет ворошители 10, которые предупреждают сводообразование порошка и способствуют подаче его в матрицу. Вращение ворошителям передается от зубчатого колеса 11, сцепленного с неподвижной рейкой 12.

Техническая характеристика кривошипной таблеточной машины ТП-1М приведена ниже.

Диаметр прессуемых таблеток, мм, не более	12
Глубина заполнения матрицы, мм, не более	15
Максимальная сила прессования, кН	17
Производительность, шт/ч, не более	3000
Мощность двигателя, кВт	1,1
Габаритные размеры, мм	600 × 560 × 1300
Масса, кг	300

Номенклатура кривошипных таблеточных машин велика, что объясняется использованием их для таблетирования множества ма-

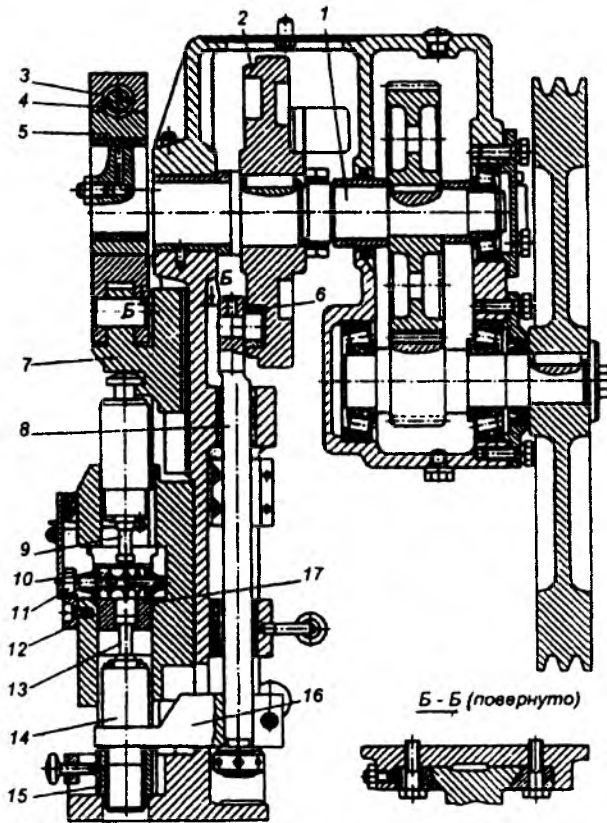


Рис. 2.4.19. Распределительный вал и исполнительные механизмы кривошипной таблеточной машины

териалов, диаметр таблеток 12...100 мм, сила прессования 20 кН...1 МН, а производительность 1000...5000 шт./ч.

Преимущество кривошипных таблеточных машин состоит в надежности и простоте их конструкции, быстрой и несложной переналадке пресс-инструмента при переходе на выпуск других изделий.

К недостаткам нужно отнести низкий КПД ( $\eta = 0,35...0,6$ ), что объясняется потерями на трение при действии больших сил в кинематических парах.

*Технологический расчет.* Основная зависимость, необходимая при реализации процесса таблетирования, – связь между плотностью полученной таблетки  $\rho$  и давлением прессования  $p$ .

Теоретический закон не выведен и существует более 100 математических зависимостей  $\rho = f(p)$ , привязанных к определенным группам прессуемых материалов и работающих при

наличии некоторых экспериментальных констант прессования. Наиболее универсальными являются степенная зависимость Смита и экспоненциальная Кунина – Юрченко:

$$\rho = \rho_n \left[ 1 + \left( \frac{p}{A} \right)^{1/a} \right];$$

$$\rho = \rho_{np} - (K_0/\alpha) e^{-\alpha p},$$

где  $\rho_n$  – начальная плотность порошка;  $\rho_{np}$  – условная предельная плотность;  $A$ ,  $a$ ,  $K_0$ ,  $\alpha$  – экспериментальные константы для прессуемых материалов.

Теоретическая производительность, шт./ч,

$$Q_T = 3600 \frac{mw}{T_p},$$

где  $m$  – число гнезд в пресс-инструменте;  $T_p$  – время рабочего (выпускного) цикла, ч;  $w$  – число потоков.

Фактическая производительность

$$Q_{\text{ф}} = K_{\text{и}} Q_{\text{т}},$$

где  $K_{\text{и}} = K_{\text{т.и}} K_{\text{орг}}$  – коэффициент использования;  $K_{\text{т.и}}$  – коэффициент, учитывающий простой по техническим причинам (износ и замену инструмента, ремонт оборудования, наладку, настройку, техническое обслуживание и т.д.);  $K_{\text{орг}}$  – коэффициент, учитывающий простой от брака, вследствие некондиционных прессуемых материалов, неудовлетворительной организации работы и т.д.

*Энергетический расчет.* При наличии экспериментально подтвержденной зависимости  $\rho = f(p)$  можно найти работу прессования

$$A_{\text{пр}} = m \int_0^{\rho_{\text{к}}} \varphi(\rho) \frac{d\rho}{\rho^2},$$

где  $m$  – масса таблетки;  $\rho_{\text{к}}$  – конечная плотность.

Для определения работы при выталкивании таблетки  $A_{\text{выт}}$  вначале определяют силу выталкивания

$$P_{\text{выт}} = \pi D h \tau_{\text{выт}},$$

где  $h$ ,  $D$  – высота и диаметр таблетки;  $\tau_{\text{выт}}$  – удельная сила трения при выталкивании (экспериментальная величина).

Тогда

$$A_{\text{выт}} = P_{\text{выт}} \left( S_{\text{пр}} + \frac{h}{2} \right),$$

где  $S_{\text{пр}}$  – ход таблетки внутри матрицы при выпрессовке.

Мощность двигателя кривошипной таблеточной машины

$$N_{\text{дв}} = (1, 2 \dots 1, 4) \frac{A_{\text{пр}} + A_{\text{выт}}}{\eta T_p},$$

где  $T_p$  – время рабочего цикла;

$T_p = t_{\text{пр}} + t_{\text{выт}} + t_{\text{хх}}$ ;  $t_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{выт}}$ ,  $t_{\text{хх}}$  – время

соответственно прессования, выталкивания и холостого хода.

**Роторные таблеточные машины.** Производительность роторных таблеточных машин достигает  $5 \cdot 10^5$  шт/ч, чем объясняется их широкое использование в химической и химико-фармацевтической промышленности. Роторные таблеточные машины – агрегаты непрерывного действия, в которых все технологические операции процесса таблетирования (дозирования, прессования, выталкивания) выполняются одновременно несколькими (до 41) комплектами пресс-инструмента, расположенного по окружности ротора.

Роторные таблеточные машины выпускаются как однократного действия, так и многократного: одно-, двух-, трех- и четырехкратного действия (число потоков  $w$ ). У машин однократного действия пресс-инструмент за один оборот формирует только одну таблетку, у многократного – больше.

Максимальный диаметр таблеток, изготавливаемых на этих машинах, достигает 30 мм, а сила прессования 100 кН.

Роторная таблеточная машина МТ-3А относится к третьему классу, с жесткой программой, многопозиционной, прессование двустороннее. Для предохранения от перегрузки в цепь электродвигателя включается тепловое реле и реле максимального тока.

Техническая характеристика роторной машины МТ-3А приведена ниже.

Число таблеток, шт/мин,	
при частоте вращения ротора, мин <sup>-1</sup> :	
5,6	85
7,5	112
11,1	166
Наибольшая сила прессования, кН	≈ 90
Наибольшая глубина	
заполнения матрицы, мм	50
Число комплектов прессующего инструмента	15
Диаметр таблеток, мм	30
Масса таблетки, г	9...16
Мощность двигателя, кВт	4,8/5,7/7,5
Частота вращения	
вала двигателя, мин <sup>-1</sup>	710/950/1430
Габаритные размеры, мм	1800 × 1450 × 1810
Масса, кг	3385

Таблеточная машина МТ-3А имеет литую станину 1, внутри которой размещены зубчатый и червячный редукторы и фрикционная муфта (рис. 2.4.20). К станине прикреплена

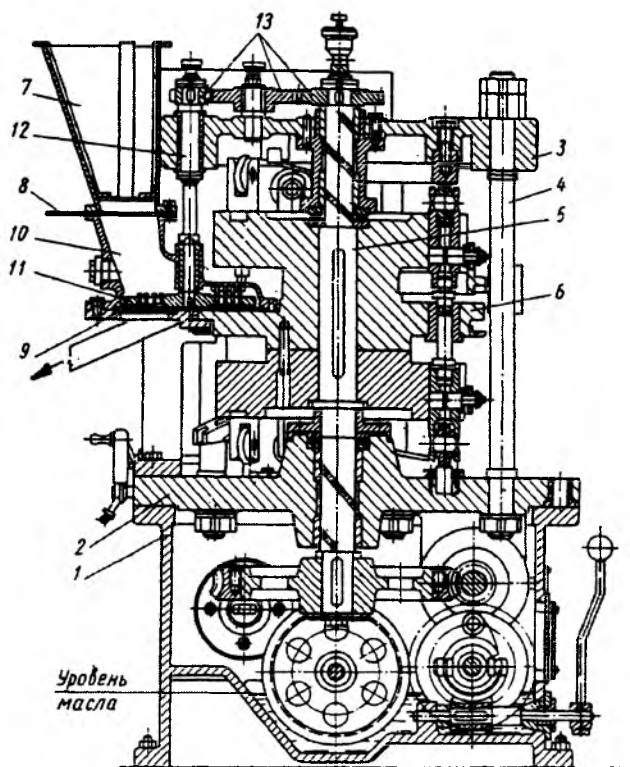


Рис. 2.4.20. Роторная таблеточная машина

нижняя плита 2, соединенная пятью колоннами 4 с верхней плитой 3. Червячное колесо редуктора закреплено на главном валу 5, который приводит во вращение ротор 6. Пресс-порошок загружается в бункер 7, заслонка 8 последнего служит для перекрытия подачи порошка в приемник 10, а заслонка 9 – для удаления порошка из приемника после остановки машины. В приемнике порошка расположен ворошитель 11, вал 12 которого приводится во вращение от главного вала посредством трех зубчатых колес 13. Машина имеет штурвалы для регулирования объема порошка, засыпаемого в матрицу при дозировании, для изменения силы таблетирования, для ручного проворота ротора машины с холостого хода на рабочий. Готовые таблетки по перфорированному лотку направляются в приемник.

Ротор таблеточной машины состоит из трех поясов, по окружности которых расположено 15 комплектов пресс-инструмента: матрицы в среднем поясе, а в направляющих верхнего и нижнего поясов – соответственно верхние и нижние толкатели с пуансонами. При вращении ротора толкатели имеют переносное

вращательное движение вместе с ротором, и за счет набегания роликов на неподвижные копиры-кулачки (горки) – еще и вертикальное движение относительно ротора.

Принудительное перемещение толкателей обеспечивается неподвижными кулачками (копирами), воздействующими на боковой ролик толкателя; для предотвращения проворачивания ползуна в направляющей на той же оси находится ролик, перемещающийся в пазу ротора. Торцовые ролики являются прессующими.

В рассмотренной машине реализовано качение толкателей по копирам, но существуют роторные таблеточные машины, в которых толкатели скользят (трение скольжения) по копирам. Несмотря на очевидный большой износ у последних конструкций, они конкурируют с роликовыми из-за простоты изготовления.

В более современной таблеточной машине выполнена замена отрезка копира на участке прессования на прессующий ролик, опирающийся на компенсатор усилия (пружину или плунжер гидроцилиндра), например в машине РТМ-41.



Следует отметить, что сила прессования лимитируется контактными напряжениями, возникающими между толкателями и копирами или толкателями и прессующими роликами.

*Технологический расчет.* Теоретическая производительность, шт./ч,

$$Q_T = 3600 m / T_p ;$$

время рабочего цикла

при  $T_p = 60 / (n u w),$

$$Q_T = 60 m n u w,$$

где  $m$  – гнездность пресс-инструмента;  $w$  – число потоков;  $n$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $u$  – число позиции ротора (число комплектов пресс-инструмента).

*Фактическая производительность*

$$Q_{\text{ф}} = K_{\text{и}} Q_T.$$

Статистические данные дают значения коэффициента использования для роторных таблеточных машин  $K_{\text{и}} = 0,83 \dots 0,95$ .

*Энергетический расчет.* Среднюю мощность двигателя  $N_{\text{дв}}$  привода рассчитывают как работу, затраченную на выполнение основных операций цикла таблетирования с учетом КПД.

$$N_{\text{дв}} = (1, 2 \dots 1, 3) \frac{A_{\text{пр}} + A_{\text{выт}}}{T_p \eta},$$

где  $A_{\text{пр}}$ ,  $A_{\text{выт}}$  – работа соответственно прессования и выталкивания (см. расчет  $N_{\text{дв}}$  для кривошипной таблеточной машины);  $\eta = \eta_1 \eta_2$ ;  $\eta_1$  – КПД перемещения механизма толкателя;  $\eta_1 = 0,7 \dots 0,8$  для механизма с копирами;  $\eta_1 = 0,8 \dots 0,9$  для механизма с прессующим роликом;  $\eta_2$  – КПД привода ротора.

**Гидравлические таблеточные машины.** Их применяют для изготовления крупных таблеток (брикетов) при большом давлении прессования. Давление прессования в гидравлических таблеточных машинах легко и плавно регулируется, а также возможна выдержка таблетки (брикета) под давлением. В гидравлических таблеточных машинах пресс-инстру-

мент расположен горизонтально, что позволяет применять при дозировании метод с отсечкой дозы порошка, находящегося между торцами пуансонов. Техническая характеристика таблеточной машины МТГ-100 приведена ниже.

Производительность, шт./ч	400
Сила таблетирования наибольшая, кН	1000
Диаметры сменных пуансонов, мм	110, 130
Электродвигатель гидропривода:	
мощность, кВт	15
частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	1450
Электродвигатель механизма загрузки порошка:	
мощность, кВт	0,55
частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	1450
Насос:	
подача, л/мин	50/50
давление наибольшее, МПа	12,5
Максимальное давление в гидросистеме при прессовании, МПа	32
Расход охлаждающей воды, $\text{м}^3/\text{ч}$	0,2
Объем масляного бака, л	800
Напряжение сети, В	380/220
Габаритные размеры, мм	2200 × 1000 × 2125
Масса, кг	4650

На основании гидравлической таблеточной машины установлены две плиты – поперечины передняя 1 и задняя 2, стянутые между собой двумя колоннами 3 (рис. 2.4.21). В передней поперечине установлен гидроцилиндр прессования 4, к плунжеру 5 которого прикреплен прессующий пуансон 6. Неподвижный пуансон 7 прикреплен к задней поперечине. Колонны одновременно выполняют функцию направляющих для бункера питателя 8, который несет матрицу; ее отверстие расположено соосно с пуансонами. Перемещение бункера-питателя и матрицы в осевом направлении осуществляется с помощью двух гидроцилиндров 4 (на схеме показан один), закрепленных в передней поперечине.

Для осуществления дозирования из исходного положения, показанного на схеме, бункер-питатель вместе с матрицей перемещаются влево таким образом, что определенная доза сыпучего материала попадает в матрицу, оставаясь между торцами пуансонов, которые при выполнении этой операции неподвижны. Объем дозы определяется крайним правым положением прессующего пуансона, которое может регулироваться винтовым механизмом 9.

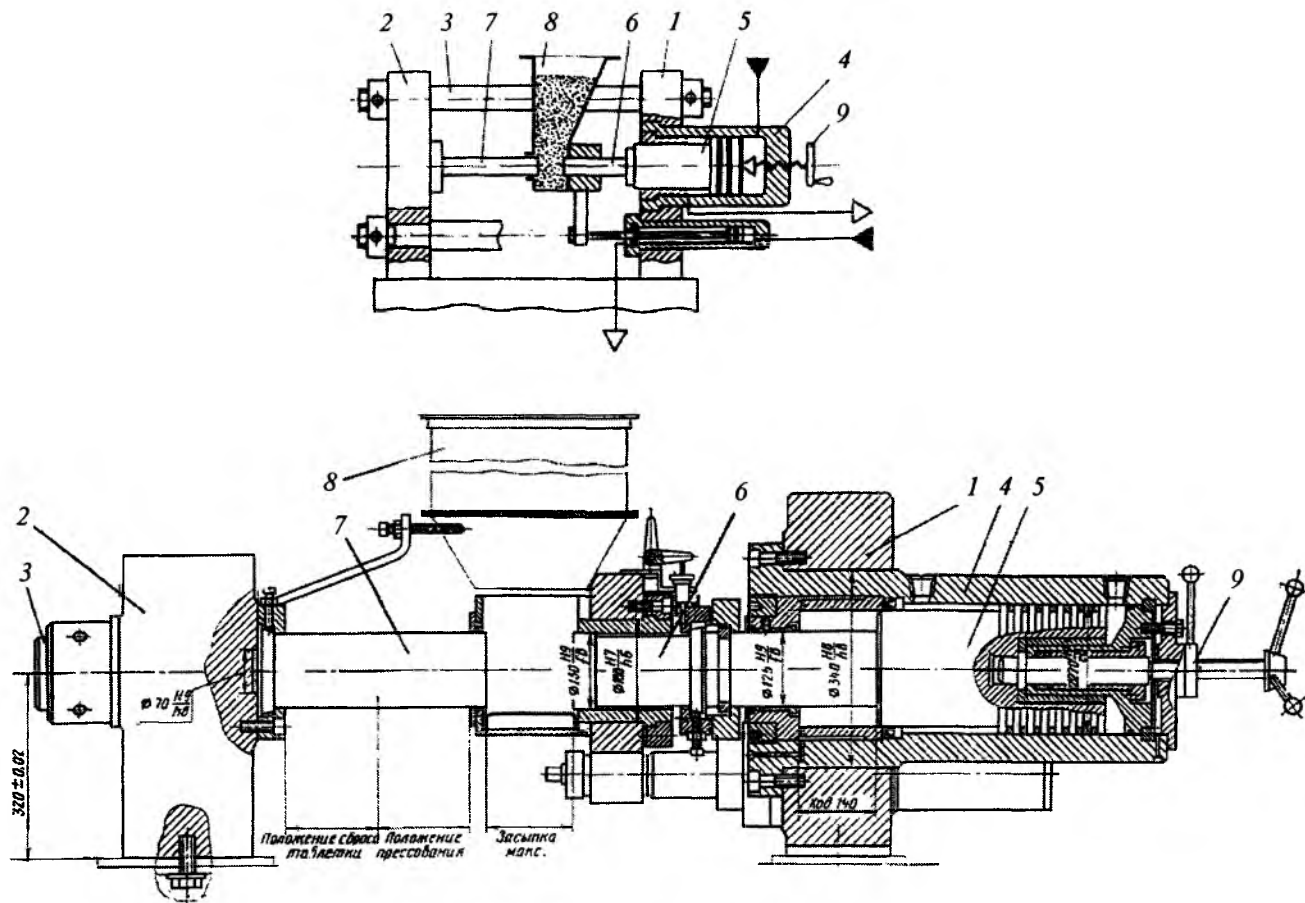


Рис. 2.4.21. Гидравлическая таблеточная машина

При прессовании порошка рабочая жидкость подается под высоким давлением в гидроцилиндр 4 прессования, пресующий пуансон 6 перемещается влево и сжимает дозу порошка, находящуюся в матрице. Реактивная сила передается с гидроцилиндра на переднюю поперечину и через колонны уравнивается силой, действующей на заднюю поперечину через неподвижный пуансон.

При прессовании положение матрицы не фиксируется, т.е. она может смещаться под давлением сил трения, что позволяет получить эффект двустороннего прессования. После окончания процесса прессования пуансон 6 отходит вправо, а бункер-питатель 8 – до предельного положения влево, выталкивая таблетку из матрицы. После этого бункер-питатель возвращается в исходное предельное правое положение.

Важной особенностью гидравлических таблеточных машин является то, что все операции таблетирования до момента выталкивания таблетки протекают в замкнутом пространстве без контакта сыпучего материала с внешней средой. Это позволяет при наличии надежных уплотнений и принятия специальных дополнительных мер успешно таблетировать порошки с токсическими свойствами [16].

Для небольших таблеток, требующих больших сил прессования и выдержки, используют многогнездный пресс-инструмент ( $m > 1$ ).

Горизонтальное расположение пресс-инструмента позволяет успешно применять гидравлические таблеточные машины для прессования волокнистых материалов, при этом точность дозирования достигается за счет прессования таблетки с высотой больше окончательной высоты таблетки. Для этого часть матрицы с готовой прессовкой совершает возвратно-поступательное движение вверх – вниз и отсекает избыток материала, который остается в пресс-форме и участвует в следующем цикле прессования.

Гидропривод таблеточной машины бывает двух вариантов. Первый вариант – ступенчатый регулируемый привод, в котором применяют один насос высокой производительности низкого давления для быстрого перемещения рабочих органов при небольших силах полезных сопротивлений и второй насос высокого давления малой производительности для прессования порошка на конечной стадии. Преимущество такой системы – уменьшение дли-

тельности цикла прессования и снижение затрат энергии. Насосы обычно приводятся от одного электродвигателя.

Второй вариант – с одним насосом высокой производительности низкого давления и гидравлическим мультипликатором.

Вопрос выбора насосов и определения энергетических показателей мощности двигателя для обоих вариантов рассмотрены в работе [17].

*Технологический расчет.* Теоретическая производительность таблеточной машины, шт./ч,

$$Q_T = 60mn,$$

где  $m$  – число гнезд пресс-инструмента;  $n$  – число двойных ходов плунжера в 1 мин.

**Конструкции и материалы пресс-инструмента таблеточных машин.** Комплект пресс-инструмента таблеточных машин состоит из матрицы и двух пуансонов, которые, являясь исполнительными органами, непосредственно формируют объект обработки в таблетку и передают ей требуемые характеристики. К комплекту пресс-инструмента предъявляют высокие требования по прочности, износостойкости и точности изготовления, что обуславливает его высокую стоимость. Так, стоимость пресс-инструмента роторных таблеточных машин составляет до 20 % стоимости машины, что с учетом замены его при износе заставляет очень серьезно подходить к конструкторской и технологической проработке этого ответственного узла таблеточной машины [16].

*Пуансоны таблеточных машин* имеют две конструктивные разновидности: пуансоны, составляющие одно целое с толкателем (ползуном) или закрепленные в них (рис. 2.4.22). Для роторных машин разъемные варианты конструкции применяются при диаметре толкателя не менее 26 мм и при большом числе позиций. Разъемный вариант более экономичен, так как только прессующие элементы изготавливают из дорогих сталей.

Многогнездный пресс-инструмент можно изготавливать только из составных пуансонов. Наиболее технологичным является соединение пуансона с толкателем резьбовой и гладкой втулками (рис. 2.4.22, б, в), но возникает опасность их самоотвинчивания, которая предупреждается в плановых осмотрах. Соосность

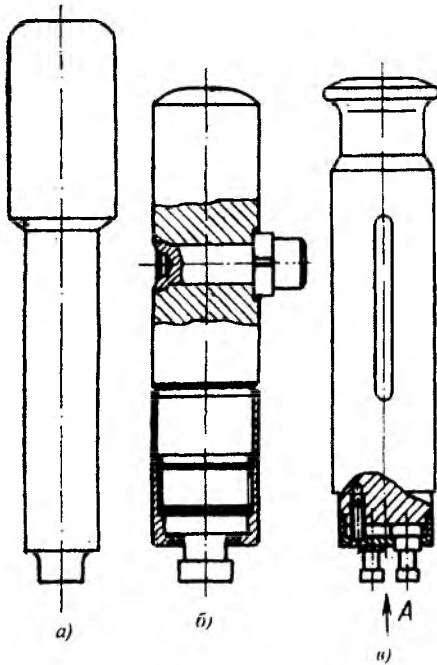


Рис. 2.4.22. Пуансоны таблеточной машины:  
 а – цельный; б – прикрепленный к толкателю  
 резьбовой втулкой; в – прикрепленный к толкателю  
 гладкой втулкой

пуансонов с отверстиями в матрице в многогнездном варианте обеспечивается шпонками или кольцами.

Точность изготовления пуансонов должна быть не ниже 7-го качества, твердость рабочей поверхности 55...58 HRC.

Зазоры между пуансонами и матрицей разные для верхнего, выходящего из матрицы при загрузке, и для нижнего. Для нижнего пуансона зазор 10...20 мкм на диаметр, верхнего 25...35 мкм, что улучшает удаление воздуха при прессовании.

Матрицы таблеточных машин работают в более тяжелых условиях нагружения и износа, чем пуансоны. Износ матрицы в 3 – 4 раза превышает износ пуансонов. Матрицы обрабатываются по 7-му качеству, твердость поверхности минимум 60...65 HRC.

Внутренняя поверхность матрицы имеет фаски с функциями ловителя и, кроме того, на глубину 5...8 мм с каждой стороны производится расшлифовка с конусностью 0,002...0,003. Конусность уменьшает износ матрицы при выталкивании таблетки и уменьшает вероятность скола кромок таблетки. Двусторонняя расшлифовка позволяет переворачивать матрицу для увеличения срока эксплуатации.

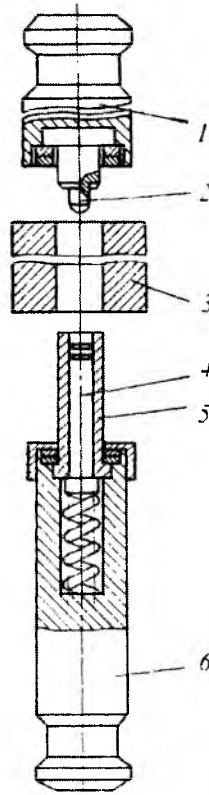


Рис. 2.4.23. Пресс-инструмент  
 для изготовления кольцевых таблеток

Прочностной расчет матрицы сводится к определению возникающих напряжений от действия бокового давления при пульсирующем цикле нагружения. Матрица рассматривается как толстостенная обечайка без дна. Расчет выполняется по формулам Ляме. При определении допустимых напряжений запас прочности берется от предела упругости.

В промышленности нашли применение составные матрицы, состоящие из наружной обоймы и втулки из твердого сплава (типа ВК-6). Соединение их производится по горячей посадке и тогда, зная величину натяга, матрица рассчитывается как составная обечайка.

Матрица, верхний и нижний пуансоны для изготовления кольцевых таблеток показаны на рис. 2.4.23. В процессе дозирования порошка нижний пуансон б расположен внутри матрицы 3. По величине погружения нижнего пуансона в матрицу регулируется объем заполняемой полости матрицы при дозировании.

## 2.4.1. Свойства сталей, используемых для изготовления пресс-инструмента

Показатель	У8А	X12	X12Ф1	X12М	X	XВГ	4XB2C	5XНВ	5XНМ	6XB2C	12XН3А	
Твердость НВ по условиям поставки	187...227	–	217...228	<217	>187	241	–	286	286	–	156...207	
Коэффициент обрабатываемости: твердым сплавом	1,2	–	0,8	0,8	0,9	0,8	–	0,6	0,6	–	0,8	
	1,1	–	0,3	0,3	0,5	0,5	–	0,3	0,3	–	0,7	
Температура термообработки, °С	750...800	950...1000	1040...1080	1020...1040	830...860	820...850	860...890	840...860	820...860	860...890	780...800	
Среда	Раствор щелочи, соли	Масло или воздух	Масло					–	–	Масло		
Склонность к обезуглероживанию	Чувствительна, нагрев в защитной атмосфере	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	
Склонность к деформации после термообработки	Склонна, требует ускоренного охлаждения при закалке	–	–	–	–	Незначит.	–	+	+	–	–	
Прокаливаемость	Неглубокая	Низкая	Высокая			Повышенная		До 70...90 мм	Повышенная		До 70...90 мм	Повышенная
Твердость после закалки HRC	60...62	58...60	56...60	62...64	61...64	62...65	53...58	41...44	41...44	53...58	58...61	

Примечание. Знаком «+» обозначено наличие свойства, а знаком «–» – отсутствие

После дозирования верхний пуансон 1 входит в матрицу, происходит двустороннее движение пуансонов навстречу один другому, т.е. начинается процесс уплотнения и прессования продукта. При соприкосновении выступа 2 верхнего пуансона со стержнем 4 последний под действием сжимающего усилия опускается в шток 5, а в матричной полости происходит образование отверстия в прессуемой таблетке. После прессования и выхода верхнего пуансона из матрицы стержень под действием пружины возвращается в исходное положение. Таблетка из матрицы выталкивается нижним пуансоном.

*Материалы, применяемые для изготовления пресс-инструмента.* Для изготовления пресс-инструмента применяются более десяти марок сталей (табл. 2.4.1).

Для углеродистых инструментальных сталей У7, У8А превышение температуры закалки выше указанной в табл. 2.4.1 недопустимо из-за ухудшения механических свойств. Эти стали используются для легко прессующихся неабразивных порошков.

Высокохромистые стали Х12, Х12Ф1, Х12М более износостойкие по сравнению с углеродистыми инструментальными и обладают одним прекрасным технологическим качеством – они подвержены минимальным объемным изменениям при термообработке.

Стали Х, 9ХС, ХВГ имеют повышенную прокаливаемость, чаще применяется сталь ХВГ, обладающая высокой твердостью, благодаря содержанию в ней вольфрама и хрома.

Пресс-инструмент из стали 5ХНМ и 12ХНЗА подвергается цементации, а из стали 9ХС и Х – диффузионному хромированию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барабашкин В.П.** Молотковые и роторные дробилки. М.: Недра, 1973. 144 с.
2. **Баранов Д.А.** и др. Процессы и аппараты химической технологии. Т. 2 / Под ред. А.М. Кутепова. М.: Логос, 2001. 600 с.
3. **Барский М.Д.** Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. 328 с.
4. **Бахтюков В.М.** Бипланетарные и адаптивные циклоидальные смесители. М.: Индрик, 2000. 56 с.
5. **Бочаров В.С., Артюшин А.Б.** Смесительные установки двухэтапного перемешивания. М.: Машиностроение, 2000. 378 с.

6. **Варенных Н.М.** и др. Химико-технологические агрегаты смешивания дисперсных материалов. Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2000. 340 с.

7. **Генералов М.Б.** Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учебное пособие для вузов. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. 592 с.

8. **Генералов М.Б.** и др. Расчет оборотного для гранулирования минеральных удобрений. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.

9. **Гусев Ю.И.** и др. Конструирование и расчет машин химических производств: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.

10. **Дженике Э.В.** Складирование и выпуск сыпучих материалов: Пер. с англ. / Под ред. М.И. Агошкова. М.: Мир, 1968. 164 с.

11. **Зенков Р.Л.** Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение, 1964. 251 с.

12. **Ильевич А.П.** Машины и оборудование для заводов по производству керамики и огнеупоров. М.: Высшая школа, 1979. 343 с.

13. **Катальмов А.В., Любартович В.А.** Дозирование сыпучих и вязких материалов. Л.: Химия, 1990. 240 с.

14. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. М.: Наука, 1985. 440 с.

15. **Класен П.В., Гришаев И.Г.** Основы техники гранулирования. М.: Химия, 1982. 272 с.

16. **Кольман-Иванов Э.Э.** Таблетирование в химической промышленности. М.: Химия, 1976. 200 с.

17. **Кольман-Иванов Э.Э., Гусев Ю.И.** Машины-автоматы и автоматические линии химических производств: Учебное пособие. М.: МГУИЭ, 2003.

18. **Кочетков В.Н.** Гранулирование минеральных удобрений. М.: Химия, 1975. 224 с.

19. **Летин Л.А., Роддатис К.Ф.** Среднеходные и тихоходные мельницы. М.: Энергоиздат, 1981. 359 с.

20. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

21. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 160 с.

22. **Муйземнек Ю.А.** и др. Конусные дробилки. М.: Машиностроение, 1970. 230 с.

23. **Оборудование** для тонкого измельчения: Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. 50 с.
24. **Промтов М.А.** Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М.: Машиностроение-1, 2001. 300 с.
25. **Процессы** и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. Т. 2 // Механические и гидромеханические процессы / Под ред. А.М. Кутепова. М.: Логос, 2001. 600 с.
26. **Рогинский Г.А.** Дозирование сыпучих материалов / Под ред. Б.И. Маруковича. М.: Химия, 1978. 174 с.
27. **Сапожников М.Я., Булавин И.А.** Машины и аппараты силикатной промышленности. М.: 1955. 422 с.
28. **Сиденко П.М.** Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1968. 382 с.
29. **Справочник** по обогащению руд. Подготовительные процессы. М.: Недра, 1982. 366 с.
30. **Смесители** для сыпучих и пастообразных материалов: Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. 77 с.
31. **Тимонин А.С.** Основы конструирования и расчета технологического и природоохранного оборудования: Справочник. Т. 2. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2001. 960 с.
32. **Фейгин Л.А.** Дробильные, сортировочные и транспортирующие машины. М.: Высшая школа, 1977. 240 с.
33. **Шубин В.С.** Прикладная надежность химического оборудования. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. 296 с.
34. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Vol.B2. VCH, 1988.

## РАЗДЕЛ 3

# МАШИНЫ И АППАРАТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### Глава 3.1

#### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

##### 3.1.1. ОТСТОЙНИКИ

*Отстаиванием* (гравитационным осаждением, седиментацией) называют разделение дисперсных систем под действием силы тяжести. Отстаивание применяют для сгущения, осветления и классификации суспензий, промывки осадков, для грубой очистки газов от твердых частиц и для разделения эмульсий. При сгущении (осветлении) суспензий твердую фазу выделяют в виде влажного осадка, а при классификации твердую фазу делят на фракции различной крупности.

Ввиду малой движущей силы отстаивание эффективно при отделении крупных частиц, соответствующих значениям чисел Рейнольдса  $Re \leq 500$  и Фруда  $Fr > 10^{-5}$  [68]. Отстаивание – наиболее простой и дешевый гидромеханический процесс, поэтому его часто используют для первичного разделения, что удешевляет последующее разделение дисперсной системы более сложными способами.

Аппараты для отстаивания – отстойники различают:

по режиму работы – периодического, полунепрерывного и непрерывного действия;

по типу разделяемой дисперсной системы – для разделения пылей, суспензий и эмульсий (рис. 3.1.1) [19].

В отстойнике для разделения суспензий непрерывного действия (рис. 3.1.1, а) разделяемая смесь распределяется по каналам между

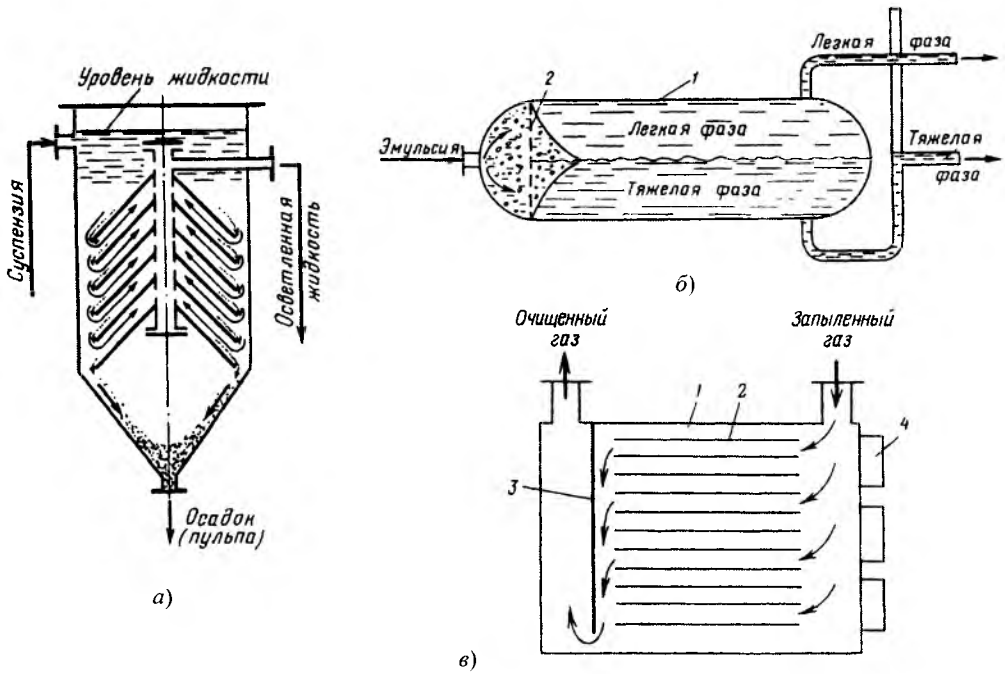
коническими полками, на поверхностях которых осаждаются твердые частицы. Осадок (пульпа) сползает с полок в нижнюю часть отстойника, откуда удаляется через патрубок. Осветленная жидкость выводится через центральную трубу.

Отстойник непрерывного действия для разделения эмульсий (рис. 3.1.1, б) представляет собой горизонтальный резервуар. Перегородка 2 с отверстиями гасит возмущения, вносимые в жидкость входной струей эмульсии. Поперечное сечение отстойника выбирают таким, чтобы режим течения в аппарате был ламинарным, чтобы исключить смешение фаз и улучшить процесс отстаивания. Расслоившиеся легкая и тяжелая фазы выводятся с противоположной стороны отстойника. Трубопровод для вывода тяжелой фазы соединен с атмосферой для предотвращения сифонного эффекта.

Отстойник для разделения пылей (рис. 3.1.1, в) представляет собой камеру 1, в корпусе которой установлены горизонтальные полки 2 на расстоянии 100...300 мм одна от другой. При прохождении газа между полками твердые частицы осаждаются на их поверхностях. Для обеспечения равномерного распределения газа между полками используется перегородка 3. Осадок твердых частиц периодически удаляется с полок через люки 4 с помощью скребков или смывается водой. Такой отстойник является аппаратом полунепрерывного действия.

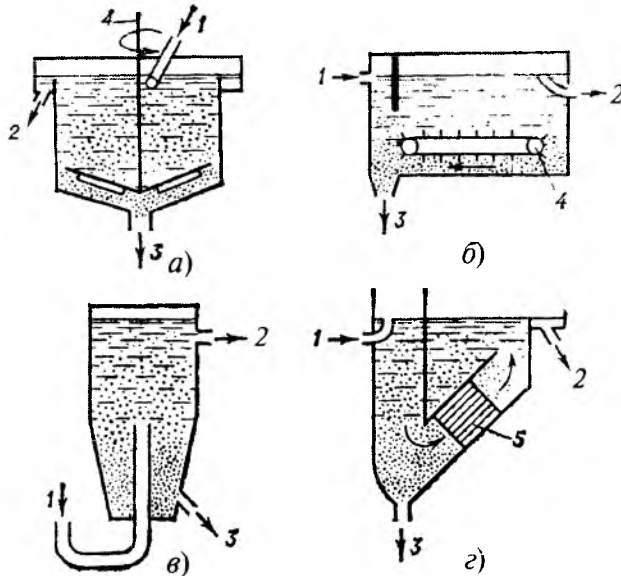
По направлению движения потока разделяемой смеси отстойники делят на радиальные, горизонтальные, вертикальные и наклонные, или тонкослойные (рис. 3.1.2) [68]. В радиальных отстойниках суспензия подается в центр аппарата и движется к периферии, в горизон-





**Рис. 3.1.1. Схемы отстойников для разделения различных дисперсных систем, различаемые по типу дисперсной системы:**

*a* – с коническими полками для разделения суспензий, *б* – для разделения эмульсий; 1 – корпус; 2 – перфорированная перегородка, *в* – пылесадительная камера. 1 – камера; 2 – полки; 3 – отражательная перегородка; 4 – люки для удаления пыли



**Рис. 3.1.2. Схемы отстойников, различаемые по направлению движения потока разделяемой смеси:** *a* – одноярусный радиальный; *б* – горизонтальный; *в* – вертикальный; *г* – тонкослойный; 1 – ввод суспензии; 2 – вывод осветленной жидкости; 3 – выгрузка осадка; 4 – скребковое устройство; 5 – пакет пластин

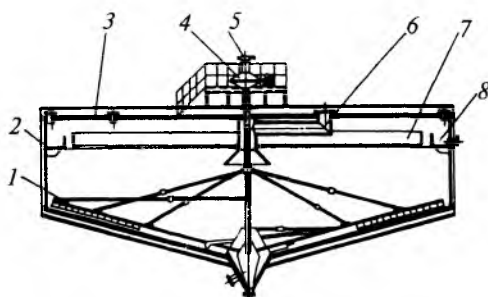
тальных – загружается с одного конца аппарата и, перемещаясь вдоль него, выводится на другом конце в виде осветленного продукта, в вертикальных – суспензия подается снизу и движется вверх, причем скорость восходящего потока должна быть меньше скорости оседания твердых частиц, благодаря чему частицы оседают в нижней части аппарата, откуда удаляются. В наклонных, или тонкослойных отстойниках осаждение осуществляется на наклонном под углом  $45...60^\circ$  пакете пластин, расстояние между которыми составляет  $25...100$  мм. Использование пакета пластин увеличивает площадь осаждения и повышает эффективность разделения.

**Особенности конструкций отстойников для разделения суспензий.** Отстойники для разделения суспензий делят на сгустители, осветлители, сгустители-осветлители и классификаторы [54]. При сгущении осаждение проводят с целью получения плотного осадка, при осветлении осаждение осуществляют с целью получения очищенных от твердых частиц жидкостей.

*Радиальные отстойники непрерывного действия с вращающимися сгребаящими устройствами (скребками) наиболее распространены. Они предназначены для сгущения и осветления суспензий. Они бывают одноярусными и многоярусными.*

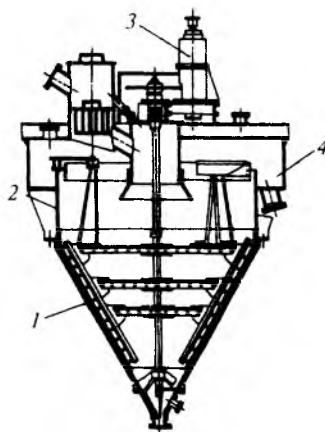
Одноярусные отстойники изготавливают с горизонтальным и вертикальным током жидкости. Отстойники с горизонтальным током жидкости (рис. 3.1.3) применяют для разделения суспензий со скоростью осаждения твердой фазы  $w_0 = 7 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  м/с, с концентрацией дисперсных частиц в исходной суспензии  $C = 5 \dots 50$  кг/м<sup>3</sup>. Угол конуса днища у них  $150^\circ$ . Отстойники с вертикальным током жидкости (рис. 3.1.4) применяют для разделения суспензий со скоростью осаждения твердой фазы  $w_0 = 15 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$  м/с, с концентрацией дисперсных частиц в исходной суспензии  $C = 100 \dots 350$  кг/м<sup>3</sup>. Угол конуса днища таких отстойников равен  $60^\circ$ .

При работе одноярусных отстойников исходная суспензия непрерывно подается в питающий стакан, расположенный в центре цилиндрического чана. В объеме чана под действием силы тяжести происходит разделение суспензии на осветленную жидкость и осадок твердых частиц. Осветленная жидкость слива-



**Рис. 3.1.3. Отстойник с горизонтальным током жидкости:**

- 1 – сгребаящее устройство; 2 – чан; 3 – крышка;
- 4 – привод механизма вращения; 5 – привод механизма подъема; 6 – питающее устройство;
- 7 – сливное устройство; 8 – переливной кольцевой желоб



**Рис. 3.1.4. Отстойник с вертикальным током жидкости:**

- 1 – сгребаящее устройство; 2 – чан; 3 – привод механизма вращения; 4 – переливной желоб

ется по периферии аппарата в переливной желоб, а твердые частицы оседают на коническое днище. Медленно вращающееся сгребаящее устройство постоянно смещает осадок к центру отстойника, откуда он непрерывно выводится через коллектор (обычно конический) для выхода сгущенной суспензии.

*Условное обозначение отстойника* включает (по порядку): букву **Р**, обозначающую тип отстойника (радиальный); цифры – внутренний диаметр отстойника (в м); буквы **А, К, Е, АК, АТ** (табл. 3.1.1) – материал основных деталей, соприкасающихся с продуктом (первая буква в двойном обозначении – материал корпуса отстойника, вторая буква –

### 3.1.1. Исполнение корпуса и сгребающего устройства радиальных отстойников

Шифр исполнения	Марка стали	
	корпуса	сгребающего устройства
А	Ст3 20 или 40 09Г2С, 16ГС или 10ГС	
К	08Х22Н6Т или 12Х18Н10Т	
Е	10Х17Н13М2Т или 08Х21Н6М2Т	
АК	Ст3 20 09Г2С	08Х22Н6Т
АЕ	Ст3 20 09Г2С	10Х17Н13М2Т
АГ	Ст3 20 09Г2С	ВГ1-0

материал сгребающего устройства, одна буква *А, К* или *Е* – корпус отстойника и сгребающее устройство изготовлены из одной стали); тире; буквы *В* – вертикальный, *Г* – горизонтальный ток жидкости; две цифры – порядковый номер модели. Например, условное обозначение отстойника *Р – 30АК – Г01* означает: радиальный отстойник диаметром 30 м, материал корпуса *Ст3*, материал сгребающего устройства *08Х22Н6Т*, ток жидкости – горизонтальный, модель первая.

В табл. 3.1.2 и табл. 3.1.3 представлены технические характеристики непрерывно действующих отстойников атмосферного давления соответственно с горизонтальным и вертикальным током жидкости.

Эти отстойники имеют центральный привод сгребающего устройства, а гребковые фермы приводятся во вращение с помощью червячной пары. В отстойниках большого диаметра вращение гребковой фермы может производиться периферическим приводом с помощью ведущей тележки 5 (рис. 3.1.5) [66]. Двигаясь по рельсу вокруг отстойника, тележка тянет за

### 3.1.2. Техническая характеристика отстойников с горизонтальным током жидкости

Показатель	Р–9К–Г01	Р–18К–Г01	Р–30К–Г01
Диаметр аппарата $D$ , м	9	18	30
Производительность по исходной суспензии, $\text{м}^3/\text{с}$	0,01	0,18	0,417
Площадь поверхности осаждения, $\text{м}^2$	60	255	700
Рабочий объем, $\text{м}^3$	130	1150	3000
Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	50	80	100
Частота вращения сгребающего устройства, $\text{с}^{-1}$ ( $\text{мин}^{-1}$ )	0,0023 (0,14)	0,0021(0,13)	0,0033(0,2)
Высота подъема сгребающего устройства, мм	400	400	400
Мощность электродвигателя, кВт, привода:			
механизма вращения	2,2	4	3
механизма подъема	1,1	1,1	4
Механизм подъема:			
передаточное число червячного редуктора	41	41	–
число цилиндров гидравлического насоса	–	–	2
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), м	9,25×9,25×9,27	18,11×18,1×11,2	32,9×30,5×17,2
Масса, т:			
аппарата	44	158,85	330
аппарата в рабочем состоянии	211,08	1310	4270