

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



**Брус И.Д.**

**Эксплуатация и ремонт оборудования  
предприятий атомной промышленности**

*Учебное пособие*

Томск 2006г.

УДК 661.87:66.02.004

Брус И.Д.

Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий атомной

Томск, изд. ТПУ, 2006 г. \_\_\_ с.

В учебном пособии приводятся сведения о методах проверки физического состояния оборудования, методах и системах ремонта, видах износа и борьба с ним, о теории старения машин, о источниках активации оборудования различных производств ядерно-топливного цикла и способах дезактивации, о различных способах восстановления поврежденных деталей, испытании емкостной аппаратуры на герметичность и прочность, а также об особенностях проектирования и эксплуатации ядерно-безопасного оборудования при работе с делящимися материалами.

Предназначено для студентов направления 240000, Химическая технология материалов современной энергетики;

По специальностям:

240601 – Химическая технология материалов современной энергетики;

240603 – Химическая технология редких элементов и материалов на их основе.

УДК 661.87:66.02.004

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом Томского политехнического университета.

Рецензенты

Доктор химических наук  
профессор ТГПУ

А.П. Еремин

Кандидат химических наук ТПУ

В.П. Дмитриенко

© Томский политехнический университет 2006 г.

Оформление Издательство ТПУ, 2006 г.

## **Введение**

Любые машины и аппарата в процессе эксплуатации неизбежно изнашиваются, какими бы совершенными они не были и какой бы совершенной не была эксплуатация. На химических предприятиях годовые затраты на ремонт оборудования составляют 10 – 15, иногда 40 % балансовой стоимости. Таким образом, эффективное использование производственного потенциала отрасли во многом зависит от деятельности ремонтных служб предприятий, качества проводимых ими ремонтов и технического обслуживания оборудования.

С переходом предприятий на самофинансирование и самоокупаемость резко возрастает значение экономических затрат на ремонтные работы.

Задачи ремонтной службы:

1. Повышение качества проводимых ремонтных работ
2. Снижение времени простоя в ремонтах всех видов
3. Снижение себестоимости ремонта

### **Глава 1. Проверка годности оборудования**

#### **1.1 Проверка технического состояния оборудования**

Производится при эксплуатации и во время плановых ремонтов и планируется таким образом, чтобы все детали машины или аппарата были проверены за несколько текущих ремонтов или за один капитальный ремонт

##### **1.1.1 Методы проверки**

1. Прослушивание машины при её работе (шумы, стуки, вибрация)
2. Визуальный осмотр
3. Легкое обстукивание молотком аппаратуры с целью выявления дефектов по звуку, по глубине вмятин. Особое внимание уделяется штуцерам, люкам (аппараты емкостного типа, бандажи колес вагонов, стеклянные и фарфоровые изделия)

4. Измерение размеров (толщины, линейных) ручными измерительными инструментами (штангенциркулем, кронциркулем, нутромером, скобой, калибром, линейкой и др.)
5. Сверление отверстий, через которые измеряется толщина стенки аппарата, трубы.
6. Радиографическая проверка (для контроля сварных швов и выявления пороков литья)
7. Ультразвуковая дефектоскопия (проверяется остаточная фактическая толщина металла и наличие внутренних дефектов (пор, трещин))
8. Металлографическое исследование – для определения качества металла по его макро- и микроструктуре (готовится шлиф из вырезанного образца металла аппарата)
9. Механическая проверка прочностных свойств металла образцов, вырезанных из аппарата ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_c$ , твердость)
10. Химический анализ образца металла аппарата

При проверке пустотелых аппаратов тщательно осматривается внутренняя и внешняя поверхности, особенно штуцера, люки, проводится обстукивание. Особое внимание уделяется сварным швам и около шовной зоне. Места со значительной коррозией проверяются на толщину стенки. Результаты проверки вносятся в коррозионную карту аппарата. По результатам замеров устанавливают скорость коррозии.

Основным методом замера толщины стенки « $\delta$ » пустотелых аппаратов является сверление отверстий диаметром 6 – 12 мм и замеры толщины измерительным инструментом. После замера « $\delta$ » отверстие закрывается резьбовой пробкой и заваривается. Часто внутри аппарата приваривается контрольная шайба из того же материала, что и аппарат. По изменению ее размеров судят о состоянии стенок аппарата.

За последние годы большое распространение в дефектоскопии получили неразрушающие методы контроля: магнитные, рентгенографические и ультразвуковые. С их помощью устанавливается толщина материалов и

выявляются внутренние дефекты в них (трещины, расслоение, раковины, рыхлоты). В Советском Союзе выпускались более двух десятков видов импульсных ультразвуковых дефектоскопов. Из них наибольшее распространение получили следующие: дефектоскоп УЗД-7 ЦНИИТ МАШ, работающий на частотах 1,25 и 2,5 мгГц, дефектоскопы марок ВУ-74, УРД-3, ВЧ-8р; УДМ-1М (дающий координаты дефекта), ДУК-12 (для пластмасс 4 – 25 мм дефекты), ИДЦ-3М (автоматический контроль труб); ультразвуковой структурный анализатор – дефектоскоп ДСК-(УСАД-61) – для определения структуры металлов и сплавов, для оценки степени развития межкристаллической коррозии в нержавеющей сталях и др.); ультразвуковые дефектоскопы с видимым изображением дефекта и ультразвуковые микроскопы.

Указанными методами измеряют толщину металла в пределах от 0,5 до 2500 мм с точностью до  $\pm (1 \% + 0,03 \text{ мм})$  и обнаруживают дефекты  $< 1 \text{ см}^2$ , а также выявляются поражения коррозией в том числе и межкристаллитной коррозии в начальной стадии (для н/стали, начиная с глубины поражения 0,1 – 0,15 мм). УЗД широко применяется для контроля качества металлических урановых ТВЭЛов и их оболочек, качества листового материала и сварных швов.

### 1.1.2 Нормы отбраковки оборудования

Нормы отбраковки оборудования (аппаратов) устанавливаются с учетом конкретных условий производства.

Показателем технического состояния аппарата емкостного типа является толщина стенки « $\delta$ ».

Отбраковочную толщину стенки корпуса любого цилиндрического аппарата можно определить по формуле:

$$\delta_{\text{отб.}} = \frac{P \cdot D_{\text{вн}}}{2R_{\text{т}}},$$

где  $\delta_{ц.а.}$  – предельная (отбраковочная) толщина стенки в мм;

$P$  – действительное рабочее давление в кг/см<sup>2</sup>;

$D_{вн}$  – внутренний диаметр аппарата, мм;

$R_{пр}$  – предельное расчетное напряжение, выбираемое в зависимости от температуры, среды и марки стали, в кг/см<sup>2</sup>.

Для сферических днищ:

$$\delta_{\tilde{n}.\tilde{a}} = \frac{1,3P \cdot r_{\tilde{n}}}{2R_{i\delta}}, \text{ (мм.)}$$

где  $r_c$  – радиус сферического днища в мм.

Если отношение радиуса закругления днища  $r_3$  к радиусу сферы  $r_c$  составляет 0,1 и менее, то отбраковочный размер увеличивается в 1,1 раза.

Для плоских днищ:

$$\delta_{i.\tilde{a}} = D_{\tilde{a}i} \sqrt{0,162 \frac{P}{R_{i\delta}}}.$$

Для полусферических днищ:

$$\delta_{i\tilde{n}\delta.\tilde{a}i} = \frac{PD_{\tilde{a}i}}{4R_{i\delta}}.$$

Для эллиптических днищ:

$$\delta_{i\tilde{n}\delta.\tilde{a}i} = \frac{PD_{\tilde{a}i}}{2R_{i\delta}}.$$

При соотношении осей эллипса более двух отбраковочный размер увеличивается на 25%.

Если износ произошел по сварочному шву (вертикальный, круговой днища), то  $\delta_{отбр}$  должна быть разделена на коэффициент прочности шва  $\phi$ .

Для двойных швов внахлестку  $\phi=0,8$ .



Для стыковых швов с обратной подваркой  $\phi=0,9$ .



Если в результате износа толщина стенки аппарата стала менее  $\delta < 0,001D + 2,5$  мм, то аппарат выводится из эксплуатации независимо от толщины стенки  $\delta_{отбр}$  – определенной по формуле.

#### Трубчатые аппараты.

Все трубчатые аппараты (холодильники, теплообменники, конденсаторы, подогреватели и др.) состоят из двух частей: корпуса и трубчатого пучка. Оба элемента проверяются одновременно. Корпус – как цилиндрический аппарат. Трубчатые пучки подвергаются гидравлическому испытанию. Неисправные трубки закрываются пробками с обеих сторон. Если число заглушенных трубок в секции трубчатого аппарата превышает 15%, то такая секция выбраковывается. Трубчатые решетки выбраковываются, если глубина каверн от коррозии превышает 10% толщины решетки.

#### Проверка трубопроводов и запорно-регулирующей аппаратуры.

Все трубопроводы подвергаются периодическому осмотру с целью обнаружения трещин в сварных швах, каверн от атмосферной и почвенной коррозии. Наиболее тщательно осматриваются сварочные швы у фланцевых соединений. В ответственных трубопроводах определяется  $\delta_{ост}$ . Для таких трубопроводов ведется коррозионная карточка, в которую записываются результаты всех проверок.

Отбраковочная толщина стенки трубопровода –  $\delta_{отбр}$  определяется по формуле:

$$\delta_{отбр} = \frac{P \cdot D_{нар}}{2R_{пр} + P} + 2, \text{ (мм.)}$$

где  $P$  – действующее давление в трубопроводе в кг/см<sup>2</sup>;

$D_{нар}$  – наружный диаметр трубопровода в мм;

$R_{пр}$  – предельное расчетное напряжение, выбираемое в зависимости от рабочей температуры и материала, в кг/см<sup>2</sup>.

Если толщина трубопровода 2 мм или менее при диаметре трубопровода  $> 75$  мм последний удаляется независимо от величины  $\delta_{отбр}$

определенной по формуле. Сроки осмотра трубопроводов и арматуры зависят от скорости и степени износа, и устанавливается каждым заводом в зависимости от условий работы, сырья и опыта эксплуатации, но не реже одного раза в год.

Литые корпуса арматуры (задвижки, вентили, клапаны) выбраковываются, если толщина стенок  $\delta$  меньше или равна, определенной по формуле:

$$\delta_{з.а.} \leq \frac{1,5D_{усл} \cdot P}{2R_{\delta}}, \text{ (мм.)}$$

где  $D_{усл}$  – условный диаметр арматуры в мм;

$P$  – действующее рабочее давление в корпусе арматуры в кг/см<sup>2</sup>;

$R_{\delta}$  – расчетное напряжение, выбранное из условий действующей рабочей температуры, выраженной в кг/см<sup>2</sup>.

Коэффициент (1,5) учитывает неравномерность распределения напряжений в запорной арматуре, в отличие от цилиндрического аппарата.

Аппаратура выбраковывается, если толщина стенок достигает величин приводимых в таблице:

$D_{усл}$ (мм)	50	80	100	125	150	200
$\delta_{з.а.}$ (мм)	3,5	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5

## Глава 2. Методы и системы ремонта оборудования

2.1. Методы ремонта подразделяются на три группы:

I. По месту выполнения ремонта:

- 1) на месте установки аппарата, машины;
- 2) с доставкой машины в ремонтный цех;
- 3) часть снимается (узлы) и отправляются в ремонтный цех, а часть (скелет) ремонтируется на месте.

II. По методу подготовки и выполнению ремонта:

- 1) По узловой – ремонтируются отдельные узлы в межремонтные периоды.

2) По агрегатный – ремонтируются отдельные агрегаты, а на их место ставятся ранее отремонтированные;

3) Замена действующей машины, требующей ремонт, на отремонтированную.

III. Планирование ремонта во времени:

1) Равномерно распределенный в течении года ремонт;

2) Концентрация ремонта на отдельный период с остановкой производства;

3) С учетом сезонности (ТЭЦ, криогенные станции).

## 2.2. Системы ремонта оборудования

В отечественной практике получили распространение следующие системы:

1) Послеосмотровый ремонт (ПОР) – планируются сроки осмотра оборудования, а по результатам осмотров назначается категория ремонта.

2) Принудительная система ремонтов (ПСР) – планируются заранее сроки и категории ремонта и машина останавливается на запланированный ремонт независимо от степени износа. Система используется в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую гарантию нормальной работоспособности машины (авиация, АЭС). Снижение категории ремонта уголовно наказуемо.

3) Планово-предупредительная система ремонта (ППР). В настоящее время в химической промышленности и части предприятий ядерной энергетики системой ремонта оборудования является система ППР. По данной системе планируются сроки и категории ремонта, но категория ремонта может быть снижена после обследования технического состояния аппарата, что снижает трудозатраты и стоимость ремонтов. Данная система является наиболее применимой к весьма разнородному оборудованию разных производств с ремонтно-эксплуатационной точки зрения.

Система ППР предусматривает комплексное обеспечение работоспособности машин как в процессе их эксплуатации, так и путем своевременной остановки на ремонт.

По сложности и трудозатратам ремонты подразделяются:

- осмотровые < 2 % трудозатрат от капитального ремонта (чел./час);
- текущие (Т) ~ 20 % трудозатрат от капитального ремонта (чел./час);
- средние (С) ~ 50 % трудозатрат от капитального ремонта (чел./час);
- капитальные (К).

Пробег нового аппарата от начала работы до капитального ремонта, а также находящегося в эксплуатации аппарата между капитальными ремонтами называется ремонтным циклом и определяется сроком службы основных частей аппарата.

В промежутках между капитальными ремонтами назначаются средние и текущие ремонты, которые совпадают со сроками службы быстро изнашиваемых, но легко заменяемых деталей. Осмотровые, текущие и средние ремонты заменяют на техническое обслуживание (ТО) => снижение затрат на ремонты.

В объем каждого ремонта высшей категории входят все работы по ремонту свойственные низшим категориям, т.е. при капитальном ремонте заменяются и ремонтируются также все детали, которые заменяются и ремонтируются при текущем и среднем.

В период одного ремонтного цикла работоспособность машины постепенно снижается, но при капитальном ремонте она должна быть доведена до номинала. Графически это можно представить следующим образом:

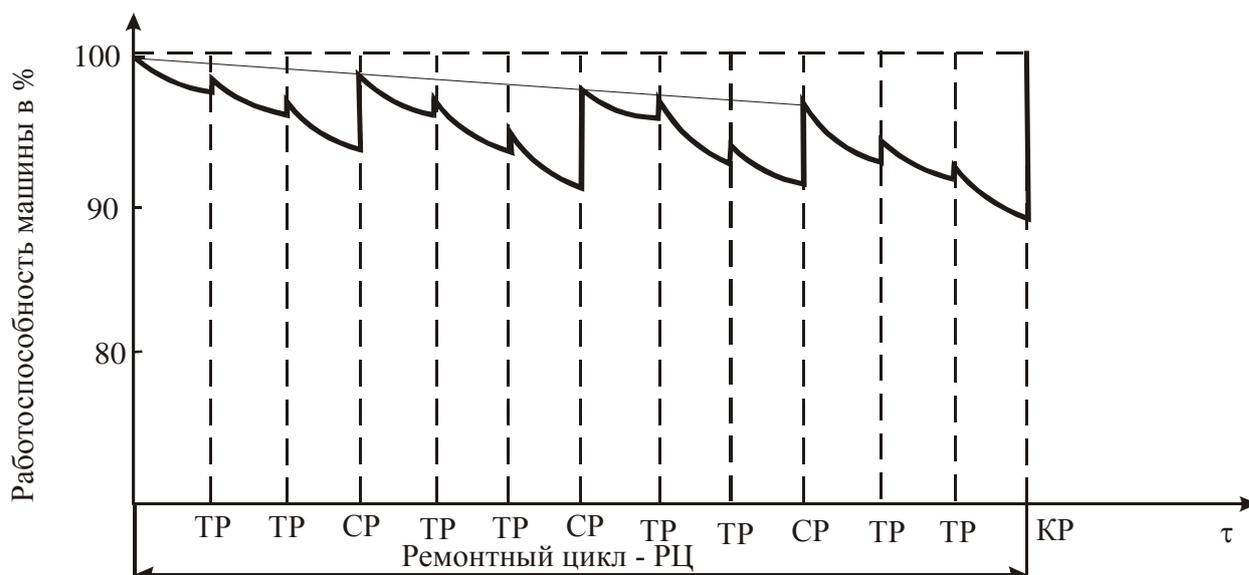


Рис. 2.1. Схема ремонтного цикла.

Каждый из видов ремонтов по всему оборудованию планируется с учетом опыта эксплуатации по трудозатратам (чел.-час), по простоям на ремонт (в час). Простой в ремонтах составляет для различного рода производств и оборудования от 4 до 15 % рабочего времени. На основании этих данных составляется годовой график ППР. Последний позволяет планировать работу всех ремонтных служб, а так же заготовку запасных частей.

#### Годовой график ППР оборудования на 2004 г

Составление графика ППР таблица 2.1 начинается с планирования ремонта высшей категории, т.е. с капитального – «К» и дальше среднего (С) и текущего (Т) в соответствии с существующими нормами по трудозатратам в человеко-часах и простоям в ремонте – в часах. При планировании ремонтов исходят из данных по последним ремонтам и нормам пробега оборудования между ремонтами всех категорий.

Итак для первого аппарата – ректификационной колонны НФ, последний капитальный ремонт производился по данным графы (б) в декабре 2002 года.

Пробег аппарата между капитальными ремонтами, по данным графы (5), составляет 25920 часов, и с учетом коэффициента использования во

времени – 75 %, графа (2), через 45 месяцев, т.е. очередной капитальный ремонт можно планировать только в 2005 году, и в 2004 году его не будет. Переходим к планированию среднего ремонта. Последний средний ремонт ректификационной колонны производится в феврале 2003 года графа (6). Пробег между средними ремонтами по нормам, графа (4), составляет 8640 часов, а с учетом коэффициента использования во времени, графа (2), через 15 месяцев. Значит, в 2004 году мы должны запланировать средний ремонт в мае месяце.

В графе (11) ставим индекс среднего ремонта «С». Сверху над «С» ставим цифру нормированного простоя в среднем ремонте – 50 часов, а внизу – нормированные трудозатраты – 180 человеко-часов.

Переходим к планированию текущих (Т) ремонтов. Пробег аппарата между текущими ремонтами составляет 720 часов, графа (3), т.е. текущий ремонт необходимо планировать в каждом месяце. В каждом месяце ставить индекс «Т», сверху – норму простоя в текущем ремонте в часах – 8 часов, а внизу – норму трудозатрат в человеко-часах – 24 чел.-часа.

В графе (19) ставим сумму часов простоя аппарата в ремонтах всех видов – 138 часов. В графе (21) проставляется плановый простой в ремонтах всех видов в процентах от общего фонда рабочего времени – 1,48 %. В графе (22) в конце года проставляется фактический простой аппарата в ремонтах всех видов.

Сравнение плановых и фактических простоев, графы (21) и (22) позволяют судить об эффективности работы ремонтной группы в течении прошедшего года.

Аналогичным образом планируем все категории ремонтов по всему оборудованию отделения, цеха, завода.

Внизу под графиком подводятся итоги по трудозатратам в ремонтах высшей категории «К» и «С» в чел.-часах, ниже трудозатраты в чел.-часах на текущие ремонты в каждом месяце.

Третья итоговая строка дает цифры суммарных трудозатрат на все категории ремонтов.

Последние три строки позволяют судить о требуемой квалификации ремонтного персонала в каждом месяце и о штатном составе всей ремонтной службы.

Годовой график ППР берется в основу планирования трудовых затрат, заготовки запасных частей, комплектования рабочей силы, планирования отпусков рабочих и служащих, подготовки ремонтных приспособлений. С его помощью согласуются работы по внедрению новой техники и модернизации производства. Он является настольным документом руководителей всех производств и подразделений.

Годовой график ППР на 2004 год

Таблица 2.1.

Наименования оборудования	Коэф. исп. во времени, %	Нормы времени непрерывной работы между ремонтами (числитель) и простоя в ремонте (знамен.), час.			Дата послед. ремонта и его условное обозначение	I квартал			II квартал			III квартал			IV квартал			год. простой в ремонте, час.	год. фонд раб. времени, час.	план. простой в рем. всех вид., %	факт. простой, %	
		Т рем.	С рем.	К рем.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
1. Ректификационные колонны для HF	75	1 мес. 720/8 1 мес.	2 года 8640/50 15 мес.	3 года 25920/240 45 мес.	C <sup>II</sup> <sub>03</sub> /K <sup>XII</sup> <sub>02</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	C <sup>50</sup> <sub>180</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	138	8640 час. (беспрерывное пр-во - 360 раб. дней в году)	1,48	2,0	
2. Насос ц/б №1	50	720/2 2 мес.	8640/2 2 года	17920/12 4 года	C <sup>IV</sup> <sub>03</sub> /K <sup>VII</sup> <sub>99</sub>	T <sup>2</sup> <sub>20</sub>	-	T <sup>2</sup> <sub>20</sub>	-	T <sup>2</sup> <sub>20</sub>	-	K <sup>12</sup> <sub>60</sub>	-	T <sup>2</sup> <sub>20</sub>	-	T <sup>2</sup> <sub>20</sub>	-	22		0,5	0,3	
3. Смеситель CaF <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90	2160/8 3 мес.	8640/18 13 мес.	25920/120 3 года	C <sup>VII</sup> <sub>03</sub> /K <sup>V</sup> <sub>02</sub>	-	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	-	-	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	-	-	C <sup>18</sup> <sub>60</sub>	-	-	T <sup>8</sup> <sub>24</sub>	-	42		0,5	8	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Итого трудоемкость "С" и "К" ремонтов, чел./часах										180		60	60									
Итого трудоемкость "Т" ремонтов, чел./час.						44	48	44	24	44	24	24	24	44	24	68	24					
Полная трудоемкость, чел./час.						44	48	44	24	224	24	84	84	44	24	68	24					

Надо так планировать ремонт оборудования, чтобы в каждом месяце были одинаковые трудозатраты, чел./час.

P<sup>18</sup> – простоев в ремонте, час.

180 – трудоемкость в человеко-часах.

График ППР составляется на все ремонтные службы от бригады до РМЗ.

### 2.3. Планирования заготовки запасных частей

Для обеспечения своевременного и качественного ремонта оборудования необходимы отдельные детали и узлы к нему, т.е. необходимо иметь какой-либо запас новых деталей и узлов на складе. Такие детали и узлы делятся на две группы: 1) собственно «запасные части» и 2) «резервные части».

«Запасные части» – та группа деталей, которые заменяются систематически вследствие износа.

«Резервные части» – та группа деталей, которые меняются редко (например, вследствие аварий, капитальных ремонтов и т.д.), но запас, которых все же необходимо иметь на заводе, чтобы избежать длительных простоев ведущих машин.

Точные нормы заготовки и хранения запасных частей по каждой группе, определяются на основании опыта работы производства. Ориентировочные нормы могут быть рассчитаны по формуле:

$$H = \frac{A \cdot D \cdot P \cdot K_A \cdot K_D}{T}, \text{ (шт.)}$$

где  $H$  – норма запаса однотипных, одноразмерных деталей одного наименования, шт;

$A$  – количество действующих одномодельных машин, шт;

$D$  – количество одноименных, одноразмерных деталей в одной машине, шт;

$P$  – срок, на который нужно создавать запас (равен сроку оформления заказа и сроку изготовления деталей), мес.;

$T$  – срок службы детали, мес.;

$K_A$  и  $K_D$  – коэффициенты, которые определяются в зависимости от количества действующих одномодельных машин и от количества одноименных, одноразмерных деталей в одной машине, соответственно, определяются из таблиц.

$A$	$K_A$
1 – 5	1
6 – 10	0,9

$D$	$K_D$
1	1
2	0,8

11 – 15	0,8
16 – 20	0,7
21 – 25	0,6
26 – 30	0,5

3 – 4	0,7
5 – 6	0,6
7 – 8	0,5
9 – 10	0,4
11 – 12	0,3

Например, имеем 10 шт. центробежных насосов. Необходимо составить норму одного запаса по рабочим колесам. Тогда в соответствии с формулой и нормами работы рабочих колес насоса имеем:

$A = 10$ ;  $D = 1$ ;  $P = 4$  месяца (принимаем);  $T = 12$  месяцев;  $K_A = 0,9$ ;  $K_D = 0,4$ . Отсюда:

$$H = \frac{10 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,9 \cdot 0,4}{12} = 1,2 \text{ шт.} \approx 2.$$

Норма запаса можно рассчитать по второй формуле:

$$H = D + 0,1A + \frac{0,5\sqrt{AD}}{K'_A \cdot K'_D}.$$

Коэффициенты  $K'_A$  и  $K'_D$  определяются из условий:

$$\hat{E}'_A = 1,5\sqrt{A}; \quad \hat{E}'_D = 1,5\sqrt{D}.$$

Нормы запаса, рассчитанные по данным формулам можно рассматривать как новый заказ, либо как норму хранения запчастей на все время. Для наполнения склада запасными частями обычно заказывают партию  $\Pi = (1,3 \div 1,5) \cdot H$ .

В том случае, когда заказ на оформление очередной партии запасных частей производится при наличии их в количестве равной норме и ожидают поступления заказа через  $P$  месяцев, когда запас деталей будет равен нулю, а по поступлению нормы возрастает до  $(1,3 \div 1,5) \cdot H$ , то такую систему планирования заготовки запасных частей называют «система двух точек».

(П и О)

Если заказ оформляется при наличии запаса деталей приблизительно равной норме и к моменту поступления нового заказа через  $P$  месяцев остается запасных деталей  $(0,3 \div 0,5) \cdot H$ , то такую систему планирования заготовки запасных частей называют «система трех точек» –

$(\min = (0,3 \div 0,5) \cdot H$ , среднее =  $H$  и  $\max = (1,6 \div 2,0) \cdot H$ ). Последняя система обычно применяется для обеспечения работы ведущего оборудования, чтобы не увеличивать затраты оборотных средств завода.

В лучших зарубежных фирмах обеспечивается гарантийная поставка любых частей в течение 24 часов в любой пункт. Затраты на их хранение в 2 – 5 раз меньше, чем в отечественных аналогах.

Система организации производства и распределения запчастей в нашем машиностроении требует хорошей перестройки.

#### 2.4. Управление и экономика за рубежом

В зарубежной ремонтной практике нашли следующие системы ремонта: система планирования капитального ремонта (ПКР) и система ремонтного обслуживания (СРО). Первую условно можно назвать планово-диагностической, вторую – планово предупредительной (аналогично ППР).

Все оборудование, эксплуатируемое на предприятии, делится на 10 рангов по типам оборудования и по видам ремонтных работ.

Самый высокий ранг 10 баллов имеет оборудование, снабжающее предприятие теплом, электроэнергией, водой. Девять баллов для производственного оборудования, не имеющего резерва. Один балл для зданий и дорог.

По видам работ:

10 баллов присваивается аварийным работам и работам по устранению опасностей. Один балл – поддержание внешнего вида. Абсолютный приоритет ремонтных работ определяется умножением рангов.

В Японии в последние годы в связи с поставленной задачей обеспечения работы оборудования по принципу «ноль отказов» наибольшее распространение получает система тотального превентивного обслуживания (СТПО), охватывающая все виды ремонта в комплексе.

### **Глава 3. Повреждения деталей в процессе эксплуатации и борьба с ними. Износ. Виды износа.**

Повреждение деталей в процессе эксплуатации заключаются в следующем: потеря точности размеров, изменение формы, образование трещин, рисок, пор или свищей, сколов, изменение внутренней структуры металла, приводящей к снижению его прочности, нарушению целостности и т.д.

Все эти повреждения могут быть обусловлены действием внешних сил, тепловым и химическим воздействием среды, внутренних напряжений (литейных, сварочных, прессовочных, сборочных, наличие аномальности в структуре металла). Кроме того, эти повреждения (как преждевременные) могут быть обусловлены нарушением технологии изготовления и правил эксплуатации машин.

По возможности восстановления повреждённых деталей все виды повреждений можно классифицировать следующим образом:

- 1) Моральный износ
- 2) Повреждения поверхностей деталей
- 3) Повреждения целостности деталей.

#### **3.1 Моральный износ**

Имеет место в том случае, если оборудование ещё не износилось и работоспособно, но не выдерживает конкуренции с новой более современной техникой по производительности, по трудозатратам, на единицу выпускаемой продукции. Устранить моральный износ можно путем модернизации или реконструкции оборудования в целом, либо отдельных его узлов и деталей. Например:

1. Замена аппаратов агитаторов с механическим перемешиванием реакционной среды на аппараты типа «Пачук» в процессах выщелачивания урановых руд;
2. Совмещение процессов выщелачивания и сорбции в пачуках;

3.1 Замена диффузионных каскадов на центрифуги при разделении изотопов урана.

### 3.2 Повреждения поверхностей деталей

#### 3.2.1 Механический износ – износ трением, эрозия.

При механическом износе происходит разрушение поверхности от внешнего кинематического трения взаимно трущихся деталей машины. Этому виду износа подвергаются валы, штоки, цапфы, подшипники, поршни, уплотнительные рабочие поверхности задвижек, вентилях, шиберов, клапанов.

В настоящее время гипотезы износа трением разделяют на три группы:

- 1) Гипотезы, объясняющие трение механическим взаимодействием поверхностных шероховатостей;
- 2) Гипотезы, объясняющие трение молекулярным взаимодействием, следствием которого является выделение большого количества тепла, которое приводит к раздроблению отдельных кристаллов, структурным превращениям и пластической деформации;
- 3) Гипотезы совместного механико-молекулярного взаимодействия поверхностей трения.

Износ трением поверхностей деталей весьма многогранен и включает в себя следующие основные процессы:

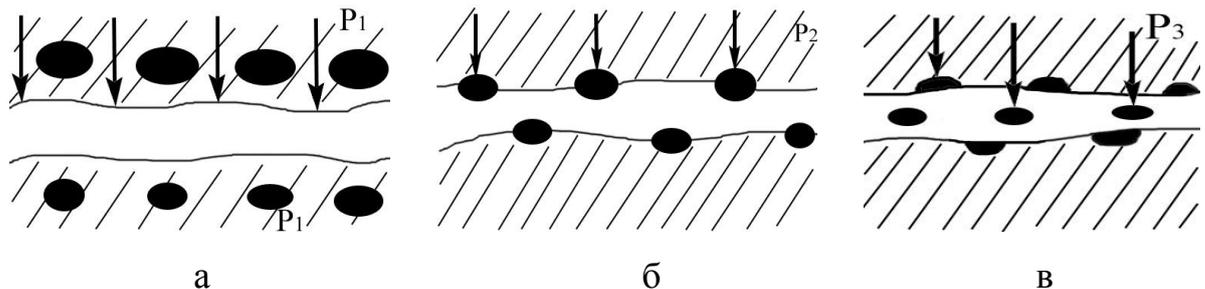
Износ при трении скольжения:

- 1) Окисление кислородом воздуха или реакционными газами окружающей среды трущихся поверхностей с образованием твердых растворов и химических соединений – оксидов, фторидов, хлоридов и др., последние будучи хрупкими, разламываются и выносятся движущимися поверхностями из зоны трения.
- 2) Тепловое действие трения, приводящее к изменению микроструктуры соприкасающихся поверхностей и даже к привариванию

поверхностей (имеет часто место при больших удельных давлениях и высоких скоростях).

- 3) Абразивное истирание, подобное процессам резания – наиболее распространенная форма износа. Абразивные частицы могут попадать в зону трения из объема трущихся деталей и из вне – со смазкой, с атмосферой, рис 3.1.

Рис. 3.1. Схема абразивного износа



- а) Истирания мягкой основы и обнажение зерен твердых составляющих (карбидов, нитридов, оксидов).
- б) Обнажение включений приводит к повышению удельного давления на их поверхности и их разлому.
- в) Обломки твердых зерен образуют абразивную суспензию в масле (тоже происходит при попадании абразива извне), что приводит вновь уже к быстрому истиранию мягкой поверхности.

Износ при трении качения:

- 1) Окислительный износ (подобно тому, что при трении скольжения)
- 2) Основидный износ – за счет неоднородной структуры и удельных нагрузок образуются микротрещины и впадины на контактной поверхности. Последние приводят к сдвигу металла, изменению расстояния между сопряженными деталями и к форсированному износу.

### 3.2.2. Влияние свойств материала деталей на их износ

Высокая твердость и химическая стойкость поверхностного слоя, а также однородность структуры изделия являются главными факторами, уменьшающими износ.

Твердость сталей можно повысить, увеличивая содержание таких элементов как углерод (обычно до 1%), марганец (до 15 %), хром, молибден, вольфрам, фосфор и др. Для повышения износоустойчивости чугунов последние легируются медью (до 0,7 %), либо модифицируются.

Повышение износостойкости черных металлов часто достигают путем применения различных методов упрочнения поверхности, а именно:

- 1) Нанесением покрытий из твердых сталей, хрома, кадмия, металлизацией, гальванопластикой, химическим осаждением, плазменным и лазерным нанесением химически твердых соединений – нитридов титана, вольфрама, карбидов.
- 2) Образованием износоустойчивого слоя на основном металле химической обработкой его поверхности:

Феррооксидирование – образование защитной пленки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . При температуре 350 – 450 °С подается пар  $\text{H}_2\text{O}$ . Кислород окисляет железо до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  при дальнейшем нагревании до 550 – 700 °С образуется защитная пленка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  с  $\delta = 10 - 25$  мк.

Азотирование с помощью  $\text{NH}_3$  при температуре 500°С,  $\tau - 30 - 36$  часов. Образуется пленка твердых нитридов железа и легирующих сталь металлов, особенно алюминия, ванадия, хрома и титана. Толщина слоя  $\delta =$  до 0,3 мм.

Фосфатирование – обработка поверхности деталей раствором  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и раствором фосфатов железа, марганца, цинка при температуре 100 °С образуется твердый и пористый слой  $\delta = 5 - 20$  мк фосфорнокислого железа, марганца, цинка.

Сульфидирование – образование тонкой пористой пленки ( $\delta = 2 - 3$  мк) сернистого железа. Хорошо держит смазку, выдерживает огромные удельные

давления (например: зубья быстроходных шестерен вращающихся барабанных печей, шаровых мельниц).

3) Нанесение износостойчивого слоя термической обработкой поверхности.

Особо широкое применение получила закалка токами высокой частоты (ТВЧ). Нагрев производят ТВЧ поверхностного слоя  $\delta = 0,5$  до 5 мм. В зависимости от толщины детали и необходимой глубины закалки. Частота 200 – 1000 кГц. Чем выше частота, тем меньше глубина проникновения токов высокой частоты, тем ниже глубина закалки. Закалка в воде, минеральном масле. Марки стали 45, 50, 40Х, 45Х, 50Т2, 50СТ, ШХ15, 40ХС и др.

4. Механическое упрочнение – ковка, роликовая накатка поверхности дробоструйная и кавитационная – наклепные обработки. Применяют дробь диаметром 1,5 – 1,8 мм. под давлением воздуха = 6 атм. При этом срок службы детали повышается в 3 – 10 раз.

Износостойчивость деталей из цветных металлов и сплавов.

В современной практике широко применяют сплавы цветных и легких металлов для изготовления деталей трения. Детали из антифрикционных бронз, баббитов, алюминиевых, цинковых и некоторых других сплавов работают, как правило, в условиях жидкостного и полужидкостного трения в паре с деталями, выполненными из более твердых и износостойчивых металлов – стальными валами, пальцами, штоками.

Баббиты – сплавы Рb с щелочными, щелочно-земельными, РЗЭ.

Раньше широко применяли оловянистые и свинцовистые баббиты (Б-10, Б-16, Б-40, Б-83 и др.). Сейчас часто идут по пути удешевления материала – создание безоловянистых сплавов – свинцовистых бронз (БрС-20, БрС-30, БрОС-8-12, БРОЦС-4-4-17) и др., алюминиевых бронз (БрА-6, БрА-8) и алюминиево-железных бронз (бронза-сплав Cu и Sn).

Широкое распространение последнее время получают металло-керамические антифрикционные материалы (спекаются порошки металла и антифрикционного наполнителя) – железо, графит. Содержание графита от 1

до 2 %, бронза-графит и другие хорошо удерживающие смазку за счет своей пористости (от 10 до 50 %).

Из неметаллических антифрикционных материалов применение нашли: текстолит, плавленный капрон, фторопласт – 4,6. Последние для слабонагруженных узлов. Повышение износоустойчивости антифрикционных сплавов достигается снижением толщины слоя до 1 мм и ниже, повышением их пористости для улучшения смазки, рациональный выбор материала.

### 3.2.3. Влияние смазки на износ деталей

Наличие смазки существенно снижает износ, так как уменьшает трение между сопряженными поверхностями.

В зависимости от вязкости смазочные материалы подразделяют на:

1. жидкие (текучие);
2. консистентные (густые);
3. твердые (графит, сульфид молибдена и др.)

Для обеспечения максимальной износоустойчивости поверхностей сопряженных деталей необходимо обеспечивать условия жидкостного трения, т.е. когда между деталями имеется слой смазки определенной толщины. В соединении «вал-подшипник» смазочный слой испытывает давление со стороны цапфы. При вращении цапфа смещается в направлении обратном вращению и вверх с образованием масляного клина толщиной  $h$ . В таком случае происходит как бы всплывание цапфы и трение становится чисто жидкостным (рис. 3.2.).

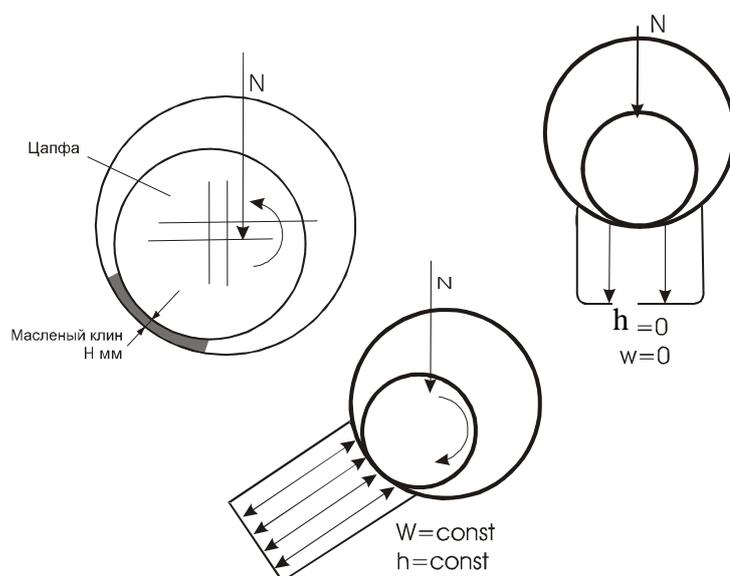


Рис. 3.2. Схема образования масляного клина.

Для обеспечения этого условия необходимо:

конструктивное обеспечение минимальной утечки смазки из нагруженной клиновой зоны, расчетное определение оптимальной величины зазора «а», при которой толщина масляного слоя  $h$  будет достаточной для создания нужного противодействия; расчетный выбор сорта смазки (вязкости, маслянистости) в зависимости от удельного давления, скорости и зазора.

Выбор оптимального зазора в соединении и сорта смазки производится с помощью уравнений, выведенных на основе гидродинамической теории смазки. Основы теории заложены академиком Эйлером, а главные положения разработаны учеными-механиками Н.П. Петровым, Н.Е. Жуковским, С.П. Чаплыгиным.

Теоретически и экспериментально доказано, что минимальное значение силы трения «Т» при жидкой смазке создается лишь при определенных соотношениях между удельным давлением  $P$ ,  $\text{кг/см}^2$ , скоростью перемещения (числом оборотов, об/мин), вязкостью и величиной зазора трущихся деталей вращения, с равномерным угловым перемещением. Для тел вращения

$$a_n = 0,45 \cdot 10^{-3} d \sqrt{zn / pc}. \quad (3.1)$$

Здесь  $a_n$  – наивыгоднейший зазор, мм (номинальный);  $d$  – диаметр цапфы, мм;  $z$  – вязкость (динамическая), паузы;  $n$  – скорость вращения (об/мин);  $p$  – уд.давление на поверхность трения кг/см<sup>2</sup>;  $c$  – геометрический фактор =  $d+l/l$ , где  $l$  – длина поверхности трения.

Практически величина «а» для тел вращения лежит в пределах

$$a_n = (0,001 \text{ до } 0,002)d, \quad (3.2)$$

для плоскостей трения

$$a_n = [0,45 \cdot 10^{-3} \cdot z \cdot b \cdot v / (b+l)p(\operatorname{tg}\alpha)^{0,8}]^{0,8}, \quad (3.3)$$

где  $b$  – ширина плоскости трения, мм;  $v$  – линейная скорость перемещения, м/с;  $\alpha$  – угол между трущимися поверхностями.

При установке и пуске новых машин выбор масла производится по техническим условиям поставщиков машин, а при отсутствии таковых по формулам, приравнивая номинальные зазоры наивыгоднейшим.

Величина « $a_n$ » непосредственно связана с минимальной толщиной масляного клина « $h_{\min}$ » для пары «вал-втулка»:

$$h_{\min} = a_n/4, \quad (3.4)$$

при этом условии достигается минимальное жидкостное трение.

Нижний предел  $h_{\min}$  лимитируется значением высоты шероховатостей поверхностей деталей, различной для разных классов чистоты поверхностей. Между суммой среднеарифметических значений высоты гребешков  $\Sigma H_{c.a.}$  и суммой среднеквадратичных значений высоты гребешков  $\Sigma H_{c.k.}$  существует соотношение:

$$\Sigma H_{c.a.} = (3 - 4) \Sigma H_{c.k.} \quad (3.5)$$

Коэффициент «3» для (1 – 6) классов чистоты, а коэффициент «4» для (7 – 14) классов чистоты поверхности. Сумма высот гребешков шероховатости поверхностей определяются по формулам:

$$\Sigma H_{c.a.} = 1/h(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n), \quad (3.6)$$

$$\Sigma H_{c.k.} = \sqrt{1/L \int_0^l h^2 dl} \text{ или приближенно } \Sigma H_{c.k.} = \sqrt{1/h(h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2)}. \quad (3.7)$$

Профиль шероховатостей представлен на рис. 3.3

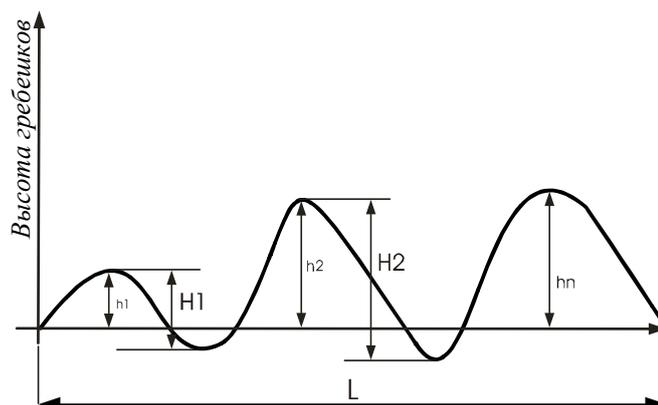


Рис. 3.3. Профиль шероховатостей.

Слой смазки в масляном клине должен быть больше суммы высот гребешков обеих деталей, чтобы предупредить обнажение отдельных выступов и переходу в этих местах к сухому трению, т.е. необходимо чтобы:

$$h_{\min} > 2 \cdot \Sigma \text{Нс.а.} \text{ или } h_{\min} > 2 \cdot 4 \cdot \Sigma \text{Нс.к.}, \quad (3.8)$$

из (3.4) следует, что

$$a_n = 4h_{\min}, \quad (3.9)$$

$$\text{отсюда } a_n = 4h_{\min} \geq 4 \cdot 8 \Sigma \text{Нс.к.} \quad a_n = 32 \Sigma \text{Нс.к.} \quad (3.10)$$

Взаимосвязь величин, влияющих на износ, т.е. величины зазора  $a_n$ , вязкости масла  $z$ , нагрузки сопряженной пары и класса чистоты поверхности сопряженных деталей  $\Sigma \text{Нс.к.}$  видно из следующего примера.

Пример: Узел трения имеет следующие параметры:

$$d = 75 \text{ мм}; l = 75 \text{ мм}; n = 1500 \text{ об/мин}; p = 15 \text{ кг/см}^2; z = 0,18 \text{ пуаз.}$$

Подставляя их в выражение (1) находим наивыгоднейший зазор.

$$a_n = 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot d \sqrt{zn/pc} = 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot 75 \sqrt{0,18 \cdot 1500 / 15 \cdot 2} = 0,1 \text{ мм},$$

$$c = d+l/l = \frac{75+75}{75}.$$

Из выражения (3.10) находим:  $\Sigma \text{Нс.к.} = a_n / 32 = 100 / 32 = 3 \text{ мкм.}$

При одинаковой чистоте поверхности вала и втулки  $\Sigma \text{Нс.к.}$  для каждой из них = 1,5 мкм, что соответствует «7» классу чистоты обработки поверхности (шлифовка).

### 3.2.4. Влияние качества поверхности и метода обработки на износ.

Качество поверхности определяется совокупностью макро- и микрогеометрией, микроструктуры и напряженностью поверхностного слоя, что объясняется следующим:

1. Выступающие неровности при низкой чистоте поверхности, срабатываются при трении весьма интенсивно, что ведет к замедлению приработки;

2. Увеличение неровностей снижает допустимые удельные нагрузки;

3. Углубление на поверхности являются очагами трещинообразования, ускоряющего его износ;

4. В период пуска, когда отсутствует «h» имеет место сухое или полусухое трение поверхностей, что при низкой чистоте поверхностей приводит к сильному ее скалыванию или смятию (у пластичных материалов).

При обработке деталей увеличение скорости резания, скорости вращения деталей, продольной подачи и глубины шлифования повышает износоустойчивость.

Эрозионный износ – вызывается абразивным действием твердых частиц основного продукта или механических примесей в жидкой и газообразных фазах (циклоны, мельницы, насосы, на линиях пульпы, аппараты «к.с.» и др.).

Меры борьбы – подбор износоустойчивых материалов, соответствующее применение конструкций аппарата, и подбор режима работы.

Износоустойчивость деталей при механическом износе, в общем случае зависит от следующих факторов:

1. Физико-механических свойств материала в поверхностном слое детали.

2. Метода и режима чистовой обработки деталей и качества поверхностей.

3. Условия смазки, качества смазочных материалов.
4. Величины и характера нагрузки от внешних сил.
5. Наличие фильтров в системе смазки.

### 3.2.5. Коррозионный износ материалов технологического оборудования

Коррозия металлов – это процесс взаимодействия химических элементов с окружающей средой, протекающий двумя путями:

- 1) путем непосредственного химического взаимодействия с образованием химических соединений (химическая коррозия)
- 2) в результате действия гальванических элементов, образующихся на поверхности металла (электрохимическая коррозия).

Химическая коррозия обычно наблюдается в тех случаях, когда на поверхности металла не может образоваться пленка электролита.

Случаи работы материалов оборудования в газовых средах при температуре  $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  могут быть типичными примерами химической коррозии. Сушка и прокалка ХКУ,  $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$  в газоотводах при  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,



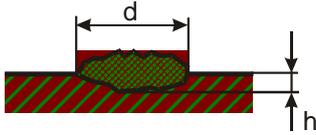
Процессы коррозии рассматривают как поверхностное явление и классифицируют по тем изменениям поверхности, которые наблюдаются в результате протекания процесса.

#### 3.2.5.1 Виды коррозии

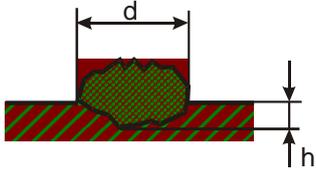
- 1) Равномерная коррозия – процесс коррозии идет равномерно по всей поверхности;
- 2) Местная коррозия;
- 3) Коррозия под напряжением.

Местная коррозия характеризуется разрушением отдельных участков поверхности. При этом различают:

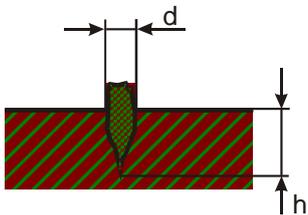
1) Коррозия пятнами, когда диаметр поражения  $d >$  глубины  $h$ .



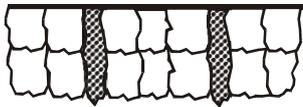
2) Язвенная коррозия, когда  $d \cong h$ .



3) Точечная (питтинговая) коррозия, когда  $d <$   $h$ .



4) Межкристаллитная коррозия, когда разрушения сосредотачиваются по границам кристаллов.



Местная коррозия более опасна, чем равномерная, так как в этом случае при относительно небольшой потере металла на коррозию выходят из строя ценные конструкции. В результате местной коррозии наблюдаются сквозные проржавления трубопроводов, резервуаров, и другого химического оборудования.

Коррозию под напряжением можно определить как самопроизвольное разрушение металла под одновременным действием коррозионной среды и механического напряжения. Может развиваться в виде межкристаллитных и внутрикристаллитных трещин без видимых признаков образования продуктов коррозии.

### 3.2.5.2. Показатели скорости коррозионного разрушения

Различают два показателя коррозии:

Глубинный  $\Pi$  (мм/год), для равномерной коррозии и весовой  $K$  (г/м<sup>2</sup>·час) выражающий массу прокорродировавшего металла отнесенную к единице поверхности.

Между глубинным и весовым показателями существует зависимость, выражающаяся формулой:

$$K = \frac{\Pi \cdot \gamma}{8,76} \text{ [г/м}^2 \cdot \text{час]},$$

где  $\gamma$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>.

$$\text{Для железа } K_{Fe} = \frac{\Pi \cdot 7,85}{8,76} = 0,895 \cdot \Pi \text{ [г/м}^2 \cdot \text{час]}.$$

Сопоставление максимальной проникаемости ( $\Pi_{\text{макс}}$ ) определенной по наиболее глубоким кавернам и средней проникаемости ( $\Pi_{\text{ср}}$ ) рассчитанной из потери массы металла, позволяет судить о степени неравномерности

коррозии  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Pi_{\text{макс}}}{\Pi_{\text{ср}}}.$$

Последнее позволяет прогнозировать поведение материала на длительный срок службы. Однако успешное прогнозирование возможно лишь с учетом всех факторов коррозии – как «внутренних» так и «внешних». К внутренним факторам относятся химический состав и структура сплава, его напряженное состояние, т.е. все то, что характеризует металл. К внешним факторам относится все то, что характеризует среду, т.е. химический состав, температура, скорость потока, давление, жизнедеятельность бактерий и прочее.

Следует отметить что, как правило, гетерогенные сплавы менее стойки в коррозионном отношении по сравнению с гомогенными сплавами.

### 3.2.5.3. Вывод кинетического уравнения процесса газовой коррозии

Скорость процесса взаимодействия металла с газовой фазой ( $O_2$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$ ,  $H_2$ ) выражается уравнением:

$$\frac{dW}{d\tau} = K_C \cdot C_1, \quad (3.11)$$

где  $W$  – количество образовавшихся продуктов коррозии;  $\tau$  – время реагирования;  $K_C$  – константа скорости реакции;  $C_1$  – концентрация газа на поверхности металла.

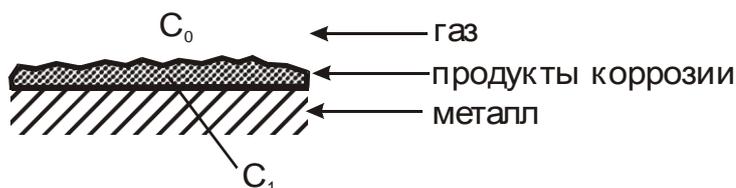


Рис 3.4. Схема газовой коррозии.

При равномерной коррозии рис 3.4  $W$  пропорционально толщине слоя образовавшихся продуктов коррозии  $\delta$ , т.е. уравнение (3.11) можно записать в виде:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = K_C \cdot C_1. \quad (3.12)$$

Поскольку скорость роста пленки продуктов коррозии определяется диффузией газа, то скорость процесса можно выразить через коэффициент диффузии  $K_D$ :

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{K_D}{\delta} \cdot (C_0 - C_1), \quad (3.13)$$

где  $C_0$  – концентрация газа на внешней поверхности пленки;  $\delta$  – толщина слоя продуктов коррозии.

Из уравнений (3.12) и (3.13) следует:

$$K_C \cdot C_1 = \frac{K_D}{\delta} \cdot (C_0 - C_1). \quad (3.14)$$

Преобразуя выражение (3.14):

$$K_C \cdot C_1 \cdot \delta + K_D \cdot C_1 = K_D \cdot C_0.$$

Находим: 
$$C_1 = \frac{K_D \cdot C_0}{K_C \cdot \delta + K_D} . \quad (3.15)$$

Выражение (3.15) подставляем в (3.12):

$$\frac{d\delta}{d\tau} = K_C \cdot \frac{K_D \cdot C_0}{K_C \cdot \delta + K_D} . \quad (3.16)$$

После преобразований:

$$(K_C \cdot \delta + K_D) \cdot d\delta = K_C \cdot K_D \cdot C_0 \cdot d\tau ,$$

$$K_C \cdot \delta \cdot d\delta + K_D \cdot d\delta = K_C \cdot K_D \cdot C_0 \cdot d\tau .$$

Интегрируя это выражение:

$$\int K_C \cdot \delta \cdot d\delta + \int K_D \cdot d\delta = \int K_C \cdot K_D \cdot C_0 \cdot d\tau .$$

Находим: 
$$K_C \cdot \frac{\delta^2}{2} + K_D \cdot \delta = K_C \cdot K_D \cdot C_0 \cdot \tau + c' ,$$

где  $c'$  – постоянная интегрирования.

При  $\tau = 0$ ,  $\delta = 0$  и  $c' = 0$ . Преобразуем последнее выражение, разделив

на  $K_C \cdot K_D$  и умножив на 2: 
$$\frac{2 \cdot K_C \cdot \delta^2}{2 \cdot K_C \cdot K_D} + \frac{2 \cdot K_D \cdot \delta}{K_C \cdot K_D} = \frac{2 \cdot K_C \cdot K_D \cdot C_0 \cdot \tau}{K_C \cdot K_D} ,$$

получаем выражение для роста  $\delta$  от  $\tau$ .

$$\frac{\delta^2}{K_D} + \frac{2 \cdot \delta}{K_C} = 2 \cdot C_0 \cdot \tau . \quad (3.17)$$

Для анализа уравнения (3.17) рассмотрим 2 случая.

В начальный момент времени реагирования толщина пленки ПК мала и членом  $\delta^2/K_D$  можно пренебречь, т.к. квадрат малой величины меньше самой величины.

Откуда: 
$$\delta = K_C \cdot C_0 \cdot \tau . \quad (3.18)$$

Уравнение прямой, т.е.  $\delta$  пропорциональна времени реагирования  $\tau$ ,  
рис. (а)

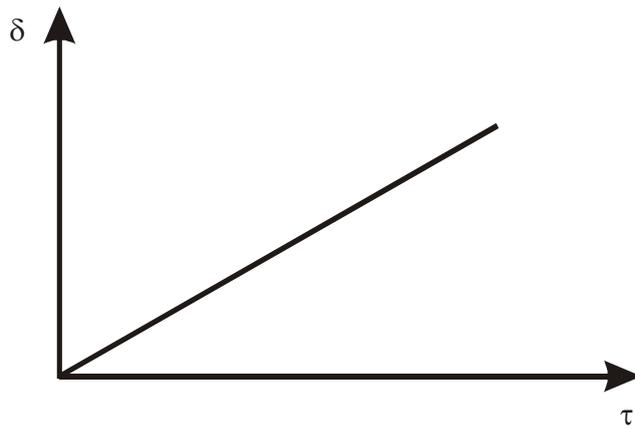


Рис 3.5 (а)

Если же пленка выросла до значительных размеров, то  $\delta^2 \gg \delta$  и между  $\delta$  и  $\tau$  будет следующая функциональная зависимость:

$$\delta^2 = 2 \cdot K_D \cdot C_0 \cdot \tau. \quad (3.19)$$

Уравнение параболы – графическая зависимость  $\delta = f(\tau)$  представлена на рис.(в)

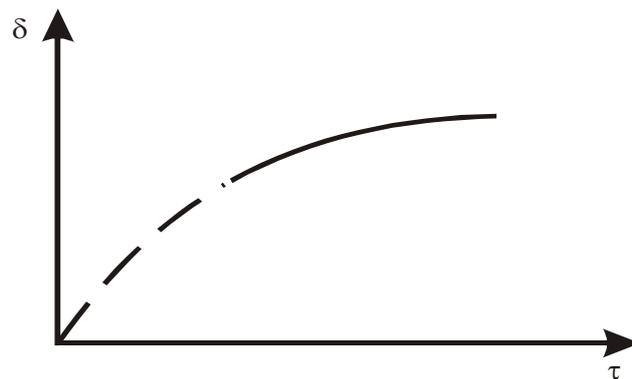


Рис 3.5 (в)

Возможность пассивации поверхности металла, рис С:

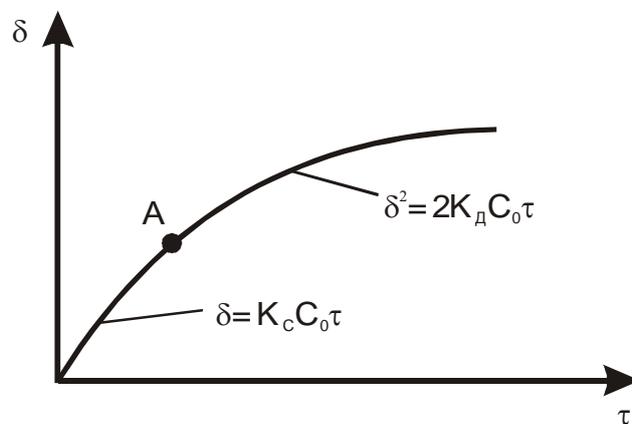


Рис 3.5 (с)

Зависимость константы от  $T$  рис. 3.6 дает уравнение Аррениуса

$$K_C = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}; \operatorname{tga} = \frac{E}{R}; E = R \cdot \operatorname{tga}. \text{ Значение } E \text{ позволяет судить об области}$$

реагирования.

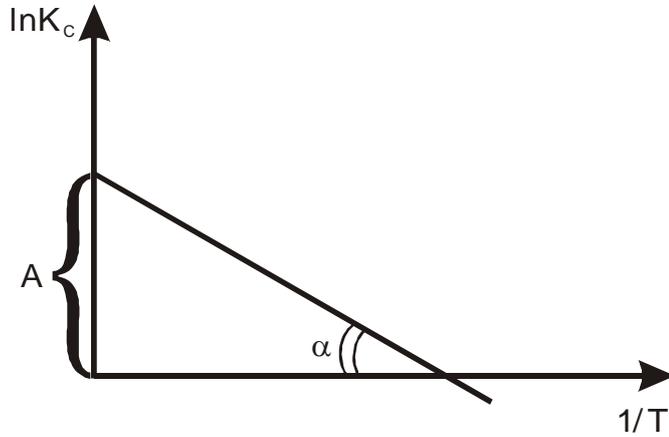
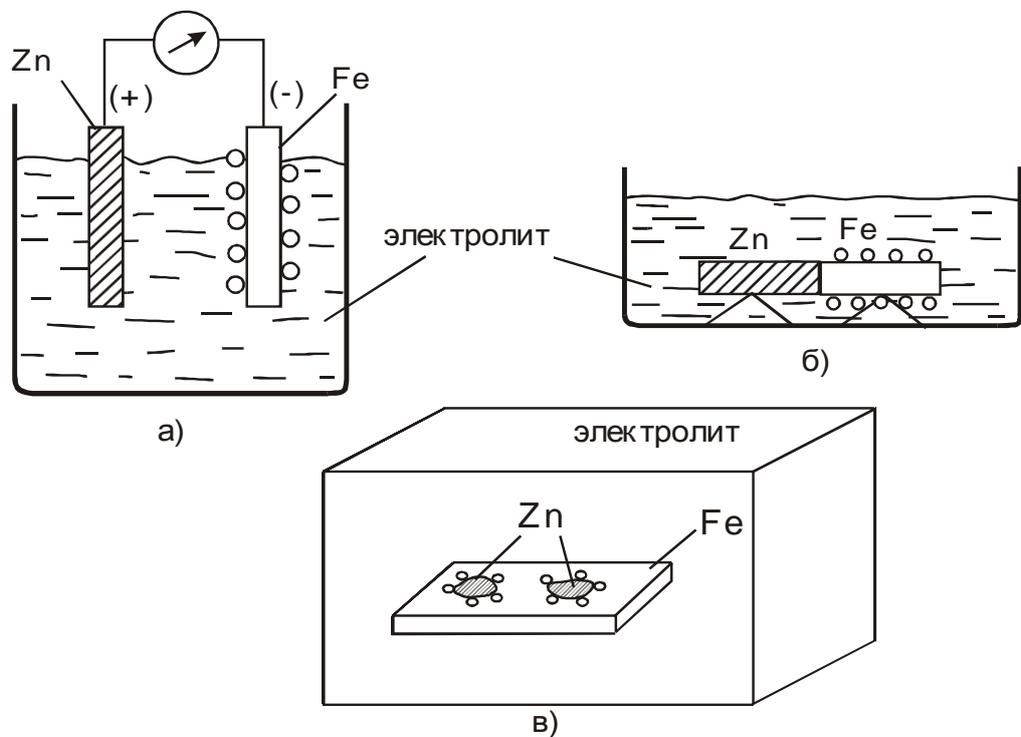


Рис. 3.6. Зависимость  $\ln K$  от  $1/T$ .

#### 3.2.5.4. Электрохимическая коррозия

Сущность процесса заключается в следующем. Если в раствор электролита поместить две пластинки из различных металлов и соединить их проводником, то в цепи появится ток (рис. а, б, в).



Исследуя пары различных металлов, еще А. Вольта, итальянский ученый, установил в 1820 году, что все металлы могут быть расположены в ряд напряжений:

Li, K, Ca, Mg, Na, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Co, Sn, Pb, H<sub>2</sub>, Cu, Ag, Pt, Au.

Металлы, стоящие правее, оказываются заряженными отрицательно, а стоящие левее – положительно и будут растворяться. Причем, чем дальше металлы отстоят друг от друга в ряду напряжений, тем больший ток возникает в их цепи, и тем больше ЭДС такого элемента.

В нашем гальваническом элементе цинковая пластинка будет растворяться, а Fe (Cu, Ag, Au) не будут растворяться.

Разность потенциалов между металлом и раствором, содержащим собственные ионы, называют потенциалом электрода. Он зависит, прежде всего, от концентрации (активности) ионов в растворе и выражается формулой В. Нернста:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{RT}{nF} \ln C,$$

где  $\varphi_0$  – нормальный равновесный потенциал, В;

R – константа;

T – абсолютная температура, К;

n – валентность металла;

F – число Фарадея, F = 96500 А·с;

C – концентрация ионов, определяющих потенциал.

При C = 1 грамм-эквиваленту собственных ионов в 1 литре  $\varphi = \varphi_0$ . ЭДС гальванического элемента E – есть разность потенциалов двух электродов:

$$E = \varphi_k - \varphi_a.$$

Для элемента состоящего из Cu и Zn электродов, погруженных в нормальные растворы собственных ионов:

$$E_{г. эл} = \varphi_{Cu}^0 - \varphi_{Zn}^0 = 0,3488 - (-0,7620) = 1,1068 \text{ В.}$$

Сила тока в цепи коррозионного гальванического элемента –  $I_k$  находится в зависимости от сопротивлений (внешнего  $r_i$  – проводника,

внутреннего  $r_{\text{вн}}$  – раствора электролита) и от  $\Delta E$  – уменьшение начальной разницы потенциалов, вызываемое изменением равновесных условий при прохождении тока, за счет катодной  $P_k$  и анодной  $P_a$  – поляризаций, то есть:

$$I_{\text{эи}\delta} = \frac{E - \Delta E}{r_i + r_{\text{ат}} + \left(\frac{D_a}{F_a} + \frac{D_e}{F_e}\right)} = \frac{E - \Delta E}{R_1 + \frac{D_a}{F_a} + \frac{D_e}{F_e}} = \frac{E - \Delta E}{R_1 - R_2}, \left[ \frac{B}{\hat{I} \hat{i} + \frac{\hat{I} \hat{i} \cdot \tilde{n} \hat{i}^2}{\tilde{n} \hat{i}^2}} \right];$$

где  $R_1$  – омическое сопротивление гальванического элемента;

$\left(\frac{P_a}{F_a} \text{ и } \frac{P_k}{F_k}\right)$  – сопротивление поляризаций –  $R_2$ .

Общее количество вещества  $W$ , подвергшегося восстановлению на катоде и соответственно окислившегося на аноде, пропорционально количеству электричества и описывается законом Фарадея:

$$W = \frac{A \cdot I \cdot \tau}{nF},$$

где  $A$  – атомный вес металла;

$n$  – валентность;

$I$  – сила тока, А;

$\tau$  – время, час;

$F$  – число Фарадея – 96500 А·с.

Причины возникновения электрохимической коррозии:

1. макро- и микро- неоднородность поверхности металлической фазы.
2. субмикроскопическая (атомарная) неоднородность поверхности металла (твёрдый раствор Cu-Zn - латунь).
3. неоднородность защитных пленок на поверхности металла.
4. неоднородность деформации и внутреннего напряжения в металле (местный наклеп металла, внешние силы и другие.)
5. неоднородность жидкой фазы (неоднородные концентрации ионов металла в электролите за счет движения электролита).
6. неоднородность физических условий (различие температур корродирующей поверхности. Более нагретые участки - аноды).

Десятибалльная шкала коррозионной устойчивости

металлических конструкционных материалов.

Группа стойкости	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Бал коррозионной стойкости	Области применения
I. Совершенно стойкие	<0,001	1	Для изготовления любых аппаратов без учета коррозионного разрушения
II. Весьма стойкие	0,001-0,005	2	
	0,005-0,01	3	
III. Стойкие	0,01-0,05	4	Для изготовления аппаратов с учетом коррозионного разрушения за время амортизации
	0,05-0,1	5	
IV. Понижено стойкие	0,1-0,5	6	
	0,5-1,0	7	
V. Мало стойкие	1,0-5,0	8	Для изготовления неотчетных, сменных деталей (патрубки, насадки и т.д.)
	5,0-10,0	9	
VI. Нестойкие	>10,0	10	Неприменимы

Для неметаллических полимерных материалов принята трехбалльная оценка коррозионной устойчивости:

Стоек – (С);

Ограниченно стоек – (О);

Нестоек – (Н).

Для большинства марок конструкционной качественной и высококачественной стали ГОСТ принято обозначение из сочетания цифр и букв. Цифры, помещенные с левой стороны букв, означают среднее значение углерода в сотых долях процента, буквы означают наличие соответствующего элемента в стали, а именно: Д – Cu; Б – Nb; А – N<sub>2</sub>; Ц – Zn; Г – Mn; С – C; Х – Cr; Н – Ni; М – Mo; В – W; Ф – V; Ю – Al; Т – Ti и К – Co.

Цифры, помещенные после букв, указывают примерное процентное содержание соответствующих элементов, если последних содержится более 1,5%.

Буква А в конце марки означает, что сталь является высококачественной.

Например: Сталь марки 12Х2Н4А является высококачественной сталью и содержит примерно 0,12% С; 2% Cr; 4% Ni.

### 3.3. Повреждение целостности деталей

#### Механические разрушения.

В их основе лежат явления усталости материала, которые возникают при действии на деталь нагрузок.

Последние, распределяясь по всему объему детали, вызывают в отдельных местах неодинаковые напряжения, так как величина, форма, ориентация осей и другие свойства кристаллов образующих металлическое тело, различны. В перенапряженных местах, когда нагрузка превысит предел прочности  $\sigma_s$ , появляются микротрещины, которые распространяясь в соседние кристаллы, образуют макротрещины. Макротрещины приводят к снижению поперечного сечения и сопротивляемости материала нагрузкам – происходит разрыв. Сечение такого излома неоднородно и состоит из двух зон – зоны мелкокристаллического строения (зона зарождения микротрещин) и зоны крупнозернистого строения (зона возникает при хрупком разрушении). Начальные зоны разрушений (слабые звенья кристаллической решетки) могут появляться как на поверхности детали, так и внутри ее.

Причиной механических повреждений целостности часто являются дефекты внутри материала, не качественное изготовление, неудачное конструктивное оформление, плохой монтаж, неправильная эксплуатация аппарата.

#### Тепло-химические повреждения

Влияние температуры на размерную стабильность конструктивных материалов. При периодических нагревах и охлаждениях практически во всех металлах и сплавах, при определенных для каждого материала условиях, происходят остаточные изменения размеров испытываемых образцов или изделий.

Остаточное изменение в каждом материале зависит от верхнего уровня температуры цикла и введения в данный материал легирующих компонентов

или примесей. Образцы изготовленные из металлов или сплавов, имеющих кубическую гранцентрированную (КГЦ) решетку, при циклической термообработке как бы раскатываются под действием термических напряжений.

Например, у пластин из Al, Cu, Ni и аустенитных нержавеющей сталей под действием термических циклов увеличиваются длина и ширина и уменьшается толщина, рис. 3.3.1.

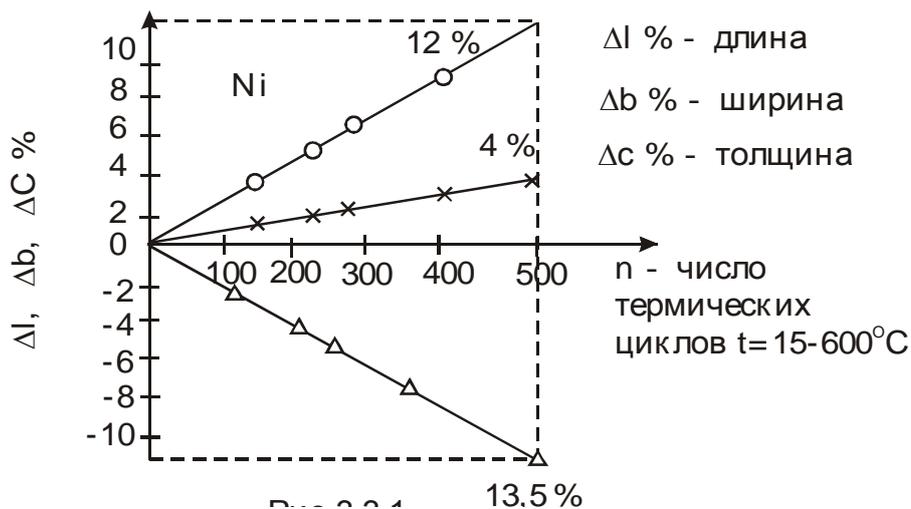


Рис. 3.8 Зависимость  $\Delta l$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  от n.

У металлов имеющих кубическую объемноцентрированную решетку (ОЦК) основной фазы в интервале температур  $15 \div 600^\circ\text{C}$ , наблюдается противоположное изменение размеров образцов, то есть уменьшение длины и ширины и увеличение толщины. Так после 600 термических циклов длина и ширина пластин из Ст. 3 уменьшились соответственно на 3 и 1,5 %.

Подобное уменьшение размеров под действием термических циклов происходит так же у образцов и изделий из различных жаропрочных сталей. Термические нагрузки приводят не только к изменению формы, а отсюда и конструктивных параметров материалов, они, приводят к образованию пористости и возникновению микротрещин, переходящие в макротрещины, которые снижают прочностные свойства материалов и могут привести к нарушению целостности.

Если конструкционные материалы оборудования подвергают термическим нагрузкам в химически агрессивной среде, то к тепловым

повреждениям целостности материала присоединяется коррозия под напряжением. Совместное их действие приводит зачастую к весьма быстрому разрушению материала и выводу из строя оборудования. В нашей промышленности подобные условия работы оборудования, имеют место весьма часто, например: 1) разложение  $\text{CaF}_2$  серной кислотой, 2) сушка и прокатка концентрата и т.д. (реторта печи разложения  $\text{CaF}_2$  имеющая  $\delta = 20 \div 30$  мм меньше чем через месяц выходит полностью из строя).

Для предупреждения повреждения целостности необходимо:

- 1) шире внедрять дефектоскопию в производство оборудования;
- 2) применять термообработку и механические виды обработки для устранения внутренних напряжений и для повышения прочности изделия;
- 3) при конструировании аппаратуры учитывать возможности местных перенапряжений, внося корректировку в нормы допускаемых напряжений;
- 4) при изготовлении и ремонтах придерживаться более высоких классов точности в допусках и посадках;
- 5) более качественно пригонять, выверять и центрировать сопряженные детали (соосные валы, червячные, винтовые и зубчатые передачи и др.);
- 6) создавать технологические процессы с низкой температурной нагрузкой материалов оборудования, особенно необходимо избегать высоких скоростей перепада температур;
- 7) обеспечивать качественное обслуживание машин.

#### 3.4. Суммированный износ машины

В общем виде суммированный износ машины можно представить из трех составляющих. Он состоит:

- 1) Износ, вызываемый нагрузками и окружающей средой при работе,

$$P_1 = f_1(\tau);$$

- 2) Износ, вызываемый нагрузками при транспортировании,

$$P_2 = f_2(\tau);$$

- 3) Износ, вызываемый нагрузками и другими видами воздействия при хранении, техническом обслуживании и ремонте

$$P_3 = f_3(\tau).$$

Суммированный износ машины:

$$P_{\text{сум}} = P_1 + P_2 + P_3 = \sum_i^s P_{i \text{ сум}} = F(\tau),$$

т.е.  $P_{\text{сум}}$  есть однозначная непрерывная функция от времени  $\tau$  использования машины за весь срок службы  $P_{\text{сум}} = F(\tau)$ .

По всем элементам сложной машины (агрегата), суммарный износ выражается формулой:

$$P_{\text{сум}} = \sum_i^s P_{i \text{ сум}} = \sum_i^s f_i(\tau) = F(\tau),$$

т.е.  $P_{\text{сум}}$  машины, в целом также является однозначной непрерывной функцией времени.

Процесс износа многих конструктивных элементов (так же как и не конструктивных) можно разделить на пять этапов, рис 3.9.

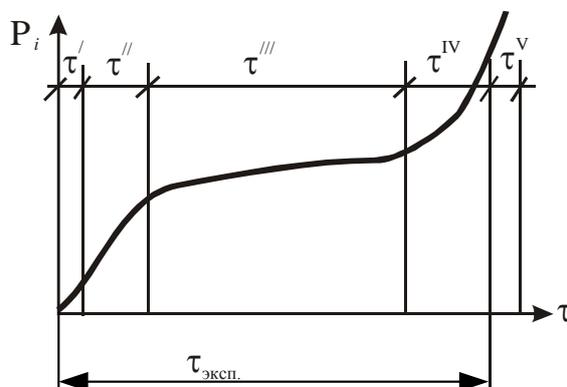


Рис 3.9. Зависимость износа конструктивных элементов от времени эксплуатации.

$\tau^I$  — кратковременный износ элементов в процессе сборки или ремонта;

$\tau^{\text{II}}$  – не установившееся усиленное изнашивание элемента в машине в начальный период эксплуатации (приработка сопряженных частей машины);  
 $\tau^{\text{III}}$  – установившееся изнашивание при нормальной работе;  
 $\tau^{\text{IV}}$  – форсированное изнашивание элемента в конце срока его службы;  
 $\tau^{\text{V}}$  – период интенсивного изнашивания и возможного разрушения, если машина (аппарат) заранее не выведена из эксплуатации.

Для некоторых элементов и узлов машины четвертого и пятого периода может и не быть (форсированного износа), когда эти детали снимаются, из-за потери технологических функций (уплотнение, плунжерные пары насосов и т.д.) рис. 3.10.

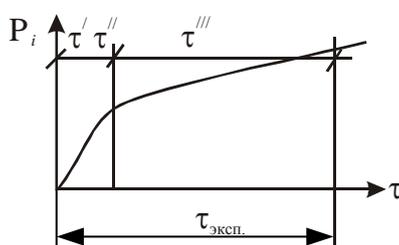


Рис. 3.10.

Другие элементы машин и аппаратов (например: токоподводящие линии, емкости, баки, теплообменники и т.д.) практически не имеют начального периода (приработки) рис. 3.11.

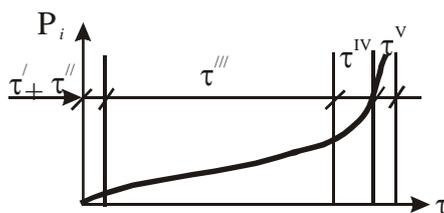


Рис. 3.11.

В настоящее время для оценки технического состояния машины принято учитывать три критерия:

- 1) Технический (снижение прочности);
- 2) Технологический (не обеспечивается технологический режим);
- 3) Экономический (эксплуатация экономически не выгодна).

### Классификация повреждений

По возможности восстановления поврежденных деталей, повреждения классифицируются на следующие группы:

группа I а – механический износ поверхностей – легко восстанавливается до наминала;

группа I б – коррозионный износ поверхности – восстанавливается только в крайнем случае, при безвыходном положении;

группа II а – механическое повреждение целостности – восстанавливается только в безвыходном положении, как крайняя мера;

группа II б – коррозионное повреждение целостности – как правило не восстанавливается.

#### **Глава 4. Основы теории старения машин [8].**

Существующие разделы теории машин:

1. Теория рабочих и вспомогательных процессов;
2. Кинематика машин;
3. Динамика и силовой расчет машин;
4. Теория производства машин.

Предлагается дополнить разделом.

5. Теория старения машин.

Этим содержанием теории машин охватывается все, что относится к машине от зарождения её до полной амортизации.

##### **4.1. Понятие годности машин**

Годность – является обобщенной характеристикой служебных свойств машины, т.е. её относительная способность и потенциальные возможности выполнять свои функции или заданный процесс в пределах допустимых отклонений по качеству и экономичности в течение оптимального срока её службы в производстве. Годность является величиной обратной износу, она безразмерная величина.

Годность машины, находящейся в сфере потребления, есть функция

времени её использования:

$$E_m = F(\tau), \quad (4.1)$$

она зависит от состояния отдельных элементов машины.

В каждой машине различают две группы элементов: конструктивные и неконструктивные.

Конструктивными элементами называются отдельно изготовленные детали, входящие в состав машины, независимо от их материала, размера и формы (рамы, валы, подшипники, емкости, трубопроводы и др.).

Неконструктивными элементами называются некоторые неотделяемые элементы, обеспечивающие необходимую активную связь или нормальное функционирование всех конструктивных элементов при работе машины (сборка, регулировка, окраска, смазка).

Каждый элемент машины, конструктивный и неконструктивный имеет свою годность. Годность готовой машины равна сумме годностей её конструктивных и неконструктивных элементов, т.е.:

$$E_m = \sum_1^s E_i + \sum_1^z G_j. \quad (4.2)$$

Рассмотрим характер изменения сначала части годности машины, относящейся к одному недолговечному сменяемому или возобновляемому элементу машины.

На рис. 4.1. приведен график, показывающий изменения годности этого элемента.

На графике зубчатая линия OABCDEFG и т.д. характеризует изменение части  $E_i$  годности машины в период ее использования. При  $t_x = 0$   $E_{ix} = \max$ . Участок АВ отражает эксплуатацию машины, и снижение рассматриваемой части годности  $E_i$ . Это снижение продолжается в течение всего периода  $t_i$  до момента остановки машины на техническое обслуживание, ремонт или замену конструктивных элементов. В этот момент часть годности машины достигает нулевого значения ( $E_{ix} = 0$ ).

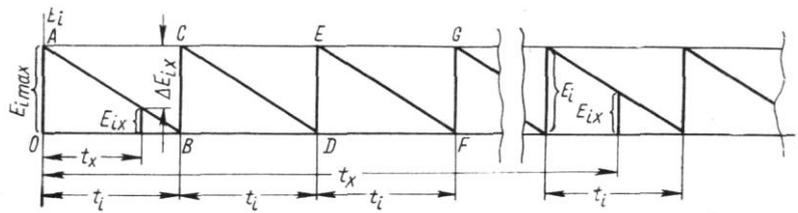


Рис. 4.1. Изменение годности одного из элементов машины

Путем проведения мероприятий технического обслуживания или ремонта или путем замены конструктивных элементов показатель  $E_{ix}$  годности на участке BC восстанавливается до значения  $E_{ix\ max}$ , затем на участке CD в течение периода  $t_i$  этот показатель снижается до  $E_{ix\ min}=0$ , а на участке DE он восстанавливается до номинального значения и т.д.

В начальный период использования машины, меньший срока службы исходного элемента (период от  $t_x=0$  до  $t_i=t_x$ ), снижение  $\Delta E_{ix}$  годности

данного элемента равно  $E_{ix} = \frac{t_x}{t_i} E_i$ , а значение сохранившейся части

годности этого элемента будет:

$$E_{ix} = f_i(t) = E_i - \frac{t_x}{t_i} E_i, \quad (4.3)$$

или после упрощения:

$$E_{ix} = \frac{t_i - t_x}{t_i} E_i. \quad (4.4)$$

Отсюда при  $t_x = 0$   $E_{ix} = E_i$ ; при  $t_x = t_i$   $E_{ix} = 0$ .

После срока использования машины  $t_x = t_i$  осуществляется техническое обслуживание, ремонт или замена соответствующих конструктивных элементов; значит, в машину вносят соответствующую новую часть годности  $E_i$ . С возобновлением через срок службы машины  $t_x = t_i$  годности  $E_{ix} = E_i$  начинается новый цикл изменений годности данного элемента машины.

Участок CD относится к периоду использования машины от  $t_x = t_i$  до  $t_x = 2t_i$  (рис. 4.1.).

За этот период снижение соответствующей годности сменного или

возобновленного элемента будет  $\Delta E_{ix} = \frac{t_x - t_i}{t_i} E_i$ , а значение сохранившейся части соответствующей годности будет:

$$E_{ix} = f_i(t) = E_i - \left( \frac{t_x - t_i}{t_i} \right) E_i$$

или

$$E_{ix} = \frac{2 \cdot t_i - t_x}{t_i} E_i.$$

При  $t_x = 2 t_i$  до технического обслуживания, ремонта машины или замены соответствующих ее элементов  $E_{ix} = 0$ ; после проведения этих мероприятий  $E_{ix} = E_i$ .

Аналогично этому третий участок зубчатой линии может быть выражен уравнением:

$$E_{ix} = f_i(t) = \frac{3 \cdot t_i - t_x}{t_i} E_i.$$

Если в общем случае срок использования машины  $t_x$  лежит в пределах  $n_{ix} t_i < t_x < (n_{ix} + 1) \cdot t_i$ , то снижение соответствующей годности многократно сменяемого или возобновляемого, элемента:

$$\Delta E_{ix} = \frac{t_x - n_{ix} t_i}{t_i} E_i, \quad (4.5)$$

а значение сохранившейся части соответствующей годности:

$$E_{ix} = \frac{(n_{ix} + 1) \cdot t_i - t_x}{t_i} E_i, \quad (4.6)$$

где  $n_{ix} = \frac{t_x}{t_i}$  – количество сменных элементов к моменту контроля состояния машины (учитывается только целое число).

При  $t_x = (n_{ix} + 1) \cdot t_i$  до технического обслуживания, ремонта, или замены элемента  $E_{ix} = 0$ ; после проведения этих мероприятий  $E_{ix} = E_i$ .

Выражение (4.6) справедливо для любых элементов машины: (в том числе и несменяемых или не возобновляемых, поскольку в этом случае  $n_{ix} = 0$ ) и для любого периода их контроля в пределах срока службы машины.

Но при этом во всех случаях для периода контроля состояния машины  $t_x = n_{ix}t_i$  (где  $n_{ix} = 1, 2, 3, \dots, n_i$ ) значение годности  $E_{ix} = 0$  до соответствующего технического обслуживания, ремонта или замены конструктивных элементов и  $E_{ix} = E_i$  – после соответствующего технического обслуживания, ремонта или замены конструктивных элементов. Для всех остальных значений  $t_x$  величина  $E_{ix}$  может быть определена по выражению (4.6).

Чтобы перейти к оценке годности всей машины  $E_{mx}$  за тот или иной срок ее использования  $t_x$ , необходимо сложить соответствующие части годности всех конструктивных и неконструктивных элементов, в данный момент составляющих эту машину.

Если за срок использования  $t_x$  машины различные недолговечные конструктивные и неконструктивные элементы периодически заменяли и возобновляли, то в соответствии с уравнением (4.6) годность машины в любой данный момент контроля ее состояния можно определить по выражению:

$$E_{mx} = F_m(t) = \sum_1^s \frac{(n_{ix} + 1) \cdot t_i - t_x}{t_i} E_i. \quad (4.7)$$

При этом, в частном случае, для значений  $t_x = n_{ix}t_i$  (где  $n_{ix} = 1, 2, 3, \dots, n_i$ ) соответствующие члены выражения (4.7) приравнивают нулю ( $E_{ix} = 0$ ) до проведения технического обслуживания машины, ремонта или замены конструктивного элемента либо приравнивают номинальному значению исходной их величины ( $E_{ix} = E_i$ ) после технического обслуживания машины, ремонта или замены конструктивного элемента.

#### 4.2. Структурные составляющие годности машин и их изменения за срок службы.

Структуру годности машины и последующие ее изменения можно выразить в виде графика, на котором вверх от оси абсцисс  $0-t$  откладывают годности  $E_i$  конструктивных элементов, а вниз – годности  $G_i$

неконструктивных элементов машины. При построении этих и некоторых последующих графиков в целях упрощения принято, что:

1) изменение годности любого элемента машины в пределах срока его службы протекает по закону прямой;

2) годность нескольких различных элементов одинакового срока службы может быть представлена в виде соответствующей годности одного укрупненного элемента;

3) сроки службы последовательно вводимых в стареющую машину недолговечных элементов сохраняются постоянными;

4) при каждом техническом обслуживании и ремонте или замене недолговечных конструктивных элементов новыми машина приобретает дополнительную годность, равную потерянной исходной годности возобновляемых при этом элементов.

Процесс снижения годности конструктивных и неконструктивных элементов машины в период эксплуатации можно показывать прямыми линиями, хотя фактически он протекает более сложно. Так, например, при временных неблагоприятных условиях работы машины (повышенная запыленность воздуха или неравномерная загрузка, работа машины в холодное время и т.п.) снижение годности происходит более интенсивно; при благоприятных условиях (длительная равномерная загрузка, малая запыленность воздуха и т.п.) – менее интенсивно; таким образом, вместо прямой линии процесс характеризуется некоторой ломаной линией. Но все же прямая линия является достаточно правильным выразителем усредненных изменений годности всех элементов машин.

Непрерывный прогресс машинной техники одновременно сопровождается и изменением структурных составляющих годности машин. В связи с этим целесообразно рассмотреть несколько категорий машин, различных по структурным составляющим их годности.

I категория. Машины, имеющие максимальную исходную годность и используемые потребителями весь срок службы только с исходными

образцами составляющих их элементов, т.е. машины, не требующие в период их работы ни технического обслуживания и ремонта, ни замены деталей (рис. 4.2.).

II категория. Машины, имеющие пониженную исходную годность, но используемые потребителями весь срок службы без замены каких-либо конструктивных элементов при условии периодического возобновления некоторых неконструктивных элементов, что, по существу, сводится к необходимости проведения периодического ремонта этих машин, выполняемого из-за недостаточной стабильности их монтажа и регулировок, а также недостаточной стабильности форм и размеров конструктивных элементов, т.е. машины, требующие за время своей работы периодические ремонты (рис. 4.3.).

III категория. Машины, имеющие еще более пониженную исходную годность и также используемые потребителями весь срок службы без замены каких-либо конструктивных элементов, но при условии периодического возобновления еще более значительной и разнообразной части их неконструктивных элементов, что, по существу, сводится к необходимости проведения потребителем не только периодического ремонта этих машин, но и более частого периодического технического обслуживания ввиду еще более недостаточной стабильности монтажа, регулировок и других неконструктивных элементов (рис. 4.4.).

IV категория. Машины, имеющие пониженную исходную годность и используемые потребителем весь срок службы при условии периодического возобновления некоторых неконструктивных элементов и замены части конструктивных элементов (ввиду недолговечности исходных образцов), что, по существу, сводится к необходимости проведения потребителем периодического ремонта машин с одновременной заменой части конструктивных элементов и проведения их периодического технического обслуживания (рис. 4.5.).

V категория. Машины, имеющие еще более пониженную исходную

годность и используемые потребителями весь срок службы только при условии периодического возобновления в разные сроки части неконструктивных элементов машин и периодической замены в разные сроки части конструктивных элементов, что, по существу, сводится к проведению потребителем периодического технического обслуживания и ремонта машины по определенной системе при одновременном проведении периодической замены части недолговечных конструктивных элементов как в сроки, совпадающие с ремонтом машины, так и в сроки, не совпадающие с ее ремонтом; к этой категории относится большинство современных машин и оборудования (рис. 4.6.).

VI категория (машины будущего). Машины, которые могут использоваться потребителями весь срок службы, имея в своем составе достаточно надежные основные части, но которые требуют периодической замены некоторых недолговечных конструктивных элементов и периодического возобновления некоторых неконструктивных элементов (рис. 4.7.). При этом имеется в виду, что смена недолговечных конструктивных и возобновление недолговечных неконструктивных элементов машин этой категории отличается крайней простотой (подобно тому, как сменяется новыми изношенный ремень вентилятора современного двигателя). Рассмотрим структуру годности машины каждой категории и проследим примерное изменение этих характеристик за срок службы машины.

Необходимо заранее условиться, что при рассмотрении и сопоставлении структур годности машин всех категорий целесообразно иметь в виду, что эти машины имеют одинаковое назначение, их параметры (мощность, производительность, экономичность, качество внешней отделки и т.п.) совпадают и что они имеют одинаковый оптимальный срок службы, в течение которого удовлетворяют производственному назначению в пределах ограничений, определяемых качеством работы и экономичностью.

Рассмотрим структуру годности машин I категории. К I категории



остаточная годность равна нулю:  $E_{м.ост I} = 0$ . Соединяя точки А и В с точкой С прямыми линиями, мы ограничиваем зону изменения годности машины I категории. По значению ординаты между сторонами АС и ВС в  $\triangle ACB$  (рис. 4.2.) можно за любой срок  $t_x$  службы машины определять остаточную годность  $E_{м I x}$  этой машины.

В народном хозяйстве машин I категории в действительности нет или очень мало.

Рассмотрим структуру годности машин II категории. К этой категории относятся машины с большим запасом прочности всех конструктивных элементов, но отличающиеся недостаточной стабильностью монтажа и регулировки, а также недостаточной стабильностью форм и размеров некоторых деталей, вследствие чего требуется периодический перемонтаж машин с необходимым ремонтом их деталей.

К этой категории могут относиться как старые, так и современные тихоходные машины, сборка которых осуществлена по менее жестким техническим условиям, чем машин I категории. Исходная годность этих машин при прочих равных условиях значительно меньше исходной годности машин I категории. В ней имеется доля недостаточно долго действующей годности неконструктивных элементов, обуславливающая необходимость перемонтажа и возобновления регулировки машины, а также некоторая часть недостаточно долго действующей исходной годности ремонтпригодных конструктивных элементов, обуславливающая необходимость возобновления форм и размеров этих деталей при ремонте машины.

Уточним некоторые особенности возобновления неконструктивных элементов рассматриваемых машин. Труд, а также некоторые материалы и энергию, затрачиваемые на сборку, регулировку, обкатку, окраску и другие процессы подготовки машины потребителю и определяющие соответствующие годности неконструктивных элементов, необходимо разделять на несколько частей.

Первая часть, относящаяся к сборке и окраске базисных

конструктивных элементов, действительна весь срок службы машины; вторая часть, относящаяся к обработке, установке и подгонке ремонтнопригодных конструктивных элементов, действительна только до наступления ремонта машины; третья часть, относящаяся к смазке, регулировочным и другим работам по техническому обслуживанию, действительна только до сроков проведения соответствующих видов технического обслуживания машины.

Годность неконструктивных элементов машины, создаваемую первой частью трудовых и иных затрат, целесообразно для упрощения присоединять к годности соответствующих базисных конструктивных элементов и пока не рассматривать, так как изменения ее за срок службы машины совпадают с изменениями годности базисных конструктивных элементов, если последние за срок службы машины не подвергают ремонту.

Годность неконструктивных элементов машины, которая может воссоздаваться третьей частью трудовых затрат, также не будем рассматривать, поскольку машины II категории по условию не нуждаются в сложном техническом обслуживании.

При рассмотрении годности неконструктивных элементов, создаваемой второй частью трудовых и иных затрат, следует отметить, что для многих машин она является существенной в исходном образце и еще более существенной для машины, работоспособность которой возобновлена при очередном ремонте.

В данном случае рассматриваем такие затраты, которые соответствуют работам, выполняемым в условиях ремонтных мастерских или предприятий, где имеются неисправные, но потенциально работоспособные машина или конструктивный элемент (в качестве соответствующих своеобразных заготовок) и где частично создается для потребителя машины новая годность. Последняя, присоединяясь к остаточной части годности машины или конструктивного элемента, обеспечивает после ремонта машине или конструктивному элементу более высокую годность.

Рассматриваем, следовательно, затраты труда рабочих, занимающихся

ремонт, которые путем использования некоторых материалов (припоев при медницких работах, электродов при сварке и т.п.) и энергии (тепловой, электрической, химической) вновь создают часть годности машины.

Из этих особенностей рассматриваемой части трудовых и иных затрат, необходимых для поддержания работоспособности машины путем ремонта в период ее потребления, вытекает, что сюда не могут включаться затраты труда на изготовление новых конструктивных элементов, замена которых через определенные сроки предусмотрена конструкцией машины и соответствующими нормами; годность запасных частей к машинам создается не трудом рабочих ремонтных предприятий, а трудом рабочих предприятий машиностроения.

Для II категории машин последнее замечание не имеет значения, но при рассмотрении последующих категорий машин, а также при рассмотрении вопроса о масштабах ремонтного производства это необходимо учитывать. Следовательно, ко второй части трудовых и иных затрат должны относиться затраты, соответствующие возобновлению годности различных элементов, которые уже имеются в машине, т.е. затраты на:

а) выполнение слесарно-механических, сварочных, кузнечных и других работ по исправлению в рациональных пределах конструктивных элементов, имеющих кратковременно действующую обработку и вследствие износа нуждающихся в ее возобновлении, поскольку все эти элементы являются еще потенциально работоспособными;

б) сборку механизмов из отремонтированных конструктивных элементов с необходимой подгонкой, регулировкой и испытанием узлов и агрегатов;

в) обкатку, окраску и общую подготовку машины. Содержание этих работ по существу и составляет ремонт машины в истинном смысле этого вида производства.

Часть годности машины II категории, созданная при осуществлении

трудовых и иных затрат на только что рассмотренный ремонт машины, за срок ее службы претерпевает в упрощенном изложении следующие изменения.

Каждая собранная, отрегулированная и окрашенная машина содержит в определенном объеме исходную годность  $G_{2II}^0$  требующую периодического полного возобновления, т.е. существующую только до очередного ремонта машины.

К концу межремонтного периода  $\tau_{2II}^0$ , годность машины, относящаяся к ее недолговечному исходному монтажу, окраске, достигнет нуля ( $G_{2II}^0 = 0$ ) и машина для продолжения своей службы в производстве должна быть разобрана, отремонтирована и вновь собрана, отрегулирована, окрашена и т.д. Таким образом, через срок  $\tau_{2II}^0$  часть годности машины этой категории полностью возобновляется путем проведения ее ремонта, т.е. путем внесения годности  $g_{2II}^1$ . Но этот ремонт и регулировка машины также недолговечны; к концу следующего межремонтного периода созданная ими годность достигает нуля ( $g_{2II}^1 = 0$ ), и требуется проведение следующего ремонта для создания годности  $g_{2II}^2$ , чтобы машина вновь была годной к работе и т.д.

На графике (рис. 4.3.) вверх от оси абсцисс  $0-t$  отложена сумма той части годности машины, которая складывается из годностей  $\Sigma E_{iII}$  исходных конструктивных элементов, а вниз от оси абсцисс отложена суммарная годность  $\Sigma G_{jII} = G_{1II} + G_{2II}^0$  неконструктивных элементов машины. Так как для данной категории машин характерны недолговечные монтаж и окраска, то на том же графике вниз по оси абсцисс через срок  $\tau_{2II}^0$  откладывают вновь создаваемую

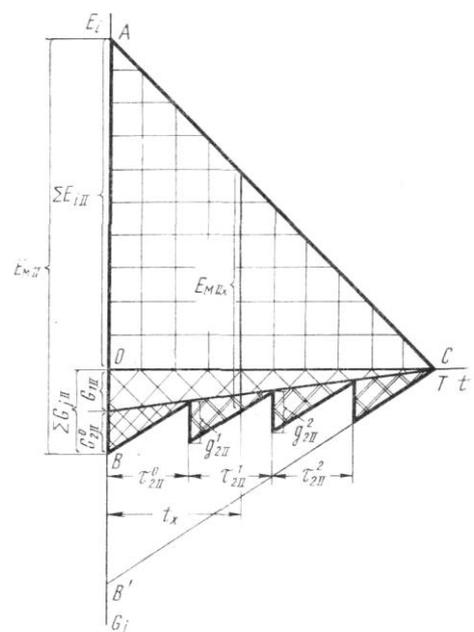


Рис. 4.3. Структурные составляющие годности машины II категории и их изменения за срок службы машины 55

часть  $g_{2II}^1$  годности, вносимую в машину при первом ремонте. Поскольку и эта годность через срок  $\tau_{2II}^1$  достигает нулевых значений, в машину при очередном ремонте вносят соответствующую часть  $g_{2II}^2$  годности. Очевидно, что последовательных ремонтов машины, т.е. полных возобновлений годности  $g_{2II}^L$ , может быть не три, как в нашем примере, а любое  $n_{2II} - 1$  число, где  $n_{2II}$  – полное количество соответствующих неконструктивных элементов машины, изнашиваемых за срок ее службы<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Чтобы различать исходные и возобновляемые неконструктивные элементы машин, здесь и всюду далее на графиках и в формулах при обозначении годности элементов ставятся индексы ( $g_i^{Ll}$ ): 0 – (верхний индекс) – для исходного образца; 1, 2, 3, ..., L, ...,  $n - 1$  для последовательно полностью возобновляемых образцов. Если неконструктивный элемент возобновляется не только полностью, но и частично, то рядом с индексом L, указывающим полное возобновление элемента, ставится дополнительный индекс 1, 2, 3, ..., 1, ...,  $m_j - 1$  указывающий порядковый номер частичного его возобновления. Аналогично этому значение индексов K и при обозначениях годности конструктивных элементов ( $e_i^{Kk}$ ).

Таким образом, в соответствии с принятыми обозначениями требующая периодического возобновления часть годности неконструктивных элементов определенного назначения, обеспечивающая работоспособность машины, за срок службы машины может быть представлена в общем виде следующим рядом годностей:

$$G_{2II}^0, g_{2II}^1, g_{2II}^2, \dots, g_{2II}^L, \dots, g_{2II}^{n_{2II}-1}.$$

Для упрощения анализа и построения графика принято, что годность, вносимая в машину при ремонте, равна соответствующей исходной годности, т.е.  $g_{2II}^L = G_{2II}^0 = \text{const}$ , а все межремонтные периоды равны между собой:

$$\tau_{2II}^0 = \tau_{2II}^1 = \dots = \tau_{2II}^L = \dots = \tau_{2II}^{n_{2II}-1}.$$

Нетрудно заметить, что рассматриваемые машины II категории имеют значительно сниженную исходную годность по сравнению с машинами I категории, что выгодно промышленности, выпускающей эти машины.

Однако наряду с этим они имеют недостаток, заключающийся в том, что потребителю нужно проводить периодические ремонты машины, чего не требовали машины I категории.

Это значит, что конструкторы и технологи промышленности, упрощая изготовление машины, но внося при этом в нее свойство нуждаться в периодических ремонтах, не получают при прочих равных условиях никакой народнохозяйственной выгоды: сокращение трудовых и иных затрат при производстве машины в данном случае требует полной компенсации, которой и являются затраты на периодические ремонты.

Обычно снижение исходной годности машин вызывается желанием сократить затраты труда, применение более ценных материалов и другие затраты при производстве машин в промышленности.

В большинстве случаев при этом упомянутая выше компенсация, которую вкладывают потребители машин с целью поддержания работоспособности используемой техники в пределах установленных сроков службы, значительно превосходит достигаемое в промышленности сокращение затрат на производство машин.

Исходная годность машины II категории равна:

$$E_{m II} = \sum E_{i II} + \sum G_{j II} = \sum E_{i II} + G_{1 II} + G_{2 II}^0, \quad (4.9)$$

где  $G_{1 II}$  – годность, соответствующая, долговременно действующей сборке и подгонке конструктивных элементов машины;

$G_{2 II}^0$  – часть годности машины, соответствующая недостаточно долго действующим обработке и монтажу конструктивных элементов и окраске машины, которую необходимо через сроки  $\tau_{2 II}^L$  полностью возобновлять при ремонте  $n_{2 II} - 1$  раз за срок службы машины.

Через срок  $T$ , являющийся оптимальным сроком службы машины, ее снимают с эксплуатации, так как она негодна для дальнейшей работы, т.е.  $E_{m.ост II} = 0$ . Но машина II категории негодна для дальнейшей работы не только по истечении полного срока службы, но и по истечении срока

годности недолговременно действующей обработки и монтажа конструктивных элементов, окраски, когда через период  $\tau_{2II}^L$  часть годности  $G_{2II}^0 = 0$  или  $g_{2II}^L = 0$ . В этом случае можно считать машину относительно негодной, в то время как по истечении срока службы  $T$  машина становится абсолютно негодной.

Из графика (рис. 4.3.) видно, что за любой срок службы  $t_x$  машины можно легко определить ее остаточную годность  $E_{mIIx}$  как ординату между верхней прямой линией АС, ограничивающей изменение суммарной годности конструктивных элементов машины, и нижней зубчатой линией, ограничивающей изменение годности неконструктивных элементов машины с учетом их возобновления при периодическом ремонте.

Если по оси ординат вниз от точки В отложить последовательно соответствующие части всех годностей, которые вносят в машину в процессе потребления путем проведения периодических ремонтов, то точка В' для машины II категории позволит определить на графике суммированную годность, равную ординате В'А, которая фактически затрачивается для обеспечения работоспособности машины в процессе ее потребления за полный срок службы.

В народном хозяйстве очень мало машин, структура годности которых соответствовала бы только что рассмотренной II категории.

Рассмотрим III категорию машин. К этой категории по структуре годности относятся машины, которые состоят из несменяемых конструктивных элементов пониженной исходной годности, вследствие чего машины, кроме периодических ремонтов, требуют предусмотренного конструкторами и технологами дополнительного периодического технического обслуживания (смазки, подтяжки креплений, регулировки, заточки режущих элементов и т.п.).

Исходная годность машины III категории равна:

$$E_{mIII} = \sum E_{iIII} + \sum G_{jIII} = \sum E_{iIII} + G_{1III} + G_{2III}^0 + G_{3III}^0, \quad (4.10)$$

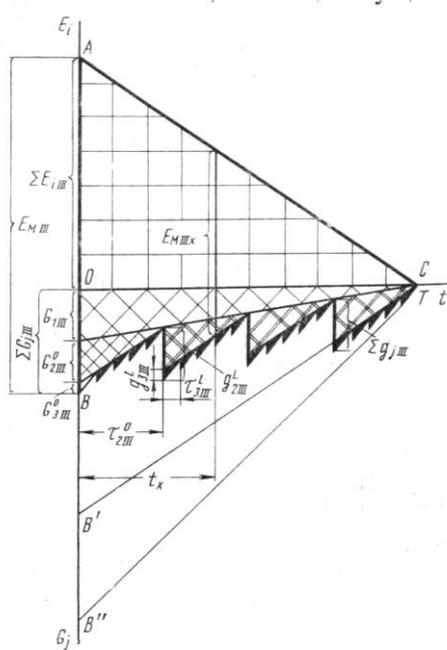
где  $G_{3III}^0$  – часть годности неконструктивных элементов машины, соответствующая кратковременно действующей смазке и регулировке, которые при использовании машины необходимо периодически через сроки  $\tau_{3III}^l$  частично возобновлять при техническом обслуживании  $m_{3III} - 1$  раз за срок службы машины.

Исходная часть  $G_{3III}^0$  годности, вызывающая необходимость периодического технического обслуживания машины, естественно, есть в машинах, имеющих существенное снижение общей исходной годности машины  $E_{mIII}$  за счет снижения значений  $\Sigma E_{iIII}$  или  $G_{1III}$  и  $G_{2III}^0$ .

В противном случае машина III категории была бы менее прогрессивной для самой промышленности, чем машина II категории.

В нашем примере предполагается, что произошло заметное сокращение исходной годности конструктивных элементов машины (например, изменено качество материала), которые, однако, сохраняют достаточную износостойкость, чтобы выдерживать полный срок службы машины, если будут применяться предусмотренные конструкторами и технологами ремонт и техническое обслуживание машины.

В отличие от машин II категории при построении графика (рис. 4.4.)



структуры годности машин III категории несколько уменьшается значение годности  $\Sigma E_{iIII}$  конструктивных элементов, а по оси ординат (вниз от оси абсцисс) откладывают сначала годность долговременно действующих неконструктивных элементов  $G_{1III}$ , затем возобновляемых при ремонте неконструктивных элементов  $G_{2III}^0$  и, наконец, возобновляемых при периодическом техническом обслуживании неконструктивных элементов  $G_{3III}^0$ .

Рис. 4.4. Структурные составляющие годности машины III категории и их изменения за срок службы машины

К изменениям годности машины за срок ее службы, характерным для машин II категории, в этом случае добавляются изменения годности, связанные с процессами технического обслуживания машины (рис. 4.4.), при которых последовательно вносят ряд возобновляемых годностей:

$$G_{3III}^0, g_{3III}^1, g_{3III}^2, g_{3III}^3, \dots, g_{3III}^l, \dots, g_{3II}^{m_j-1}.$$

Единая периодичность  $\tau_{3III}^l$  и стабильные объемы технического обслуживания  $G_{3III}^0 = g_{3III}^l$  при построении графика приняты для его упрощения.

Из рассмотрения графика совершенно ясно, что машины III категории являются более прогрессивными для промышленности. Для потребителей эти машины имеют сниженную исходную годность по сравнению с машинами I или II категории при остальных равных параметрах.

Снижение исходной годности машин III категории вызвано сокращением затрат труда, более ценных материалов и других затрат на производство машин в промышленности, но оно в нашем случае полностью компенсируется равновеликими (а практически значительно большими) затратами труда, энергии и материалов, вкладываемыми в машины потребителями.

В определенных условиях народному хозяйству может быть выгода от этого мероприятия, поскольку оно разгружает промышленность от работ, которые могут выполняться в сфере потребления машин, если при этом будут обеспечены необходимые условия нормального воспроизводства недолговечных элементов.

В любой момент времени  $t_x$  использования машины III категории ее остаточная годность  $E_{mIIIx}$  может быть определена как ордината между верхней прямой линией AC (рис. 4.4.), ограничивающей изменения суммарной годности конструктивных элементов машины, и нижней зубчатой линией, соединяющей точки B и C и ограничивающей изменения годностей неконструктивных элементов с учетом их возобновления при периодическом

ремонте и техническом обслуживании машины.

Если по оси ординат вниз от точки В отложить последовательно все годности, которые вносят в машину при периодическом ремонте,  $\Sigma g_{2m}^L$  и все годности, которые последовательно вносят в машину при периодическом техническом обслуживании,  $\Sigma g_{3m}^l$  то точка В" определит на графике (рис. 4.4.) суммированную годность машины III категории, равную ординате В"А, которая фактически затрачивается для обеспечения работоспособности машины в процессе ее потребления за полный срок службы.

Следует заметить, что при определении соответствующих величин, используемых для построения подобных графиков, часть годности  $g_{2m}^L$  имеет периодичность изменений  $\tau_{2m}^L$ , часть  $g_{3m}^l$  – периодичность  $\tau_{3m}^l$ , а при ремонте машины, поскольку эти периодичности приняты кратными, они вносятся одновременно как две дополняющие одна другую составляющие.

Рассмотрим IV категорию машин, отличающуюся от III категории тем, что с целью облегчения веса машины или с какой-либо другой целью часть ее конструктивных элементов выполнена так, чтобы потребители могли их заменять в условиях эксплуатации,

В данном случае принято, что периодичность  $t_{iIV}^K$  смены конструктивных элементов совпадает с периодичностью ремонтов машины,

$$\text{т.е.} \quad t_{iIV}^K = \tau_{jIV}^L = \tau_{mIV}.$$

Исходная годность машины IV категории равна:

$$E_{mIV} = \Sigma E_{iIV} + \Sigma G_{jIV} = E_{1IV} + E_{2IV}^0 + G_{1IV} + G_{2IV}^0 + G_{3IV}^0, \quad (4.11)$$

где  $E_{2IV}^0$  – годность машины, относящаяся к части исходных конструктивных элементов, которые при нормальном использовании машины необходимо периодически через сроки  $t_{2IV}^K$ , совпадающие со сроками ремонтов, заменять новыми  $n_{2IV} - 1$  раз за срок службы машины.

Соответствующий ряд годностей, последовательно вводимых в машину и относящихся к сменяемым конструктивным элементам определенного

назначения, за весь период работы машины в общем виде будет:

$$E_{2IV}^0, E_{2IV}^1, E_{2IV}^2, \dots, E_{2IV}^K, \dots, E_{2IV}^{n_i-1}.$$

При построении графика (рис. 4.5.) было обращено внимание на то, что структура исходной годности машин IV категории отличается от структуры машин III категории, так как по оси ординат вверх от оси абсцисс сначала откладывают некоторую часть годности долговременно работающих конструктивных элементов, затем часть годности машины, относящуюся к сменяемым конструктивным элементам. При этом общая исходная годность машины существенно уменьшена.

В течение срока службы машины к изменениям годности, свойственным машинам III категории, в этом случае добавляются изменения, вызванные потерей через срок  $t_{2IV}^K = \tau_{2IV}^L$  годности части исходных недолговечных конструктивных элементов машины, требующих смены, т.е. возобновления соответствующей годности машины периодическим введением в нее новых конструктивных элементов вместо изношенных.

Машины этой категории можно создавать более легкими по сравнению с машинами предыдущих категорий, поэтому они имеют более широкую сферу применения, если при этом в сфере потребления машин постоянно обеспечиваются нормальные условия воспроизводства недолговечных элементов: наличие соответствующих ремонтных предприятий, нормальное обеспечение запасными частями (вместо недолговечных), ремонтными материалами и т.п.

В любой период использования машины IV категории ее остаточная годность легко определяется как ордината между верхней зубчатой линией, ограничивающей изменение

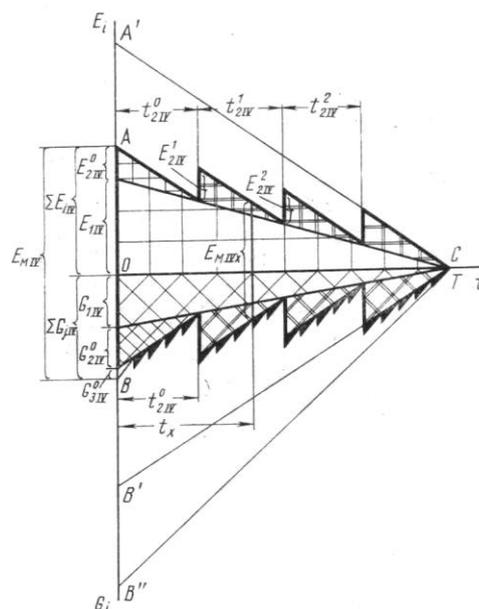


Рис. 4.5. Структурные составляющие годности машины IV категории и их изменения за срок службы машины 62

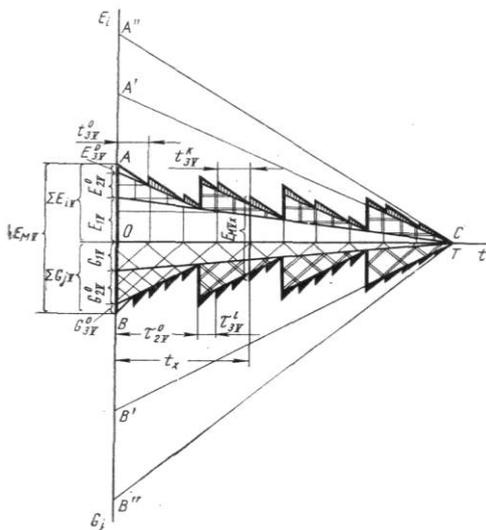
годности конструктивных элементов машины с учетом периодической замены недолговечных, и нижней зубчатой линией, ограничивающей изменение годности неконструктивных элементов машины с учетом их возобновления при периодическом ремонте и техническом обслуживании.

Построение по оси ординат точек  $A'$  и  $B''$  (рис. 4.5.), выполненное подобно тому, как это делалось по машинам уже рассмотренных категорий, определяет суммированную годность машины IV категории, равную ординате  $B''A'$  и затрачиваемую для обеспечения работоспособности машины в процессе ее потребления за полный срок службы.

Машины V категории, к которым относится большинство современных машин, отличаются от машин IV категории тем, что в структуре их годности имеется дополнительная составляющая  $E_{3V}^0$ , относящаяся к конструктивным элементам, смену которых предусмотрено проводить при техническом обслуживании. В связи с этим произошло некоторое уменьшение других структурных составляющих годности машины. В данном случае принято, что периодичность смены этих недолговечных конструктивных элементов  $t_{3V}^K$  равна двойному сроку проведения технического обслуживания, т.е.  $t_{3V}^K = 2\tau_{3V}^l$ , но не является кратной периодичности ремонтов ( $\tau_{2V}^l : t_{3V}^K$  – не целое число).

Исходная годность машины V категории равна:

$$E_{mV} = \sum E_{iV} + \sum G_{jV} = E_{1V} + E_{2V}^0 + E_{3V}^0 + G_{1V} + G_{2V}^0 + G_{3V}^0, \quad (4.12)$$



где  $E_{3V}^0$  – годность машины, относящаяся к части исходных конструктивных элементов, которые при нормальном использовании машины необходимо периодически через сроки  $t_{3V}^K$  заменять при некоторых видах технического обслуживания  $n_{3V} - 1$  раз за срок службы машины.

Рис. 4.6. Структурные составляющие годности машины V категории и их изменения за срок службы машины

При построении графика (рис. 4.6.) в структуре исходной годности машины V категории должно быть отражено изменение удельных весов частей годности машины и показана новая исходная составляющая этой структуры  $E_{3V}^0$ , а также весь ряд соответствующих годностей часто сменяемых элементов  $E_{3V}^1, E_{3V}^2, \dots, E_{3V}^K, \dots, E_{3V}^{n_i-1}$ .

Как видно из графика, общая величина исходной годности  $E_{mV}$  машины V категории меньше исходной годности  $E_{mIV}$  машины IV категории.

К изменениям годности, свойственным машинам IV категории, в этом случае добавляются изменения, вызванные потерей годности часто сменяемых конструктивных элементов и последовательным возобновлением соответствующей части годности машины путем введения в нее новых конструктивных элементов вместо недолговечных изношенных.

В любой период использования машины V категории ее остаточная годность легко определяется как ордината между верхней зубчатой линией, ограничивающей изменение годности конструктивных элементов с учетом периодической замены недолговечных конструктивных элементов, и нижней зубчатой линией, ограничивающей изменение годности неконструктивных элементов машин с учетом их возобновления при периодическом ремонте и техническом обслуживании машины.

Ордината В"А" (рис. 4.6.) определяет суммированную годность, которая затрачивается для обеспечения работоспособности машины V категории в процессе ее потребления за полный срок службы.

Изменения структуры годности рассматриваемой V категории машин в общем случае можно распространить на все современные машины независимо от видов ремонтов машин и периодических технических обслуживании, так как от изменения количества видов технического обслуживания или ремонта машины изменится только значение соответствующих составляющих годности конструктивных или неконструктивных элементов машины и периодичность их замены или

возобновления.

Машины VI категории могут считаться наиболее совершенными машинами или машинами будущего. Отличительной особенностью конструктивных элементов этих машин является то, что они неремонтопригодны, т.е. так хорошо рассчитаны, имеют настолько удачные формы, размеры и сочетание применяемых материалов, способов их обработки и т.п., что предельное техническое состояние элемента или предельный износ какой-либо одной поверхности (или части поверхности) наступает лишь тогда, когда достигается предельное техническое состояние или предельный износ всех других поверхностей, выход из строя и полная непригодность к дальнейшему использованию всего конструктивного элемента. Кроме того, предполагается, что в этих машинах полностью решен вопрос о кратности сроков службы деталей в узлах и агрегатах, исходя из весовых и других требований к конструкции машины.

Технологические процессы смены любого недолговечного конструктивного элемента узла или группы элементов хорошо продуманы, доведены до совершенства и могут проводиться при самых минимальных затратах на подготовительные, разборочные и другие балластные работы.

Для машин VI категории полностью исключается ремонт, как форма частичного возмещения утраты их годности; замена элементов для них – единственная форма частичного возмещения износа.

Исходная годность машины VI категории равна:

$$E_{mVI} = \sum E_{iVI} + \sum G_{jVI} = E_{1VI} + E_{2VI}^0 + E_{3VI}^0 + G_{1VI} + G_{3VI}^0. \quad (4.13)$$

В отличие от годности машины II, III, IV и V категорий здесь нет годности  $G_{2VI}^0$ , относящейся к недостаточно долго действующей обработке и монтажу конструктивных элементов, обычно требующей возобновления при соответствующем ремонте машины.

Построение графика структуры годности машины VI категории (рис. 4.7.) ясно из предыдущего.

Приведенные на рис.4.2. – 4.7. графики всех рассмотренных выше категорий машин иллюстрируют изменение общего состояния машины, обусловливаемое воздействием на машину всех испытываемых ею нагрузок (работа, транспортирование, хранение) и всех мероприятий системы технического обслуживания, ремонта и смены недолговечных конструктивных элементов, т.е. весь процесс физического старения машин.

Рассмотрение графиков изменения структуры составляющих годности машин различных категорий позволяет вести дальнейший анализ в двух направлениях: 1) оценка конструктивного и технологического совершенства машин по новым параметрам, важным для потребителей; 2) установление общих закономерностей изменения годности машины, т.е. закономерностей старения машин в период их потребления.

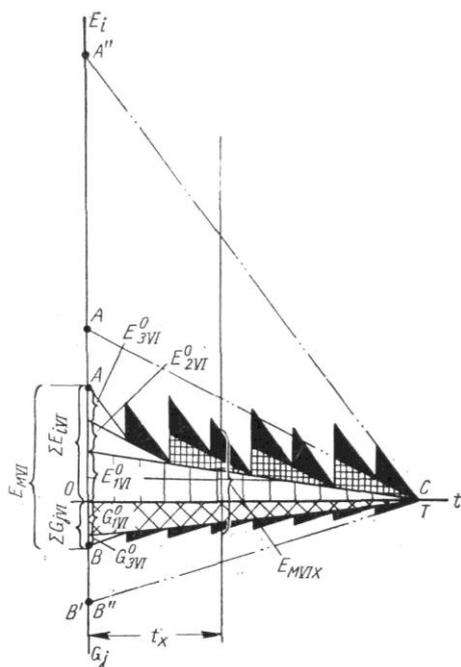


Рис. 4.7. Структурные составляющие годности машины VI категории и их изменения за срок службы машины

Анализ структуры годности машин дает возможность судить о том, насколько удачно сконструирована машина, какова точность её расчета, насколько совершенна технология выполнения конструктивных и неконструктивных элементов, в достаточной ли степени учтены условия её использования, какова сложность требуемых ТО и ремонтов, какова её действительная надежность и долговечность.

Одним из первых условий совершенствования современных машин и создания машин будущего – будет создание равнопрочных узлов при одновременном резком повышении стабильности регулировок машин (за счет упрощения установки узлов и кратности сроков их службы в машине), снижение металлоемкости.

В машинах будущего найдут широкое применение

самосмазывающиеся подшипниковые узлы и другие трущиеся элементы, саморегулирующиеся передачи, самозатачивающиеся режущие органы, самоочищающиеся фильтрующие элементы, самоподжимаемые, самогерметизирующиеся уплотнения, самоцентрирующиеся при установке сменяемые элементы (агрегаты и узлы), самозакрывающиеся люки, самоустанавливающиеся опоры для установки машин при хранении и постоянной самообеспечивающейся работоспособностью в условиях нормальной эксплуатации.

## **Глава 5. Защита аппаратуры от коррозии и преждевременного износа**

### **5.1. Методы защиты**

Скорость процесса коррозии и механического износа можно уменьшить

- 1) подбирая соответствующие коррозионно-стойкие сплавы, в соответствие с диаграммами коррозии;
- 2) подбирая состав среды (ингибиторы коррозии, меланжи);
- 3) используя устройства для поляризации сооружений, т.е. электрохимическую защиту;
- 4) изолируя металл от агрессивной среды слоем более стойкого материала;
- 5) используя высококачественные сорта смазки и износостойчивые покрытия в узлах трения.

#### **5.1.1. Электрохимическая защита**

Защита сооружений может быть осуществлена путем применения:

- 1) Внешних источников постоянного тока (установок катодной и анодной защиты с выпрямителями, генераторами постоянного тока, гальваническими элементами и т.п.);
- 2) Внутренних источников постоянного тока – протекторов.

Во всех случаях электрохимической защиты защищаемая конструкция подвергается либо катодной, либо анодной поляризации. При катодной защите от внешнего источника постоянный ток подается от положительного полюса по проводу в специальное анодное заземление анодного устройства, через которое он поступает в среду, воздействующую на металл. Переходя из среды на защищаемый металл, ток поляризует его, затем ток из защищаемой конструкции через точку дренажа и соединительный провод поступает к отрицательному полюсу источника тока. Рис. 5.1. Мах защитный потенциал для стальной изолированных поверхностей лежит в пределах 1,2 – 1,5 В.

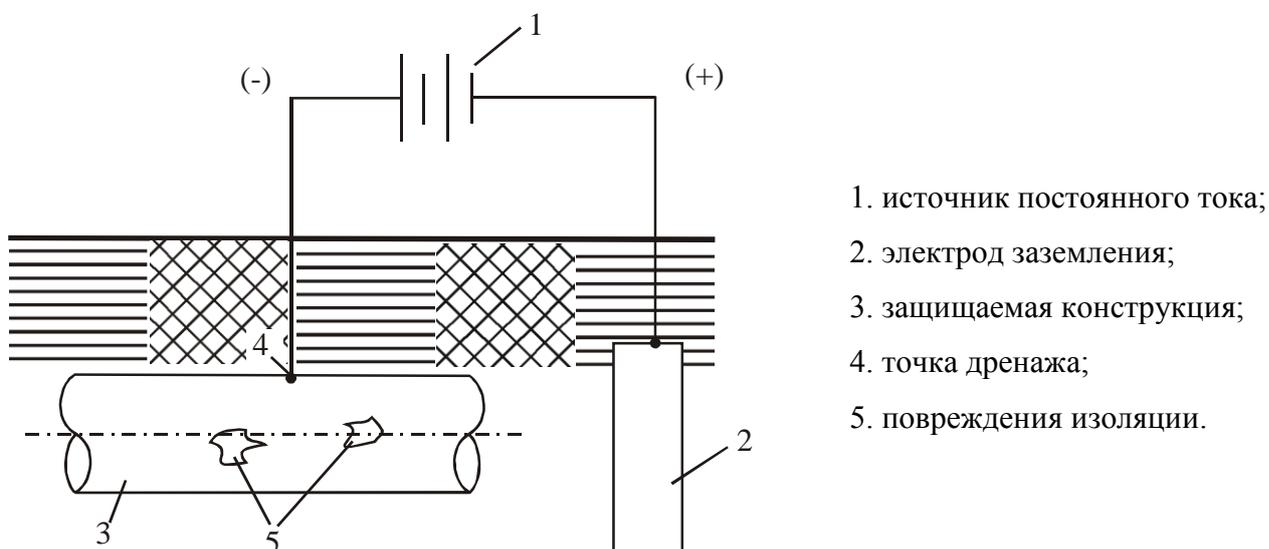


Рис. 5.1. Схема катодной защиты.

Анодную электрохимическую защиту применяют для защиты аппаратуры из нержавеющей сталей и других конструкционных материалов (сталь, свинец). Схема защиты аналогична катодной, но с обратной полярностью. Рис. 5.2.

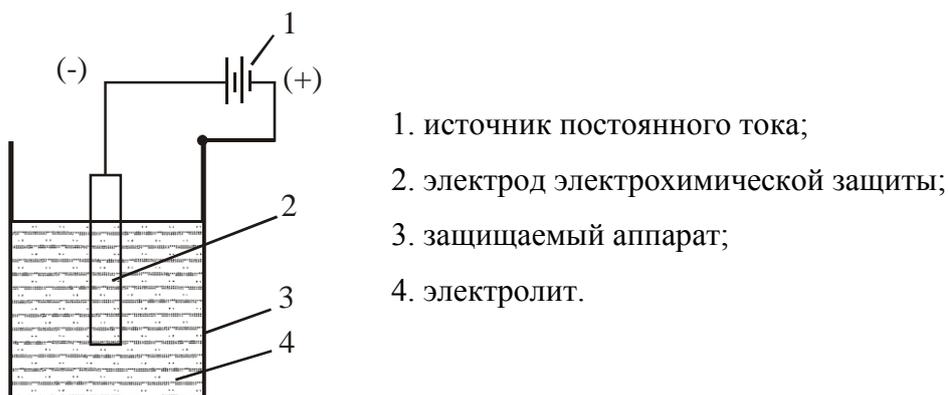
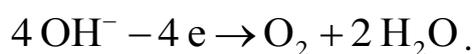


Рис. 5.2.

Процесс электрохимической коррозии металла, сопровождающейся его пассивацией, хорошо иллюстрируются с помощью поляризационной кривой.

Рис. 5.3.

Поляризационная диаграмма раскрывает переход металла из одного состояния в другое в процессе коррозии. Область от  $\varphi_{\text{равн}}$  до  $\varphi_{\text{п}}$  отражает активное состояние металла, корродирующего со скоростью, соответствующей силе анодного тока до значения  $i_{\text{п}}$  (в стационарных условиях)  $i_{\text{а}} = i_{\text{к}}$ . Область от  $\varphi_{\text{п}}$  до  $\varphi_{\text{пп}}$  соответствует процессу пассивации, переходу металла в пассивное состояние, т.е. неустойчивой пассивности, когда сила анодного тока уменьшается, процесс коррозии замедляется, но еще не прекращается. Область от  $\varphi_{\text{пп}}$  до  $\varphi_{\text{акт}}$  – область устойчивого пассивного состояния, при этом сила коррозионного тока постоянна и минимальна равна  $i_{\text{пп}}$ , хотя сдвиг потенциала в положительную сторону продолжается от  $\varphi_{\text{пп}}$  до  $\varphi_{\text{акт}}$ .  $\varphi_{\text{акт}}$  – потенциал, соответствующий переходу металла вновь в активное состояние. Участок кривой от  $\varphi_{\text{акт}}$  до  $\varphi_{\text{O}_2}$  – соответствует области перепассивации и возрастанию скорости коррозионного процесса. Эта новая активность металла вызывается электролитическим выделением кислорода, возникающим при достаточно высоких значениях потенциала и увеличивающейся плотности тока по реакции:



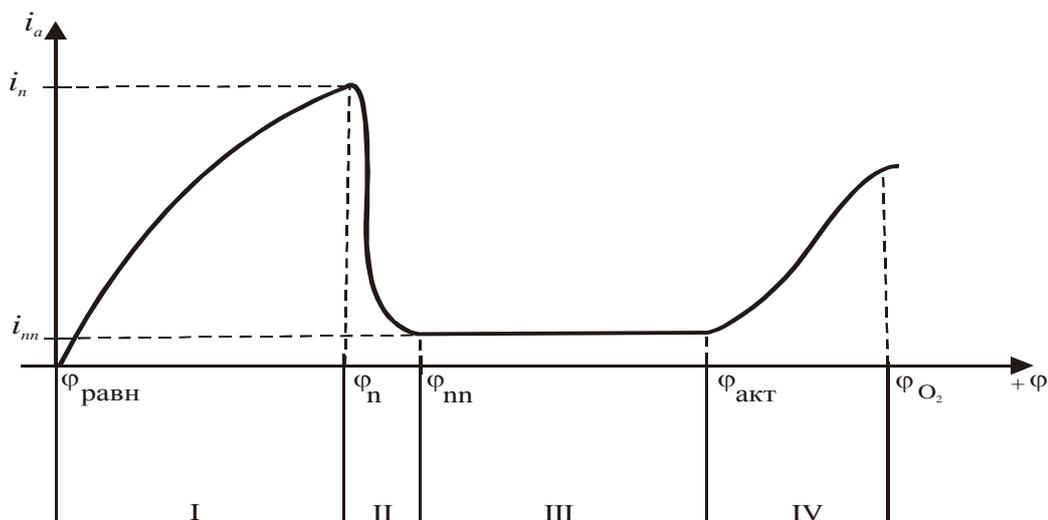


Рис 5.3. Поляризационная кривая.

Во всех случаях эффективность действия электролитического метода защиты можно охарактеризовать степенью защиты  $P$ :

$$P = \frac{W_{корр} - W_{защ}}{W_{корр}} 100\% = \frac{I_{корр} - I_{защ}}{I_{корр}} 100\%$$

где  $W_{корр}$  – потеря массы металла за определенный интервал времени с единицы поверхности самопроизвольной коррозии;

$W_{защ}$  – потеря металла за определенный интервал времени ( $\tau$ ) с единицы поверхности при применении электролитического метода;

$I_{корр}$  – токовое выражение скорости коррозии без защиты;

$I_{защ}$  – ток коррозии при наличии защиты.

Наиболее простой случай катодной защиты – протекторная защита, можно представить в виде трехэлектродной системы рис. 5.4.

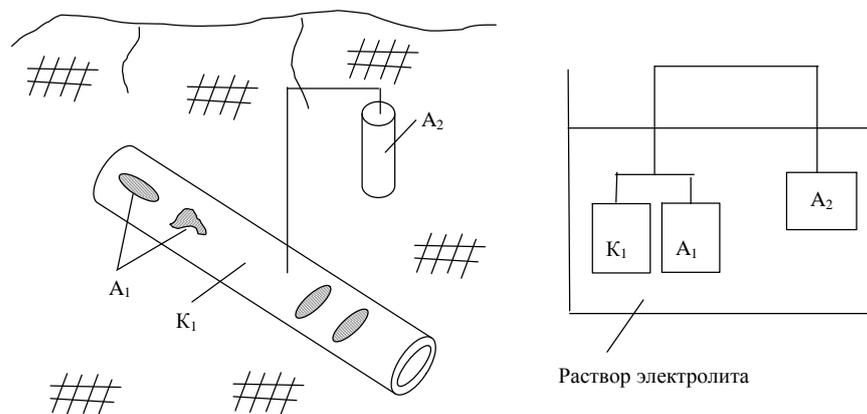


Рис 5.4. Схема протекторной электрохимической защиты.

Два электрода данной системы представляют собой коррозионный гальванический элемент состоящий из катода  $K_1$  и анода  $A_1$ , к которым присоединен третий электрод  $A_2$  – протектор, обладающий более электроотрицательным потенциалом анодной реакции  $\varphi_A^0$  или, как часто говорят, по сравнению с начальным потенциалом анода коррозионного элемента (Zn, Mg).

Сила анодного тока, проходящего через протектор характеризуется величиной  $I_n$ , сумма анодных токов в системе  $I_A + I_n$ , равна току проходящему через катод.

Отсюда, ток, проходящий через  $A_1$  равен разности абсолютных величин токов

$$I_A = I_k - I_n.$$

Чем более отрицательным становится потенциал конструкции, тем меньше собственный ток коррозии. При достижении потенциала  $\varphi_A^0$ , равного равновесному потенциалу анода, коррозионного элемента, ток в цепи анода становится равным нулю, а ток, проходящий через катод равный внешнему току поляризации. Это состояние отвечает полной защите: потенциал  $\varphi_A^0$  является защитным и соответствующая ему плотность тока – так же защитной.

Если в качестве допустимой скорости коррозии принять величину потери массы  $K = 0,001$  г/м<sup>2</sup>час, что соответствует совершенно стойкому состоянию по десятибалльной шкале, то необходимую степень защиты можно найти из следующей формулы:

$$P = \frac{K - 0,001}{K} 100\% ,$$

где  $K$  – скорость коррозии, г/м<sup>2</sup>час (без защиты).

Соответствующую данному состоянию защитную плотность тока можно рассчитать по формуле:

$$I_{защ} = I_{корр} \frac{1000 - (100 - P)\sqrt{100 - P}}{100\sqrt{100 - P}} ,$$

где  $I_{корр} = 0,96K$  – токовое выражение скорости коррозионного процесса.

Если  $K$  определяется в  $г/м^2\text{час}$ , то  $I_{защ}$  и  $I_{кор}$  выражается в  $А/м^2$ .

Заданной плотности тока будет соответствовать определенное смещение потенциала:

$$\Delta\varphi = \frac{2,3RT}{F} \lg \frac{100}{100 - P}.$$

Разновидность катодной защиты – электродренажная защита, применяется в тех случаях, когда в сооружении (трубопроводе, ж/б коллекторе и др.) обнаруживаются блуждающие токи (часто от рельсового пути электрифицированного транспорта, грозовые разряды). Токи попадают в сооружения и вызывают в месте входа катодную поляризацию, а на выходе из сооружения – сильные местные разрушения. Эти токи кабелями отводят к источнику или специальному заземлению, предотвращая анодное разрушение сооружений.

### 5.1.2 Защитные покрытия.

Нанесение изолирующего покрытия на поверхность металла позволяет в значительной степени снизить скорость его коррозии. Этот метод защиты наиболее универсальный, применяется с давних времен. Основные требования к материалу защитного покрытия следующие:

- 1) Высокая химическая стойкость;
- 2) Низкий коэффициент проницаемости для жидких и газообразных коррозионных сред;
- 3) Высокая адгезия к металлу ;
- 4) Механическая прочность и высокая стойкость к деятельности микроорганизмов;
- 5) Высокая структурная стабильность во времени.

Защитное покрытие в общем виде можно разделить на два класса: неметаллические и металлические. Неметаллические покрытия, в свою очередь, делятся на 2 группы: органические и неорганические.

### 5.1.2.1. Органические защитные покрытия

В борьбе с коррозией при низкой температуре широкое применение находят органические покрытия: лакокрасочные, битумные, каменноугольнопековые, пластикатные, эпоксидные, каучуковые и др.

Наиболее широкое применение в технологии ядерного горючего нашли следующие органические покрытия:

5.1.2.1.1. Резиновые покрытия – гуммирование, т.е. приклеивание к защищаемой металлической поверхности сырой резины с последующей ее вулканизацией при  $t = 143\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении 2 – 3 атм.

Резина, эбонит и клей горячего крепления, применяемые для защиты аппаратуры, химически устойчивы до  $t = 60 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с повышением температуры разлагаются.

Для защиты аппаратуры больших габаритов применяют покрытие резиной при нормальной температуре и атмосферном давлении – маслобензиностойкой резиной марки 4190, а для растворов, содержащих серную кислоту и щелочи, резиной марки 4190Н. Покрывать рекомендуется в два слоя, а в жестких условиях работы – число слоев не менее трех.

5.1.2.1.2. Фаолит – кислотостойкая пластмасса, выдерживает  $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Устойчива к серной, соляной, фосфорной, уксусной кислоте. Не стоек в азотной кислоте. Требуется термообработка в течение 20 часов.

5.1.2.1.3. Винипласт – получается при термической пластификации полихлорвинила: запорная арматура и футеровка из винипласта широко используется в кислотном производстве до  $t=45\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до  $P=6\text{ кг/см}^2$ .

5.1.2.1.4. Фторопласт – фторированные углеводороды марки Ф4, Ф6 широко используются в HF и F<sub>2</sub> атмосфере.

5.1.2.1.5. Лакокрасочные покрытия – защищают от коррозии и улучшают внешний вид. Лакокрасочные покрытия должны иметь следующие свойства:

1. Непроницаемость пленок;
2. Атмосфероустойчивость;
3. Хорошую адгезию к металлу;

4. Гибкость;
5. Пластичность;
6. Твердость;
7. Механическую прочность на удар;
8. Блеск;
9. Высокую стойкость к истиранию, к пониженным и повышенным температурам, к воздействию окружающей среды.

Покрyтия необходимо наносить в несколько слоев, чтобы сделать его влаго- газонепроницаемым (5 – 7 слоев).

#### 5.1.2.2. Неорганические защитные покрытия

##### 5.1.2.2.1. Кислотоустойчивая керамика

В анитикоррозионной технике широко используют изделия из кислотоустойчивой керамики. Изделия из керамики получают формовкой и обжигом глины, в которую добавляют песок – наполнитель, полевой шпат для снижения температуры спекания. После обжига изделия из керамики получаютcя плотными, прочными, газонепроницаемыми и стойкими к действию минеральных и органических кислот при высоких температурах. Однако они не стойкие к действию едких щелочей, плавиковой кислоты, а при высокой температуре и к фосфорной кислоте.

Выпускают следующие виды керамических кислотоупонных изделий:

1. Кирпич кислотоупорный 3-х сортов, различных форм;
2. Плитка керамическая кислотоупорная, размеры 50/50/10, 100/100/10(20), 200/200/20 мм;
3. Плитка керамическая для полов 50/50/10, 100/100/10 150/150/13мм;
4. Кирпич клинкерный, шамотный 230/113/65мм.

Примерный химический состав кислотоупорных керамических материалов:

SiO<sub>2</sub>-50 – 75 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20 – 40%; CaO- 0,1 – 0,8 %; MgO-0,3 – 1,4 %;  
K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O-0,5 – 3,0 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,3 – 1,6 %.

Пористость и влагопоглощение керамики должны быть минимальными. Влагопоглощение не более 8 %

Часто для предупреждения возможного проникновения агрессивной среды к металлу, керамику кладут на непроницаемый (гумированный) подслои.

Футеровку керамическими изделиями выполняют кислотостойкими (арзамит-1, арзамит-4), термостойкими до 250 °С (арзамит-6), кислото-щелочестойкими (арзамит-5 и арзамит-7) замазками.

Замазки поставляются заводами в виде двух компонентов арзамит – мука (в мешках) и арзамит – раствор (в бочках).

#### Состав замазок арзамит.

Компоненты	Состав, % Арзамит №				Компоненты	Состав, % Арзамит №			
	Арз.-1	Арз.-4	Арз.-5	Арз.-7		Арз.-1	Арз.-4	Арз.-5	Арз.-7
Арзамит – раствор					Арзамит – мука				
Фенолоформальдегидная смола	90	90	75	65	Графитовый порошок	–	90	90	70
Фенолофорфулоформальдегидная смола	–	–	–	10	Кварцевая мука	70	–	–	–
Бензиловый спирт	–	–	–	–	Кремнезем	20	–	–	–
Дихлоргидринглицерин	10	10	5	5	Паратолуолсульфохлорид	10	10	10	10
	–	–	20	20	Бисульфат натрия	–	–	–	20

Для приготовления замазки муку смешивают с раствором до необходимой вязкости. Соотношение раствора и муки (0,28 ÷ 0,6) кг: 1 кг муки. Время схватывания замазки невелико от 15 ÷ 20 мин до 6 часов и зависит от температуры. Внутренняя поверхность футеровки лакируется замазкой соответствующей марки. Вместо керамики на урановых заводах используют плитку АТМ (битум с графитным наполнителем), в качестве замазки – арзамит.

## Футеровка пачука для кислотного выщелачивания.

Структура слоя футеровки представлена на рис. 5.5

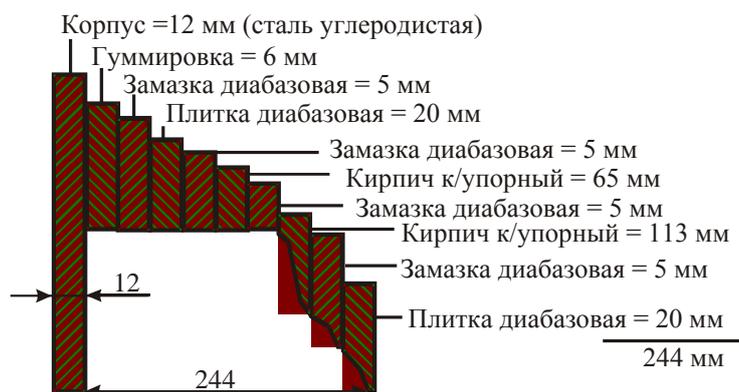


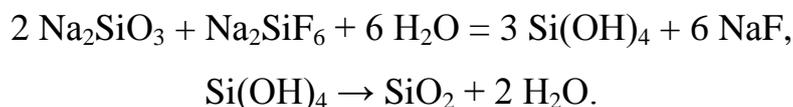
Рис 5.5. Структура футеровки пачука.

Срок службы до 20 лет.

Кислотоупорные силикатные замазки в зависимости от рода наполнителя называют андезитовой, кварцевой и диабазовой.

Приготавливаются на основе жидкого стекла (основной материал) натриевого  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  или калиевого  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ , кремнефтористого натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ .

– ускоритель твердения по реакции:



### 5.1.2.2.2. Пассивация.

Пассивация – процесс образования на поверхности конструкционных материалов защитной пленки продуктов коррозии, (сублиматного «С» и диффузионного «Д» производств). Для того, чтобы пленка продуктов коррозии была защитной необходимо основное условие: объем образующихся продуктов коррозии  $V_{\text{п.к}}$  должен быть больше объема прореагировавшего металла  $V_{\text{м}}$ , т.е.  $V_{\text{п.к}} > V_{\text{м}}$ .

Объем одного граммаатома металла:  $V_{\text{м}} = \frac{A_{\text{м}}}{\gamma_{\text{м}}}$ ,

где  $A_{\text{м}}$  – ат. вес;  $\gamma_{\text{м}}$  – плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$

Объем продуктов коррозии:

$$V_{\text{п.к}} = \frac{M_{\text{п.к}}}{\Pi \cdot \gamma_{\text{п.к}}},$$

где  $M_{п.к}$  – молекулярный вес продуктов коррозии;  $\gamma_{п.к}$  – плотность продуктов коррозии;  $n$  – число атомов металла в молекуле продуктов коррозии.

условие пассивации (критерий) Пиллинга – Бедварса

$2,5 > \eta > 1$
------------------

$$\eta = \frac{V_{п.к}}{V_M} = \frac{M_{п.к} \cdot \gamma_M}{A_M \cdot \pi \cdot \gamma_{п.к}} > 1.$$

Для  $Mg + 1/2 O_2 = MgO$ .  $\eta_{Mg} = \frac{40,3 \cdot 1,74}{1 \cdot 24,3 \cdot 3,6} = 0,34 < 1.$

Для  $Zn + 1/2 O_2 = ZnO$ .  $\eta_{Zn} = \frac{M_{ZnO} \cdot \gamma_{Zn}}{n \cdot \gamma_{ZnO} \cdot A_{Zn}} = \frac{81,4 \cdot 7,13}{1 \cdot 5,7 \cdot 65,4} = 1,56 > 1$

Для  $Ni + F_2 = NiF_2$ .  $\eta_{NiF_2} = \frac{845,5}{277,3} = 3,5 > 1.$

$A_{Mg} = 24,3$ ;  $A_{O_2} = 16,0$ ;  $\gamma_{Mg} = 1,74$ ;  $\gamma_{MgO} = 3,6$ .

$A_{Zn} = 65,4$ ;  $\gamma_{Zn} = 7,13$ ;  $\gamma_{ZnO} = 5,7$ .  $\gamma_{Ni} = 8,91$ ;  $\gamma_{NiF_2} = 4,72$

Итак, в первом случае мы не можем ожидать пассивации, а во втором и третьем возможна пассивация оборудования производств. (Сублиматный завод и завод по разделению изотопов урана)

### 5.1.2.3. Защитные металлические покрытия

5.1.2.3.1. Горячие покрытия. Процесс заключается в том, что покрываемый металл с высокой  $t_{пл}$  (сталь) на короткое время (несколько секунд) погружают в ванну с расплавленным металлом (Zn, Sn).

Для Zn толщина слоя  $\delta \sim 0,25$  мм, для Sn –  $\delta = 0,03$  мм.

(Применяется в основном для мелких изделий и изделий умеренных размеров (корпус ЗИМ (а)).

5.1.2.3.2. Металлизация – нанесение металлических покрытий на поверхность изделий из любого материала, любой формы путем распыления расплавленного металла струей сжатого воздуха, рис.5.6

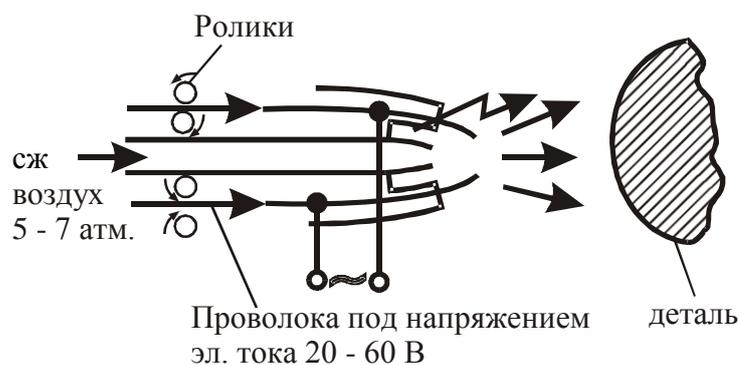


Рис 5.6. Схема установки для металлизации.

Ценность метода в том, что позволяет покрыть любую поверхность из любого материала необходимым металлом, сплавом не нагревая до высоких температур основной металл изделия, т.е. не изменяя его физико-механических свойств.

#### 5.1.2.3.3. Диффузионное покрытие

Изделие погружается в порошок металла или атмосферу паров летучих соединений металлов. Проводится при высокой температуре 900 - 1000°C в восстановительной или нейтральной атмосфере.

Коррозионно-защитные пленки дают следующие диффузионные процессы:

- 1) Алитирование (Al покрытие) 45 % FeAl + 53 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2 % NaCl.  $\tau = 4 \div 20$  часов.  $\delta = 0,2 - 0,3$  мм – повышает жаростойкость стали.
- 2) Силицирование (покрытие Si), порошок Si, FeSi + NH<sub>4</sub>Cl;  $\tau = 10 \div 24$  часов.  $\delta = 0,8 - 1,0$  мм. Значительно повышается коррозионная стойкость и износостойчивость. (силицированные графитовые тигли, графитовые электроды)
- 3) Термохромирование (покрытие Cr), порошок хрома, каолин+ NH<sub>4</sub>Cl;  $\tau = 20 \div 25$  часов.  $\delta = 0,02 - 0,1$  мм.
- 4) Цинкование (покрытие Zn), пыль Zn,  $\tau = 6$  часов при  $t = 350 - 600^\circ\text{C}$ ,  $\delta = 0,05 - 0,2$  мм (для крепежа).

#### 5.1.2.3.4. Плакирование

- покрытие одного металла другим

В качестве основного материала применяют конструкционные углеродистые стали, а в качестве защитного слоя – высоколегированные

стали ОХ13, Х18Н10Т, Х18Н12М2Т и др. Марки двухслойных сталей записываются ст. 3+ОХ13; ст. 3+Х18Н10Т и др.

Двухслойные стали применяют в коррозионных средах и при высоких температурах. Температурный предел ограничивается разницей коэффициентов линейного расширения.

Аппаратуру из двухслойных сталей 2ОК+ОХ13 и 12ХН+ОХ13 можно применять на неограниченное давление в условиях нагрева стенки от - 40°С до +475°С.

Толщину  $S_1$  защитного слоя выбирают в зависимости от толщины  $S$  листа основного металла: обычно принимают  $S_1=0.1S$ , но не менее 2 мм.

Плакирующий слой качественно сваривается электродуговой сваркой с основным металлом.

В настоящее время широко используют двухслойный материал для изготовления пачуков в гидрометаллургическом производстве.

#### 5.1.2.3.5. Гальванические покрытия

Широкое распространение в промышленности имеют электролитические покрытия Zn, Cd, Sn, Pb, Ag, Cu, Au, Ni, Cr, а также сплавами – латунью, бронзой и др.

В диффузионном производстве повсеместно используется электролитическое покрытие внутренних полостей Ni по Cu (компрессоры, теплообменная, запорная и регулирующая аппаратура)

Металлические покрытия непроницаемы для коррозионных агентов (водных растворов, газов), однако в них могут быть дефекты в виде пор, трещин, царапин и прочих. В месте повреждения покрытия характер коррозионного разрушения основного металла определяется электрохимическими характеристиками обоих металлов.

Различают катодные и анодные металлические покрытия. По отношению к стали Zn-покрытие является анодным, а медное – катодным.

Zn отдает два электрона и заряжается положительно по отношению к Fe

РН:(-) К, Са; Mg; Al; Mn; Zn; Cr; Fe; Cd; Co; Sn; Pb; H<sub>2</sub>; Cu; Ag (+)

В системе Cu-Fe – электроны отдает железо и заряжается положительно по отношению к Cu.

При наличии нарушения в Zn-покрытии оно само подвергается коррозионному разрушению, оказывая на сталь протекторное действие, рис.5.6.

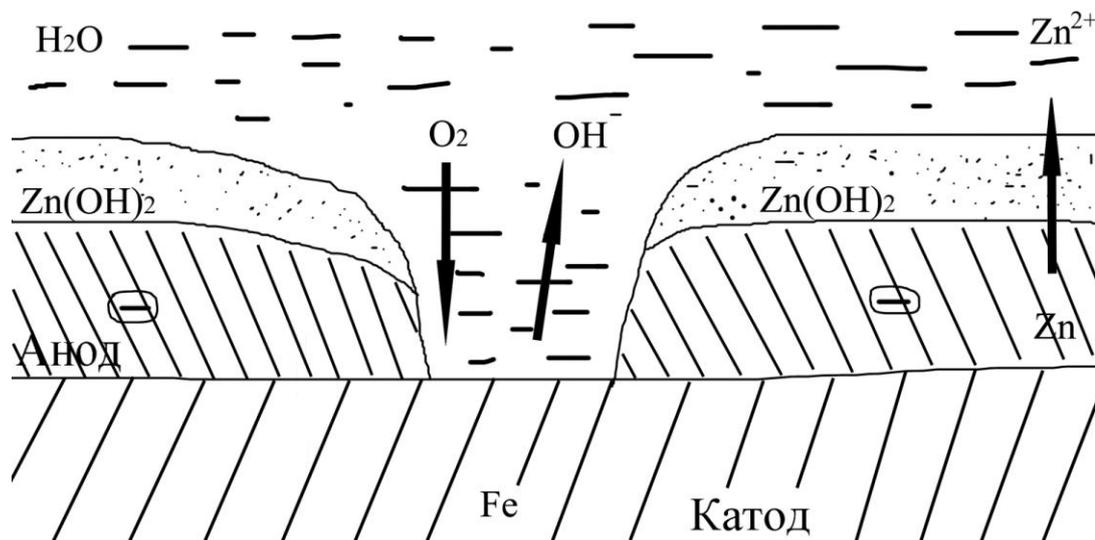
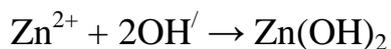
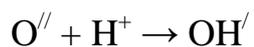
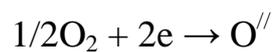
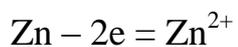


Рис.5.6.

$$E = \varphi_{\text{к}} - \varphi_{\text{а}};$$

$$E = \varphi_{\text{Fe}} - \varphi_{\text{Zn}} = -0,44 - (-0,76) = +0,32 \text{ В.}$$



При нарушении медного слоя на поверхности стали скорость коррозии последней возрастает за счет действия образующегося гальванического элемента, в котором сталь является анодом, рис.5.7

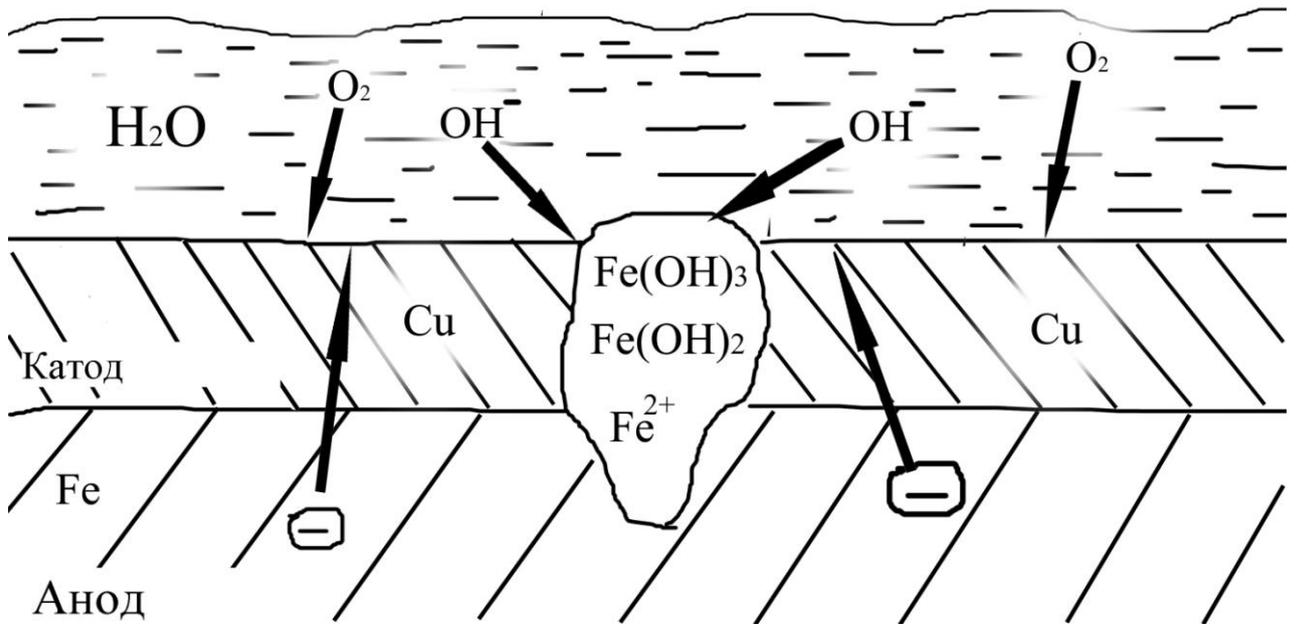
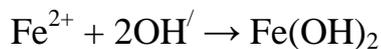
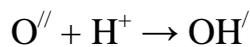
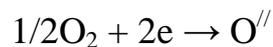
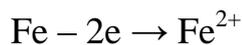


Рис.5.7. Схема электрохимического разрушения металлоконструкции при анодном защитном покрытии.

$$E = \varphi_{\text{Cu}} - \varphi_{\text{Fe}} = +0,345 - (-0,44) = +0,78 \text{ В.}$$



Износоустойчивость материалов в сопряженных узлах повышают путем применения синтетических смазочных материалов и упрочнение поверхностных слоев конструкционных материалов следующими способами:

- 1) Газотермическое напыление;
- 2) Газодинамическое напыление;
- 3) Дуговую металлизацию;
- 4) Электроискровое легирование;
- 5) Микроискровое оксидирование;
- 6) Лазерную обработку;
- 7) Ионно-лучевую обработку;
- 8) Ионно-плазменное покрытие;
- 9) Литье инструмента с твердосплавными вставками;

- 10) Литье изделий из износостойких сплавов (бронеплиты мельниц, траки гусениц);
- 11) Сварка взрывом для получения биметаллических подшипников;
- 12) Наплавка твердосплавными сплавами (наплавка на бронеплиты шаровых мельниц).

В 80-е годы в машиностроении упрочнение поверхностей узлов трения производилось:

- в Японии 80%;
- в ФРГ и США 50-60%;
- в СССР 5%.

## Глава 6. Технология ремонта машин и аппаратов.

Подготовка оборудования к ремонту.

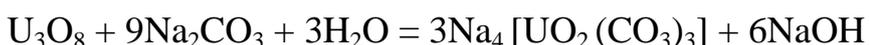
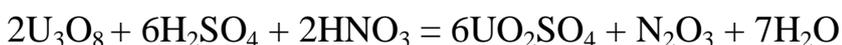
Перед сдачей оборудования в ремонт ремонтной группе технологи должны провести следующие операции:

- 1) Отключить оборудование от работающих технологических линий;
- 2) Очистить оборудование от технологических продуктов и различного рода загрязнений;
- 3) Провести дезактивацию.

### 6.1 Источники активации оборудования

#### 6.1.1 Гидрометаллургия

Реакции выщелачивания:



Источником радиоактивных загрязнений является перерабатываемая урановая руда, в состав которой входят восемь  $\alpha$  – излучателей (UI; UII; Yo; Ra; Rn; RaA; RaC) и шесть  $\beta$  – излучателей (UX<sub>1</sub>; UX<sub>2</sub>; RaB; RaC; RaD; RaE).

При содержании в руде 1% урана, находящегося в равновесии со своими дочерними продуктами распада, в 1 мг. руды ежеминутно происходит

60  $\alpha$  – и 30  $\beta$  – распадов. На одну тонну переработанного урана на гидрометаллургическом заводе поступают радиоактивные элементы его семейства с общей активностью около 3,3  $\text{Cu}/\text{т}$  ( $1\text{Cu} - 3,7 \cdot 10^{10}$  p/c).

Загрязнение поверхности оборудования происходит путем адсорбции из воздуха или жидких фаз дочерних продуктов распада радона и может достигать 70  $\alpha$  – частиц/ $\text{см}^2$  в мин при концентрации радона  $1,7 \cdot 10^{-8}$   $\text{Cu}/\text{л}$ .

Основные отходы гидрометаллургических заводов – рудные пульпы, состоящие из песковой и шламовой фракций.

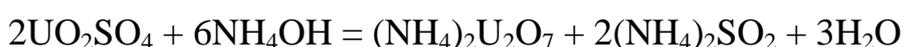
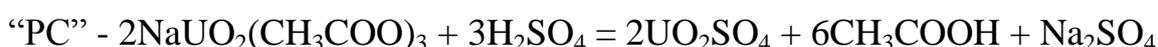
Содержание Ra в песках составляет  $(2 \div 3) \cdot 10^{-10}$   $\text{Cu}/\text{г}$ , а в шламах  $(10 \div 13) \cdot 10^{-10}$   $\text{Cu}/\text{г}$ ; содержание полония  $(3 \div 4) \cdot 10^{-10}$  и  $(15 \div 18) \cdot 10^{-10}$   $\text{Cu}/\text{г}$ , соответственно.

При переработке 500 т. руды в сутки при содержании  $U = 0,2\%$ , общая активность пульпы, сбрасываемой в хвостохранилище, составляет около 3  $\text{Cu}$ , из которых на Ra и Po в растворенном виде приходится  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$   $\text{Cu}$ . Такая активность может служить серьезным источником радиоактивного загрязнения оборудования.

### 6.1.2 Сублиматное производство

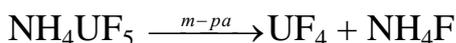
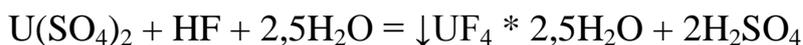
На сублиматное производство может поступить сырье двух типов: натуральное “НС” и радиохимическое “РС”. “НС” поступает с переделов гидрометаллургических заводов чаще всего в виде концентрата  $U_3O_8$ . “РС” – сырье (вторичное) поступает с радиохимических (РХ) заводов по переработке облученного ядерного горючего.

Основная часть радиохимических загрязнений оборудования сублиматного производства представляет собой технологические осадки различных соединений урана и осколочных элементов (О.Э.), т.е. по реакциям:





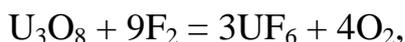
В восстановительных электролизерах:



“PC” после экстракционного разделения U, Pu и ПД.



Фторирование:



При фторировании образуются промежуточные фториды:  $\text{UF}_5$ ,  $\text{U}_2\text{F}_9$ ,  $\text{U}_4\text{F}_{19}$ .

Осколочные элементы вносятся с радиохимическим («PX») сырьем. Характеристика основных радиоизотопов содержащихся в  $\text{NaUO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_3$  – «PX» - сырья представлена в таблице 6.1.

Радионуклидный состав «PX» сырья.

Таблица 6.1.

Наименование изотопа	Вид излучения	$T_{1/2}$	Мах энергия $\beta$ -излучения, Мэв.	Мах энергия $\gamma$ -излучения, Мэв.
1 Zr <sup>95</sup>	$\beta; \gamma$	65 дн.	0,91	0,76
2 Nb <sup>95</sup>	$\beta; \gamma$	35 дн.	0,148	0,768
3 Ru <sup>106</sup>	$\beta$	290 дн.	0,039	-
4 Rh <sup>106</sup>	$\beta; \gamma$	30 сек.	3,51	1,54
5 Ce <sup>144</sup>	$\beta; \gamma$	282 дн.	0,446	0,231
6 Pr <sup>144</sup>	$\beta; \gamma$	17,5 мин.	2,95	0,218
7 Pm <sup>147</sup>	$\beta$	2,26 года	0,223	-
8 Sm <sup>147</sup>	$\alpha$	$0,7 \cdot 10^{11}$ лет.	-	-

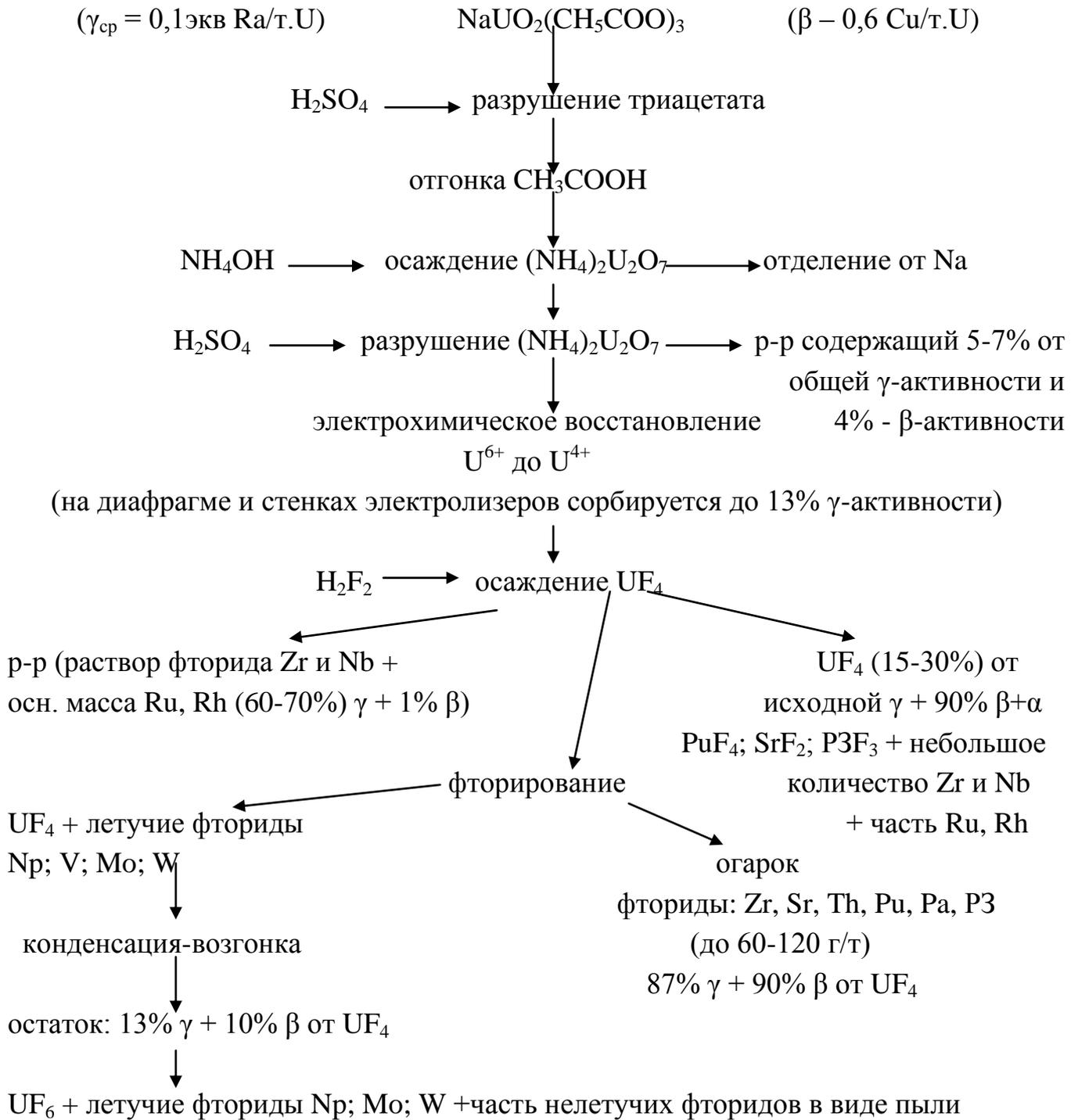
9 Sr <sup>90</sup>	β	19,9 лет.	2,27	-
10 I <sup>90</sup>	β	2,54 дн.	2,27	-
11 Cs <sup>137</sup>	β; γ	33 года	1,18	0,66
12 Pu <sup>239</sup>	α; γ	2,4*10 <sup>4</sup> лет.	-	0,38
13 Th <sup>234</sup>	β; γ	24,1 дн.	0,193	0,09
14 Pa <sup>234</sup>	β; γ	1,2 дн.	2,32	0,817

γ-активность поступающего на переработку сырья колеблется от 0,04 до 1,5 г экв. Ra/т.U (средняя 0,1 г экв. Ra/т.U). Колебания γ-активности зависят от времени хранения сырья, т.к. основным γ-излучателями являются Zr<sup>95</sup> и Nb<sup>95</sup> с малым T<sub>1/2</sub> (65 и 35 дней).

Жесткая β-активность сырья (с энергией >0,5 Мэв) почти всегда одинакова и равна в среднем 0,6 Ci/т.U. Такой уровень активности приводит к интенсивной активации оборудования и к необходимости устанавливать ограниченное время пребывания обслуживающего персонала на отдельных рабочих местах.

При изучении распределения р.а. по технологической схеме при переработки NaUO<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub> в UF<sub>6</sub> по сернокислотной схеме получены следующие результаты.

**Сернокислотная схема переработки триацетата уранила натрия.**

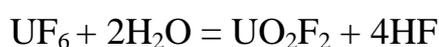


### 6.1.3. Завод разделения изотопов урана. (ЗРИ)

На «ЗРИ»  $UF_6$  поступает в транспортных емкостях с сублиматного производства. В транспортных емкостях помимо  $UF_6$ , содержатся примеси в виде летучих фторидов:  $WF_6$ ,  $MoF_6$ ,  $NpF_6$ ,  $VF_5$ ,  $HF$ ,  $F_2$ , а также нелетучие, в виде пыли фторидов: PЗЭ, Rn+Rh.

После «тренировки» транспортных емкостей – сдувки под вакуумом летучих примесей ( $WF_6$ ,  $MoF_6$ ,  $NpF_6$ ,  $VF_5$ ,  $HF$ ), гексафторид поступает на диффузионные каскады. Вместе с  $UF_6$  в каскады поступает в виде пыли часть фторидов PЗЭ, Rn+Rh и часть летучих, особенно  $WF_6$ ,  $HF$ .

О.Э. – Rn; Rh; PЗ улавливают на специальных фильтрах. Таким образом на диффузионных каскадах находится  $UF_6$  в значительной степени очищенный от осколочной активности. В качестве основной примеси  $UF_6$  остаются  $WF_6$  и следы  $HF$  и  $F_2$ .  $UF_6$  является весьма реакционно-способным веществом, поэтому при определенных условиях, помимо чистого  $UF_6$  в технологическом процессе могут образовываться другие соединения U со фтором:  $UF_4$ ;  $(UF_6+Ni)$ ;  $UF_5$ ;  $U_2F_9$ .



$U_4F_{17}$  и растворы  $UF_6$  с фторированными углеводородами, такими как спецсмазки «УПИ» и «КС».

Кроме того из-за высокой реакционной способности  $UF_6$  и наличия  $F_2$  и  $HF$  в  $UF_6$  с металлами оборудования могут образовываться неактивные соединения, такие как фториды Fe; Sn; Pb; Al; Ni, на поверхности которых будет сорбироваться  $UF_6$ , делая последние радиоактивными.

Урановые соединения, обогащенные изотопами  $U^{235}$ , обладают значительно большей токсичностью, чем при естественном содержании изотопов U, что объясняется повышенной радиоактивностью.

Активность урана, содержащего 20%  $U^{235}$ , примерно в 12 раз, а содержащего 90%  $U^{235}$  в 80 раз выше активности естественной смеси.

Последнее объясняется тем, что по мере обогащения урана изотопом  $U^{235}$  в несколько большей степени в смеси изотопов возрастает доля изотопа

$U^{234}$ , который имеет наименьший период полураспада ( $T_{1/2} = 2,48 \cdot 10^5$  лет) и, соответственно, обладает наибольшей удельной активностью по сравнению с активностью других изотопов, содержащихся в природной смеси.

Периоды полураспада  $U^{238}$  и  $U^{235}$  соответственно равны  $4,5 \cdot 10^9$  и  $7,13 \cdot 10^8$  лет ( $2,48 \cdot 10^5$  лет  $U^{234}$ ).

При 20% обогащении урана изотопами  $U^{235}$  содержание  $U^{234}$  возрастает от 0,006% до 0,13% и на его долю приходится  $\approx 92\%$  от общей  $\alpha$ -активности продукта, а при 90% обогащении до 0,87% и на его долю приходится 96,3% общей  $\alpha$ -активности.

Естественно, в случае попадания на поверхность обогащенного урана, уровни их загрязнения и соответственно уровни загрязнения воздуха значительно выше чем при работе с природным ураном.

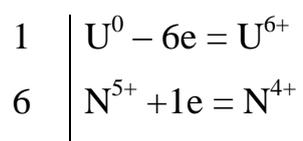
#### 6.1.4. Радиохимическое производство (РХ)

При работе ядерного реактора в течении 300 суток, в каждом килограмме природного урана образуются продукты деления общей активностью около 2000 кюри и 1 г  $Pu^{239}$ . В ядерном горючем, содержащем  $U$ , обогащенный по  $U^{235}$ , образуется относительно больше продуктов деления и меньше  $Pu$ . Извлеченные из реактора отработанные ТВЭЛы обычно выдерживают 1,5 – 2 месяца. За это время общая активность продуктов деления уменьшается в 4 раза.

В выдержанном в течении двух месяцев ядерном горючем основную долю по активности составляют радиоизотопы:  $Cs^{137}$ ,  $Nb^{95}$ ,  $Sr^{90}$ ,  $Ru^{106}$ ,  $Rh^{106}$ ,  $Cs^{137}$  и РЗЭ.

В дальнейшем в зависимости от способа переработки ядерного горючего и вида производственного участка поверхности оборудования могут загрязняться различными химическими формами указанных изотопов. Растворение ТВЭЛов идет по реакции:





Операцию по отделению продуктов деления от U и Pu обычно проводят в герметичной аппаратуре, имеющей надежную защиту. Поэтому на этих производственных участках загрязнение различных поверхностей происходит главным образом при ремонте технологического оборудования. При этом до отделения продуктов деления они обычно определяют активность загрязненных поверхностей. После отделения продуктов деления (ПД) и концентрирования перерабатываемых продуктов, загрязнение оборудования определяется уже в зависимости от вида производственного участка U или Pu и частью ПД.

При использовании экстракционных методов переработки облученного горючего [15, 28] р.а. элементы могут попадать на поверхность вместе с органическими веществами, (ТБФ и керосина, этилгексилфосфорная кислота). Уже в настоящее время общее количество р.а. веществ, образующихся при работе действующих реакторов, настолько велико, что их переработка представляет важнейшую проблему.

Общая мощность атомных электростанций в 1980 г. достигла  $0,5 \cdot 10^4$  МВт, а в 2000 г. –  $2,7 \cdot 10^6$  МВт [31]. Это неизбежно привело к тому, что общая активность продуктов деления в 2003 г. составила около  $10^{11}$  кюри. По мере распада относительно короткоживущих изотопов в смеси ПД возрастает доля наиболее долгоживущих изотопов и в первую очередь  $\text{Cs}^{137}$  и  $\text{Sr}^{90}$ , а также Pu и  $\text{Am}^{241,242,243}$ . эти элементы обладают особенно высокой токсичностью.

В последние годы в связи с переходом на экстракционный способ разделения U, Pu и ПД, урановые и плутониевые фракции содержат значительно меньше ПД.

Из сказанного выше следует, что проблема дезактивации оборудования перед ремонтом очевидна.

### 6.1.5. Metallurgical production

There are several metallurgical productions:

1. Production of metallic uranium with natural isotope content;
2. Production of metallic uranium with isotope content  $U^{235}$  above natural;
3. Production of metallic plutonium.

From the point of view of equipment activation, the production of metallic uranium with natural isotope content is the safest, since uranium, entering the plant, is purified from daughter elements of radioactive decay at hydrometallurgical plants and has a low  $\alpha$ -activity. Products of its decay  $UX_1$  and  $UX_2$  have a low-energy  $\beta$ -spectrum, while the accumulation of products of radioactive decay of  $U^{238}$  with a high-energy  $\beta$ -spectrum is hindered by  $I_0(Th^{230})$  with a half-life of  $8,3 \cdot 10^4$  years. However, to prevent radioactive damage to the repair personnel (through respiratory and digestive organs) the equipment must be deactivated.

Activation of equipment for the production of enriched metallic uranium is more intensive due to the higher concentration of  $U^{235}$  and, especially,  $U^{234}$ , which has the lowest half-life of  $2,48 \cdot 10^5$  years, compared to other natural isotopes. High  $\alpha$ -activity promotes the occurrence of  $(\alpha, n)$  reactions with light elements-impurities.

In the production of metallic plutonium, we deal with especially toxic substances, such as isotopes of plutonium ( $Pu^{239}$ ,  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ ,  $Pu^{242}$ ) and americium ( $Am^{241}$ ,  $Am^{242}$ ,  $Am^{243}$ ), as well as partially  $Cs^{137}$ ,  $Sr^{90}$ . In addition, due to the high energy of  $\alpha$ -particles emitted by isotopes of plutonium (5,15 MeV –  $Pu^{239}$ ; 5,16 MeV –  $Pu^{240}$ ; 4,9 MeV –  $Pu^{242}$  and others)  $(\alpha, n)$  reactions with light elements-impurities occur. Isotopes  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ ,  $Pu^{242}$  are

( $\alpha, n$ ) реакциях дают n-фон. На их долю приходится 0,05 мг-экв радия на 1 кг Pu, т.е. активация конструкционных материалов оборудования неизбежна.

#### 6.1.6. Нейтронное излучение

При производстве металлического плутония и обогащенного урана возникает нейтронное излучение. Оно возникает по ( $\alpha, n$ ) реакциям между  $\alpha$ -частицами испускаемыми плутонием и ураном и легкими элементами-примесями: Li, Be, B, C, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, Mg, Na, Al, Si, Cl<sub>2</sub>, K, Ca, Se, Fe.

Большой выход нейтронов наблюдается у фторидов плутония:



Литий, бор и бериллий в солях плутония и в техническом плутонии содержатся в ничтожных количествах ( $< 10^{-4}$  %) и большой роли не играют. Нейтроны, проходя через вещество, производят в нем наиболее сильные изменения по сравнению с другими излучениями. Не обладая электрическим зарядом, нейтроны не взаимодействуют с электронной оболочкой атомов.

При столкновении с ядрами атомов нейтроны либо поглощаются, либо рассеиваются, теряют свою энергию, замедляются и, в конце концов, поглощаются ядрами. Наиболее сильно нейтроны замедляются в результате столкновений с веществами, содержащими легкие элементы (водород, углерод, азот, кислород, бор и др.), например, водой, парафином, биологическими тканями. Тепловые же нейтроны (замедленные до скорости движения атомов газа при 25 °С), легко поглощаясь ядрами, вызывают ядерные реакции с теми же элементами (водородом, азотом, фосфором). Например, по реакции с водородом  $H^1(n, \gamma)D^2$  образуется дейтерий и возникает гамма-излучение с энергией 2,2 Мэв; при поглощении нейтронов другими ядрами энергия  $\gamma$ -квантов достигает 4 ÷ 8 Мэв; по реакции с азотом  $N^{14}(n, p)C^{13}$  образуется поток протонов с энергией 0,6 Мэв; по реакции с фосфором  $P^{31}(n, \gamma)P^{32}$  возникает нестабильный изотоп  $P^{32}$ , который испускает  $\beta$ -частицы (период полураспада 145 дней).

Интенсивность нейтронного потока за счет  $(\alpha, n)$  реакций легких элементов вычисляется по формуле:  $N = E (A^1 + BN)$

где:  $N$  – интенсивность нейтронов;

$E$  – концентрация легкого элемента, выраженная в  $10^{-4}\%$  мас;

$A^1 = A(\alpha_{239} + \alpha_{240})/\alpha_{239}$ ;

$\alpha_i$  – скорость распада в 1 гр. смеси изотопов с атомным номером  $i$ ;

$A$  – постоянная для  $Pu^{239}$ ;

$B$  – постоянная для  $Pu^{238}$ ;

$N$  – относительная доля атомов  $Pu^{238}$  приходящаяся на 1 атом металла.

## 6.2. Механизм процесса активации

Физико-химическое строение радиоактивных загрязнений деталей и аппаратов зависит от природы их материалов, условий работы и характеристики загрязняющих веществ.

Как показали исследования, активация поверхностей нержавеющей стали, находившейся в производственных условиях в контакте с радиоактивными растворами и газами складывается из трех основных частей:

1. Активизация за счет адсорбции радиоактивных ионов на поверхности нержавеющей стали, не имеющей окисных пленок.

2. Активизация за счет сорбции активных частиц на пленках продуктов коррозии и осаждения трудно-растворимых осадков, образующихся в технологическом процессе.

3. Активизация за счет диффузионного проникновения активных частиц в глубь металла.

Количественная оценка рассмотренных путей активизации показала, что на пленках продуктов коррозии конструктивного материала концентрируется до 90 % радиоактивных изотопов от общей активности.

В глубь металла проникает 1 ÷ 2 % активности, адсорбированной поверхностью металла. Причем основная часть активности проникает в глубь

металла и сосредоточенна в  $2 \div 3$  мкм верхнего слоя металла, хотя активные частицы наблюдаются при снятии  $5 \div 10$  мкм верхней поверхности металла.

Пути активации поверхностей углеродистых сталей аналогичны, но уровень активности может быть выше за счет более высокой скорости коррозии.

### 6.3 Дезактивация

Из анализа источников активации оборудования производств ядерно-топливных циклов следует, что перед ремонтом оборудование необходимо дезактивировать.

#### 6.3.1. Способы дезактивации.

Для дезактивации оборудования могут быть использованы обычные способы очистки поверхности конструкционных материалов, однако, чаще всего используется в производственных условиях те, которые дают наиболее высокие результаты по дезактивации, обеспечивая нормальные санитарно-гигиенические условия труда.

Итак, способы дезактивации:

- 1) Ручная отчистка скребками, щетками и др;
- 2) Пескоструйный;
- 3) Дробеструйный, дробеметный;
- 4) Гидроабразивный;
- 5) Кварцевание;
- 6) Термический;
- 7) Электролитический;
- 8) Химический;
- 9) Ультразвуковой;
- 10) Электро-гидроударный.

В настоящее время на производствах чаще всего используются ручной, химический и ультразвуковой.

Ручной – используется как крайняя мера в безвыходных ситуациях. Наиболее широкое распространение получил химический, хотя с ним успешно конкурирует ультразвуковой

#### 6.3.1.1. Химические методы дезактивации.

Способ заключается в том, что отдельная деталь или аппарат в целом помещаются в ванну или последовательно в несколько ванн с растворами химических реагентов, растворяющих загрязнение. Выбор химического реагента зависит от характера загрязнения, от типа применяемого оборудования, его материала и от необходимой степени дезактивации. В настоящее время разработано множество рецептов дезактивирующих смесей как общего, так и сугубо конкретного назначения.

Рассмотрим некоторые из них.

1. Для снятия продуктов коррозии и окалина, зараженных радиоактивными веществами применяются следующие составы:

- 1.) 1 – 50% раствор HCl при 20° С
- 2.) 5 – 10% раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при 60 – 80° С
- 3.) 25% раствор H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> при 60 – 80 °С

Растворы (2 и 3) применяются с добавками веществ – ингибиторов коррозии, таких как тиомочевина CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> , хинолин и др.

Составы на основе H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> используются с добавками, улучшающими смачиваемость.

4.) Водные растворы, содержащие от 10 до 70% NaHSO<sub>4</sub> , до 30% Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и 2% хинолина.

5.) Эмульсия. приготовленная из H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl или H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> , содержащая 50 -200 г /л растворителя, бензина, керосина, 50 – 500 г/л, эмульгатора ОП – 7, ОП – 10-(5 – 80г/л), ингибитора – тиомочевины, ПП – 5 - 23 г/л, остальное H<sub>2</sub>O. Раствор готовится до получения однородной эмульсии, температура 20 – 50 °С в зависимости от состава растворителя.

6.) На некоторых заводах США дезактивацию проводят в начале путем промывки водой, разбавленной кислотой и пропариванием острым паром. Далее оборудование обрабатывают дезактивирующими растворами в такой последовательности:

1. 10% водный раствор  $\text{HNO}_3$ ;
2. 10% водный раствор лимонной кислоты;
3. 10% водный раствор  $\text{NaOH}$ ;
4. 10% водный раствор  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ;
5. 0,003 молярный раствор  $\text{HJO}_4$  (окислитель);
6. 20%  $\text{HNO}_3$  + 3%  $\text{NaF}$  (фтор-ион для снятия части металла).

Обработка этими растворами проводится в течение 8 и более часов при температуре, близкой к кипению. Данные растворы применяют в основном для нержавеющей сталей, т.к. в этом случае коррозия металла незначительна.

7.) Для дезактивации полов, внешних поверхностей технологического оборудования, стен помещений на отечественных заводах широко применяются, так называемый, контакт Петрова (гидрированный керосин с  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  + специальные добавки – ОП- 7, ОП -10 – технические мыла поверхностно – активные вещества).

8.) Большое распространение получила обработка аппаратуры для дезактивации двумя растворами следующего состава:

1. водный раствор, содержащий 5%  $\text{NaOH}$  + 0,1%  $\text{KMnO}_4$
2. водный раствор, содержащий 5%  $\text{HNO}_3$  + до 0,1%  $\text{HF}$   
(0,2%  $\text{NaF}$ ) + 0,1%  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$

Обработка первым раствором проводится в течение 10 и более часов и 6 часов вторым раствором при температуре 90 °С. Для оборудования радиохимического производства перед ремонтом дезактивация ведется в течение одного месяца и более.

Этот способ обработки двумя растворами сравнительно универсален, так, как в раствор переходит не только соединения урана, но и соединения радиоактивных осколков элементов и часть металла аппаратуры.

Химический способ дезактивации, являясь основным и наиболее универсальным (распространенным), имеет ряд существенных недостатков, как-то:

1. Длительность процесса и как следствие сильная коррозия аппаратуры;
2. Образуется большое количество отработанных радиоактивных растворов;
3. Способ требует зачастую большого количества ручного труда;
4. Не обеспечивает необходимую степень дезактивации оборудования и деталей сложной геометрии, имеющих каналы, отверстия, поры.

#### 6.3.1.2. Ультразвуковой способ

Всех этих недостатков химического способа в большинстве случаев лишен «способ совместного действия ультразвука и растворов химических реагентов»

Впервые в СССР данный способ начал разрабатываться на кафедре №43 ТПУ в 1958 г.

В 1960 г. проводились уже промышленные испытания, в 1963 г. способ был внедрен на “Диффузионном” и “Сублиматном” производствах.

В США ультразвуковой способ начали разрабатывать с 1959 г., а в 1963 г. проводились промышленные испытания на заводе по разделению изотопов.

В акустике под ультразвуковыми колебаниями понимаются такие упругие колебания, частота которых превосходит 16 КГц.

Законы акустики справедливы и для ультразвука, однако последний имеет ряд особенностей: отлично фокусируется, а значит можно получать направленное излучение больших интенсивностей (до 1000 Вт/см<sup>2</sup> - в фокусе).

Дезактивация в ультразвуковом поле с химически активной средой по отношению к радиоактивным загрязнениям происходит за счет:

1. Разрушающего действия ударных волн при кавитации жидкости;

2. Колебательного движения газовых пузырьков разрушающих слой загрязнений;
3. Интенсификации процесса химического растворения слоя загрязнений.

В настоящее время уже сложилось определенное мнение: для дезактивации деталей больших габаритов необходимо применять ультразвук низких частот 18 – 25 кГц, а для мелких деталей 200 – 500 кГц.

В первом случае интенсивность ультразвука для водных растворов должна быть в пределах 2 – 3 Вт/см<sup>2</sup>, во втором 7 – 12 Вт/см<sup>2</sup>, т.е. такая которая может вызвать кавитацию жидкости.

#### 6.3.1.2.1. КАВИТАЦИЯ

Из всех явлений, связанных с прохождением интенсивной звуковой волны в жидкости, кавитация является наиболее распространенным, но в то же время наименее изученным физическим процессом. Под кавитацией понимают образование в жидкости полостей, которые потом быстро смыкаются. Кавитация может возникнуть благодаря большим растягивающим напряжениям, которые возникают в жидкости при обтекании ею различных препятствий (при вытекании жидкости из сопла, вращение лопастей турбины или при распространении в ней звуковой волны, создающей отрицательное давление).

Известно, что под большим давлением объем некоторых жидкостей может значительно уменьшаться. При небольших изменениях давления объемная деформация  $\Delta v/v$  жидкостей пропорциональна изменению давления  $\Delta p$ . Это позволяет объемную упругость жидкости охарактеризовать величиной модуля объемной упругости

$$K = V \frac{\Delta p}{\Delta V}.$$

Зависимость модуля  $K$  от величины давления  $p$  может быть выражена рядом

$$K = x_1(p + p') + x_2(p + p')^2 + \dots$$

В этом выражении коэффициент  $\chi$  от температуры не зависит, а параметр  $p'$  с повышением ее уменьшается.

Зависимость  $p'$  от температуры  $t$  можно представить аналогичным рядом:

$$p' = \pi_1(t'-t) + \pi_2(t'-t)^2 + \dots$$

Здесь параметр  $t'$  близок к критической температуре жидкости.

В этих выражениях параметры  $p'$  и  $t'$  характеризуют условия, при которых расстояние между частицами жидкости достигает критического значения. Превышение этого критического расстояния приводит к разрушению жидкости, что достигается повышением отрицательного давления по ( $p = -p'$ ) или повышением температуры ( $t = t'$ ).

Если исходить из молекулярной теории чистой однородной жидкости, то для возникновения в ней разрывов необходимо растяжение порядка  $10^4 \text{ ат}^*$ .

Практически прочность очищенной дегазированной дистиллированной воды в статических условиях (при испытаниях в центрифуге) составляет не более  $280 \text{ ат}$ . В случае содержания в воде твердых частиц и газовых включений прочность ее во много раз меньше. Это наводит на мысль, что кавитация представляет собой не разрывы жидкости как таковой, а разрывы слабых ее мест, обусловленных наличием газообразных или твердых включений, или какими-либо иными причинами. Эти слабые места принято называть ядрами, кавитационными зародышами.

Существует несколько гипотез о механизме образования в жидкости кавитационных зародышей:

1. Отрицательные давления и тепловые флуктуации в жидкости способствуют образованию пузырьков пара, которые могут являться зародышами кавитационных полостей. Такие полости могут образоваться не только в результате испарения жидкости со стенок в полость пузырька, но также вследствие диффузии в него газа, растворенного в жидкости.

2. Разрыв жидкости происходит не в самом ее объеме, а на границе с твердой поверхностью, например, поверхностью взвешенных частиц.

3. Твердые взвешенные частицы имеют микротрещины, в которые жидкость не может проникнуть даже при большом давлении, такие места могут быть зародышами кавитационных полостей.

4. Твердые частицы, находящиеся в жидкости, смачиваются ею с различной степенью, что оказывает существенное влияние на ее прочность и образование кавитационных полостей.

5. Кавитационные зародыши могут возникать при прохождении через жидкость элементарных частиц высокой энергии \*.

Однако, гипотеза о газовой природе зародышей содержит в себе ряд противоречий. Известно, что под действием сил поверхностного натяжения и гидростатического давления маленькие пузырьки должны растворяться в жидкости, а большие — всплывать. По этой причине жидкость не должна содержать в себе устойчивых зародышей. На самом деле они существуют, по всей вероятности, благодаря стабилизации газовых зародышей тонкими, поверхностными мономолекулярными пленками органических веществ.

Известно, что некоторые из этих веществ не растворяются даже в самых сильных органических растворителях, в которых наблюдается явление кавитации.

Математический анализ процессов образования полости в ультразвуковом поле и ее разрушения усложняется необходимостью учета влияния ряда факторов: поверхностного натяжения жидкости, ее сжимаемости, тепловых превращений в ней, превращения газа в пар, диффузии, изменения во времени давления среды, окружающей полость. Решить уравнение с таким количеством неизвестных практически невозможно.

Рэлей, решая частную задачу с рядом допущений, показал, что в жидкости с плотностью  $\rho$ , находящейся под гидростатическим давлением  $p_0$ , область пузырька с начальным радиусом  $r_0$  при уменьшении его до  $r_1$  имеет максимальное давление на расстоянии  $\sqrt[3]{4r_1}$ . При этом давление сферической ударной волны

$$p_{\text{макс}} = p_0 \left(4\right)^{-\frac{4}{3}} \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^3.$$

Время, необходимое для разрушения пузырька, определяется выражением

$$t = 13,5 \sqrt{\frac{\rho}{p_0}} \cdot r_0,$$

где  $p_0$  — гидростатическое давление.

Скорость  $v$  при уменьшении радиуса пузырька в жидкости для случая, когда полость наполнена газом, может быть определена по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2p_0}{3\rho} \left(\frac{r^3}{r_1^3} - 1\right) - \frac{2p_g}{\rho} \cdot \frac{r_0^3}{r_1^3} \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)},$$

где  $r$  — максимальный радиус пузырька для данного звукового давления;  $p_g$  — давление газа в пузырьке при максимальном радиусе.

В этой формуле первый член выражает работу, произведенную жидкостью при захлопывании пузырька, а второй — работу сжатия газа. Данное выражение Рэлей считает справедливым только для изотермического сжатия. Он указывает, что наиболее разрушительным действием ударная волна, образованная в результате смыкания вакуумной сферической полости в жидкости, должна обладать на расстоянии примерно радиуса захлопнувшегося кавитационного пузырька. При этом мгновенное давление может достигать несколько сотен атмосфер. Экспериментальные данные подтверждают высказанные Рэлеем соображения о больших давлениях, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков. Захлопывание больших кавитационных пузырьков приводит к образованию ударной волны, которая является основным источником кавитационной эрозии. Экспериментальные данные показывают, что под действием ультразвуковой энергии процесс кавитации не является мгновенным, а протекает постепенно по стадиям, причем каждая стадия зависит от развития предыдущей.

Предполагают три стадии кавитации (начальную, критическую и стадию кавитационных пузырьков), а также послекавитационный период.

Начальная стадия возникает, когда кавитационные зародыши-ядра, находящиеся в жидкости, попадают в область высокой интенсивности ультразвука. В это время ядра, содержащие устойчивые газонаполненные области, под влиянием ультразвуковой волны сжимаются и расширяются.

В областях максимальной интенсивности ультразвука кавитационный пузырек, совершая колебания с частотой ультразвуковой волны, постепенно увеличивается в своем объеме.

Если при этом частота звука ниже резонансной частоты кавитационного пузырька, то в полупериод растяжения он приобретает некоторую скорость расширения и, расширяясь до максимального радиуса, затем захлопывается со все возрастающей скоростью.

При частоте звука выше резонансной частоты кавитационного пузырька пузырек не захлопывается и его движение носит сложный характер. Следовательно, для каждой частоты звука существует минимальный и максимальный радиусы пузырьков, которые способны вызывать кавитацию. Захлопывание пузырьков в кавитирующей жидкости происходит не одновременно, разница между моментами захлопывания отдельных пузырьков зависит от их начальных радиусов.

Частота резонансных колебаний кавитационного пузырька может быть определена по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( p + \frac{2\sigma}{R} \right)},$$

где  $R$  — радиус пузырька;  $\rho$  — плотность жидкости;

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  — отношение удельных теплоемкостей для газа в пузырьке;

$p$  — гидростатическое давление;

$\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости.

Для частот 10, 100 и 1000 *кГц* диаметры пузырьков воздуха в воде при резонансе равны 0,66; 0,066; 0,0066 *мм*.

Процесс разрушения кавитационного пузырька происходит в доли миллисекунд за несколько периодов колебаний.

Экспериментально определено, что рост кавитационного пузырька происходит тем быстрее, чем ниже частота звука и больше звуковое давление. Поэтому с увеличением размера кавитационного пузырька (при определенной частоте звука) увеличивается сила ударной волны. Однако это увеличение продолжается до тех пор, пока время захлопывания пузырька  $t$  не станет равным половине периода  $T$  звукового колебания

$$t \leq \frac{1}{2}T.$$

При дальнейшем увеличении звукового давления, несмотря на рост пузырька, давление, создаваемое ударной волной, значительно уменьшается, так как пузырек не успевает захлопнуться полностью к моменту появления отрицательного полупериода звукового давления. Практически сила ударной волны при захлопывании пузырька зависит от ряда причин:

- 1) демпфирующего действия газов и паров, находящихся в полости пузырька;
- 2) вязкости и сжимаемости жидкости;
- 3) конечной скорости захлопывания полости пузырька;
- 4) распада пузырька на части в момент его захлопывания.

Разрушение кавитационного пузырька сопровождается сильными периодическими колебаниями ударной волны с амплитудой, во много раз превышающей амплитуду внешней звуковой волны. Ударная волна вместе с передающимися звуковыми волнами имеет амплитуду, достаточную для образования мириады микрополостей в жидкости.

При этих условиях интенсивность результирующих волн будет достаточной для того, чтобы разорвать жидкость в местах, не имеющих кавитационных зародышей, т. е. в местах статических разрывов в ее

молекулярной структуре. Появившиеся вибрирующие полости движутся во время этой фазы в область наибольшей интенсивности звука, создавая на своем пути новые микрополости — кавитационные взрывы. До сих пор не ясно, почему появляются случайные пузырьки во время образования микрополостей. Предполагают, что они образуются от блуждающих ядер, которые, вероятно, и обеспечивают начальное содержание в них газа.

Послекавитационные условия определяются в основном неразрушенными газовыми пузырьками, которые выносятся из области высокой интенсивности ультразвукового поля циркулирующей жидкостью. При прекращении излучения пузырьки поднимаются на поверхность жидкости — всплывают.

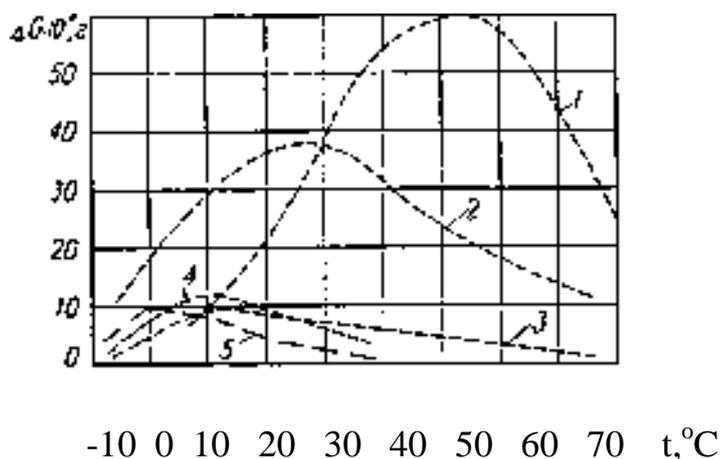


Рис. 6.1. Зависимость кавитационного разрушения (изменения веса) алюминиевых пластин от температуры среды:

1 — вода; 2 — керосин; 3 — спирт; 4 — бензин;  
5 — ацетон.

Сравнительно недавно появилось сообщение о том, что при кавитации наблюдаются периодические скачкообразные изменения силы звука и температуры жидкости. Обнаружено, что при постоянной интенсивности излучаемого ультразвука существуют два вида колебаний газовых пузырьков в жидкости.

При этом переход одного вида колебаний в другой происходит скачкообразно. Время релаксации такого процесса зависит от интенсивности ультразвука и температуры жидкости. Переход из одного вида газовых пузырьков в другой проявляется в качественных изменениях различных процессов, вызываемых кавитацией (кавитационная эрозия, люминесценция, окислительное действие и др.).

Было замечено, что при колебаниях второго типа не наблюдается окислительных процессов и люминесценции, в то время как кавитационный шум в этом случае больше, чем при колебаниях первого типа.

Все эти вопросы недостаточно изучены.

Влияние ультразвуковой кавитации на физико-химические процессы в жидких телах обстоятельно рассмотрено во многих работах. Следует отметить, что интенсивность кавитационных явлений зависит от температуры окружающей среды, давления, свойств жидкости и других факторов. Так например, интенсивность кавитационного разрушения твердой поверхности зависит от температуры (рис. 6.3.1.) свойств применяемой жидкости, а также содержания в ней газовых пузырьков.

Ультразвуковые колебания могут быть получены с помощью магнитострикционных, пьезоэлектрических и механических источников.

Практическое значение для целей (отчистки) дезактивации в настоящее время у нас в стране получили магнитострикционные.

Явление магнитострикции – это способность некоторых металлов и сплавов изменять свои геометрические размеры под действием высокочастотного электрического поля (Ni, сплавы Ni – пермаллой, пермендюр, инвар и др.).

В США широко используются поликристаллические пьезоэлектрики на основе титаната бария – BaTiO<sub>3</sub>.

### 6.3.1.2.2. Установка для дезактивации.

В настоящее время существует много типов конструкций и технологических решений процесса дезактивации.

На отечественных заводах для дезактивации малогабаритных деталей (до 200мм – массово и до 600мм – штучно), наибольшее распространение получили УЗ ванны, разработки кафедры 43, рис.6.2.

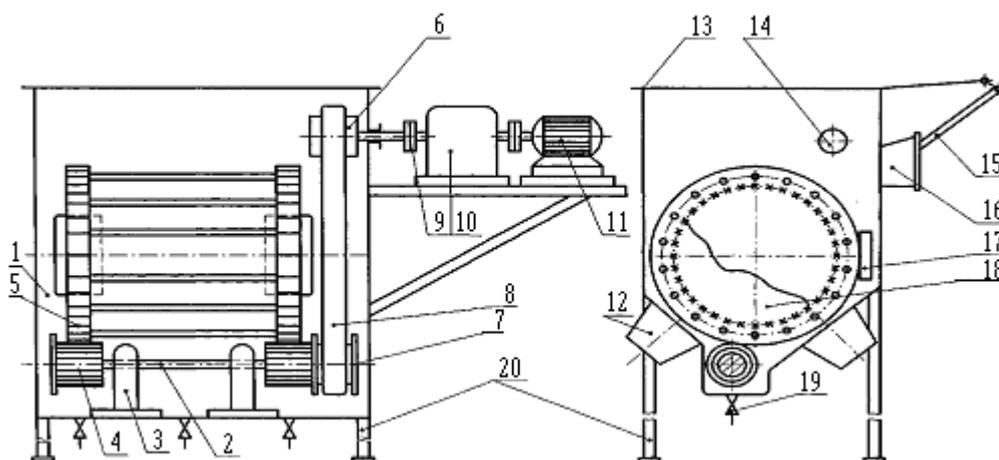


Рис.6.2. Ультразвуковая ванна УЗВ-ТПУ для дезактивации деталей

1) Корпус ванны. 2) Вал привода. 3) Подшипниковые опоры. 4) Опорно-приводные ролики. 5) Барабан типа «Беличье колесо». 6) Приводной ведущий ролик. 7) Приводной ведомый ролик. 8) Зубчатый ремень. 9) Фрикционная муфта. 10) Редуктор. 11) Электродвигатель. 12) Магнитострикционные преобразователи. 13) Крышка ванны. 14) Отверстие для подачи растворов. 15) Газовая пружина. 16) Вентиляционный патрубок. 17) Опорные элементы барабана. 18) Дезактивируемые детали. 19) Вентили для слива растворов. 20) Опорные стойки.

### Принцип устройства и работы УЗВ–ТПУ.

В основу принципа устройства и работы положена необходимость придания дезактивируемым деталям сложного движения в акустическом поле, чтобы исключить теневые акустические эффекты.

УЗВ–ТПУ состоит из корпуса (1), в который встроены магнитострикционные преобразователи (12), барабана типа «беличье колесо» (5), привода, состоящего из приводного вала (2), опорно-приводных роликов (4), которые приводятся во вращательное движение от электродвигателя (11), редуктора (10), приводного ведущего ролика (6) и зубчатого ремня (8).

Дезактивируемые детали (18) загружаются в барабан (5), на стержнях которого внутри находится сетка. Барабан (5) с деталями опускается в ванну на опорные ролики (4). Центр тяжести барабана смещён относительно оси приводного вала в сторону опорных пластин из тефлона, поэтому барабан с деталями самоустанавливается в ванне. Дезактивирующие растворы заливаются в ванну через отверстие (14). После заполнения ванны раствором включается привод барабана и магнестрикторы (12). Слив активного раствора производится через вентили (19). Барабан с дезактивированными и промытыми деталями поступает на разгрузку и сушку деталей с последующим дозиметрическим контролем.

#### 6.3.1.2.3. Технологические режимы и составы дезактивирующих растворов.

Составы дезактивирующих растворов и режимы ультразвуковой дезактивации оборудования различных заводов зависят от вида загрязнений, материала оборудования, состава радиоактивных веществ, требований, предъявляемых к чистоте поверхности.

Для достижения санитарной допустимой нормы ( $\alpha=20,0$  Р/мин;  $\beta=2000$  Р/мин,  $\gamma =0,06$  мР/ч) или естественного фона по всем видам излучения ультразвуковую дезактивацию оборудования диффузионного, сублиматного, радиохимического и металлургических производств необходимо проводить по следующему более – менее универсальному режиму:

1. 5% водный раствор NaOH;  $t=50 - 60$  °С;  $\tau =30$  мин.
2. 2 – 3%  $\text{HNO}_3$  +(0,2 – 0,5)%  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ;  $t=40-50$  °С,  $\tau=15-20$  мин.
3. 10%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $t=60-40$  С ;  $\tau=20$  мин.
4. Промывка в  $\text{H}_2\text{O}$  в течение 3 – 5 мин.

#### 6.4. Ремонтная разборка машин, дефектация

Разборка – процесс расчленения машины (аппарата) на отдельные сборочные единицы и далее на детали.

Процесс разборки состоит из следующих операций:

- 1) Предварительная деффе́кция на ходу машины (т.е. до остановки на ремонт);
- 2) Общая разборка на отдельные сборочные единицы в объеме предстоящего ремонта;
- 3) Деффе́кция в процессе общей разборки для выявления отклонений от заданного взаимоположения сборочных единиц;
- 4) Разборка отдельных сборочных единиц на более мелкие сборочные единицы (узлы низших порядков) и на отдельные детали;
- 5) Деффе́кция в процессе детальной разборки.

Результаты всех деффе́кций (на ходу машины, поузловая, детальная) заносятся в деффе́ктные ведомости данной машины. Предварительная деффе́кция включает в себя проверку на ощупь или приборами температуры узлов трения, проверку характера и силы стуков, вибраций и ударов и т.п. Стуки в машине возникают из-за люфтов в сопряженных деталях, шумы – из-за вибрации. По характеру стуков и шумов, которые контролируются акустическими и виброметрическими приборами, можно достаточно точно установить место и причину неисправности машины.

Общая разборка – расчленение машины на отдельные сборочные единицы. При общей разборке производится также деффе́кция, состоящая из ряда проверок, замеров, осмотров.

Детальная разборка состоит из очистки детали (дезактивации) и окончательной деффе́кции. Деффе́кция деталей производится по следующим видам отклонений номинала:

потери первоначальных размеров – устанавливается измерительным инструментом;

потери правильной геометрической формы, т.е.:

- 1) Образование эллипсности, конусности, бочкообразности поверхности вращения;
- 2) Неравномерность выработки фасонных и плоских поверхностей;

3)Изгиб и скручивание детали (обнаруживаются несколькими замерами мерительными инструментами, шаблонами, краской на плите, индикаторами и т.д.);

4)Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя детали (изменение твердости вследствие перегрева и отпуска, износ твердого покрытия и т.д.). Обнаруживается с помощью напильника, ножовки или специальными приборами на твердость типа «ТП» по методу Виккерса, Бринелля;

5)Прочие поверхностные повреждения – коррозия, оплавление, эрозия – обнаруживается осмотром.

#### 6.5. Восстановление поврежденных деталей

После очистки, дезактивации и дефекации оборудование поступает на восстановление – ремонт.

Затраты на ремонт обычно составляют  $10 \div 15$  % балансовой стоимости машин и аппаратов, поднимаясь иногда до 40 %.

При этом на изготовление новых запасных частей расходуется около  $3 \div 5$  % балансовой стоимости оборудования.

Из этих данных видно, что основная масса деталей оборудования не заменяется на новые, а ремонтируются.

Способы восстановления деталей зависит от вида и степени износа, от материала и категории ремонта могут быть весьма разнообразны. Итак, способы восстановления. Для деталей с поверхностными повреждениями, главным образом вследствие механического и частично коррозионного износа к числу ремонтных способов восстановления относятся следующие:

##### 6.5.1. Обработка на ремонтные размеры

Расчлняя узел на сопряженные пары, доводят обработкой до исходной формы и чистоты поверхности (но не размера) более дорогую сложную или менее изнашиваемую деталь, рис.6.5.1, 6.5.2

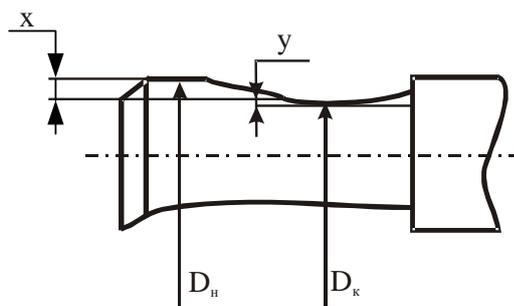


Рис. 6.3. Схема обработки детали на ремонтный размер.

Обозначения:

$X$  – износ детали за период пробега между ремонтами на глубину, мм (по радиусу);  $Y$  – обработка детали при ремонте на заданную глубину, мм;  $(x + y)$  – изменение размера детали (мм) при каждом ремонте по радиусу и  $2(x + y)$  – по диаметру.

При числе ремонтов  $n$  изменение диаметра выразится, мм:  $2(x + y)n$ .

Если по условиям прочности известен предельно-допустимый размер  $D_k$  и номинальный размер  $D_{ном}$ , то  $n$  найдется из выражения:

$$\text{Для отверстия } n = \frac{D_k - D_{ном}}{2(x + y)}.$$

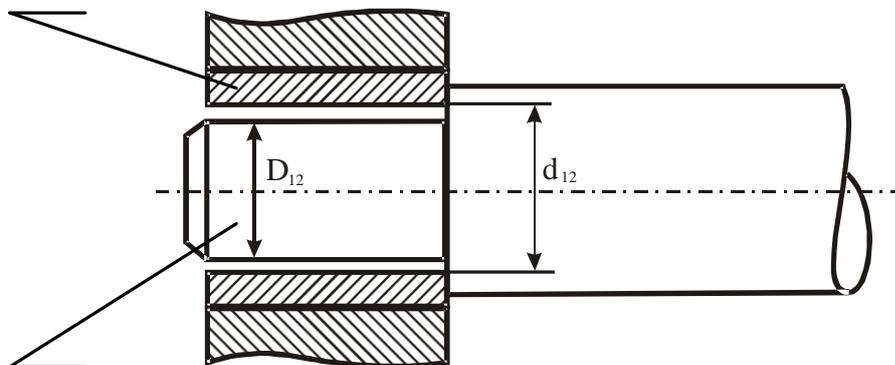
$$\text{Для валов } n = \frac{D_{ном} - D_k}{2(x + y)}.$$

Для валов принимают  $D_k = (0,93 - 0,95) D_{ном}$  или

$$D_n - D_k = D_n - (0,93 - 0,95) D_{ном}.$$

Деталь, которая по внутреннему диаметру

или восстановление с наращиванием или заменяется новой.



Несменяемая деталь. По шейке вала

восстанавливается с ликвидацией выработки.  $D_1 > D_2$  и  $d_1 < d_2$

Рис. 6.4. Схема восстановления изношенной детали на ремонтный размер.

6.5.2. Металлизация – наращивание деталей распылением по их поверхности расплавленного металла в струе сжатого газа с последующей обработкой до номинального размера.

6.5.3. Плазменное напыление на обрабатываемую поверхность с помощью плазмотрона напыляется нитрид, карбид титана, вольфрама

6.5.4. Наплавка – процесс последовательного наваривания металла на поверхность детали до образования сплошного слоя покрытия. В процессе наплавки расплавляется не только присадочный материал, но и поверхностный слой основного металла детали, чем достигается сплавление обоих металлов. Это позволяет восстанавливать не только формы и размеры, но и номинальное сопротивление детали. Кроме того, покрытие может быть более износостойко, чем основной металл детали (бронеплиты мельниц, дробилок). Наплавка производится сварочными процессами: электродуговым и газокислородным. Чаще используется процесс электродуговой наплавки как более производительный и дешевый.

В ремонтной практике химических производств широко используются наплавка стальных деталей конструкционными сталями, наплавка твердыми сплавами, наплавка цветных металлов.

Порядок нанесения сварочного шва в зависимости от диаметра шейки вала, рис. 6.5.3.

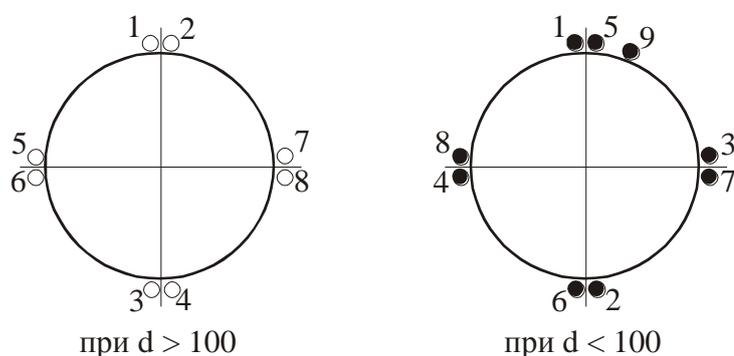


Рис. 6.5. Схема наложения сварочного шва.

После процесса наплавки проводят механическую обработку деталей до номинальных размеров.

### 6.5.5. Заливка

Широко используется для восстановления узлов трения (БВФ, шаровые мельницы). Процесс заливки сводится к следующим операциям:

- 1) подготовка изношенных деталей к перезаливке – удаление старой заливки, очистка;
- 2) лужение;
- 3) сборка формы и заливка;
- 4) механическая обработка;
- 5) приработка.

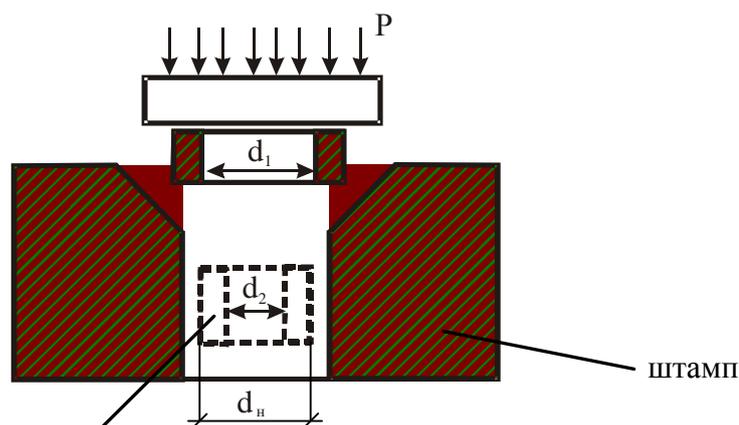
Для перезаливки применяются, в зависимости от рабочих условий (от нагрузки  $P_B$  кг/см<sup>2</sup> и линейной скорости перемещения  $V_B$  м/сек), бабиты и их заменители. Широко используются в производственной практике следующие:

- Бабиты: оловянистый Б83 ( $PV > 100$ ) при ударной нагрузке;
- оловянистый Б16 ( $PV < 60$ ) при спокойной нагрузке.
- оловянистый Б11 ( $PV < 60$ ) то же;
- свинцовистый БК (с Na и Ca) ( $P < 200$  кг/см<sup>2</sup> в тихоходных машинах);
- свинцовистый БС ( $PV < 20$  и  $t_{раб} < 60$  °С).
- Сплавы ЦАМ 10 – 5 ( $PV < 100 : P < 200$  кг/см<sup>2</sup> и  $V < 7$  м/сек).

### 6.5.6. Восстановление деталей методом пластического формоизменения

Способ используется для деталей, выполненных из пластических материалов: бронзы, латуни, вязких марок стали.

- 1) обжатие втулки в штампе:  $d_1 > d_2: d_2 < d_H$



Деталь восстанавливается по внутреннему диаметру, наружный восстанавливается нанесением слоя покрытия металлизацией, электрохимическим способом

Рис. 6.6. Осадка втулки в штампе.

## 2) прессовая осадка шейки вала.

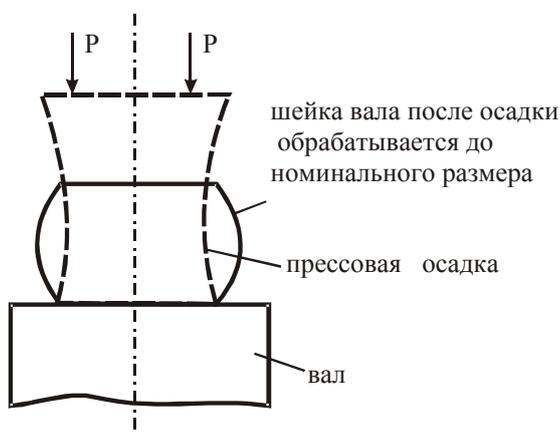


Рис. 6.7. Осадка шейки вала.

После осадки шейка вала протачивается резцом до номинальных размеров.

## 6.5.7. Электрохимические покрытия

Электрохимические методы наращивания металлического слоя весьма разнообразны как в отношении применяемых для покрытия металлов, так и по своему назначению.

Хромирование – применяется чаще всего, т.к. хром имеет высокую твердость, износостойчивость и антифрикционность.

Наибольшая толщина наращивания слоя при хромировании составляет 0,25 мм при плотных покрытиях и 0,5 мм – при пористых покрытиях.

После покрытия наружный слой шкифуется на 0,1 ÷ 0,15 мм.

Состав электролита ванны: до 150 гр  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и 1,5 гр  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на 1 литр воды (для «разведенных» ванн) и 450 гр  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  + 4,5 гр  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на 1 литр воды для «концентрированных» ванн.

Качество покрытия в сильной степени зависит от плотности тока, температуры электролита, что видно на рис. 6.5.7.1.

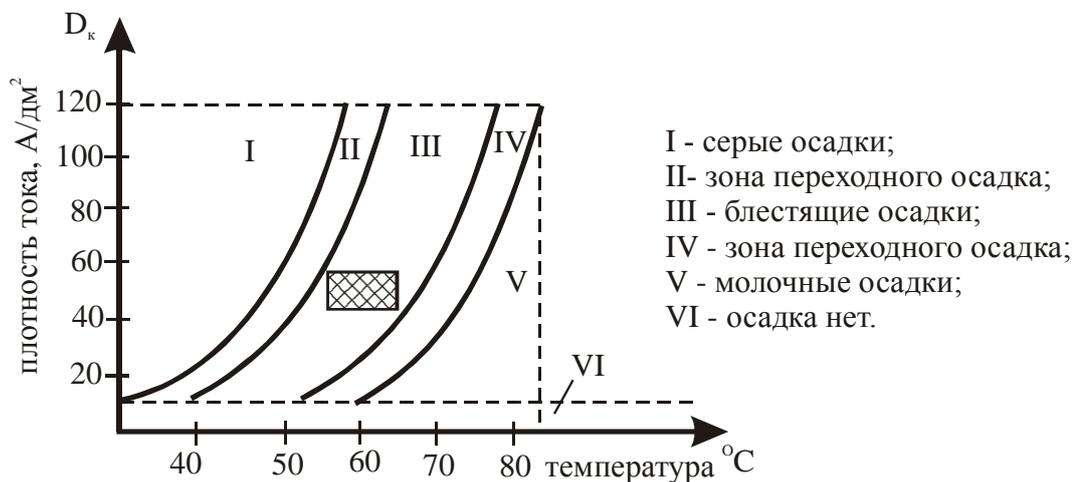


Рис. 6.8. Диаграмма зависимости качества слоя покрытия от температуры электролита и плотности тока  $D_k$ .

Лучшие результаты по прочности, твердости и износоустойчивости покрытия блестящими осадками получаются при  $D_k = 50 \div 60 \text{ А/дм}^2$  и  $t = 55 \div 65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Деталь включается катодно. Поверхность анода  $F_A$  в  $1,5 \div 2$  раза должна быть больше  $F_K$ ,  $F_A = (1,5 \div 2) F_K$ .

Кинетика процесса хромирования выражается уравнением:

$$\delta = \frac{c \cdot D \cdot \tau \cdot \alpha}{n \cdot \gamma \cdot 3600},$$

где  $\delta$  — толщина слоя покрытия, мм;  $c$  — электрохимический эквивалент, равный  $0,324 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ ;  $D$  — плотность тока,  $\text{А/дм}^2$ ;  $\tau$  — время образования слоя толщиной  $\delta$ , ч;  $\alpha$  — коэффициент выхода по току, равный  $0,12 \div 0,18$  в зависимости от состава ванны;  $n$  — коэффициент плотности покрытия, равный  $0,8 \div 0,9$ ;  $\gamma$  — плотность металла, для хрома  $7 \text{ г/см}^3$ .

Электролитическое осталивание — процесс осаждения железа или стали. Осуществляется тремя способами:

1) осаждение чистого железа мелкозернистой структуры производится из ванны содержанием  $\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O} - 200 \div 350 \text{ г/л} + \text{NaCl}$ ;  $t = 90 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$   $H_B = 200 \div 250 \text{ кг/мм}^2$  по Виккерсу;

2) осаждение низкоуглеродистого сплава Fe-C из такой же ванны, но с добавкой 200 гр/л глицерина.  $H_B = 300 \div 400 \text{ кг/мм}^2$ ;

3) осаждение высокоуглеродистого сплава Fe-C ( $C \cong 1 \%$ ),  $H_B$  до  $1000 \text{ кг/мм}^2$  из тех же ванн, но с добавкой глицерина и сахара.

Сплав поддается всем видам термообработки.

Анодом для всех ванн служат стальные листы.

$D_K$  для ванн 1-го типа  $10 \div 15 \text{ А/дм}^2$  и  $20 \div 25 \text{ А/дм}^2$  – для 2-го типа.

### 6.5.8. Восстановление методом дополнительных деталей

Метод имеет две разновидности:

1) прессовая посадка в системе отверстия (А) по 3 классу точности.

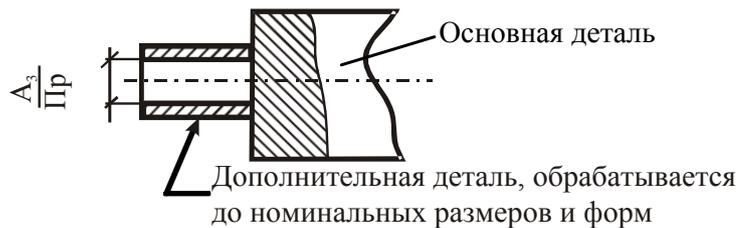


Рис. 6.9. Схема посадки банджа.

2) прессовая посадка в системе вала (В) по 2-му классу точности.

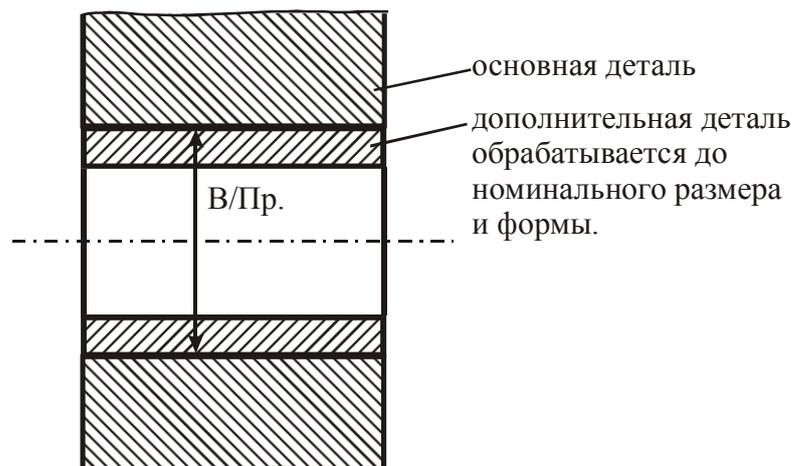


Рис. 6.10. Схема посадки втулки.

В системе отверстия (А) номинальным размером является наименьший предельный размер отверстия. В системе вала (В) номинальный размер является наибольшим предельным размером вала.

В основном пользуются системой (А).

6.5.9. Для деталей с повреждением целостности используются методы:

1) Заварка трещин.

Последовательность операций: засверловка отверстий на концах трещины, разделка шва и заварка, рис. 6.11.

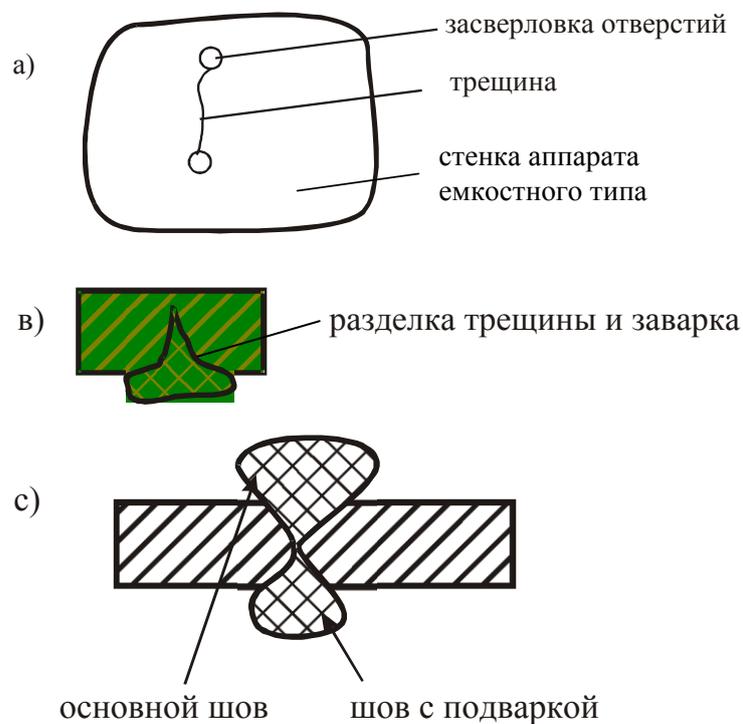


Рис. 6.11. Последовательность операций по завариванию трещин.

2) наложение заплат, рис. 6.12.

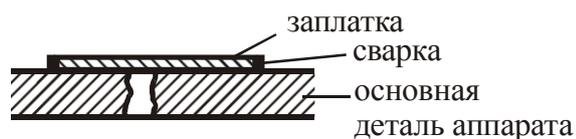


Рис. 12. Наложение заплаты на трещину в стенке аппарата.

3) ремонт валов, рис. 6.13.





Рис. 6.13. Последовательность операций при ремонте валов.

## Глава 7. Сборка машин и аппаратов. Проверки в процессе сборки

Сборка – процесс соединения сопряженных деталей и узлов при обеспечении правильного взаимоположения их в машине. Для обеспечения этого условия необходимо проводить следующие проверки.

### 7.1. Проверка поверхностей на горизонтальность

Проводится уровнями и выражается в мм на 1 погонный метр.

Для проверки длинных деталей (барабанные печи) используются «водяные уровни» – две стеклянные открытые трубки со шкалами, а так же геодезические уровни (при большом расстоянии между плоскостями).

### 7.2. Проверка прямолинейности плоскостей

Используется для этой цели:

I. проверенные линейки, по двум схемам, рис 7.1:

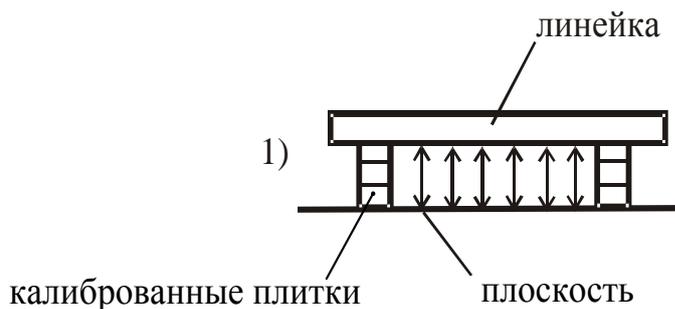


Рис. 7.1. Без учёта стрелы прогиба линейки.

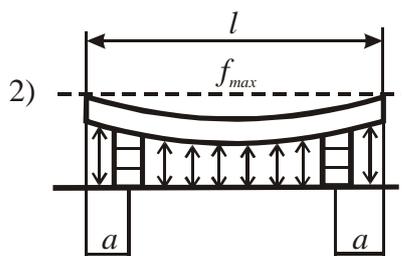


Рис. 7.2. С учётом стрелы прогиба линейки.

Зазоры проверяют щупами или меряются индикаторами с точностью  $0,01 \div 0,02$  мм.  $a=0,22 l$ .

При необходимости в особых случаях учитывается стрела прогиба

линейки  $f = \frac{P}{E \cdot I} \cdot \frac{5\ell^3}{384}$  (для 1-го случая),  $f'_{\max} = 0,018f$  (для 2-го случая),

где  $P$  – вес;  $I$  – момент инерции сечения линейки, см<sup>4</sup>;  $E$  – модуль упругости материала линейки кг/см<sup>2</sup>;  $\ell$ - длина, см.

### II. Применение струны рис. 7.3:

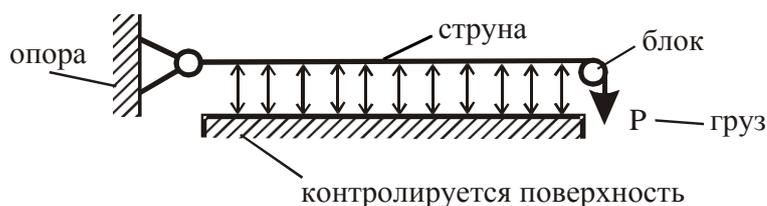


Рис. 7.3. Проверка прямолинейности с помощью струны.

Тонкая проволока или шелковая нить натягиваются у поверхности изделия и замеряются индикатором расстояния между измеряемой плоскостью и струной.

### III. Проверка на поверочной плите по точкам касания. (для деталей малых габаритов)

#### 7.3. Проверка параллельности и перпендикулярности валов и плоскостей

Параллельность проверяется путем промера расстояния между валами, поверхностями с помощью индикаторов-штихмассов, рис. 7.4:

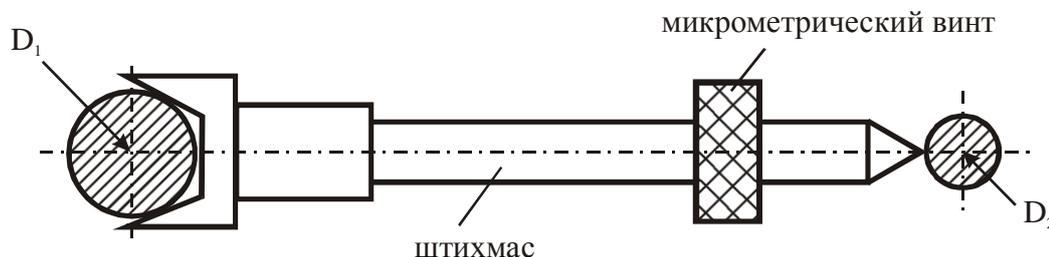


Рис. 7.4.

Или с помощью стрелок (если нет возможности замеров расстояния). Поворачивая валы со стрелками добиваются условия  $a_1 = a_2$  и  $v_1 = v_2$ .

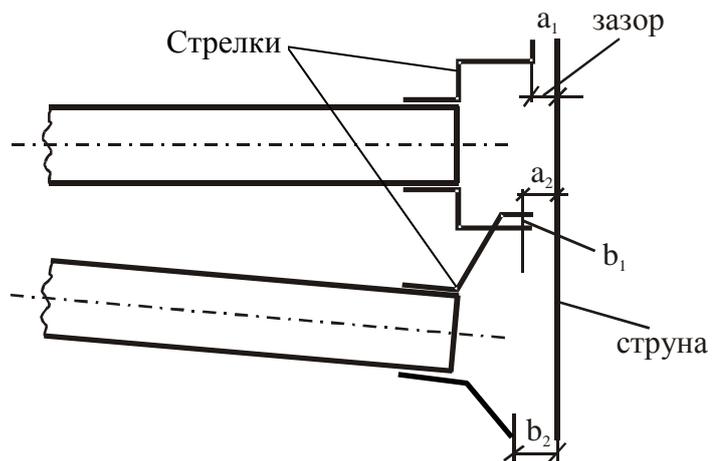


Рис. 7.5. Применение стрелок для проверки параллельности валов.

Перпендикулярность обычно проверяется угольниками, отвесами.

#### 7.4. Проверка соосности отверстий

Весьма важная операция в процессах сборки.

Соосность отверстий проверяют разными способами.

Если отверстие малого диаметра и на малом расстоянии, то используют оправку-стержень с двумя калиброванными диаметрами на расстоянии равном расстоянию между отверстиями. Детали с отверстиями фиксируют при свободном перемещении оправки, рис .7.6:

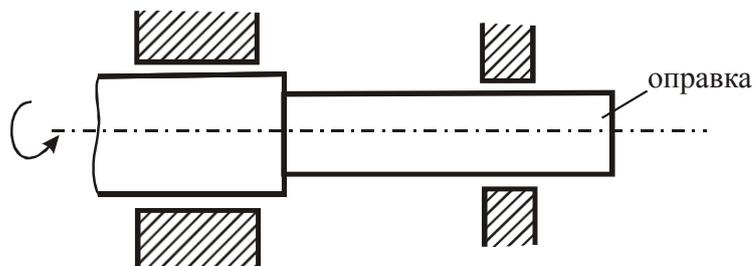


Рис. 7.6. Центровка отверстий с помощью оправки.

Если отверстия большого диаметра, особенно когда разного диаметра используется струна и индикатор.

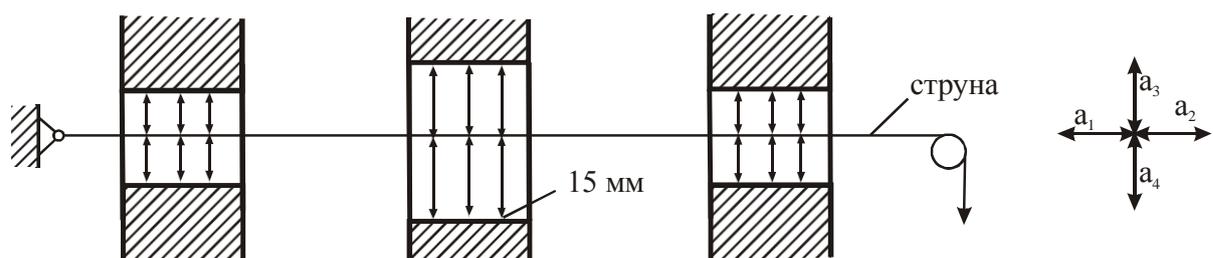


Рис. 7.7. Центровка отверстий с помощью струны.

Центровкой добиваются равенства размеров  $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$  по всем соосным отверстиям. Часто в химической промышленности используется метод проверки соосности световым лучом, когда расстояние между отверстиями большие (барабанные печи – отверстия опорных роликов), рис.7.8.

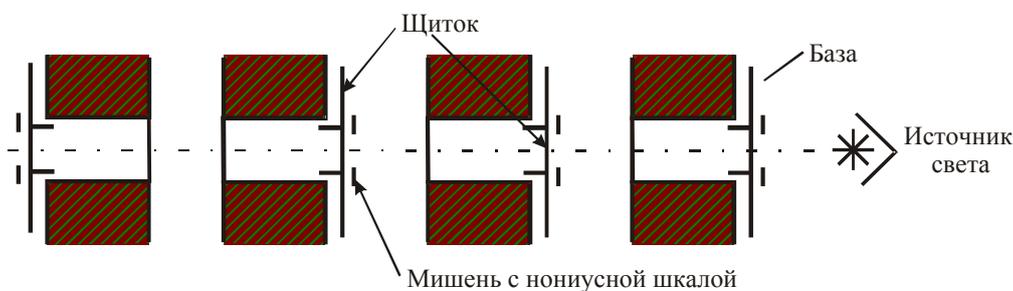


Рис. 7.8. Выставление отверстий по световому лучу.

### 7.5. Центровка валов, рис. 7.9, 7.10.

Виды смещения и перекоса валов:

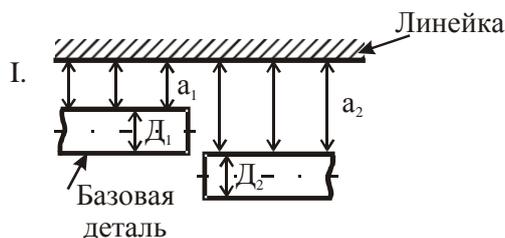


Рис. 7.9. Смещение валов в одной плоскости

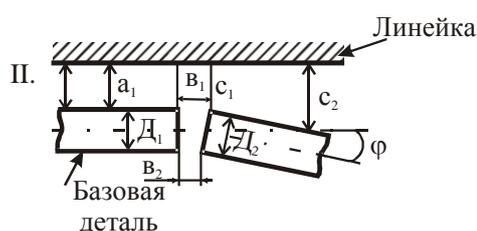


Рис. 7.10. Смещение валов в одной плоскости с перекосом.

При смещении в плоскости  $a_1 = a_2$  при  $D_1 = D_2$ , рис. 7.9.

При  $D_1 \neq D_2$  учитывается поправка на разность диаметров валов.

При смещении по радиальному зазору ( $c_1 \neq c_2$ ) и углу перекоса  $\varphi$  добиваются  $b_1 = b_2$ ;  $c_1 = c_2 = a$  при  $D_1 = D_2$ , рис. 7.10.

Центрируются валы чаще по линейке, прилагаемой к базовой детали и промером расстояний между второй деталью и линейкой. Для более точного и быстрого центрирования используют стрелки по схеме.

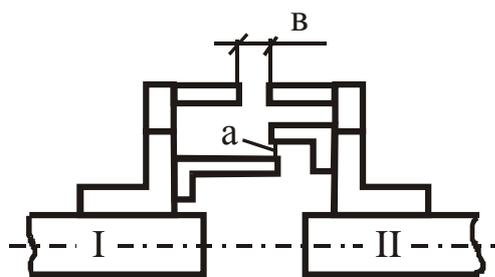


Рис. 7.11. Центровка валов с помощью стрелок.

Добиваются минимальной разницы в зазорах по диаметрально противоположных направлениях, рис 7.12.

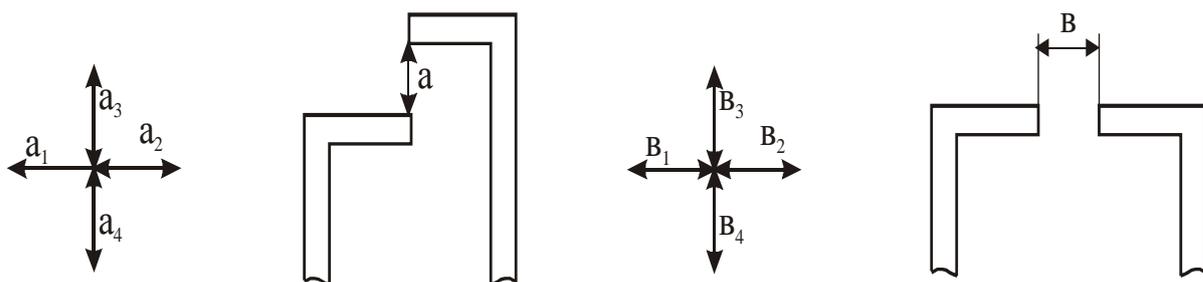


Рис. 7.12. Схема центровки валов с помощью стрелок.

### Норма центровки

Типы соединения валов	Наибольшие разности $a_2 - a_1$ и $a_4 - a_3$ Радиальные зазоры, мм	Наибольшие разности $B_2 - B_1$ и $B_4 - B_3$ , мм Осевые зазоры, мм
Жесткое	0,05	0,03
Полужесткое	0,1	0,04
Гибкое	0,15	0,05

### Глава 8. Балансировка при сборке.

Балансировка – операция уничтожения неуравновешенной центробежной силы, либо пары сил, возникающих в телах вращения от несовпадения центра тяжести детали (узла) с геометрической осью вращения. Неуравновешенность возникает за счет внутренней неоднородности материала детали, за счет возникновения эксцентриситета при обработке детали и др. Неуравновешенность вызывают при вращении детали вибрацию, а последняя приводит к разрушению машин. При вращении тел типа простого диска (рабочие колеса насосов, вентиляторов, распылительных дисков и тому подобное) возникающая неуравновешенность тела в форме центробежной силы лежит в одной плоскости с силой тяжести диска  $g$ , то

есть балансировка изделий подобного рода простая и называется “статической балансировкой”, рис.8.1.

Длинные тела вращения реторты, валы по длине могут быть представлены как множество плоских дисков (рис.8.2). В каждом из этих дисков может появиться неуравновешенная центробежная сила под своим углом.



Рис. 8.1. Схема смещения центра тяжести от оси вращения в плоском диске.

В сумме по всем дискам возникает пара сил  $A A$  и их результирующая сила  $K$ . Выявление и уравнивание пары центробежных сил является операцией весьма сложной и носит название «динамическая балансировка», рис.8.2

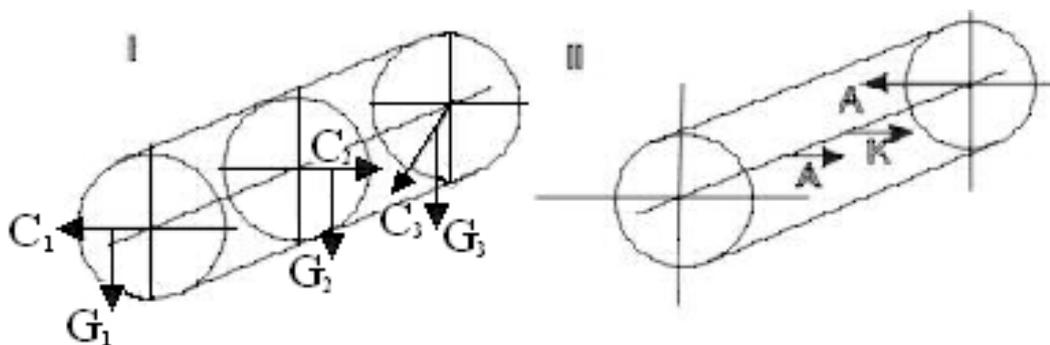


Рис. 8.2. Схема смещения центра тяжести от оси вращения в длинном цилиндре.

Амплитуда вибраций вызываемых неуравновешенностью деталей пропорциональна квадрату числа оборотов, отсюда граница применимости статической и динамической балансировки определяются не только отношением длины детали “ $l$ ” к ее диаметру “ $D$ ”, но и быстроходностью

детали. Эта зависимость может быть представлена следующей диаграммой, рис. 8.3:

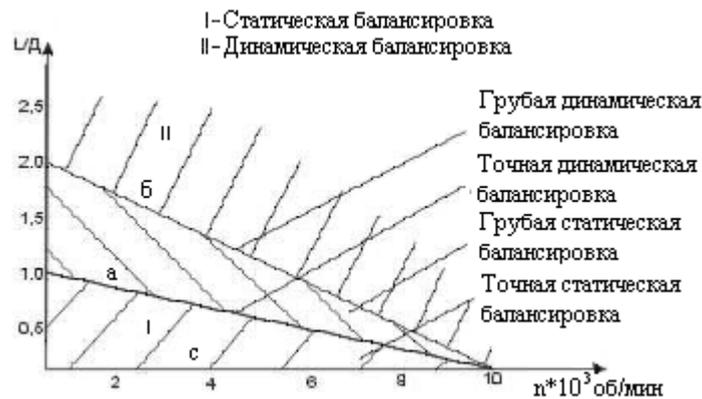


Рис. 8.3. Диаграмма областей балансировок.

Под граничными прямыми (а) и (б) находится область статической балансировки, выше этих прямых – область динамической балансировки. Причем нижняя прямая (а) соответствует балансировке точных машин, верхняя – более грубым машинам.

### 8.1. Статическая балансировка.

При несовпадении центра тяжести диска с осью вращения за счет наличия избыточной массы  $\Delta G$  на расстоянии  $x$  от оси возникает центробежная сила  $C$ .  $C = \frac{\Delta G}{g} * x * \left(\frac{\pi * n}{30}\right)^2$ . [G] - кг; [x] - м; [n] – об/мин.

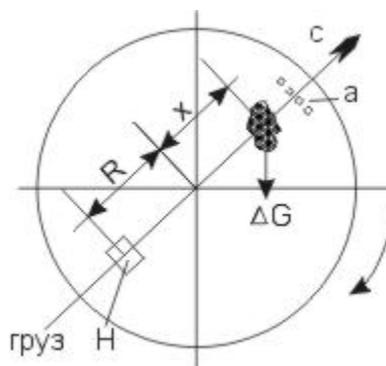


Рис. 8.4. Схема статической балансировки.

Силу “С” уравновешивают грузом (Н) располагающемся на одном диаметре с “С” на расстояние “R” от оси, то есть добиваются равенства, рис.8.4:

$$H \cdot R = \Delta G \cdot x$$

Либо балансировку производят снятием металла в точке “а”.  
Уравновешивание производят на призмах, или на роликах; рис. 8.5.

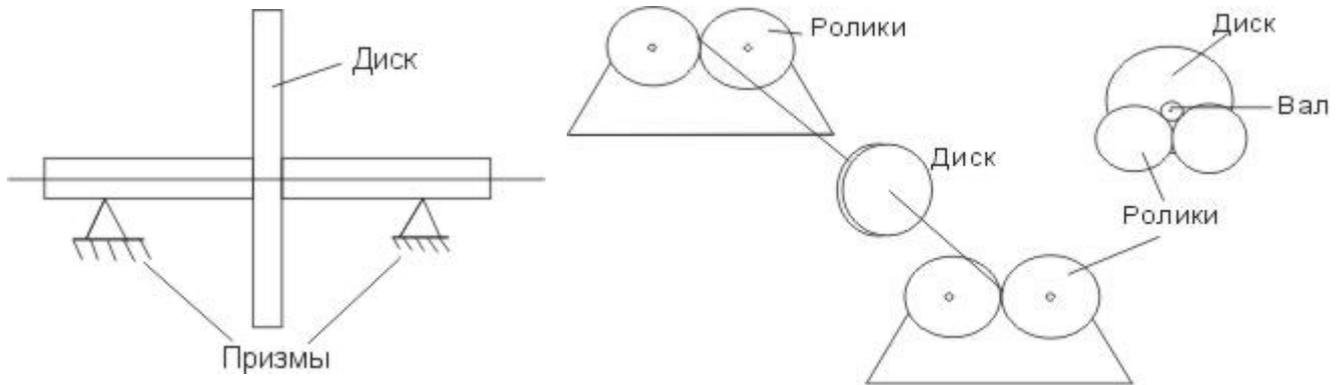


Рис. 8.5. Схема балансировки.

Грубые балансировки проводят без учета трения в призмах, точные – с учетом.

$$\text{Момент трения: } M_{\text{тр}} = G \cdot K,$$

где  $G$  – вес детали,  $K$  – коэффициент трения качения  $K=0,03 \div 0,07$ .

$$C_{\text{ост}} = \frac{M_{\text{тр}}}{g} \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2$$

Пример: При  $\Delta G = 10,0$  гр;  $x=25$  мм и  $n=3000$  об/мин.

$$C_{\text{ост}} = \frac{M_{\text{тр}}}{g} \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 = \frac{0,01}{9,8} * 0,025 * 314 = 2,5 \text{ кг, то есть } C_{\text{ост}} > \Delta G \text{ в } 250 \text{ раз.}$$

Для быстроходных машин ответственного назначения (1 класс)  $C_{\text{ост}} \leq 10\%$  от  $G$ . Для машин малого и среднего веса при  $n \leq 1500$  об/мин (2-ой класс)  $C_{\text{ост}} \leq 20\%$  от  $G$ .

## 8.2. Динамическая балансировка.

Существует два основных способа динамической балансировки:

- 1) способ максимальных отметок;
- 2) способ обхода грузом.

По первому способу у каждой опоры выбирают открытые участки вала  $l=50-60$  мм, которые окрашивают меловой краской. Пускают машину до рабочих

оборотов. К покрашенной части вала подводится чертилка и делается 3-5 параллельных рисок. Риски получаются не круговые, а только со стороны возмущающей центробежной силы.

Риски потом делятся пополам и проводится образующая, а от нее луч по торцу цилиндра, рис 8.6:



Рис. 8.6. Схема динамической балансировки.

Откладывая назад по вращению вала угол  $\beta$ .  $\beta=(180-\alpha)$ , находят угол  $\alpha$ , угол приложения уравновешивающего груза  $H$  и наличия избыточной массы.

$\alpha$  – угол отстаивания вектора изгиба вала от вектора неуравновешенной силы.

Так же поступают при балансировке стороны II. Более точные балансировки проводятся с помощью виброскопов для точного замера амплитуды вибрации –  $a_{ост}$ , мкм.

При динамической балансировке  $C_{ост} \leq 2\%$  от веса ротора  $G$ /

Допуски по амплитуде вибрации следующие:

для машин 1-го класса  $a_{ост} \leq 0,06$  мм (60 мкм);

для машин 2-го класса  $a_{ост} \leq 0,1$  мм (100 мкм).

Точная балансировка – залог бесшумной и долговечной работы машины.

## Глава 9. Испытание емкостной аппаратуры.

Заключительный этап процесса ремонта, имеет цель проверки герметичности и прочности аппаратов. Аналогичным испытаниям подвергается и новая аппаратура. Испытание проводятся с учетом возможных наиболее тяжелых условий работы.

Аппараты, работающие под давлением нетоксичных, инертных сред испытываются пробным давлением  $P_{\text{проб}} = 1,5 P_p$ , при рабочем давлении  $P_p$  до 5 атм, при  $P_p > 5$  атм,  $P_{\text{пр}} = 1,25 P_p$ . Если под давлением находятся токсичные и взрывоопасные вещества, то аппараты испытываются  $P_{\text{проб}}=2 P_p$ .

Если аппараты работают под разным давлением в различных местах, то они проверяются, испытываются с учетом  $P_p$  – наибольшее.

Степень герметичности при испытании аппаратуры определяется по формуле:  $n = \frac{100}{\tau} \left( 1 - \frac{P_2 \cdot T_2}{P_1 \cdot T_1} \right)$ , %

где  $T_1$  и  $P_1$  – температура ( $^{\circ}\text{K}$ ) и давление ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ) в начале испытания;  
 $T_2$  и  $P_2$  – температура ( $^{\circ}\text{K}$ ) и давление ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ) в конце испытания;  
 $t$  – продолжительность испытаний в часах  $\approx 24$  часа.

Эта формула для случая переменной температуры.

Для постоянной температуры  $n = \frac{P_1 - P_2}{P_1 \cdot \tau} \cdot 100\%$

Герметичность считается удовлетворительной, если падение давления за 1 час не превышает 0,2 % (для новых аппаратов) и 0,5% - для периодически испытываемых аппаратов. Для межцеховых трубопроводов  $D_{\text{вн}}$  до 250 мм с токсичными и горючими газами  $n = 0,1\%$ , с инертными газами  $n=0,2\%$ . При диаметре трубопровода  $D_{\text{вн}} > 250$  мм вводится коэффициент:

$$K = 250/D_{\text{вн., мм}} < 1 \quad (n = 0,2/K).$$

Испытание аппаратов, работающих под вакуумом ведут гидравлическим способом с  $P_{\text{проб}} = 2 \text{ кгс}/\text{см}^2$  и пневматическим (воздухом или инертным газом) под давлением  $1 \text{ кгс}/\text{см}^2$  с обмыливанием сварных швов и разъёмных соединений (точность способа – до  $0,001 \text{ л}/\text{сек} \cdot \text{мм. рт. ст.}$ ).

Выбор способа испытаний – гидравлический или пневматический производится из следующих соображений:

- 1) Безопасность проведения испытаний (лучше гидравлический);
- 2) Влияние на опоры и строительные элементы.
- 3) Состояние атмосферных условий (замерзание воды и др.);
- 4) Влияние компримированного вещества на последующую работу аппарата (сушка, взрывоопасность и др.).

Чаще проводят испытания гидравлическим способом, наиболее безопасным. Пневматические испытания проводят в присутствии представителей по ТБ и котлонадзора, если это оборудование котлонадзора. Выявленные дефекты устраняются только после снятия давления. Результаты ремонта и испытания оформляются соответствующими документами и прилагаются к паспорту аппарата.

## **Глава 10. Основы проектирования и эксплуатации оборудования при работе с делящимися материалами.[3,22,23,24]**

### **10.1 Теоретические основы**

#### **Деление ядер**

Источником энергии во всех действующих в настоящее время ядерных реакторах является деление некоторых тяжелых ядер. Деление представляет собой процесс расщепления ядра  $(Z, A)$  ( $Z$ -заряд и  $A$ -массовое число атомного ядра) на два ядра  $(Z_1, A_1)$  и  $(Z_2, A_2)$ , называемых осколками деления:



При этом  $Z_1 + Z_2 = Z$ ;  $A_1 + A_2 = A$ .

Различают самопроизвольное (спонтанное) деление и вынужденное деление атомных ядер. Спонтанным называют такое деление, которое происходит без предварительного возбуждения атомных ядер. Вынужденное деление ядер обусловлено внешним воздействием и может производиться нейтронами, заряженными частицами,  $\gamma$ -квантами и другими излучениями.

Спонтанное деление энергетически выгодно для ядер, для которых  $Z^2/A > 17$ , однако обнаружено оно было только для самых тяжелых из существующих в природе элементов тория, урана. Если  $Z^2/A < 49$ , деление, хотя и энергетически выгодно, но маловероятно, так как развалу ядра препятствует барьер деления  $W_f$ , возникающий в процессе колебательного изменения формы ядра. Барьер деления сравнительно велик, поэтому вероятность квантово-механического эффекта проникновения сквозь барьер (т.е. туннельного эффекта) исключительно мала. Например, среднее время жизни ядра  $U^{238}$  по отношению к спонтанному делению составляет  $\sim 10^{16}$  лет, а для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  еще больше. В принципе спонтанное деление может служить источником нейтронов, инициирующим цепную реакцию в ядерном реакторе.

Деление ядер нейтронами может быть как пороговым, так и беспороговым. К беспороговому делению способны нечетные изотопы тяжелых элементов;  $^{233}U$ ,  $^{235}U$ ,  $^{239}Pu$ ,  $^{241}Pu$ . Их называют делящимися нуклидами. В природе существует только изотоп  $^{235}U$ , причем в очень небольших количествах – 0,72%.

Остальные делящиеся изотопы могут быть созданы искусственным путем при захвате нейтронов четными изотопами урана или тория. Четные изотопы тяжелых элементов:  $^{232}Th$ ,  $^{238}U$  и т.д. имеют порог деления. В ядерных реакторах эти изотопы используются для получения нового ядерного горючего, т.е. для его воспроизводства. Способность ядер к пороговому или беспороговому делению зависит от соотношения между энергией возбуждения, выделяющейся при захвате нейтронов ядрами, и высотой барьера деления. Так, например, барьер деления ядра  $^{235}U$  составляет 6 МэВ, а энергия, высвобождающаяся при захвате теплового нейтрона ядрами  $^{235}U$ , равна 6,5 МэВ. Барьер деления для ядра  $^{239}U$  6 МэВ, а энергия присоединения нейтрона к ядру  $^{238}U$  примерно 5 МэВ, т.е. меньше барьера деления.

Особенностью реакций деления тяжелых ядер является огромная энергия, высвобождающаяся в этом процессе. Так, при делении ядер  $U^{235}$

тепловыми нейтронами полная выделяющаяся энергия составляет  $(202,8 \pm 0,4)$  МэВ. Важнейшей особенностью реакций деления, благодаря которой оказалось возможным осуществление цепной реакции, является испускание в процессе деления нескольких новых вторичных нейтронов. Экспериментально было показано, что новые нейтроны образуются не непосредственно в процессе деления, а при испускании их возбужденными осколками деления, которые, должны быть сильно перегружены нейтронами.

Критичность и основные факторы, влияющие на нее.

Ядра тяжелых элементов, поглощая нейтрон, распадаются на несколько ядер-осколков, причем при распаде испускаются два-три вторичных нейтрона. Вторичные нейтроны могут быть захвачены другими ядрами этих элементов с последующим их делением и испусканием новых вторичных нейтронов. Таким образом, появляется возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции деления атомных ядер. Процесс деления сопровождается выделением большого количества энергии и радиоактивных излучений.

Для осуществления цепной реакции деления используют изотопы  $U^{233}$  и  $U^{235}$ , а также  $Pu^{239}$ , которые называют делящимися изотопами, а вещества, содержащие их, делящимися веществами. Часть системы, где находятся делящиеся вещества и где осуществляется цепная реакция деления, образует активную зону, а слой материалов, окружающих зону, отражатель.

Не все вторичные нейтроны, возникающие в процессе деления, захватываются делящимися изотопами. Часть их теряется в результате вылета из системы (утечка нейтронов), часть захватывается ядрами неделящихся элементов, которые присутствуют в виде конструкционных материалов, примесей и т.д. Поэтому для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции требуется, чтобы утечка нейтронов из системы и поглощение их неделящимися элементами не превышали определенной величины.

Удобной величиной, используемой для анализа системы с делящимися веществами, является эффективный коэффициент размножения  $K_{эфф}$ , равный

отношению числа нейтронов 1-го поколения к числу нейтронов (i-1)-го поколения. Если  $K_{эфф} = 1$ , то количество нейтронов в системе остается неизменным, т. е. сохраняется баланс нейтронов.

Образование = утечка + поглощение.

Состояние системы при  $K_{эфф} = 1$  называют критическим, а значения параметров, характеризующих ее состав и размеры, при которых достигается это состояние, критическими параметрами (критическая масса, критический объем, критические размеры активной зоны, критическая концентрация делящегося вещества). При  $K_{эфф} < 1$  самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна (подкритическое состояние), при  $K_{эфф} > 1$  интенсивность цепной реакции с течением времени экспоненциально возрастает (надкритическое состояние).

Вторичные нейтроны, испускаемые при делении, имеют среднюю энергию 2 Мэв. Цепная ядерная реакция может вызываться быстрыми, промежуточными и тепловыми нейтронами. Быстрыми нейтронами называют нейтроны с энергией более 100 кэв, промежуточными - с энергией от 100 кэв до тепловой, тепловыми нейтронами называют нейтроны, кинетическая энергия которых около 0,025 эв. Чтобы цепная реакция проходила в основном на тепловых или промежуточных нейтронах, необходимо присутствие в активной зоне значительного количества замедлителя, т. е. элементов, при соударении с ядрами которых нейтроны теряют значительную часть своей первоначальной энергии. Для протекания цепной реакции на быстрых нейтронах необходимо, чтобы в активной зоне не было замедлителей нейтронов.

Самоподдерживающаяся цепная реакция деления возможна только тогда, когда количество делящегося вещества равно критической массе или больше ее. Это количество зависит от ряда факторов, которые рассмотрены ниже.

**Форма активной зоны.** Форма активной зоны оказывает большое влияние на утечку нейтронов из системы. Известно, что утечка нейтронов будет тем больше, чем больше отношение площади наружной поверхности

активной зоны к ее объему. Следовательно, при уменьшении линейных размеров активной зоны увеличивается доля нейтронов, вылетающих из нее, так как поверхность уменьшается пропорционально квадрату, а объем - пропорционально кубу линейных размеров. Из правильных геометрических тел одинакового объема наименьшим отношением площади наружной поверхности к объему обладает сфера. Поэтому наименьшую критическую массу и критический объем имеют системы с активной зоной в форме сферы.

Для цилиндрической активной зоны наименьшую критическую массу и критический объем имеет зона в форме примерно равностороннего цилиндра, т. е. цилиндра, у которого высота равна диаметру, а для активной зоны в форме параллелепипеда - в виде куба, так как равносторонний цилиндр и куб наиболее близки по форме к сфере. При значительном отклонении формы активной зоны от сферической критическая масса и критический объем сильно возрастают. Так, например, для водных растворов урана с водяным отражателем, когда отношение высоты к диаметру активной зоны изменяется от 0,2 до 4, критическая масса возрастает почти в 1,8 раза по сравнению с критической массой равностороннего цилиндра. При соответствующем радиусе активной цилиндрической зоны или высоте активной зоны в форме плоского слоя утечка нейтронов из системы становится настолько большой, что при дальнейшем уменьшении радиуса или высоты цепная реакция становится невозможной при любом количестве делящегося вещества в системе. Соответствующий радиус активной цилиндрической зоны называют критическим радиусом бесконечного цилиндра, а высоту активной зоны в форме плоского слоя - критической высотой плоского бесконечного слоя.

Действие отражателей. При наличии отражателя часть вылетающих из активной зоны нейтронов возвращается обратно после столкновений с материалом отражателя. Таким образом, присутствие отражателя приводит к уменьшению вылета нейтронов из активной зоны, а следовательно, к уменьшению критических параметров системы. Вылет нейтронов из

активной зоны уменьшается при увеличении толщины отражателя. При этом наиболее эффективно действует первый слой отражателя толщиной порядка длины миграции быстрого нейтрона в отражателе. Для отражателя из воды эта толщина около 6 см, для отражателя из графита примерно 50 см, для бетона около 30 см. Дальнейшее увеличение толщины отражателя приводит к незначительному уменьшению критических параметров.

Рассмотрим две критические системы, у которых активные зоны имеют форму сфер, причем составы активных зон у обеих систем одинаковы. Системы различаются тем, что одна из них имеет отражатель, а другая нет. Тогда вследствие наличия отражателя критический радиус активной зоны у первой системы будет на  $\gamma$  см меньше, чем у второй. Если отражателем является слой воды толщиной более 20 см, а активная зона заполнена раствором обогащенного урана, величина  $\gamma$  равна 3,3 см. Причем значение  $\gamma$  слабо зависит от концентрации урана в растворе при изменении ее в пределах от 20 до 300 г/л. При изменении кривизны поверхности активной зоны величина  $\gamma$  изменяется, но при тех радиусах кривизны, которые наиболее часто встречаются на практике (от 15 см до бесконечности), этим изменением можно пренебречь. При малых толщинах отражателя, например при толщине водяного или стального отражателя менее 1 см, величина  $\gamma$  прямо пропорциональна толщине отражателя.

Эффективность действия отражателей возрастает с уменьшением размеров активной зоны, так как при малых размерах роль утечки нейтронов возрастает. Для металлического  $U^{235}$  и плутония лучшими материалами для отражателя служат бериллий, окись бериллия, естественный уран. Так, критическая масса системы из металлического урана 93,5%-ного обогащения равна 52 кг без отражателя и 8,9 кг, когда эта система имеет отражатель из окиси бериллия. Для систем, активная зона которых заполнена водными растворами делящихся веществ, лучшими материалами для отражателя являются бериллий, окись бериллия, вода, тяжелая вода, графит. Отражатели из тяжелой воды и графита менее эффективны, чем вода, при небольших

толщинах отражателя (5—10 см) и более эффективны при больших толщинах отражателя. рис.10.1 Отражатели из стали и воды по эффективности примерно одинаковы для систем с растворами делящихся веществ. Отражатель наиболее эффективно действует в том случае, когда он находится в непосредственном контакте с активной зоной. Даже небольшое расстояние между активной зоной и отражателем значительно увеличивает критические размеры системы.

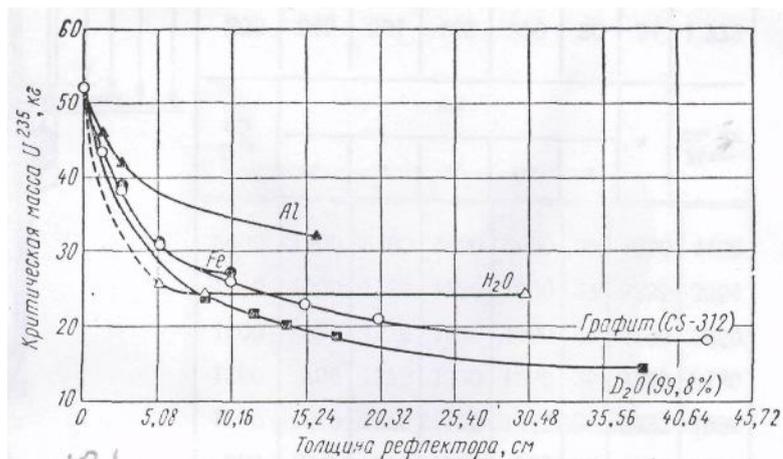


Рис. 10.1. Влияние различных отражателей на критическую массу  $U^{235}$  (обогащение 93,5%, плотность  $U^{235}$  18,8 г/см<sup>3</sup>)

На предприятиях, перерабатывающих ядерное горючее, наиболее распространенными материалами, которые могут выполнять роль отражателя, являются вода, сталь, бетон. Необходимо отметить, что на заводах почти не встречается систем без отражателя, так как технологические аппараты обычно имеют толстые стальные стенки (0,5-1 см), всевозможные охлаждающие оболочки и т. д. Кроме того, стены и пол помещений, в которых расположено технологическое оборудование, также выполняют роль частичных отражателей. Поэтому при установлении норм загрузки технологического оборудования почти всегда считается, что это оборудование имеет хороший водяной отражатель. Так как наличие отражателя уменьшает критические размеры системы, то часто возникает задача уменьшения эффективности действия отражателей. Этого можно достичь путем помещения на границе между активной зоной и отражателем

слоя материалов, хорошо поглощающих нейтроны, в частности кадмия или бора.

**Плотность системы.** Критические параметры системы уменьшаются при увеличении плотности активной зоны и отражателя. Уменьшение плотности всей системы в  $k$  раз приводит к увеличению критических размеров также в  $k$  раз, критического объема в  $k^3$  раз и критической массы в  $k^2$  раз. Это справедливо, если при уменьшении плотностей системы отношение плотностей активной зоны и отражателя остается постоянным.

При изменении плотности только одной активной зоны (при постоянной плотности отражателя) для сфер с водяным замедлителем и водяным отражателем существует следующая зависимость критической массы от плотности: рис.10.2

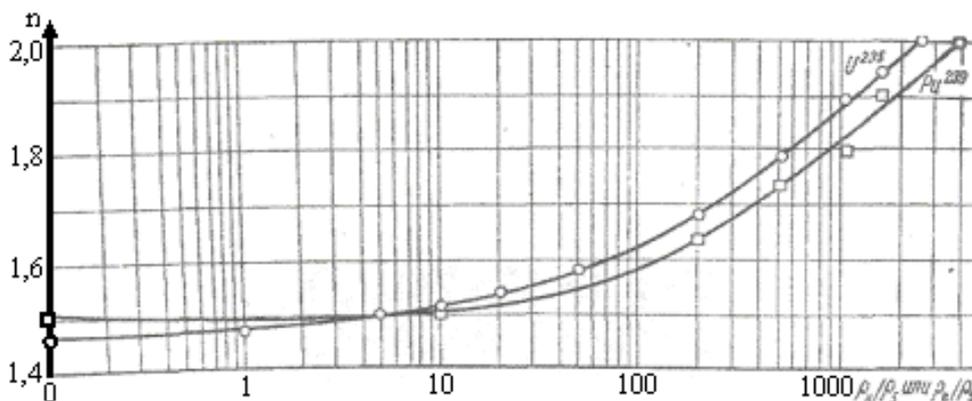


Рис. 10.2. Показатель степени  $n$  для определения критических масс урана и плутония в активной сферической зоне с водяными замедлителем и отражателем.

Критическая масса  $\sim$  (плотность активной зоны) $^{-n}$ , где показатель степени  $n$  меняется от 1,5 до 2 в зависимости от отношения числа атомов водорода к числу атомов делящегося изотопа ( $\rho_H/\rho_5$  или  $\rho_H/\rho_9$ ) в активной зоне.

**Действие замедлителей.** Если в активной зоне присутствуют ядра легких элементов, то при столкновении с этими ядрами нейтроны деления замедляются, т. е. они постепенно теряют свою энергию. Наиболее быстро уменьшается энергия нейтронов при соударении их с ядрами самых легких элементов, следовательно, она зависит от содержания в активной зоне таких

элементов, как водород, бериллий, углерод. При достаточно малой относительной концентрации делящегося вещества и малом сечении поглощения нейтронов в замедлителе практически все нейтроны поглощаются только после того, как они достигнут теплового равновесия со средой. Дальнейшее уменьшение концентрации делящегося вещества не приводит к уменьшению средней энергии нейтронов, а лишь увеличивает относительный захват нейтронов неделяющимися изотопами.

Сечения поглощения нейтронов ядрами делящегося изотопа и последующий процесс деления этого ядра сильно зависят от энергии нейтронов. Обычно чем меньше энергия нейтронов, тем больше сечение деления, что приводит к существенному уменьшению критической массы системы. Так, например, для уран-водных систем в зависимости от содержания водорода в активной зоне критическая масса изменяется от 22 кг (металл) до 0,8 кг (растворы), несмотря на существенное уменьшение плотности делящегося вещества в активной зоне.

**Действие поглотителей.** Для систем с замедлителем введение поглотителей в активную зону увеличивает критические размеры. Поглотители можно вводить как гомогенным способом в виде различных растворов и порошков, так и гетерогенным способом в виде всевозможных поглощающих вставок (стержни, пластины, змеевики и т. д.). Почти в каждом делящемся веществе, поступающем на переработку, имеются элементы, поглощающие нейтроны. Например,  $U^{238}$  может рассматриваться как поглотитель тепловых нейтронов. Для сильно разбавленных растворов существенным становится поглощение нейтронов водородом среды. Однако для значительного увеличения критических размеров применяют элементы, обладающие большой способностью поглощать нейтроны, в частности бор, кадмий и др.

Гомогенно введенный поглотитель более эффективен по своему действию, чем гетерогенный, при одинаковых их весах. Это связано с тем, что в гетерогенном поглотителе существует так называемый эффект блокировки, который заключается в том, что наиболее эффективно работают только

внешние слои поглотителя, а внутренние слои частично или полностью экранированы внешними. При гомогенном введении поглотителя эффект блокировки отсутствует, но в этом случае часто усложняется технологический процесс переработки ядерного горючего, так как на конечных стадиях переработки необходимо отделение поглощающего элемента от делящегося вещества.

Эффективность действия гетерогенных поглотителей в первом приближении пропорциональна площади внешней поверхности поглотителя. Так, эффективность цилиндрических поглощающих стержней возрастает с увеличением радиуса стержня по линейному закону. Эффективность центрально расположенного стержня в цилиндрической системе уменьшается при увеличении радиуса активной зоны. Для систем без отражателя эффективность центрального одиночного стержня в первом приближении обратно пропорциональна квадрату радиуса активной зоны. Когда в аппарате находится один поглощающий стержень, то целесообразно поместить его в центре, так как в этом случае он будет наиболее эффективен. При размещении нескольких стержней в аппарате необходимо учитывать, что эффективность каждого из них меньше эффективности центрального одиночного стержня, и она будет зависеть от числа стержней и их взаимного расположения.

Поглотители можно использовать для обеспечения ядерной безопасности только после экспериментальной проверки их эффективности. Особенно целесообразно введение гетерогенных поглотителей для увеличения значений минимальных критических параметров (минимальных объема и радиуса бесконечного цилиндра). Так, например, введение борного стержня диаметром 58 мм увеличивает минимальный критический радиус бесконечного цилиндра с водяным отражателем для азотнокислых растворов урана с 8 до 10 см.

В реальных системах при разбавлении активной зоны происходит одновременно как изменение замедления и поглощения, так и изменение

плотности. Чтобы представить себе действие этих факторов в совокупности, рассмотрим, как будут меняться критические параметры активной сферической зоны из  $\text{PuO}_2$  при добавлении в нее воды. При этом будем считать, что система всегда остается гомогенной. Когда добавляют небольшое количество воды, то как критическая масса, так и критический объем увеличиваются. На этой стадии эффект изменения плотности плутония преобладает, а дополнительное замедление оказывает малое влияние. Однако когда отношение числа атомов водорода к числу атомов плутония становится больше четырех, действие замедлителя начинает сказываться и критическая масса уменьшается, хотя критический объем продолжает увеличиваться. При  $(\rho_{\text{H}}/\rho_5)=10\text{—}20$  замедление вызывает также и уменьшение объема. Дальнейшее добавление воды уменьшает критическую массу до тех пор, пока она не достигнет минимума. После этого добавление воды вызывает увеличение критической массы, так как начинает сказываться поглощение нейтронов водородом, и при  $(\rho_{\text{H}}/\rho_5) > 2800$  критическая масса и критический объем становятся бесконечными, так как в этом случае доля нейтронов, поглощаемая водородом, настолько велика, что коэффициент  $K_{\text{эфф}}$  становится меньше единицы и цепная реакция невозможна.

**Гетерогенность системы.** Критические массы систем, в которых делящиеся вещества находятся в виде стержней, блоков и т. д. (гетерогенные системы), отличаются от критических масс гомогенных систем. Критические массы гетерогенных систем при обогащениях урана более 5% превышают критические массы гомогенных систем. При обогащениях урана менее 5%, наоборот, критические массы меньше в гетерогенных системах, чем в гомогенных.

**Взаимодействие.** При наличии ряда емкостей с делящимися веществами необходимо рассматривать условия критичности всей системы емкостей в целом, а не только каждой отдельной емкости. Это связано с тем, что существует нейтронное взаимодействие между емкостями, так как часть нейтронов, вылетающих из одной емкости, попадает в другую и там вызывает

деления. Это приводит к тому, что значение  $K_{эфф}$  системы емкостей будет больше, чем  $K_{эфф}$  отдельных емкостей, из которых состоит система. Коэффициент  $K_{эфф}$  всей системы возрастает при увеличении числа емкостей и уменьшении расстояний между ними.

#### Особенности делящихся веществ.

На заводах при переработке делящихся материалов встречается большое количество всевозможных соединений и смесей, в состав которых входят делящиеся материалы (плутоний, уран с различным обогащением изотопом ( $U^{235}$  и  $U^{233}$ )). Наиболее часто делящиеся материалы встречаются в виде следующих продуктов:

- а) металлы;
- б) химические соединения ( $UO_2$ ,  $U_3O_8$ ,  $UC$ ,  $UF_4$ ,  $UF_6$ ,  $PuO_2$  и т. д.);
- в) водные растворы и водородсодержащие смеси;
- г) безводные смеси с большим количеством неделящихся изотопов.

Остановимся кратко на некоторых особенностях перечисленных продуктов.

**Металлы.** Металлические соединения имеют большую плотность делящегося материала, поэтому критические размеры таких систем очень малы. Так, например, критический объем сферы из плутония при наличии водяного отражателя равен всего 0,3 л. Необходимо отметить, что критическая масса металлического урана сильно растет с уменьшением обогащения и при обогащении ниже 5% обращается в бесконечность.

Таблица 10.1: Критические параметры делящихся веществ в виде металлов

Критический параметр	$U^{235}$	$U^{233}$	$Pu^{239}$
Масса сферы, кг	22,8	7,5	5,6
Диаметр бесконечного цилиндра, см	7,8	4,8	4,3
Толщина бесконечной пластины, см	1,5	0,7	0,6

В табл. 10.1. приведены основные критические параметры систем с обыкновенным водяным отражателем, активная зона которых состоит из

металлического  $U^{238}$ ,  $U^{233}$  и  $Pu^{239}$  (плотность урана  $18,8 \text{ г/см}^3$ , плутония  $19,6 \text{ г/см}^3$ ).

**Химические соединения.** Для этих соединений характерно то, что их плотность ( $3—13 \text{ г/см}^3$ ) значительно меньше плотности металлического урана, и поэтому все критические параметры их больше соответствующих параметров для металлов. Наличие в этих соединениях незначительного количества других элементов (кислород, фтор, углерод и т. д.) не приводит к заметному замедлению нейтронов, а следовательно, не уменьшает критическую массу. Но присутствие в них даже небольших количеств водородсодержащих веществ (вода, HF, парафин, глицерин) может сильно уменьшить критические параметры, что особенно относится к соединениям урана невысокого обогащения.

**Водные растворы и водородсодержащие смеси.** На химических предприятиях по переработке ядерного горючего часто встречаются растворы и водородсодержащие смеси делящихся веществ. Для растворов и водородсодержащих смесей имеется наибольшее количество экспериментальных и расчетных данных.

Величина критической массы сильно зависит от концентрации водорода в этих соединениях. Концентрация водорода обычно выражается в виде отношения числа атомов водорода к числу атомов делящегося вещества. Эта величина может изменяться в пределах от нуля для металла или сухой безводной соли до нескольких тысяч для разбавленных водных растворов.

При уменьшении концентрации делящегося вещества вначале происходит резкое уменьшение критической массы. Затем критическая масса проходит через минимум (минимальная критическая масса), а после этого начинает возрастать. При определенной, очень низкой концентрации делящегося вещества (минимальная критическая концентрация) критическая масса возрастает до бесконечности. Это значит, что при такой концентрации поглощение нейтронов неделящимися изотопами настолько велико, что цепная реакция становится невозможной. Минимальная критическая концентрация для

растворов соответствует отношению числа атомов водорода к числу атомов делящегося изотопа, равному 2800 для плутониевых систем и 2200 — для урановых ( $U^{235}$ ).

Критические объем сферы, радиус бесконечного цилиндра и высота плоского бесконечного слоя также сильно зависят от концентрации водорода. Аналогично минимальной критической массе для растворов существуют минимальные критические объем сферы, радиус бесконечного цилиндра и высота бесконечного плоского слоя при определенных отношениях числа атомов водорода к числу атомов делящегося изотопа. Необходимо отметить, что эти отношения значительно меньше тех, при которых наблюдается минимальная критическая масса сферы. Так, например, минимум критической массы для растворов  $U^{235}$  с активной зоной в форме сферы отмечается при отношении числа атомов водорода, к числу атомов  $U^{235}$ , равном 500, а минимум критического объема при отношении, равном примерно 50.

В табл.10.2 приведены критические параметры систем, содержащих растворы делящихся веществ, при наличии бесконечного водяного отражателя.

Таблица 10.2

Критические параметры растворов делящихся веществ

Критический параметр	$U^{235}$	$U^{233}$	$Pu^{239}$
Критическая масса, кг	0,82	0,59	0,51
Диаметр бесконечного цилиндра, см	13,7	11,2	12,4
Толщина бесконечной плиты, см	4,3	3,0	3,3
Критический объем, л	6,3	3,3	4,5

При цилиндрической форме активной зоны критические масса и объем зависят не только от концентрации водорода в активной зоне, но и от

диаметра активной зоны. Для каждого диаметра существуют свои минимальные значения критических массы и объема, соответствующие определенным концентрациям водорода, в активной зоне. Например, для растворов  $UO_2F_2$  93%-ного обогащения при активной цилиндрической зоне из нержавеющей стали диаметром 20,3 см с полным водяным отражателем минимальная критическая масса  $U^{235}$  равна примерно 1,4 кг, а для активной зоны диаметром 16,5 см равна 3,2 кг.

Критические параметры систем, содержащих водные растворы урана, увеличиваются с уменьшением обогащения урана. В водных растворах урана при обогащении его менее 1 % цепная ядерная реакция становится вообще невозможной. Подобным же образом критические параметры водных растворов плутония возрастают при наличии в растворе  $U^{238}$ . Присутствие азота в нитратных растворах, которые часто используют при химической переработке, увеличивает критические параметры растворных систем, особенно для растворов урана невысокого обогащения. Критические параметры водородсодержащих систем зависят также от плотности делящегося вещества. Повышение плотности его приводит к уменьшению критических параметров.

Безводные смеси с большим содержанием неделящихся элементов.

Встречающиеся на предприятиях безводные смеси с большим содержанием неделящихся веществ имеют весьма разнообразный химический состав. Среди них есть смеси, в состав которых входят в большом количестве элементы, являющиеся хорошими замедлителями (в частности, углерод). В настоящее время имеется очень мало экспериментальных и расчетных данных по критическим параметрам смесей с большим содержанием неделящихся элементов. Критические параметры таких смесей обычно больше, чем у водородсодержащих систем. Так, например, минимальная критическая масса смеси  $U^{235}$  с графитом с графитовым отражателем составляет около 1,5 кг, а для водных растворов  $U^{235}$  с водным отражателем - 0,8 кг.

Так как в большинстве случаев в состав смесей, с которыми приходится иметь дело на предприятиях, входят неделящиеся элементы, которые по своим ядерным свойствам (замедление, поглощение нейтронов) хуже углерода, то критические параметры таких смесей будут больше параметров смесей делящихся веществ с углеродом. Поэтому последние часто могут служить нижним пределом при оценке критических параметров безводных смесей с большим содержанием неделящихся элементов.

#### Формула четырех сомножителей

Основная величина, определяющая развитие цепной ядерной реакции деления – эффективный коэффициент размножения  $K_{эфф}$ . По физическому смыслу как это было отмечено выше  $K_{эфф}$  есть отношение числа нейтронов в данном поколении к числу нейтроне в предыдущем поколении. Если  $K_{эфф} = 1$ , то в реакторе протекает стационарная цепная реакция; если  $K_{эфф} > 1$ , то ядерная реакция развивается и поток нейтронов и мощность реактора растут; если  $K_{эфф} < 1$ , то ядерная цепная реакция затухает, поток нейтронов и мощность уменьшаются.

Рассмотрим коэффициент размножения для бесконечной системы  $k_{\infty}$ , когда можно не учитывать вылета нейтронов из реактора, В этом случае он характеризует свойства среды, заполняющей реактор. Тогда эффективный коэффициент размножения конечной среды  $K_{эфф}$  определяется формулой (1):

$$K_{эфф} = k_{\infty} p_{зам} p_{диф} , \quad (10.1)$$

где  $p_{зам}$  - вероятность того, что нейтрон избежит утечки из реактора в процессе замедления, а  $p_{диф}$  - вероятность того, что нейтрон избежит утечки из реактора в процессе диффузии.

Сначала введем коэффициент размножения для гомогенной среды, в которой равномерно размещены ядерное горючее, замедлитель, теплоноситель и конструкционные материалы. Пусть реактор работает на уране без примеси других делящихся нуклидов и в единице его объема содержится  $N_5$  ядер  $U^{235}$ ,  $N_8$  ядер  $U^{238}$  и  $N_1$  ядер различных компонентов замедлителя, теплоносителя и

конструкционных материалов. Тогда при захвате теплового нейтрона в уране образуется  $\eta$  быстрых нейтронов деления (10.2):

$$\eta = \frac{\nu_{f5} \cdot \sigma_{f5} \cdot N_5}{\sigma_5 \cdot N_5 + \sigma_8 \cdot N_8}, \quad (10.2)$$

где  $\nu_{f5}$ - среднее число нейтронов, образующихся при делении ядра  $U^{235}$ ;  $\sigma_{f5}$ ,  $\sigma_5$ - сечение деления и полное сечение захвата для  $U^{235}$ ;  $\sigma_8$  - сечение захвата для  $U^{238}$ .

Быстрый нейтрон может вызвать деление  $U^{238}$ . Учтем увеличение эффективного числа быстрых нейтронов, образующихся в результате этого процесса коэффициентом  $\epsilon > 1$ . Далее, быстрые нейтроны начинают замедляться и могут поглотиться резонансным образом. Обозначим вероятность избежать резонансного захвата  $\phi$ .

Замедлившись до тепловых энергий, нейтроны начинают диффундировать. В процессе диффузии нейтроны могут поглотиться в различных веществах. Назовем коэффициентом использования тепловых нейтронов  $\theta$  вероятность того, что тепловой нейтрон захватится в уране, а не в других веществах. Тогда (10.3):

$$\theta = \frac{\sigma_5 N_5 + \sigma_8 N_8}{\sigma_5 N_5 + \sigma_8 N_8 + \sum_i \sigma_i N_i}, \quad (10.3)$$

причем в знаменателе формулы суммирование производится по сортам всех ядер, находящихся в реакторе, т. е. по ядрам конструкционных материалов, замедлителя, теплоносителя и введенного для регулирования цепной реакции поглотителя.

Как следует из формулы,  $\theta$  растет с увеличением концентрации урана, стремясь в пределе к единице.

По физическому смыслу коэффициент размножения  $K$  есть произведение:

$$K_{\infty} = \eta \epsilon \phi \theta. \quad (10.4)$$

В литературе эта формула известна как *формула четырех сомножителей*. Рассмотрим более подробно каждый из сомножителей, учитывая возможную гетерогенную структуру размещения материалов в реакторе.

#### Число быстрых нейтронов

Число быстрых нейтронов зависит от обогащения ядерного топлива  $^{235}\text{U}$ . Для чистого  $^{235}\text{U}$   $\eta \sim 2,08$ ; для естественного урана, когда  $N_5/N_8 = 0,714 \cdot 10^{-2}$ ,  $\eta_{\text{ест}} \sim 1,34$ . Если в реакторе имеется один тип тепловыделяющих элементов, то гетерогенная структура никак не сказывается на формуле (10.1) для  $\eta$ . Если в реакторе имеется смесь блоков разной конструкции или с разным изотопным составом, то формула (10.1) превращается в следующую (10.5):

$$\eta = \frac{\nu_{f5} \sum_k (\sigma_{f5}^k N_5^k n^k)}{\sum_k (\sigma_{f5}^k N_5^k + \sigma_8^k N_8^k) n^k}, \quad (10.5)$$

где  $n^k$  - средняя плотность тепловых нейтронов на поверхности твэла типа  $k$ ; суммирование проводится по всем типам твэлов. Величины  $N_5^k$ ,  $N_8^k$ ,  $\sigma_5^k$ ,  $\sigma_8^k$ , характеризуют твэл типа  $k$ , причем три последних из них могут зависеть от типа  $k$  из-за различия спектров нейтронов в разных твэлах, что приводит к изменению эффективных сечений.

#### Размножение на быстрых нейтронах

Размножение на быстрых нейтронах обусловлено  $^{238}\text{U}$ . Усредненное по спектру деления сечение деления  $^{238}\text{U}$  есть  $\sigma_{f5} = 0,29$ . Коэффициент  $\varepsilon$  зависит от геометрии твэла, так как этой геометрией определяется вероятность того, что быстрый нейтрон до выхода из твэла провзаимодействует с  $\text{U}^{238}$ . Для сплошного цилиндра радиусом  $r$  ( $r < 1$  см), состоящего из естественного урана (10.6):

$$\varepsilon = 1 + 0,02r, \quad (10.6)$$

где  $\gamma$  дан в сантиметрах. Формула (10.6) справедлива в том случае, когда можно пренебречь вероятностью попадания быстрого нейтрона деления из одного блока в другой и считать, что размножение на быстрых нейтронах обусловлено нейтронами, родившимися только в данном блоке. Если же расстояние между блоками существенно меньше длины рассеяния в среде между блоками, то прежде, чем замедлиться, до энергии ниже порога деления  $^{238}\text{U}$ , быстрый нейтрон пройдет через несколько твэлов. Эмпирическая формула расчета коэффициента размножения на быстрых нейтронах для реакторов типа ВВЭР имеет вид (10.7):

$$\varepsilon \approx 1 + 0,22(N_8/N_H), \quad (10.7)$$

где  $N_8/N_H$  — отношение числа ядер  $^{238}\text{U}$  к числу ядер водорода.

Вероятность избежать резонансного поглощения

В реакторе, работающем на естественном или слабо обогащенном уране, основное резонансное поглощение происходит в  $^{238}\text{U}$ , сечение которого имеет много резонансов.

Резонансное поглощение *определяется резонансным интегралом I*, который имеет вид (10.8):

$$I = \int_{E_{zp}}^{E_0} \sigma(E) \frac{dE}{E}, \quad (10.8)$$

где  $E_0$  - энергия нейтронов деления. Формула получена из следующих соображений. Во-первых, резонансный, интеграл описывает поглощение нейтронов во всем энергетическом интервале замедления нейтронов; следовательно,  $I$  должен представляться как интеграл по энергиям. Во-вторых, в процессе замедления, энергетическое распределение нейтронов пропорционально  $1/E$ .

Вероятность избежать резонансного поглощения  $\phi$  следующим образом выражается через резонансный интеграл  $I$  и замедляющую способность среды  $\zeta \cdot \Sigma_s$  (10.9) :

$$\phi = \exp[-(\zeta \Sigma_s)^{-1} \Sigma N_i I_i], \quad (10.9)$$

где  $I_i$  - резонансный интеграл ядер сорта  $i$ ;  $N_i$  - число ядер этого сорта в единице объема реактора; суммирование проводится по всем сортам ядер, обладающим резонансным поглощением.

Резонансное поглощение для *гомогенной* и *гетерогенной* систем существенно разное.

В *гомогенной системе*, когда ядра урана равномерно размещены по всему объему реактора, все ядра находятся в одинаковых условиях. С ростом концентрации  $^{238}\text{U}$  резонансный интеграл уменьшается. Этот – эффект, называемый *блокировкой резонансных уровней*, обусловлен тем, что при увеличении концентрации часть резонансных нейтронов, ранее поглощавшихся данным ядром, будет поглощаться другими ядрами. Но макроскопическое поглощение резонансных нейтронов при росте  $N_8$  концентрации ядер  $^{238}\text{U}$  будет все же расти (но слабее, чем линейным образом) и общая вероятность избежать резонансного захвата  $\phi$  будет падать.

В *гетерогенной системе* при тех же средних концентрациях  $^{238}\text{U}$  по объему реактора резонансное поглощение меньше, чем в соответствующей гомогенной системе. Это обусловлено двумя эффектами. Во-первых, большая часть нейтронов проходит резонансную область в замедлителе вдали от  $^{238}\text{U}$  и не захватывается резонансным образом. Во-вторых, в гетерогенной системе более существенна блокировка резонансных уровней, чем в гомогенной системе - до ядер  $^{238}\text{U}$ , расположенных в центральной части блока, резонансные нейтроны практически не доходят.

#### Коэффициент теплового использования

Коэффициент  $\theta$  вычисляется по формуле (10.3), которая в гомогенном случае (когда плотность нейтронов в ядрах всех сортов одинакова) предельно проста. Усложнения наступают в гетерогенном случае, когда ядерное горючее располагается в виде отдельных твэлов, окруженных замедлителем. Учесть изменение плотности нейтронов по твэлу можно путем введения коэффициентов внутренней экранировки. Этот коэффициент характеризует отношение плотности нейтронов на границе твэла к средней по твэлу.

Распределение плотности нейтронов по замедлителю зависит от свойств замедлителя, характеристик твэлов и частоты их расположения.

Коэффициент размножения для гомогенной системы, определяемый формулой четырех сомножителей как функция отношения  $N_{\text{зам}}/N_{\text{U}}$ , имеет максимум. Это обусловлено тем, что с ростом  $N_{\text{зам}}/N_{\text{U}}$   $\theta$  падает, а  $\varphi$  увеличивается.

Зависимость коэффициента размножения от степени обогащения

Для естественного урана, содержащего  $\sim 0,71\%$   $^{235}\text{U}$  и  $\sim 99,29\%$   $^{238}\text{U}$ , коэффициент размножения оказывается весьма низким, что позволяет использовать в виде замедлителя лишь графит или тяжелую воду. Для повышения коэффициента размножения в энергетических реакторах используют обогащенный уран.

Для того чтобы установить зависимость коэффициента размножения от обогащения удобно ввести относительное поглощение нейтронов ядрами сорта  $i$ , равное (10):

$$q_i = \sigma_i N_i / \sigma_5 N_5, \quad (10.10)$$

Тогда, воспользовавшись формулами (10.2) и (10.3) для, можно переписать (10.4) в виде (10.11):

$$K = \frac{\nu_{f5} \sigma_{f5} / \sigma_5 \varepsilon \varphi}{1 + q_8' + \Sigma q_i'}. \quad (10.11)$$

Значения  $K$  приведены в таблице 10.3.

Таблица 10.3.

Зависимость коэффициента размножения от обогащения.

Обогащение, $10^2 N_5 / N_8$	$1+q_8'+\Sigma q_i'$	$K_{\infty}$	Обогащение, $10^2 N_5 / N_8$	$1+q_8'+\Sigma q_i'$	$K_{\infty}$
0,714	1,650	1,10	3,0	1,155	1,57
1,0	1,465	1,24	4,0	1,112	1,63
2,0	1,233	1,47	5,0	1,093	1,66

## 10.2 Основные принципы обеспечения ядерной безопасности. [22,23]

### 10.2.1 Способы обеспечения ядерной безопасности.

Из рассмотрения условия критичности систем, содержащих ядерноопасные делящиеся материалы, очевидно, что в основе обеспечения ядерной безопасности при переработке, хранении и транспортировке ядерноопасных делящихся материалов лежат два способа:

Ограничение размера и формы оборудования, в котором находится ядерноопасный делящийся материал;

Ограничение количества или концентрации ядерноопасных делящихся материалов; на форму и размеры аппарата или упаковки ограничения не накладываются. При этом необходимо, чтобы характеристики, влияющие на критические параметры (химический и изотопный составы ядерноопасного делящегося вещества, его агрегатное состояние, плотность и размещение, количество и размещение, параметры отражателей и др.), находились в строго определённых пределах.

Ядерная безопасность может быть обеспечена одним из приведённых выше способов или их комбинацией.

С точки зрения ядерной безопасности первый способ представляется наиболее предпочтительным: не требует контроля количества ядерноопасных делящихся материалов, вероятность возникновения СЦР практически отсутствует, но с точки зрения экономики, технологии применение этого способа зачастую не оправданно. При использовании второго способа или в сочетании его с первым вероятность возникновения СЦР возрастает, поэтому необходим контроль установленных норм по количеству или концентрации ядерноопасных делящихся материалов. Несмотря на это, второй способ широко применяют. Очевидно, что способ обеспечения ядерной безопасности следует выбирать в каждом конкретном случае, исходя из соображений минимально допустимого риска. При современном уровне развития атомной промышленности обеспечить ядерную безопасность только техническими средствами не представляется возможным; наряду с

ними широко применяют меры административного контроля за установленными нормами.

#### 10.2.2 Допустимые и безопасные параметры.

Очевидно, что для безопасной работы с ядерноопасными делящимися веществами параметры оборудования должны быть меньше критических. На практике в качестве нормативных параметров ядерной безопасности используют: количество, концентрацию и объем ядерноопасного делящегося материала; диаметр оборудования, имеющего цилиндрическую форму; толщину плоского слоя для оборудования, имеющего форму пластины.

Нормативный параметр (норму) устанавливают исходя из допустимого параметра, который меньше критического и не должен быть превышен при эксплуатации оборудования. При этом необходимо, чтобы характеристики, влияющие на критические параметры находились в строго определенных пределах. Используются следующие допустимые параметры: количество  $M_d$ , объем  $V_d$ , диаметр  $D_d$ , толщина слоя  $\tau_d$ .

Используя зависимость критических параметров от концентрации ядерноопасного делящегося нуклида, можно определить такое значение критического параметра, ниже которого при любой концентрации СЦР невозможна. Так, для растворов солей плутония и обогащенного урана критические масса, объем, диаметр бесконечного цилиндра, толщина бесконечного плоского слоя имеют ярко выраженный минимум в области оптимального замедления. Для смесей металлического обогащенного урана с водой критическая масса, как и для растворов, имеет ярко выраженный минимум в области оптимального замедления, а критические объем, диаметр бесконечного цилиндра, толщина бесконечного плоского слоя при высоком обогащении ( $\geq 35\%$ ) имеют минимальные значения при отсутствии замедлителя ( $p_n/p_5=0$ ); для обогащения ниже 35% критические параметры смеси имеют минимум при оптимальном замедлении.

Очевидно, что параметры, установленные исходя из минимальных критических параметров, обеспечивают безопасность во всем интервале изменения концентрации. Эти параметры называются безопасными, они меньше минимальных критических параметров. Используются следующие безопасные параметры: количество  $M_6$ , концентрация  $C_6$ , объем  $V_6$ , диаметр  $D_6$ , толщина слоя  $\tau_6$ . Таким образом, при обеспечении ядерной безопасности системы по допустимому параметру обязательно ограничивается концентрация делящегося нуклида (иногда количество замедлителя), в то же время при использовании безопасного параметра никаких ограничений на концентрацию (или по количеству замедлителя) не накладывается.

### 10.2.3 Коэффициенты запаса.

В предыдущем параграфе указывалось, что допустимые и безопасные параметры должны быть меньше соответствующих критических и минимальных критических параметров. Отношение критического или минимального критического параметра к соответствующему допустимому или безопасному параметру называется коэффициентом запаса.

Величиной, характеризующей степень подкритичности системы с ядерноопасными делящимися материалами, является  $K_{эф}$ . В настоящее время требуется, чтобы  $K_{эф} \leq 0,95$ , а коэффициенты запаса по массе, объему, размеру были не ниже следующих значений:

Допустимое количество .....	2,1
Безопасное количество .....	2,1
Безопасная концентрация .....	1,3
Допустимый объем .....	1,1
Безопасный объем .....	1,1
Допустимый диаметр .....	1,1
Безопасный диаметр .....	1,1
Допустимая толщина слоя .....	1,1
Безопасная толщина слоя .....	1,1

С помощью коэффициентов запаса и данных по критическим параметрам легко определить допустимые и безопасные параметры.

Необходимо, однако, отметить, что пользоваться этими коэффициентами надо осторожно:  $K_{эф}$  больших систем, например систем, содержащих низкообогащенный уран, в результате уменьшения критических параметров в соответствии с приведенными коэффициентами снижается незначительно и может превысить 0,95 в результате незначительного изменения условий (взаимодействия с другими аппаратами, наличия отражателей, ошибочных анализов и др.).

Поэтому одновременно должны выполняться два требования: коэффициенты запаса в оборудовании должны соответствовать приведенным значениям и  $K_{эф}$  оборудования не превышать 0,95.

#### 10.2.4 Нормативные параметры ядерной безопасности

В тех случаях, когда ядерная безопасность оборудования обеспечивается ограничением по размеру, можно пользоваться безопасными или допустимыми параметрами  $V_d, V_b, D_d, D_b, \tau_d, \tau_b$ . Введения дополнительных нормативных параметров для размеров и объема не требуется, так как размер можно измерить с незначительной погрешностью, которой можно пренебречь.

При установлении нормативных параметров для количества ядерноопасного делящегося материала или его концентрации необходимо учитывать погрешность определения количества или концентрации (которая в зависимости от технологии может быть весьма значительной), а также наличие ядерноопасного делящегося материала в оборудовании за счет остатков, образования осадков, отложений на поверхности аппаратов. Это количество называется закладкой, а его нормативное значение — нормой закладки  $N_3$ . С учетом приведенных выше факторов для оборудования, в котором ядерная безопасность обеспечивается

ограничением количества ядерноопасного делящегося материала или его концентрации, вводят нормативные параметры:

*норму загрузки (комплектации)  $M_3$ :*

$$M_3(1+\Delta M/100)+H_3(1+\Delta H/100)\leq M_d(M_6), \quad (10.12)$$

где  $\Delta M$  и  $-\Delta H$  суммарные погрешности, %, определения нормы загрузки, определенные с доверительной вероятностью 0,95;

*норму накопления  $M_n$ :*

$$M_n\leq M_d(M_6)/(1+\Delta/100), \quad (10.13)$$

где  $\Delta$  — суммарная погрешность, %, определения нормы накопления, определенная с доверительной вероятностью не менее 0,95;

*норму концентрации  $C_n$ :*

$$C_n\leq C_6/(1+\Delta_c/100), \quad (10.14)$$

где  $\Delta_c$  — суммарная погрешность определения концентрации ядерноопасного делящегося нуклида, определенная с доверительной вероятностью не менее 0,95, %.

Если ядерная безопасность в аппарате обеспечивается поддержанием нормы концентрации, норма закладки не должна превышать 5% минимальной критической массы для данного аппарата. В выражениях (10.12)-(10.14) значения погрешностей могут быть приняты равными нулю, если погрешность измерения параметра не превышает 2%.

#### 10.2.5 Классификация оборудования и транспортных установок

Оборудование, в котором перерабатывается ядерно-опасный делящийся материал, разделяется на три категории.

Безопасное оборудование (Б), конструкция которого исключает возможность возникновения СЦР при любых предвидимых условиях.

Опасное оборудование (О), конструкция которого не исключает возможности возникновения СЦР при нарушении установленных

нормативных параметров ядерной безопасности, в основе которых лежит количество или концентрация ядерноопасного делящегося материала.

Оборудование с повышенным коэффициентом запаса (ПКЗ), особенности конструкции и эксплуатации которого при работе с заданными ядерноопасными делящимися материалами обеспечивает значение минимальной критической массы, превышающее не менее чем в 5 раз минимальную критическую массу ядерно-опасных делящихся нуклидов для того же материала, но в системе, имеющей форму сферы, окруженной плотноприлегающим отражателем из воды толщиной не менее 25 см. Для аппаратов с повышенным коэффициентом запаса при расчете безопасного количества устанавливается коэффициент запаса 3,3, а при расчете безопасной концентрации 2. Оборудование с повышенным коэффициентом запаса также относится к опасному оборудованию.

При хранении и транспортировке делящихся материалов используют понятия: упаковочный комплект, упаковка, группа упаковок.

Упаковки с ядерноопасными делящимися материалами, предназначенные для транспортировки между предприятиями, с точки зрения ядерной безопасности классифицируются на классы следующим образом:

I — ядернобезопасные в любом количестве, при любом размещении и в любых предвидимых условиях транспортировки;

II — ядернобезопасные при ограниченном числе упаковок, произвольном размещении и любых предвидимых условиях транспортировки;

III — ядернобезопасные при всех предвидимых условиях транспортировки в результате особых мер предосторожности или в результате специальных административных средств контроля, установленных при транспортировке.

## 10.2.6 Общие принципы обеспечения ядерной безопасности

1. Ядерная безопасность в аппаратах, содержащих ядерноопасные делящиеся материалы, обеспечивается: — геометрической формой аппарата и его размерами;

ограничением количества ядерноопасных делящихся нуклидов в аппарате;

ограничением концентрации ядерноопасных делящихся нуклидов в аппарате;

использованием гомогенных или гетерогенных поглотителей нейтронов;

ограничением изотопного или нуклидного состава ядерноопасного делящегося материала;

ограничением количества замедлителя;

ограничением, налагаемым на отражатель;

комбинацией приведенных выше способов и ограничений;

использованием технических мер контроля параметров, влияющих на ядерную безопасность.

2. В опасных и с повышенным коэффициентом запаса аппаратах ядерная безопасность обеспечивается (О и ПКЗ):

в опасных аппаратах (О) установлением норм загрузки (накопления) с одновременным ограничением концентрации ядерноопасного делящегося нуклида, если норма загрузки (накопления) установлена исходя из допустимого количества. Если норма загрузки (накопления) установлена исходя из безопасного количества, то концентрация ядерноопасного делящегося нуклида не регламентируется;

в аппаратах с повышенным коэффициентом запаса (ПКЗ) установлением нормы загрузки (накопления) ядерноопасного делящегося материала исходя из безопасного количества;

в опасных и с повышенным коэффициентом запаса аппаратах установлением нормы концентрации ядерно-опасных делящихся нуклидов; норма загрузки (накопления) при этом не устанавливается.

3. Ядерная безопасность может обеспечиваться техническими и административными мерами. Под техническими мерами следует понимать меры, действие которых происходит независимо от воли человека (например, автоматическое закрытие клапана на линии подачи раствора ядерноопасного делящегося материала при достижении заданного уровня раствора в емкости). Под административными мерами следует понимать меры, принимаемые обслуживающим персоналом. Например, аппаратчик, производя загрузку в реактор, должен следить за тем, чтобы не была превышена заданная норма загрузки. При обеспечении ядерной безопасности приоритет должен отдаваться техническим мерам.

4. При работе с ядерноопасными делящимися материалами следует выполнять требования:

использовать опасное оборудование (О и ПКЗ) только в сочетании с установкой средств контроля параметров ядерной безопасности, дополнительных блокировок и ограничений норм загрузок; использовать технические средства не только для контроля загрузки, накопления и концентрации ядерно-опасных делящихся нуклидов в оборудовании, но также для контроля других ограничений, накладываемых условиями безопасности;

исключать конструктивно или с помощью блокировок попадание в опасном количестве водородсодержащих веществ в технологические аппараты и места хранения, где согласно требованиям безопасности их не должно быть;

предусматривать технические меры, исключаяющие попадание ядерноопасных делящихся материалов в опасном количестве во вспомогательное оборудование и коммуникации;

размещение оборудования необходимо рассчитывать с учетом нейтронного взаимодействия, наличия отражателей, коммуникаций с ядерноопасными делящимися материалами, при этом  $K_{эф}$  всей системы не должно превышать 0,95;

в случаях, когда ядерная безопасность обеспечивается ограничением размера системы, допуск на изготовление аппаратов не должен приводить к превышению допустимых (безопасных) или установленных размеров;

если условия производства гарантируют соблюдение установленных параметров при нормальных и аварийных условиях эксплуатации, то можно определять нормы, исходя из допустимых параметров, в противном случае следует исходить из безопасных параметров; если в технологической цепочке осуществляется непрерывный процесс, все аппараты, входящие в цепочку, в которых может находиться ядерноопасный делящийся материал (с учетом возможных аварий), должны относиться к безопасному типу либо для них должны быть установлены нормы концентрации;

если из безопасного аппарата ядерноопасный делящийся материал может попасть в опасный аппарат, то для безопасного аппарата должна быть установлена норма такая же, как и для опасного; если технология такова, что в аппаратах (например, в сборнике растворов после мойки оборудования) могут находиться растворы, концентрация ядерноопасного делящегося нуклида в которых не превышает безопасной концентрации для данного аппарата, то для него устанавливается норма концентрации, в противном случае в аппарате (например, в реакторе-растворителе, реакторе-осадителе и др.) безопасность обеспечивается либо установлением только нормы загрузки в случае, если концентрация меняется в широком интервале, либо установлением нормы загрузки с дополнительным ограничением концентрации, которая по условию технологии не может быть превышена, например в сборник десорбатов;

обеспечение ядерной безопасности должно быть предусмотрено как при нормальном ведении технологического процесса, так и при всех единичных предвидимых отклонениях и нарушениях;

ядерная безопасность отдельной упаковки достигается ограничением по одному из параметров:  $M_{\partial}$ ,  $M_{\bar{\partial}}$ ,  $C_{\bar{\partial}}$ ,  $V_{\partial}$ ,  $V_{\bar{\partial}}$ ,  $D_{\partial}$ ,  $D_{\bar{\partial}}$ ,  $\tau_{\partial}$ ,  $\tau_{\bar{\partial}}$ . Значение  $K_{эф}$  при этом должно быть не более 0,95. Расчет допустимых и безопасных параметров проводился с учетом полного отражателя, а также предвидимых аварийных ситуаций при хранении и транспортировке;

анализ ядерной безопасности упаковки при транспортировке между предприятиями должен проводиться в соответствии с результатами моделирования повреждений в аварийных ситуациях, полученными при испытаниях или на основании расчетов.

5. Рассмотрение ядерной безопасности технологических аппаратов, упаковок, установок, технологических линий хранилищ следует начинать с изучения технологии и пределов изменения технологических параметров. Должны быть определены условия, для которых необходимо обеспечивать ядерную безопасность. Первоочередное внимание должно быть уделено;

изотопному составу ядерноопасного делящегося вещества (обогащение урана, состав плутония);

типу соединения ядерноопасного делящегося вещества (соль, окисел, нитрид, карбид, металл);

агрегатному состоянию ядерноопасного делящегося материала (раствор, порошок). Особо следует обратить внимание на аппараты, в которых агрегатное состояние в технологическом процессе в рабочих или аварийных режимах изменяется (растворители, осадители, печи и др.);

физическим характеристикам системы: плотности материалов, размещению ядерноопасных делящихся материалов, количеству и размещению поглотителей, характеристикам отражателей, наличию нейтронного взаимодействия;

возможности перемещения материалов во время работы и связанным с этим изменениям.

Выбранная для рассмотрения система должна иметь такие приведенные характеристики, чтобы ее критические параметры были заведомо ниже, чем у реальной системы.

6. При рассмотрении вопросов ядерной безопасности должны быть тщательно проанализированы аварийные ситуации и возможные изменения параметров, которые влияют на критичность системы:

изменение формы и размеров за счет деформации, коррозии, повреждения аппарата или контейнера;

увеличение массы ядерноопасного делящегося материала в результате ошибок персонала;

изменение параметров замедления в результате неточности приборов или химических анализов, затопления или орошения, ошибочной постановки в группу контейнеров с ядерноопасным делящимся материалом, контейнеров с водородсодержащими материалами, попадания в группу снега, масла, дерева и др., выпаривания или вытеснения замедлителя, осаждения ядерно-опасных делящихся материалов из растворов; изменение количества или размещения поглотителя вследствие потери твердого поглотителя из-за коррозии или растворения, потери замедлителя, входящего в конструкцию поглощающей ловушки, перераспределения поглотителя и делящегося материала вследствие осаждения одного из них в растворе;

изменение характеристик отражателя в результате увеличения его толщины вследствие появления дополнительных отражателей (вода, люди), потери поглотителя в составе отражателя;

изменение нейтронного взаимодействия между аппаратами и отражателями в результате введения дополнительных емкостей или отражателей, потери замедлителя или поглотителя между аппаратами, разрушения каркаса, предназначенного для фиксации положения емкостей;

увеличение плотности ядерноопасного делящегося материала;

установка в группу емкостей, содержащих ядерноопасные делящиеся материалы, в количестве большем, чем разрешено, вследствие ошибки персонала; эффекты, которые могут привести к увеличению размеров емкостей, утечке раствора на пол или в емкость, где делящегося материала не должно быть, растворению поглотителей нейтронов, разрушению полок, перегородок, приводящему к увеличению нейтронного взаимодействия, экстракции ядерных материалов или перевод их в труднообнаруживаемые соединения, к увеличению параметра замедления за счет поглощения воды из атмосферы;

пожар, который может привести к изменению размеров, геометрии, параметров замедления, физических характеристик системы;

ошибки персонала: повторная загрузка или несоблюдение интервалов между загрузками, неверное опознание материала; неправильное переключение вентилей в технологической цепочке, следствием чего, может быть перекачка ядерноопасного делящегося материала в опасную емкость; закачка в емкость с ядерноопасным делящимся материалом воды или масла и др.; внесение замедлителя в систему за счет ошибочного использования деревянных или пластиковых контейнеров и других упаковочных материалов, содержащих водород; отбор непредставительных проб; неправильная запись в технологических журналах; изменение в оборудовании ремонтниками, о котором не поставлен в известность сменный персонал;

тепловые эффекты, которые могут привести к упариванию до опасной концентрации; замораживанию, которое изменяет концентрацию ядерноопасных делящихся материалов; конденсации, вызывающей изменение параметра замедления в холодильном оборудовании; тепловому удару, вызывающему повреждение оборудования; механические эффекты: превышение нагрузки на полки стеллажей, приводящее к уменьшению

заданного расстояния между упаковками или их разрушению вследствие падения;

наличие сифонов, перепускных клапанов, вентилей, вакуумных трубопроводов и трубопроводов для химических реагентов, связывающих безопасные и опасные емкости;

разрушения, вызванные бурей, землетрясением, транспортными авариями;

воздействие движущегося оборудования (ленточные транспортеры, гидравлические подъемники или автопогрузчики) на размещение, геометрию, взаимодействие делящихся материалов и отражение нейтронов в складских помещениях в цепочках боксов.

7. Особое внимание следует уделять транспортировке между предприятиями. Хотя многие принципы обеспечения безопасности при всех видах работ с ядерноопасными делящимися материалами одни и те же, следует иметь в виду, что при транспортировке между предприятиями отсутствуют технические средства контроля количества продуктов, не исключена возможность дорожной аварии с труднопредсказуемыми последствиями, продукт попадает в руки неквалифицированного в вопросах ядерной безопасности персонала.

10.2.7 Примеры использования нормативных, допустимых и безопасных параметров при обеспечении ядерной безопасности.[22]

Пример 1. Необходимо сконструировать безопасный сборник для сбора растворов от травления твэла азотной кислотой, обогащение урана 20%. В результате аварии возможно затопление емкости водой, растворение твэла, при этом концентрация урана в растворе может достигать максимального значения. По условиям технологии достаточно иметь объем сборника 50 л. Желательно иметь емкость цилиндрической геометрии..

*Решение.* В связи с тем, что концентрация урана в сборнике может изменяться в широком диапазоне и сборник может быть залит водой, надо

исходить из минимальных значений критического диаметра бесконечного цилиндра с бесконечным водяным отражателем и материального параметра. Находим необходимые данные (см. рис. 2.30 и 2.31[22]):  $(B^2_m)_{\max} = 0,019 \text{ см}^{-2}$ ;  $K_\infty=1,645$ ;  $M^2=33,4 \text{ см}^2$ .

Минимальный критический диаметр бесконечного цилиндра с бесконечным водяным отражателем согласно данным, приведенным на рис. 2.28, равен 20 см.

Безопасный диаметр равен соответственно  $20/1,1= 18,2 \text{ см}$ . Определим высоту сборника из условия, что-объем его равен 50 л:  $H=192,6 \text{ см}$ . Эффективная добавка к радиусу цилиндра равна  $2,405/\sqrt{(B^2_m)_{\max}} - 10 = 7,31 \text{ см}$ .

Проверим выполнение условия  $K_{\text{эф}} < 0,95$ :

$$B_g^2 = \left( \frac{2,405}{9,1 + 7,31} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{192,6 + 14,62} \right)^2 = 0,0217 \text{ см}^{-2};$$

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_\infty}{1 + B_g^2 M^2} = 0,954,$$

т. е. второе требование не выполняется.

Уменьшим диаметр емкости до 17,5 см, тогда высота будет равна 208 см, а  $K_{\text{эф}}=0,937$ , т. е. меньше 0,95.

Сборник диаметром 17,5 см и высотой 208 см в рассматриваемом случае относится к безопасному оборудованию, так как его размеры определены исходя из безопасного диаметра.

Пример 2. В реакторе, представляющем собой цилиндр диаметром 20 и высотой 80 см, происходит растворение в азотной кислоте соли урана с обогащением 95%. Норма закладки в реакторе установлена равной 100 г  $^{235}\text{U}$  с погрешностью 15% (доверительная вероятность 0,95). Норма загрузки урана на растворение определяется с помощью взвешивания с погрешностью не более 10% (доверительная вероятность 0,95). Рабочее положение реактора — вертикальное. Реактор оборудован рубашкой для пароводяного подогрева. Определить норму загрузки в реактор.

*Решение.* Очевидно, что диаметр и объем реактора превышают безопасные значения. Так как в реакторе происходит растворение, разумно предположить, что концентрация урана в растворе может меняться в широких пределах, поэтому норму загрузки надо определять исходя из безопасного количества Мб. Результаты расчета минимальной критической массы в реакторе сведены в табл. 10.4.

$$B_g^2 = \left( \frac{2,405}{10 + 7,31} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{h + 9,96} \right)^2;$$

Таблица 10.4.

Зависимость  $M_{кр}^{235U}$  и других параметров в реакторе  
от высоты залива  $h$

$h, \text{ см}$	$B_g^2, \text{ см}^2$	$C_{кр}^{235U}$ г/л	$V, \text{ л}$	$M_{кр}^{235U}$ г
20	0,03029	—	6,28	—
30	0,02548	98,8	9,42	930,6
40	0,02325	71,25	12,56	894,9
50	0,02204	60,8	15,7	954,56.
60	0,02131	57	18,84	1073,8
70	0,02084	55,1	21,98	1211,1
80	0,02051	53,2	25,12	1336,9

$C_{5кр}$  находится из зависимости  $B_m^2$  от  $CU$  (рис. 2.31);  $V = \pi r^2 h$ ;  $r = 10$  см;  $M_{кр} = VC_{5кр}$  при  $h \leq 20$  см;  $B_e^2 > (B_m^2)_{\max} = 0,0279$ , т. е. критические условия недостижимы. Таким образом, минимальное значение критической массы  $(M_{кр})_{\min} = 894,9 \text{ г } ^{235U}$ , а  $M_6 = 894,9 / 2,1 = 426,1 \text{ г } ^{235U}$ ; по формуле (Г1.1) находим, что норма загрузки  $^{235U}$  должна быть не более 283 г.

Реактор относится к опасным аппаратам, так как в случае превышения нормы загрузки в нем возможно возникновение СЦР.  $K_{эф}$  при приведенной выше норме загрузки не превышает 0,95.

Пример 3. Условия задачи те же, что для примера 2, с тем изменением, что емкость используется как сборник раствора и ядерная безопасность обеспечивается в ней поддержанием нормы концентрации, которая определяется с погрешностью 5% (доверительная вероятность 0,95).

*Решение.* Из табл. 10.2.1 находим  $C_{min}=53,2$  г/л  $^{235}U$ , с учетом коэффициента запаса  $C_б=53,2/1,3=40,9$  г/л  $^{235}U$ ; по формуле (10.2.3) находим, что норма концентрации  $^{235}U$  должна быть не более 38,97 г/л. Норма закладки в аппарате не должна превышать 5 % от минимальной критической массы, т. е. 44,74 г  $^{235}U$ .  $K_{эф}$  при вышеприведенной норме концентрации меньше 0,95.

Пример 4. В фильтре типа «Циклон» происходит очистка воздуха от твердых примесей. Фильтр установлен на тракте газоочистки из печи сжигания отходов, содержащих уран с обогащением не более 35%. При нормальном ведении процесса количество урана в циклоне не превышает 2—3 г. Однако при нарушении процесса и при длительной эксплуатации без зачистки в «Циклоне» может скопиться значительное количество урана, что в случае попадания воды в «Циклон» может привести к возникновению СЦР. Фильтр представляет собой цилиндр диаметром 500 мм с коническим днищем и высотой более 1000 мм. Суммарная погрешность определения количества урана в фильтре 200% с доверительной вероятностью 0,95. Определим меры обеспечения ядерной безопасности в фильтре.

*Решение.* Поскольку количество воды нельзя ограничить, следует исходить из значения  $M_б$ . Очевидно, что не имеет смысла производить точный расчет минимальной критической массы в «Циклоне», так как состав смеси точно не известен, возможны локальные скопления и т. д. Будем исходить из минимальной критической массы для смеси воды и

двуокиси урана с обогащением 35% в сфере, окруженной бесконечным водяным отражателем, плотность двуокиси  $10,6 \text{ г/см}^3$ .

Пользуясь данными, приведенными на рис. 2.12,а, находим  $(M_{\text{кр}})_{\text{min}}=1 \text{ кг } ^{235}\text{U}$ ;  $M_6=0,476 \text{ кг } ^{235}\text{U}$ ; по формуле (10.2.2) находим, что норма накопления  $^{235}\text{U}$  должна быть не более 158 г.

«Циклон» относится к опасному оборудованию, так как в случае превышения нормы накопления в нем возможно возникновение СЦР;  $K_{\text{эф}}$  при указанной норме накопления меньше 0,95. Должна быть организована периодическая зачистка фильтра, исключающая возможность превышения установленной нормы накопления.

### 10.3 Проектирование оборудования.

#### Оборудование для транспортировки

Ниже следует обсуждение требований, предъявляемых к транспортировке жидкостей и твердых веществ.

##### *Транспортировка жидкостей.*

В производстве высокообогащенного материала скорости потоков обычно довольно низки, что усложняет конструирование насосов и регулировочных вентилях.

Успешно применялись следующие типы насосов, в которых отсутствует утечка: поршневой насос с диафрагменной головкой, центробежный насос с герметизированным ротором, и барботаж воздухом. Области применения насосов указаны в табл. 10.5. Схема воздушного насоса показана на рис. 10.3.

## ПРИМЕНЕНИЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Область применения	Насос	
	Сильный напор	Слабый напор
Регулируемый поток	Поршневой с диафрагменной головкой	Поршневой с диафрагменной головкой ;барботаж воздухом
Быстрая перекачка пульпы	Центробежный с герметизированным ротором	Центробежный с герметизированным ротором; барботаж воздухом

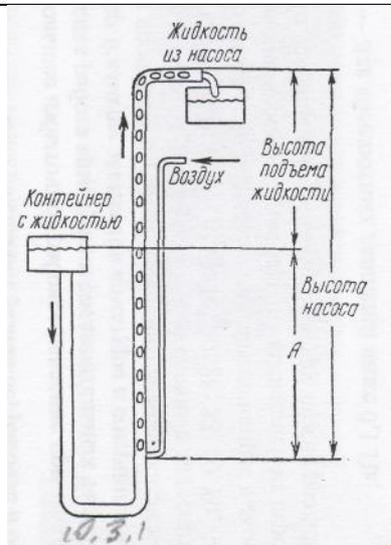


Рис.10.3. Схема работы воздушного насоса

(степень подъема =  $\frac{A - 100}{\text{высота насоса}}$  % ).

С помощью поршневых насосов с диафрагменной головкой достигается точный контроль потока. Однако эти насосы дороги, имеют тенденцию к образованию воздушных пробок при нехватке всасываемой жидкости и недостаточно приспособлены для перекачки жидкостей, содержащих твердые частицы. Центробежные насосы с герметизированным ротором относительно недороги; для них не существует проблемы уплотнения поршня. Однако насосы такой конструкции могут быть серьезно повреждены в результате недостатка всасываемой жидкости или при перекачке жидкостей, содержащих твердые абразивные вещества.

Воздушные насосы (барботаж воздухом) недорогие, имеют простое устройство (рис.10.3.) и практически не требуют обслуживания. Они с успехом применялись для создания контролируемого потока путем регулирования скорости подачи воздуха для перекачки пульпы, содержащей до 20% твердых веществ, и для перекачки кипящих растворов. Они могут быть в любой момент приведены в действие и остановлены, но требуют достаточной степени подъема уровня откачиваемой жидкости над уровнем подачи воздуха, что иногда затрудняет работу вследствие увеличения вертикальных размеров оборудования. Типичные рабочие параметры воздушного насоса приведены на рис. 10.4 и 10.5.

При работе с растворами обогащенного урана рекомендуется доводить до минимума число фланцевых и сварных соединений в трубопроводах, В большинстве случаев подходящим материалом трубопроводов служит нержавеющая сталь . Стыки свариваются дуговым методом в атмосфере гелия. Шариковые вентили из нержавеющей стали с тефлоновым уплотнением относительно недороги, просты в обращении, надежны и не задерживают твердых частиц, в связи с чем они удовлетворяют условиям работы.

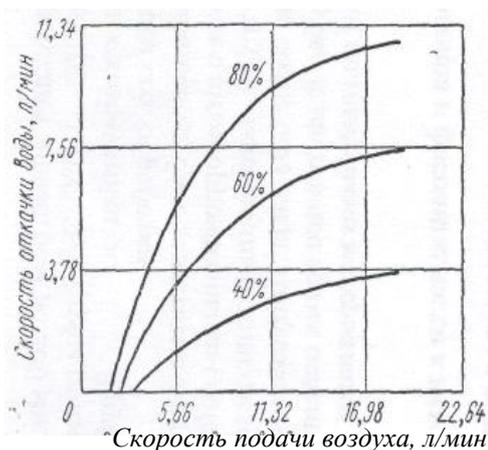


Рис. 10.4. Типичные характеристики воздушного насоса с трубкой диаметром 1,27 см (на кривых указана степень подъема).

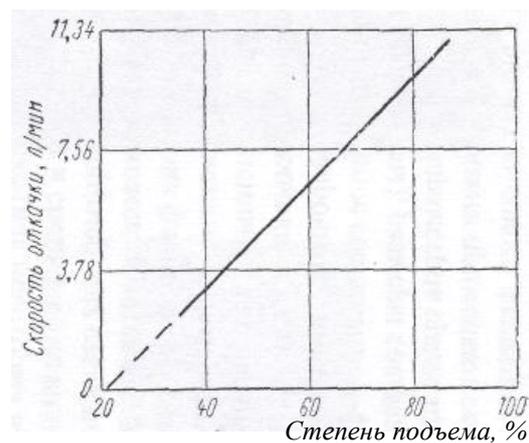


Рис. 10.5. Зависимость скорости откачки воды от степени подъема при постоянной скорости подачи воздуха 14,2 л/мин.

Резьбовые соединения трубопроводов из нержавеющей стали оказались ненадежными, так как в них часто образуются течи. Трубопроводы, из

нержавеющей стали удовлетворяют технологическим условиям, если они хорошо закреплены. Детали трубопроводов из неразмягченного поливинилхлорида коррозионностойки и имеют низкую закупочную цену. Однако требуется большой опыт при проектировании и монтаже таких трубопроводов в связи с трудностями их изготовления и необходимостью надежных креплений и защиты от вибраций. К тому же они не выдерживают высоких температур.

Схема контейнера для транспортировки растворов обогащенного урана показана на рис. 10.6.

*Транспортировка твердых веществ.* При небольших масштабах производства, когда, как правило, используют периодические процессы, уран транспортируют в закрытых контейнерах, размеры которых определяются как концентрацией урана, так и его изотопным составом. На рис.10.7 показана схема тележки с контейнером для перевозки соединений урана.

При осуществлении непрерывного процесса или в том случае когда объем перевозок достаточно велик, транспортировки порошков успешно проводили в атмосфере инертного газа под давлением или в вакууме.

Типичные рабочие параметры для подобной системы сведены в таблице 10.6.

Таблица 10.6.

Типичные рабочие параметры системы вакуумной транспортировки

Вещество	Температура, °С	Расстояние, м	Скорость переноса, кг/мин
UO <sub>3</sub>	21	4,6	6,8
UF <sub>4</sub>	93	4,6	6,4
UF <sub>4</sub>	260	4,6	7,7
UO <sub>2</sub>	21	61	2,0
UF <sub>4</sub>	538	61	1,9

Примечание. Диаметр трубопровода 25,5 мм, размер частиц от -20 до + 40 меш, вакуум 711 – 762 мм рт.ст.

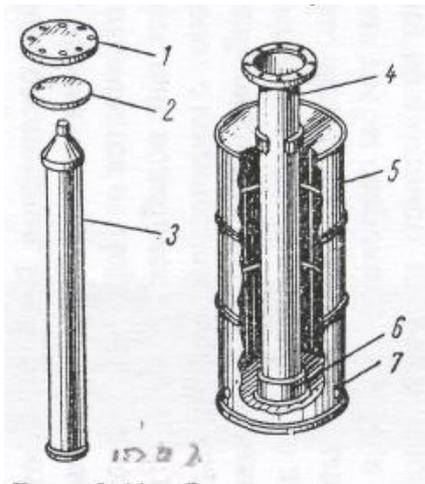


Рис. 10.6. Схема контейнера для транспортировки растворов высокообогащенного урана.

1 — глухой фланец из нержавеющей стали (внутренний диаметр трубы № 40 — 15,2 см); 2 — прокладка из тефлона; 3 — внутренний контейнер из технического полиэтилена (максимальный внутренний диаметр для концентрации урана менее 200 г/л — 13,3 см, для концентрации более 200 г/л — 12,7 см; максимальный объем контейнера — 15 л); 4 — труба № 40 из нержавеющей стали (длина — 127 см); 5 — стальная бочка емкостью 206 л; 6 — стенка трубы толщиной 6,4 мм; 7 — четыре отверстия диаметром 2,54 см (отверстия размещены в шахматном порядке менее чем в 5 см от дна и верха бочки).

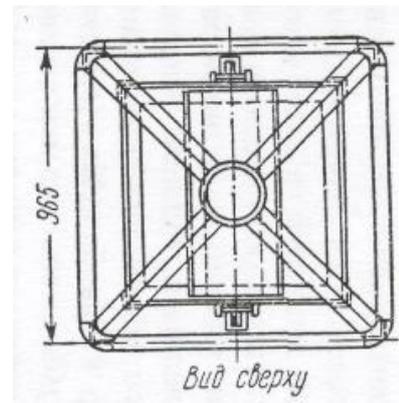
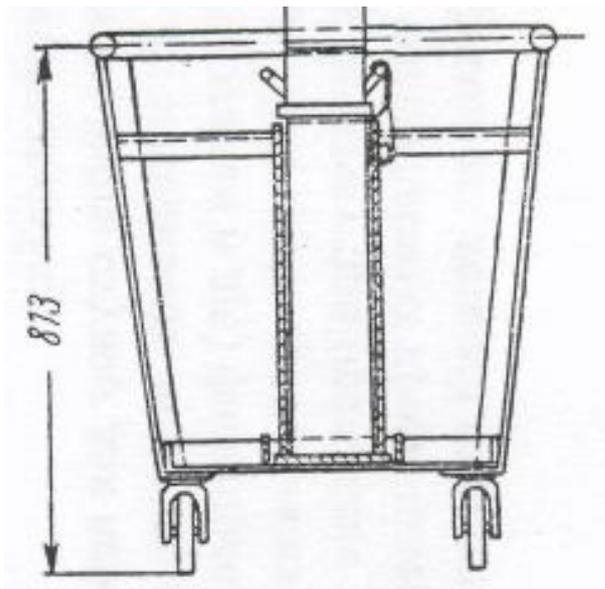


Рис. 10.7. Схема тележки с контейнером для транспортировки соединений урана

*Аппараты для выщелачивания и растворения.* На рис.10.8 показаны конструкционные особенности аппарата для непрерывного растворения. Аппарат является ядернобезопасным при переработке большинства типов отходов, содержащих уран со степенью обогащения  $U^{235}$  до 95%. На рис. 10.9 показана действующая установка, созданная по этому проекту. Колонны для растворения в этой установке изготовлены из труб из нержавеющей стали с номинальным диаметром 15,2 см. Другие элементы установки изготовлены из труб диаметром 10,16 см. Для переработки отходов, содержащих уран с низкой степенью обогащения, могут быть применены трубы больших диаметров. Если растворы обладают повышенными корродирующими свойствами, можно применять трубы, покрытые изнутри тефлоном.

На рис.10.9 показано ограждение для защиты обслуживающего персонала от горячих поверхностей. Теплоизоляция установки отсутствует, так как на ней обычно осаждается уран и возникают дополнительные трудности при очистке, что приводит к загрязнению воздуха. Любые заметные утечки в аппаратах вызвали бы разрушение теплоизоляции, и она могла бы попасть в перерабатываемые отходы урана. К тому же изоляция может рассматриваться как полный отражатель. Учитывая необходимость безопасной геометрии для высоких степеней обогащения, не следует применять полностью отраженные длинные трубы диаметром 15,2 см.

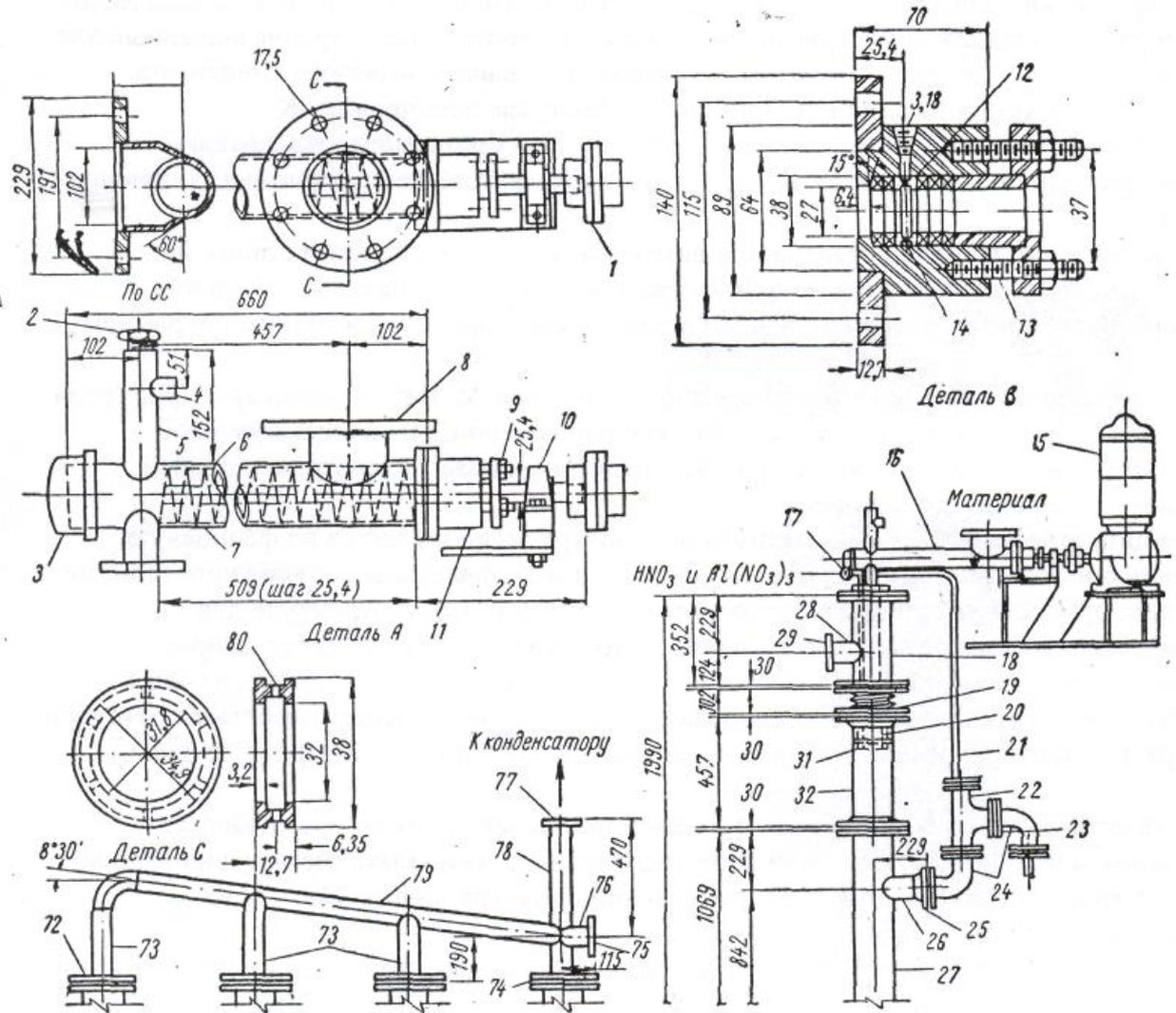
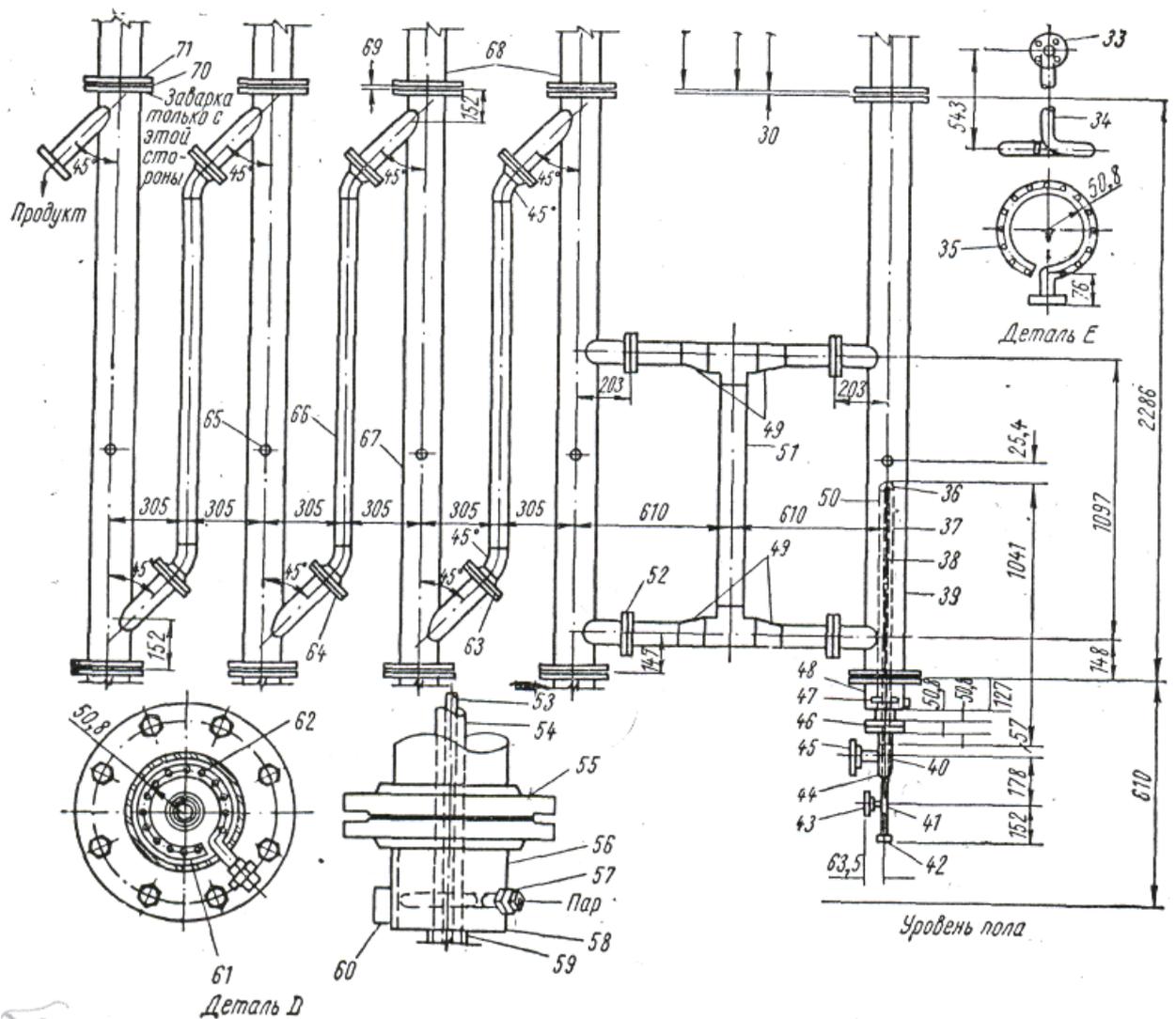


Рис. 10.8 Детали конструкции ядернобезопасного аппарата непрерывного действия, применяемого для выщелачивания и растворения большинства материалов, содержащих уран со степенью обогащения до 95%  $U^{235}$ :

1 — эластичная муфта; 2 — набивка сальника; 3 — крышка с резьбой (диаметр 76 мм); 4 — патрубок (диаметр 25,4 мм); 5 — 32 мм труба из нержавеющей стали; 6 — 76 мм труба из нержавеющей стали; 7 — червячный питатель (6,35x70 мм); 8 — фланец для соединения с бункерным питателем; 9 — 9,5-16 NC (резьба крупная нормальная, шестигранная гайка); 10 — опора подшипника; 11 — деталь В; 12 — уплотнение толщиной 6,4 мм из графитизированного асбеста; 13 — 9,5 — 16 NC-5 (резьба крупная нормальная); сверление — диаметр 8,6 мм, глубина 19 мм; 14 — деталь С; 15 — мотор (0,37 кет, передача под прямым углом (5—20 об/мин)); 16 — деталь А; 17 — деталь Е; 18 — труба (диаметр 152 мм); 19 — упругое сочленение (диаметр 152 мм) с фланцами на концах; 20 — труба № 40 (диаметр 50,8 мм) из нержавеющей стали; 21 — труба № 40 (диаметр 25,4 мм) из нержавеющей стали; 22 — тройник (пирекс) 76X76X X76 мм; 23 — фланец из литого алюминия; 24 — колено (90°) диаметром 76 мм; 25 — фланец (диаметр 80 мм); 26 — труба (диаметр 76 мм); 27 — труба (диаметр 152 мм); 28 — труба (диаметр 76 мм); 29 — фланец (диаметр 80 мм); 30 — прокладка (3,2мм); 31 — вставка из тефлона; 32 — труба (пирекс) диаметром 152 мм; 33 — глухой фланец (диаметр 16,5 мм) из нержавеющей стали; 34 — труба (диаметр 6,35 мм); 35 — отверстие диаметром 1,59 мм (сверление под 45° к нижней плоскости); 36 — вставка (диаметр 38 мм); 37 — труба (диаметр 38 мм); 38 — труба (диаметр 12,7 мм); 39 — труба (диаметр 152 мм); 40 — тройник (38 мм); 41 — тройник (12,7 мм); 42 — крышка с резьбой (диаметр 12,7 мм); 43 — фланец (диаметр 16,5 мм); 44 — отверстие диаметром 12,7 мм в крышке диаметром 38 мм; 45 — фланец (диаметр 42 мм); 46 — фланец (диаметр 54,6 мм); 47 — штифт; 48 — деталь D; 49 — переходная муфта 102X76 мм; 50 — штифт; 51 — труба (диаметр

102 мм) из нержавеющей стали; 52 — фланец (диаметр 88 мм); 53 — труба № 40 (диаметр 12,7 мм) из нержавеющей стали; 54 — труба № 40 (диаметр 38 мм) из нержавеющей стали; 55 — подвижные фланцы (диаметр 156 мм); 56 — труба Кг 40 (диаметром 152 мм) из нержавеющей стали; 57 — муфта (диаметр 6,35 мм); 58 — крышка SO<sub>x</sub> (толщина 15,9 мм, g наружный диаметр 168 мм); 59 — труба № 40 (диаметр 50,8 мм) из нержавеющей стали; 60 — патрубок (диаметр 25,4 мм); 61 — барботажная труба (диаметр 6,35 мм) из нержавеющей стали; 62 — отверстия (диаметр 3,2 мм); расстояние между центрами 25,4 мм; 63 — фланец WN (диаметр 80мм); 64 — фланец SO (диаметр 80 мм); 65 — патрубок (диаметр 25,4 мм) из нержавеющей стали; 66 — труба (диаметр 76 мм) из нержавеющей стали; 67 — труба (диаметр. 152 мм) из нержавеющей стали; 68 — труба (пирекс) диаметром 152 мм, высотой 457 мм; 69 — тефлоновая прокладка толщиной 3,2 мм с асбестовым наполнителем; 70 — фланец FF, SO, (диаметр 156 мм); 71 — фланец из литого алюминия; 72 — глухой фланец (диаметр 156 мм), сверление для трубы диаметром 76 мм; 73 — труба (диаметр 76 мм) из нержавеющей стали; 74 — глухой фланец (диаметр 156 мм), сверление для трубы диаметром 102 мм; 75 — фланец диаметром 80 мм; 76 — труба диаметром 50,8 мм; 77 — фланец (диаметр 106 мм), FF, SO<sub>x</sub>; 78 — труба (диаметр 102мм) из нержавеющей стали; 79 — труба (диаметр 76,2 мм) из нержавеющей стали; 80 — 6 отверстий диа метром 3,18 мм.



Конструкции двух первых колонн способствуют тепловой конвекции жидкости, что улучшает перемешивание. В остальных колоннах для выщелачивания или растворения вполне достаточно

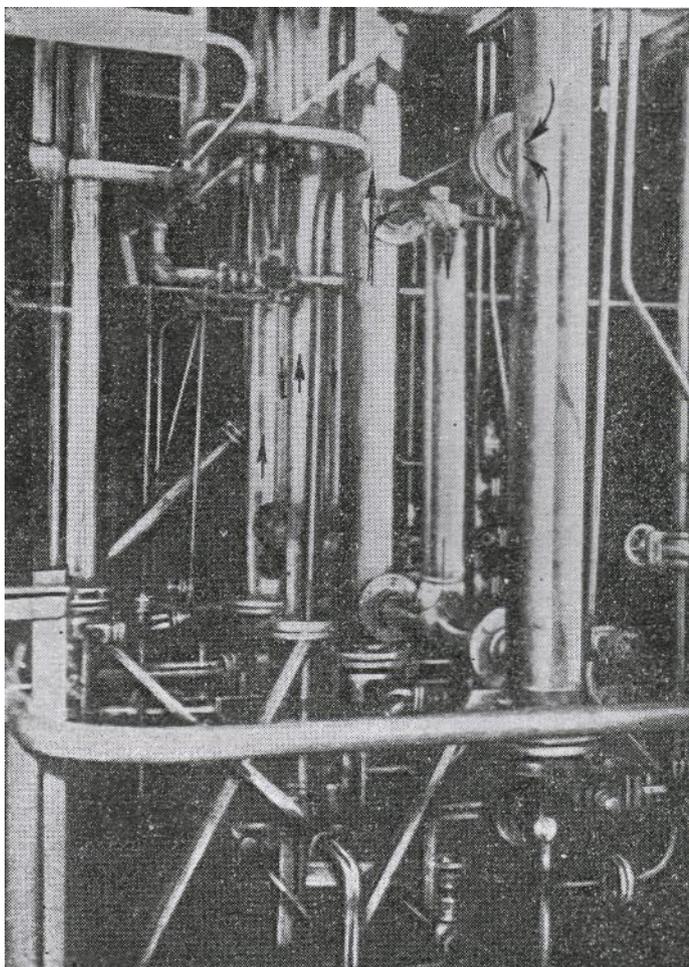


Рис. 10.9 Установка, выполненная по проекту, показанному на рис.10.8.

простого контакта кислотного растворителя с твердыми веществами при их прохождении через систему. При изменении продолжительности контакта может быть выбрана другая высота и иное количество колонн с учетом габаритов и конструкции установки. Выделяющиеся газы из каждой колонны направляются к коллектору и далее, через конденсатор пара и сепаратор, в вентиляционную систему. Конденсат и вещества из сепаратора возвращаются в первую колонну. Во избежание утечки паров в рабочее помещение и повышения давления паров в аппарате для питания системы целесообразно

применять установки водяного затвора высотой 15 см на верху питательной колонны.

Нагрев осуществляется при помощи локальных нагревателей, установленных в нижней части каждой колонны. Нагрев паром производится при помощи парового барботирующего кольца на дне колонн. Может возникнуть необходимость в дополнительном барботировании воздухом при переработке материалов, имеющих тенденцию к быстрому осаждению.

Дисперсность частиц является важным параметром, определяющим работу установки. Несмотря на то, что и относительно грубый материал (20меш) хорошо растворялся, превосходные результаты были достигнуты путем измельчения материала (100% порошка проходило через сито 50 меш и часть — через сито 100 меш). Отходы от металлургического восстановления  $UF_4$ , содержащие иод, перед растворением должны быть подвергнуты обжигу для предотвращения коррозии оборудования из нержавеющей стали. Обжиг также позволяет окислить избыток металла-восстановителя.

В состав перерабатываемых материалов входят отходы от восстановительных плавов (шлак и примеси огнеупоров), зола, смешанные твердые осадки, твердый каустик (остающийся при сплавлении осадков с каустиком), сернистый кальций и активированная окись алюминия (из ловушек для  $UF_6$ ). Для большинства этих веществ растворителем служит азотная кислота с достаточной добавкой азотнокислого алюминия для образования растворимых комплексов фторидов. Для растворения твердых веществ, содержащих каустик, применялось выщелачивание водой (для удаления силикатов и алюминатов) с последующим кислотным выщелачиванием в соответствующем процессе. Номинальная скорость процесса для колонны высотой 152 см составляла 20—30 кг/ч при переработке шлаков восстановительной плавки и 10 кг/ч при переработке золы (100% измельченного материала проходило через сито 50 меш).

## КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТАНОВОК

### Требования к производственным помещениям

Строения должны быть огнестойкими. Соблюдение этого условия диктуется особенно тем, что в данном случае при пожаре исключается применение воды, поскольку в результате контакта воды с ураном возникает опасность ядерной реакции. Стены должны быть окрашены и легко поддаваться периодической мойке, полы рекомендуется делать из химически инертных плотных материалов. Обычно в помещениях по обработке металла пол покрывают пластиком, например поливиниловой плиткой, а в отделениях регенерации отходов - нержавеющей сталью. Полы в сухих складских помещениях, коридорах и других зонах с низкой потенциальной загрязненностью можно покрывать глянцевой плотной и пластичной замазкой.

В мокрых химических цехах для электрических кабелепроводов, металлических перегородок, вентиляционных каналов приточной вентиляции и т. п. рекомендуется использовать алюминий и покраску с коррозионно-устойчивым покрытием. Для трубчатых подставок, а также для кронштейнов для оборудования нужно применять нержавеющую сталь.

Отсутствие водостоков характерно для многих помещений, в которых перерабатывают обогащенный уран. В процессе монтажа водостоки должны отводиться в «безопасные» емкости для хранения. Это обусловлено необходимостью предотвращения потерь ценного материала в результате разлива или других неудачных манипуляций. Производственные отделения должны быть снабжены прямыми коридорами, ведущими к выходу.

### Требования к вентиляции

Основные проектные критерии могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) воздушные загрязнения должны быть локализованы и направлены в вентиляционную систему вблизи от источника их образования;
- 2) потери урана в атмосферу должны быть сведены к минимуму

соответствующей очисткой вентиляционных газов и воздушных сбросов из вытяжных колпаков и перчаточных боксов;

- 3) для соблюдения норм ядерной безопасности необходимо предупреждать накопление чрезмерных количеств обогащенного урана в системе вытяжной вентиляции. Должен быть сведен к минимуму путь газа по трубам от рабочего аппарата до фильтра. Кроме того, в проекте необходимо заложить возможность осмотра вентиляционной системы;
- 4) приточный воздух, подаваемый в производственные помещения, нельзя использовать повторно.

Загрязнение воздуха ураном редко оказывается серьезной проблемой при переработке жидкостей или суспензий в закрытых помещениях. Конечно, как и на обычных химических заводах, должны быть приняты меры по очистке воздуха от испарений кислот и органических веществ. Для таких помещений обычно достаточно, если воздух обновляется полностью от 15 до 20 раз в час.

В помещениях, где обрабатываются пылящие вещества или проводится механическая обработка металла, как правило, чистый подогретый воздух вводится в рабочие помещения через металлические диффузоры (или вблизи) потолка и, минуя зону, где находятся люди, выводится из помещения снизу через вытяжки, осушающие емкости, и отводную вентиляцию, находящиеся на уровне пола. Процессы, при осуществлении которых получается много пыли, должны проводиться в герметизированных емкостях (или на установках должны предусматриваться вытяжки). Характер таких мер предосторожности несколько меняется в зависимости от степени обогащения урана. Вытяжки или перчаточные боксы обычно изготавливаются из нержавеющей стали или чистого пластика. Поверхности должны быть гладкими, легко поддающимися очистке, с минимальным числом перегибов, выступов и впадин.

Типичная вентиляционная система при работе с пылящими веществами может состоять из фильтра предварительной очистки (огнестойкий фетр или набивка из стекловолокна, предназначенного для отделения частиц

размером свыше 25 мк) и одного или двух комплектов гофрированных абсолютных фильтров, задерживающих до 99,97% всей пыли.

В зависимости от количества пыли могут быть использованы другие типы устройств для очистки воздуха - циклоны, чехольчатые фильтры автоматической очистки и влажные газоочистители (скрубберы). Применение влажной очистки усложняется тем, что вода (в качестве замедлителя) может способствовать возникновению цепной реакции. При проведении процессов с пылящими веществами может потребоваться до 60 смен воздуха в 1 ч в рабочем помещении в зависимости от объема вытяжного колпака или сухого бокса.

Воздух, содержащий пыль, проходит последовательно через циклон с безопасной геометрией, через чехольчатые фильтры автоматической очистки (также с безопасной геометрией) и, наконец, через гофрированный абсолютный фильтр. Следует заметить, что забор воздуха в систему осуществляется специальным направляющим фильтром.

#### Система сигнализации

Большое значение имеет организация централизованного контрольного пункта для принятия мер при аварии. В качестве контрольного пункта следует выбрать такое помещение, где всегда присутствует кто-нибудь из обслуживающего персонала. Примером такого подходящего места служит подвал под входной будкой.

Контрольный пункт должен быть снабжен двумя видами связи с основными цехами завода. В контрольном пункте нужно иметь полный список обслуживающего персонала завода с указанием их местонахождения. Систему связи необходимо обеспечить аварийным источником энергии, гарантирующим ее безотказное функционирование.

#### Средства радиационного контроля

Местные системы радиационного контроля предназначены для подачи сигнала тревоги при СЦР или других явлениях, обусловивших ненормально высокий уровень радиации. КАЭ требует утверждения таких

контрольных систем при выдаче всех лицензий, предусматривающих работу с более чем  $500 \text{ г } U^{235}$ . Местные дозиметры служат для измерения отношения доз  $\gamma$ - и нейтронного облучения в различных отделениях в случае возникновения критической композиции.

*Радиационный контроль.* Желательно, чтобы системы радиационного контроля указывали приблизительно место источника излучения и уровень радиации в различных пунктах установки. Промедление в несколько секунд при возникновении СЦР может привести к смерти. Поэтому необходимо, чтобы сигнализационная система срабатывала быстро, не давала ложных сигналов тревоги, чтобы сигналы были специфическими и хорошо воспринимаемыми на слух. По организации системы сигнализации могут быть даны следующие рекомендации.

- 1) Система, которая подает сигнал тревоги и эвакуации обслуживающего персонала и указывает место источника радиации, должна быть полностью отделена от системы, измеряющей уровень радиации при возникновении СЦР. Измерительная система ведет непрерывную запись интенсивности излучения в большом интервале во многих отделениях. Местные контрольные датчики и звуковая система тревоги должны быть настроены на достаточно высокий уровень радиации во избежание подачи сигнала без возникновения СЦР. Однако этот уровень должен быть таким, чтобы взрыв, сопровождающийся  $10^{16}$  распадов, привел сигнализационную систему в действие.
- 2) Звуковая сигнализация и местная система должны реагировать на  $\gamma$ -излучение (а также на нейтронное), но не на  $\beta$  и  $\alpha$ -частицы. В качестве датчика системы следует применять ионизационную камеру, а не сцинтилляционный кристалл или трубку Гейгера - Мюллера. В связи с тем, что продолжительность радиационного взрыва может быть от нескольких миллисекунд до нескольких секунд, показание интенсивности чувствительного прибора не может быть таким точным, как

показания интегрирующего прибора, поэтому ему отдается предпочтение.

- 3) Сигналы тревоги должны действовать непрерывно, независимо от спада уровня радиации ниже точки подачи тревоги. В целях максимальной надежности система должна быть устроена таким образом, чтобы для приведения ее в действие было достаточно сигналов от двух из трех приборов.
- 3) Измерительная система может включать сцинтилляционный счетчик совместно с усилителем, логарифмическим интенсиметром и подходящим дистанционным измерительным оборудованием. С другой стороны, для измерения может быть использован аргонный гаммаграф.

*Местные дозиметры.* Целесообразно применять пороговые детекторы с гамма датчиками. Полная система порогового детектора включает Pu<sup>239</sup>, Np<sup>237</sup>, U<sup>238</sup> и серу. Эта система дает спектр нейтронов, позволяющий рассчитать с достаточной точностью дозу облучения ткани в пределах  $\pm 10\%$  на дозиметре. Число распадов в различных частях детекторов может быть определено сцинтилляционными счетчиками. Число дозиметров, необходимых для установки, должно быть определено из сопоставления ее стоимости и возможности возникновения поблизости СЦР.

## Приложение

Таблица 1.

Допустимые массы, кг, для изолированных систем с водяным отражателем.

X	Металл, $\rho_H / \rho_X \leq 2$	Смеси, $\rho_H / \rho_X \leq 20$	Растворы	
			$\rho_H / \rho_X \leq 100$	$\rho_H / \rho_X \leq 2500$
U <sup>235</sup>	11.0	2.5	0.8	0.35
Pu <sup>239</sup>	2.6	2.2	0.5	0.25
U <sup>233</sup>	3.0	1.3	0.48	0.25

Таблица 2.

Допустимые объёмы, л, изолированных гомогенных систем с водяным отражателем.

x	Растворы		
	$20 \leq \rho_H / \rho_x$	$400 \leq \rho_H / \rho_x$	$800 \leq \rho_H / \rho_x$
U <sup>235</sup>	4.8	9.5	20.0
Pu <sup>239</sup>	3.3	6.8	11.4
U <sup>233</sup>	2.0	6.9	12.0

Таблица 3.

Безопасные диаметры цилиндров изолированных систем с водяным отражателем, см.

x	Металл при максимальной плотности	Растворы		
		$20 \leq \rho_H / \rho_x$	$400 \leq \rho_H / \rho_x$	$800 \leq \rho_H / \rho_x$
U <sup>235</sup>	6.35	12.7	17.5	23.1
Pu <sup>239</sup>	3.55	11.4	15.5	18.7
U <sup>233</sup>	3.80	9.4	14.7	18.8

Таблица 4.

Безопасные толщины пластин для изолированных систем с водяным отражателем, см.

x	Металл при максимальной плотности	Растворы		
		$20 \leq \rho_H / \rho_x$	$400 \leq \rho_H / \rho_x$	$800 \leq \rho_H / \rho_x$
U <sup>235</sup>	1.78	3.6	6.3	10.0
Pu <sup>239</sup>	0.50	3.8	6.3	8.3
U <sup>233</sup>	0.50	1.2	4.8	7.3

Таблица 5.

Максимальные допустимые значения высоты и диаметра цилиндра для солей и водных растворов U<sup>235</sup>

(водяной отражатель, обогащение и  $\rho_H / \rho_5$  любое, плотность урана не более 3,2 кг/л)

Диаметр, см	Высота, см	Диаметр, см	Высота, см	Диаметр, см	Высота, см
12,7	∞	20,3	15,7	30,5	8,4
14,0	85,6	22,9	12,7	38,1	6,6
15,2	44,7	25,4	10,7	91,4	4,3
17,8	21,6	27,9	9,4	∞	3,8

Таблица 6.

Максимальные допустимые значения массы, объёма, безопасного диаметра цилиндра и безопасной толщины пластины для солей и водных растворов  $U^{235}$  в зависимости от обогащения

(системы гомогенные,  $\rho_H/\rho_5$ )

Обогащение урана, %	Масса $U^{235}$ , кг	Объём, л	Безопасный диаметр цилиндра, см	Безопасная толщина пластины, см
100	0,350	4,8	12,7	3,8
75	0,360	5,0	13,2	4,1
50	0,390	6,0	14,5	4,8
40	0,410	6,7	15,2	5,1
30	0,440	7,7	16,0	5,6
20	0,480	9,5	17,5	6,9
15	0,520	11,0	18,8	7,9
12	0,583	12,5	19,8	8,6
10	0,600	14,0	20,8	9,1
8,0	0,650	16,0	22,1	9,9
6,0	0,710	20,5	24,4	11,4
5,0	0,800	27,0	26,0	12,7
4,0	0,930	33,8	28,4	14,0
3,5	1,040	40,0	30,5	15,2
3,0	1,200	49,2	32,5	16,5
2,5	1,470	64,6	35,6	18,0
2,0	2,000	95,1	40,6	22,1
1,75	2,560	126,0	44,7	24,4
1,5	3,600	186,0	50,8	27,9
1,25	6,670	308,0	61,0	34,3
1,0	22,700	731,0	83,8	49,5
0,8	36,000	3917,0	147,3	91,4
0,72	∞	∞	∞	∞

Таблица 7.

Максимальные допустимые значения массы для металлических слитков  $U^{235}$  с плотностью  $18,9 \text{ г/см}^3$  в зависимости от обогащения урана (водяной отражатель)

Обогащение $U^{235}$ , %	Масса $U^{235}$ , кг	Объём, л	Обогащение $U^{235}$ , %	Масса $U^{235}$ , кг	Объём, л
100	11,0	0,582	20	31,9	8,44
90	11,0	0,647	15	38,5	13,6
75	12,6	0,889	10	51,6	27,3
50	17,0	1,8	8	60,0	39,7
40	19,8	2,62	6	72,6	64,0
30	24,0	4,23	<5	$\infty$	$\infty$

Таблица 8.

Допустимые значения массы металлического урана в воде при любом объёмном отношении воды к урану

(отражатель водяной, блоки или куски урана при беспорядочной укладке в контейнер с водой)

Обогащение урана, %	Масса $U^{235}$ , кг	Обогащение урана, %	Масса $U^{235}$ , кг
3,0	1,04	0,9	12,5
2,0	1,36	0,8	30,0
1,0	6,80		

Таблица 9.

Максимальные допустимые значения массы для солей и водных растворов  $U^{235}$  в зависимости от отношения  $\rho_H / \rho_5$

(водяной отражатель, обогащение урана любое, плотность урана не более  $3,2 \text{ кг/л}$ )

$\frac{\rho_H}{\rho_5}$	Масса $U^{235}$ , кг	$\frac{\rho_H}{\rho_5}$	Масса $U^{235}$ , кг	$\frac{\rho_H}{\rho_5}$	Масса $U^{235}$ , кг
1	2	3	4	5	6
0,01	43,0	4,0	11,5	40,0	1,34
0,1	39,8	5,0	9,5	50,0	1,10
0,5	33,6	8,0	6,3	75,0	0,80

1	2	3	4	5	6
1,0	28,5	10,0	5,0	100,0	0,65
1,5	24,2	15,0	3,3	200,0	0,41
2,0	20,6	20,0	2,5	Без	0,35
3,0	14,8	30,0	1,7	ограничений	

Таблица 10.

Допустимые значения массы  $U^{235}$  для смеси  $UF_6$  и водород содержащих материалов при  $\frac{\rho_H}{\rho_5} \leq 10$  (отражатель любой)

Максимальная плотность урана, г/см <sup>3</sup>	$\frac{\rho_H}{\rho_5}$	Безопасная масса $U^{235}$ , кг	Максимальная плотность урана, г/см <sup>3</sup>	$\frac{\rho_H}{\rho_5}$	Безопасная масса $U^{235}$ , кг
1,8	10	5,0	3,0	1	28,5
2,3	5	9,4	3,2	0,1	39,8
2,6	3	14,3	3,2	0,01	43,0
2,8	2	20,0			

Таблица 11.

Основные критические параметры делящихся материалов  
(величины при оптимальных условиях критичности)

Характеристика среды	$U^{233}$		$U^{235}$		$Pu^{239}$	
	Практические рекомендации	М кр.	Практические рекомендации	М кр.	Практические рекомендации	М кр.
1	2	3	4	5	6	7
Вес, кг						
Раствор	0,25	0,59	0,35	0,82	0,22	0,51
Металл	3,2	7,5	10,0	22,8	2,6 <sup>*)</sup> 3,57 <sup>**)</sup>	5,6 <sup>*)</sup> 7,6 <sup>**)</sup>
Диаметр бесконечного цилиндра, мм						
Раствор	94,0	111,8	127,0	137,2	106,7	124,5
Металл	43,2	48,3	68,6	74,7	35,6 <sup>*)</sup> 45,7 <sup>**)</sup>	43,2 <sup>*)</sup> 53,3 <sup>**)</sup>

1	2	3	4	5	6	7
Толщина бесконечной шахты, мм						
Раствор	20,3	30,5	38,1	43,2	22,9	33,0
Металл	5,1	7,6	12,7	15,2	4,57 <sup>*)</sup> 6,10 <sup>**)</sup>	5,59 <sup>*)</sup> 7,12 <sup>**)</sup>
Объем раствора, л	2,3	3,3	4,8	6,3	3,4	4,5
Концентрация водных растворов изотопа, г/л	10,0	11,2	10,8	12,1	6,9	7,8

\*) Альфа фаза,  $\rho = 19,60 \text{ г/см}^3$ .

\*\*\*) Гамма фаза,  $\rho = 15,65 \text{ г/см}^3$ .

Все технологические аппараты и транспортные ёмкости выполняются в соответствии с приведёнными рекомендациями.

## ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Я.Шапиро. Технология ремонта оборудования химических заводов. Госхимиздат, 1958.
2. Я.С.Черняк, Е.И.Боченов. Ремонт оборудования нефтеперерабатывающих заводов. М.: Гостехиздат, 1960.
3. Ф.С.Паттон и др. Ядерное горючее на основе обогащенного урана. М.; 1966.
4. А.П.Зефирова, Б.В.Невский, Г.Ф.Иванов. Заводы по переработке урановых руд в капиталистических странах. 1962.
5. Б.Н.Судариков, Э.Г.Раков. Процессы и аппараты урановых производств. М.: Машиностроение, 1969.
6. И.Я.Клинов и др. Химическое оборудование в коррозионностойком исполнении. М., 1970.
7. Х.Л.Логан. Коррозия металлов под напряжением. Металлургия. 1970.
8. А.И.Селиванов. Основы теории старения машин. М., 1971.
9. С.М.Городинский, Д.С.Гольдштейн. Дезактивация полимерных материалов. М.: Атомиздат, 1975.
10. А.Д.Зимон. Дезактивация. М.: Атомиздат, 1975.
11. М.В.Бесчастнов, В.М.Соколов, М.И.Кац. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М. Химия, 1976.
12. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов. Справочная книга. М.: Химия, 1976, 376 с.
13. В.И.Ермаков, В.С.Шейн. Технология ремонта химического оборудования. Л.: Химия, 1977, 275с.
14. Н.Е.Дроздов. Эксплуатация, ремонт и испытания оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М.: Высшая школа, 1979, 312с.
15. В.Д.Плахтин. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин. М.: Металлургия, 1983, 415с.

16. Система технологического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности. М.: Химия, 1986, 352 с.
17. С.А.Фарамазов. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефте перерабатывающих заводов. Издание третье. М.: Химия, 1988.
18. Усталость материалов при высокой температуре. Под ред. К.П.Скелтона. Пер. с англ. Е.
19. А.Аверчнкова. Под ред. Г.А.Тулякова. ГЛ.: Metallurgy, 1988,
20. Э.И.Шкловский, М.В.Макаренко. Повышение эффективности ремонтного производства в химической промышленности. М.: Химия, 1989.
21. Лекции по спецкурсам 1, 2, 3.
21. Проблема обращения с р/а отходами за рубежом. Выпуск 6, 1984.
22. Критические параметры делящихся материалов и ядерная безопасность. Справочник, 1984.
23. Критические параметры систем с делящимися веществами и ядерная безопасность. Справочник, 1966.
24. Дубовский Б. Г., Камаев А. В. и др. Критические параметры систем с делящимися веществами и ядерная безопасность. Справочник М.: Атомиздат, 1966, 226 с.

## Содержание

Введение	3
Глава 1. Проверка технического состояния оборудования	3
1.1 Проверка технического состояния оборудования	3
1.1.1 Методы проверки	3
1.1.2 Нормы отбраковки оборудования	5
Глава 2. Методы и системы ремонта оборудования	8
2.1 Методы ремонта подразделяются на три группы	8
2.2 Системы ремонта оборудования	9
2.3 Планирования заготовки запасных частей	15
2.4 Управление и экономика за рубежом	17
Глава 3. Повреждение деталей в процессе эксплуатации и борьба с ними	
Износ. Виды износа	18
3.1 Моральный износ	18
3.2 Повреждение поверхностей деталей	19
3.2.1 Механический износ – износ трением, эрозия	19
3.2.2 Влияние свойств материала деталей на их износ	21
3.2.3 Влияние смазки на износ деталей	23
3.2.4 Влияние качества поверхности и метода обработки на износ	27
3.2.5 Коррозионный износ материалов технологического оборудования	28
3.2.5.1 Виды коррозии	28
3.2.5.2 Показатели скорости коррозионного разрушения	30
3.2.5.3 Вывод кинетического уравнения процесса газовой коррозии	31
3.2.5.4 Электрохимическая коррозия	34
3.3 Повреждение целостности деталей	38
3.4 Суммированный износ машины	41
Глава 4. Основы теории старения машин	43
4.1 Понятие годности машин	43

4.2 Структурные составляющие годности машин и их изменения за срок службы	47
Глава 5. Защита аппаратуры от коррозии и преждевременного износа	67
5.1 Методы защиты	67
5.1.1 Электрохимическая защита	67
5.1.2 Защитные покрытия	72
5.1.2.1 Органические защитные покрытия	73
5.1.2.1.1 Резиновые покрытия	73
5.1.2.1.2 Фаолит	73
5.1.2.1.3 Винипласт	73
5.1.2.1.4 Фторопласт	73
5.1.2.1.5 Лакокрасочные покрытия	73
5.1.2.2 Неорганические защитные покрытия	74
5.1.2.2.1 Кислотоустойчивая керамика	74
5.1.2.2.2 Пассивация	76
5.1.2.3 Защитные металлические покрытия	77
5.1.2.3.1 Горячие покрытия	77
5.1.2.3.2 Металлизация	77
5.1.2.3.3 Диффузионное покрытие	78
5.1.2.3.4 Плакирование	78
5.1.2.3.5 Гальванические покрытия	79
Глава 6. Технология ремонта машин и аппаратов	82
6.1 Источники активации оборудования	82
6.1.1 Гидрометаллургия	82
6.1.2 Сублиматное производство	83
6.1.3 Завод разделения изотопов урана (ЗРИ)	87
6.1.4 Радиохимическое производство (РХ)	88
6.1.5 Metallургические производства	90
6.1.6 Нейтронное излучение	91
6.2 Механизм процесса активации	92

6.3 Дезактивация	93
6.3.1 Способы дезактивации	93
6.3.1.1 Химические методы дезактивации	94
6.3.1.2 Ультразвуковой способ	96
6.3.1.2.1 Кавитация	97
6.3.1.2.2 Установка для дезактивации	105
6.3.1.2.3 Технологические режимы и составы дезактивирующих растворов	106
6.4 Ремонтная разборка машин, деффектация	106
6.5 Восстановление повреждённых деталей	108
6.5.1 Обработка на ремонтные размеры	108
6.5.2 Металлизация	110
6.5.3 Плазменное напыление	110
6.5.4 Наплавка	110
6.5.5 Заливка	111
6.5.6 Восстановление деталей методом пластического формоизменения	111
6.5.7 Электрохимические покрытия	112
6.5.8 Восстановление методом дополнительных деталей	114
6.5.9 Восстановление деталей с повреждением целостности	115
Глава 7. Сборка машин и аппаратов. Проверки в процессе сборки	116
7.1 Проверка поверхностей на горизонтальность	116
7.2 Проверка прямолинейности плоскостей	116
7.3 Проверка параллельности и перпендикулярности валов и плоскостей	117
7.4 Проверка соосности отверстий	118
7.5 Центровка валов	119
Глава 8. Балансировка при сборке	120
8.1 Статическая балансировка	122
8.2 Динамическая балансировка	123
Глава 9. Испытание ёмкостной аппаратуры	125
Глава 10. Основы проектирования и эксплуатации оборудования при работе с делящимися материалами	126

10.1 Теоретические основы	126
10.2 Основные принципы обеспечения ядерной безопасности	147
10.2.1 Способы обеспечения ядерной безопасности	147
10.2.2 Допустимые и безопасные параметры	148
10.2.3 Коэффициенты запаса	149
10.2.4 Нормативные параметры ядерной безопасности	150
10.2.5 Классификация оборудования и транспортных установок	151
10.2.6 Общие принципы обеспечения ядерной безопасности	153
10.2.7 Примеры использования нормативных, допустимых и безопасных параметров при обеспечении ядерной безопасности	159
10.3 Проектирование оборудования	163
Приложение	177
Перечень рекомендованной литературы	183

Иван Дмитриевич Брус

«Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий  
атомной промышленности».

Учебное пособие.

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

Г.Г. Андреев

Редактор

Подписано к печати