

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания к практическим занятиям  
по дисциплине «Технологическое оборудование»**

для направления подготовки 18.03.01 Химическая технология  
направленность (профиль) Химическая технология синтетических  
биологически активных веществ, химико-фармацевтических препаратов и  
косметических средств

Ставрополь 2023

Предмет «Технологическое оборудование» предусматривает изучение учащимися устройства, работу и методы эксплуатации аппаратов и оборудования основных отраслей химической промышленности, а также усвоения основ конструирования и расчета данного оборудования в соответствии с программой.

Номера вариантов и соответствующие им номера задач указаны по списку.

При выполнении практических работ необходимо соблюдать следующие правила:

- все практические работы выполняются в одной тетради;
- на обложке указывается фамилия, им, отчество, наименование предмета, номер варианта, номер практической, название практической;
- тексты условий задач переписываются полностью с указанием всех исходных данных.

**Перечень практических работ:**

1. Изучение микроструктуры стали.....	5
2. Изучение микроструктуры чугуна.....	5
3. Расчет толщины стенок обечаек и днищ.....	20
4. Расчет укрепления вырезов в стенках аппарата.....	26
5. Расчет фланцевого соединения.....	28
6. Расчет опор аппарата.....	31
7. Расчет кожухотрубчатого теплообменника.....	33
8. Расчет резервуара объемом 5000 м <sup>3</sup> на прочность.....	37
9. Расчет на прочность колонны высокого давления.....	41
10. Расчет колонны на прочность с учетом ветровой нагрузки.....	41
11. Механический расчет центрифуг.....	42
12. Механический расчет вращающегося барабана.....	44
13. Механический расчет элементов перемешивающего устройства...	47

## Практическая работа №1 и №2

**Тема:** Изучение микроструктуры сталей.

Изучение микроструктуры чугуна

**Цель работы:** Изучить классификацию, микроструктуру, свойства и назначение сталей и чугунов.

### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

В машиностроении используются детали из заготовок, полученных способами обработки давлением или литьем. Широкое применение имеют стали и чугуны. Стали являются деформируемым материалом, иногда применяется стальное литье. Чугуны представляют собой, как правило, литейные материалы. Примеры использования этих материалов даны ниже. Легковой автомобиль среднего класса массой 1000...1100 кг имеет детали из разных сталей, составляющие 57...60 % его массы (США, Западная Европа). В станкостроении общая масса чугунных деталей равна в среднем 70...80 % от массы металлорежущего станка.

Основу химического состава сталей и чугунов составляет железо с добавками углерода менее 2,14 % (стали) или более 2,14 % (чугуны). У многих марок этих материалов дополнительно содержатся легирующие химические элементы (хром, кремний, марганец, никель, молибден и др.). Перечень основных видов сталей и чугунов по государственным стандартам приведен в табл. 3 и 4. В машиностроении преимущественно применяются конструкционные стали и отливки из чугунов, используемые для изготовления деталей машин и различных сооружений, и инструментальные стали для металлорежущих, штамповых, измерительных и других инструментов.

При изучении строения и определении качества металлических материалов в материаловедении широко используется микроструктурный анализ.

**Микроанализ** - изучение строения поверхностей шлифованных, полированных и протравленных образцов - микрошлифов с помощью металлографических оптических микроскопов при увеличениях обычно от  $\times 100$  до  $\times 1000$ .

Наблюдаемое при этом строение поверхности шлифа называется **микроструктурой**. Микроструктура разных по химическому составу материалов и после их различной обработки отличается по размеру,

геометрической форме, цвету, взаимному расположению отдельных структурных составляющих

Микроанализ основан на использовании законов отражения и поглощения световых лучей от поверхности непрозрачных металлических материалов (рис. 3). Полированная металлическая поверхность отражает направленные на нее перпендикулярно световые лучи и видна в окуляр микроскопа как светлая. При наличии в материале неметаллических составляющих структуры они видны как темные, так как поглощают световые лучи.

Стали, получаемые кислородно - конверторным, электросталеплавильным и другими способами, содержат **неметаллические включения**. Это химические соединения металлов (железа, алюминия, и др.) с неметаллами (серой, кислородом, азотом и др.).

Таблица 3. Перечень основных разновидностей сталей по государственным стандартам

№№ ГОСТа	Наименование стандарта
380-88	Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.
535-88	Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия.
1050-88	Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.
1414-75Е	Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия
1435-90	Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали
1435-90	Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия
4543-71	Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.
5632-72	Прутки и полосы из инструментальной легированной стали. Технические условия
	Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной

5950-73	стали. Технические условия.
14959-79	Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия.
19265-73	

Таблица 4. Перечень основных разновидностей чугунов по государственным стандартам

№№ ГОСТа	Наименование стандарта
1215-79	Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия.
1412-85	Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки.
1585-85	Чугун антифрикционный для отливок. Марки.
7293-85	Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки.
7769-82	Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки.
28394-89	Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки.



Рис. 3. Схема отражения световых лучей от поверхности полированного (а) и подвергнутого травлению (б) микрошлифа.

Основными видами неметаллических включений в стали по ГОСТ 1778-70 являются оксиды, сульфиды, силикаты, нитриды и карбонитриды ( $MnS$ ,  $SiO_2$ ,  $TiN$ ,  $nFeO \cdot mMnO \cdot pSiO_2$  и др.). Оксиды и нитриды являются хрупкими и при прокатке стали располагаются в виде строчек или рассредоточенных точечных частиц. Пластичные сульфиды

получают форму продолговатых линз. Силикаты имеют сложный химический состав и могут быть пластичными или хрупкими.

После травления шлифа химическим реактивом различные структурные составляющие материала растворяются в разной степени, т.е. возникает некоторый рельеф поверхности (наличие выступающих и углубленных участков). На отдельных участках этого рельефа световые лучи отражаются в разной степени и участки поверхности шлифа видны в окуляр как светлые и темные различных оттенков.

Данные о фазовом строении и структуре материалов в равновесном состоянии получают из приведенных в учебниках и справочниках диаграмм состояния. Такие диаграммы состояния в координатах «температура - химический состав» содержат информацию о фазах (первичных составляющих микроструктуры), имеющих в отдельных областях диаграмм, разделенных сплошными линиями. Эти данные относятся к равновесному состоянию сплавов. Применительно к сталям и чугунам диаграмма состояния железо – углерод дана на рис. 4.

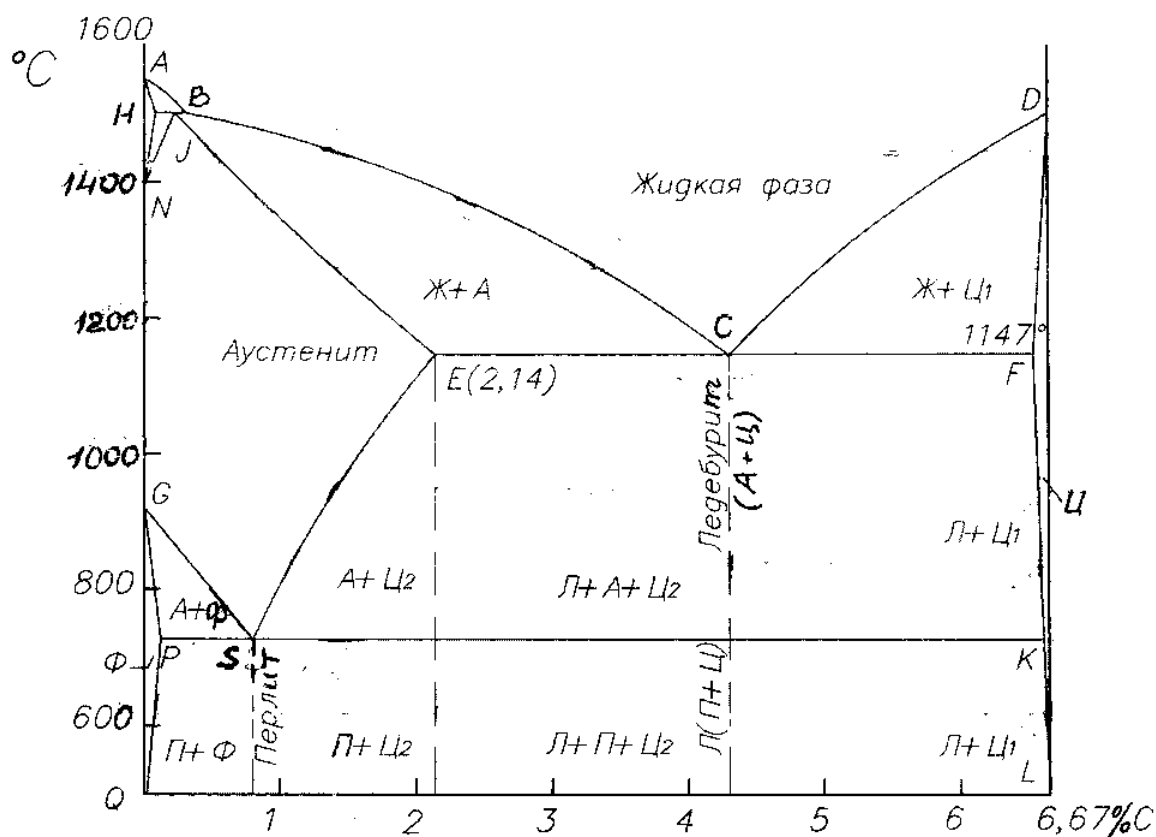
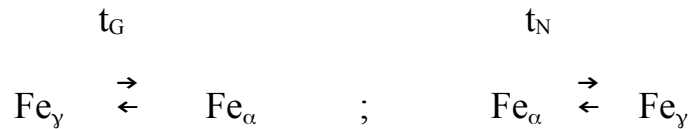


Рис. 4. Диаграмма состояния железо – углерод

Метастабильная диаграмма состояния железо-углерод относится к случаю полной растворимости компонентов в жидком состоянии выше линии ликвидуса ABCD и ограниченной растворимости углерода в железе в твердом состоянии. У железа наблюдаются два полиморфных превращения:



Железо модификаций  $\alpha$  и  $\gamma$  имеет соответственно кристаллические решетки объемноцентрированного куба (ОЦК) и гранецентрированного куба (ГЦК). В связи с наличием у железа полиморфных превращений на диаграмме состояния железо-углерод образуются три области твердых растворов углерода в железе:

- область NJESGN твердого раствора  $\gamma$  (аустенита А), т.е. раствора углерода в  $\text{Fe}_\alpha$  (ГЦК);

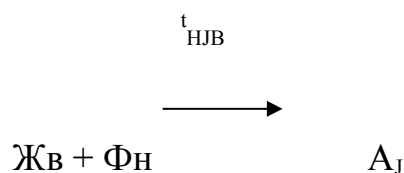
- две области QPGQ и AHNA твердого раствора  $\alpha$  (феррита Ф), т.е. раствора углерода в  $\text{Fe}_\alpha$  (ОЦК).

В правой части метастабильной диаграммы состояния железо-углерод имеется узкая область DFKLD твердого раствора небольшого количества железа в химическом соединении  $\text{Fe}_3\text{C}$ , т.е. цементита Ц.

Следовательно, в сплавах метастабильной диаграммы состояния железо-углерод существуют следующие фазы: жидкий раствор углерода в железе, феррит, аустенит, цементит. Остальные области диаграммы состояния, ограниченные сплошными линиями, являются двухфазными, т.е. состоят из тех или иных двух фаз.

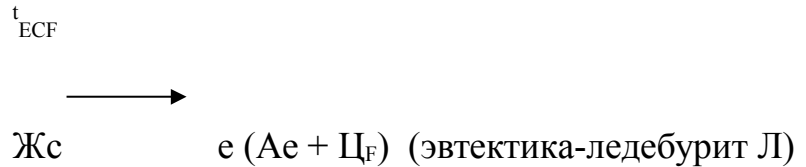
На диаграмме состояния имеются также горизонтальные линии трехфазных равновесий при постоянных температурах, где в равновесном состоянии существуют по три фазы:

- линия HJB перитектического превращения:

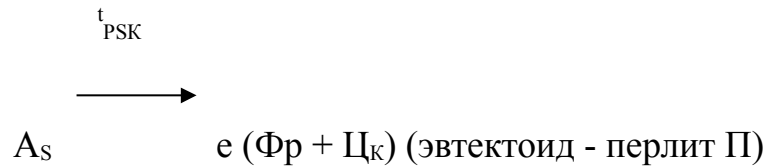




- линия ECF эвтектического превращения:



- линия PSK эвтектоидного превращения:



В сплавах железо – углерод - кремний в зависимости от количества углерода и кремния, численной величины скорости охлаждения существуют две разновидности диаграммы состояния железо-углерод: метастабильная (железо-цементит) и стабильная (железо - графит).

У сталей и чугунов в равновесном состоянии имеются следующие фазы:

**Жидкий раствор (Ж)** на основе железа.

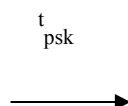
**Феррит (Ф)**- твердый раствор углерода и легирующих элементов в железе  $\text{Fe}_{\alpha}$  с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба (ОЦК). Феррит имеет твердость НВ 80-90, пластичен (относительное удлинение 50 %).

**Аустенит (А)** - твердый раствор углерода и легирующих элементов в железе  $\text{Fe}_{\gamma}$  с кристаллической решеткой гранецентрированного куба (ГЦК).

**Цементит (Ц)** - раствор небольшого количества железа в карбиде железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

Образуются также и более сложные структурные составляющие из двух фаз, наблюдаемые в микроструктуре:

**Перлит (П)** в виде темных (коричневых) участков, состоящий из ферритной основы и кристаллов цементита пластинчатой формы (пластинчатый перлит). Он образуется при медленном охлаждении в сталях и чугунах в результате следующего фазового превращения аустенита:

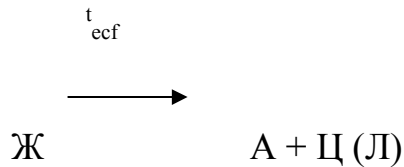


А

Ф + Ц (П)

Особой термической обработкой может быть получен зернистый перлит, состоящий из феррита и частиц цементита в форме мелких зерен.

**Ледебурит (Л)** в виде пестрых бело-темных участков, состоящий из белого цементита -основы и темного перлита в виде округлых или удлинённых частиц (ниже  $727^{\circ}\text{C}$ ). Выше температуры  $727^{\circ}\text{C}$  этот ледебурит состоит из цементита и аустенита :



Многочисленные стали разных марок, отличающиеся химическим составом, по микроструктуре в равновесном состоянии разделяются на шесть основных структурных классов (табл. 5). Представление о структурных классах чугунов дает табл. 6 и структурная диаграмма на рис. 5. Формы включений графита показаны на рис. 6.

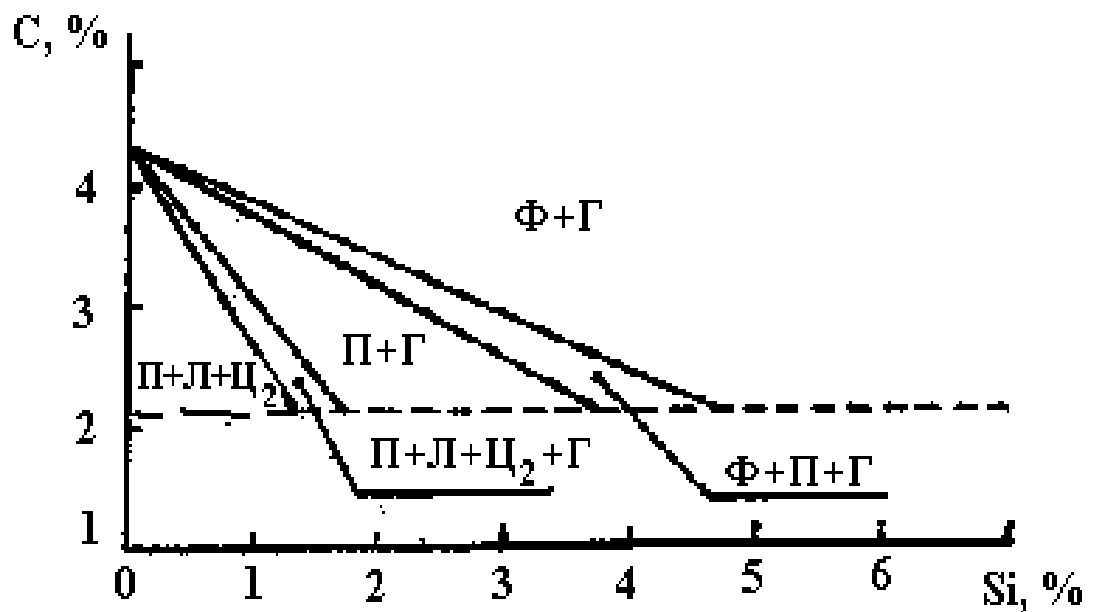


Рис. 5. Структурная диаграмма чугунов (толщина стенки отливки постоянная)

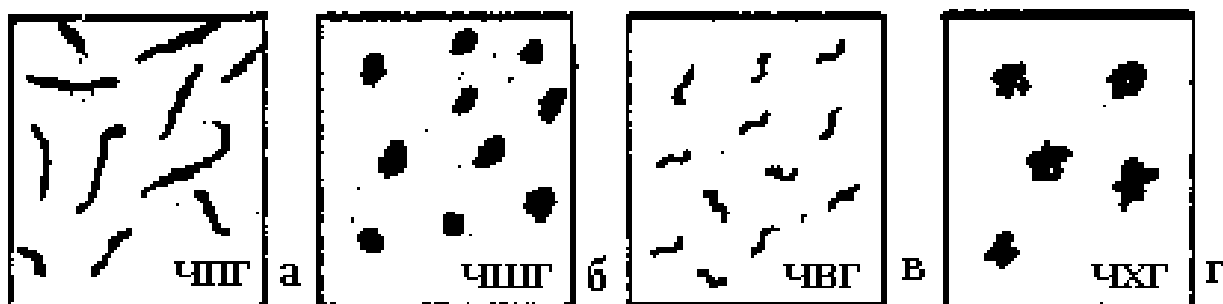


Рис. 6. Характерные геометрические формы включений графита в конструкционных чугунах (без травления шлифов): а - пластинчатая, б - шаровидная, в – вермикулярная, г - хлопьевидная (компактная).

Таблица 2.3. Структурные классы сталей в равновесном состоянии

Структурный класс стали	Химический состав		Микроструктура	Типовое применение в машиностроении
	Углерод С	Типичные легирующие элементы		
Доэвтектоидные стали	$C_p < C < C_s$	Cr, Mn, Ni и др.	Феррит + перлит	Конструкционные стали
Эвтектоидные стали	$C = C_s$	Cr, W, V и др.	Перлит	Инструментальные стали
Заэвтектоидные стали	$C_s < C < C_E$	Cr	Перлит и карбиды вторичные	Инструментальные стали
Стали карбидного (ледебуритного) класса	$C_E < C < 2,14\%$	Хром, вольфрам (до 6...12 %)	Перлит, карбиды первичные и вторичные	Инструментальные стали

Стали аустенитного класса	Десятые доли % и менее	Никель, марганец (до 13...20 %)	Аустенит легированный	Коррозионно-стойкие стали. Жаропрочные стали
Стали ферритного класса		Кремний, хром	Феррит легированный	Электротехнические стали. Кислотостойкие стали

Таблица 6. Типичные структурные классы чугунов

Структурный класс чугуна	Микроструктура
Белые чугуны: <ul style="list-style-type: none"> <li>- доэвтектические (<math>C_E &lt; C &lt; C_C</math>)</li> <li>- эвтектический (<math>C = C_C</math>)</li> <li>- заэвтектические (<math>C_C &lt; C &lt; C_F</math>)</li> </ul>	Ледебурит, перлит и карбиды вторичные Ледебурит Ледебурит и карбиды первичные
Половинчатые чугуны	Ледебурит, перлит, вторичный цементит и графит
Чугуны с пластинчатым графитом ЧПГ	Перлит и графит; феррит, перлит и графит
Чугуны с шаровидным графитом ВЧШГ	Перлит и графит; перлит, феррит и графит; бейнит и графит
Чугуны с вермикулярным графитом ЧВГ	Перлит, феррит, графит вермикулярный, до 20...30 % графита шаровидного
Чугуны с хлопьевидным (компактным) графитом ЧХГ	Феррит и графит; перлит и графит

Сведения о характерных механических свойствах углеродистых сталей и конструкционных чугунов приведены в табл. 7.

Таблица 7. Механические свойства сталей и чугунов  
(без упрочняющей термической обработки)

Наименование материала	Механические свойства	
	предел прочности при растяжении, МПа	относительное удлинение, %
Углеродистые конструкционные стали	321...676	2...15
Конструкционные чугуны:	100...440	0,2...1,1
	300...450	2,0...6,0
	300...630	2,0...12,0
	350...1000	2,0...17,0

## 2. МАТЕРИАЛЬНО – ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ

В работе используются металлографические микроскопы и коллекции микрошлифов. Микроскопы выпускаются различной конструкции. Основными их частями являются: основание, корпус, предметный столик для установки микрошлифа, механизмы грубой фокусировки с макровинтом и микроподачи с микровинтом для точной наводки на фокус, оптическая система, осветитель.

Способность оптической системы микроскопа изображать отдельно две точки (разрешающая способность  $\delta$ , мкм) определяется по формуле:

$$\delta = \lambda / 2A ; (A = n \sin (\alpha/2)),$$

где  $\lambda$  - длина волны световых лучей, мкм;  $n$  - показатель преломления световых лучей средой, находящейся между поверхностью микрошлифа и объективом микроскопа;  $\alpha$ - отверстиеный угол объектива;  $A$  - числовая апертура микроскопа (обычно  $A = 0,17...1,25$ ). При  $A = 1,25$  и  $\lambda = 0,55$  мкм для видимых лучей спектра микроскоп позволяет видеть структурные составляющие размером  $\delta = 0,2$  мкм.

## 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Практическая часть работы заключается в изучении микроструктуры сталей и чугунов, как правило, при увеличении микроскопа  $\times 100$ , а в

некоторых случаях до  $\times 600$ . Студентам предоставляются лабораторные коллекции микрошлифов, подготовленные для исследований.

Предварительно студенты знакомятся с устройством и работой микроскопа под руководством преподавателя и лаборанта. Для рассмотрения микроструктуры шлиф, запрессованный в пластилин на стеклянной пластинке, устанавливается на предметный столик микроскопа. После включения источника света проводится наводка на фокус сначала с помощью макровинта, а затем более точно микровинтом. Далее изучается микроструктура шлифов типовых сплавов, описание которых дано в табл. 8. С помощью описания, схем микроструктур (рис. 7) и находящихся в лаборатории фотографий устанавливают, какие структурные составляющие имеет каждый образец, наименование, состав и структурный класс.

Более подробная оценка микроструктуры сталей, проводится по следующему государственному стандарту: ГОСТ 8233. Сталь. Эталоны микроструктуры.

Путем сравнения микроструктуры изучаемой стали со шкалами структур ГОСТ, определяется количественная характеристика или номер балла по соответствующему признаку. Применительно к равновесному состоянию сплава использование ГОСТ 8233 позволяет определить процентное соотношение между ферритом и перлитом в доэвтектоидных сталях, соотношение количества пластинчатого и зернистого перлита, дисперсность пластинчатого и зернистого перлита. Для оценки неметаллических включений и различных видов неоднородности микроструктуры в сталях имеются отдельные государственные стандарты: ГОСТ 1763-68, ГОСТ 1778-70, ГОСТ 5640-68.

Классификация чугунных отливок по микроструктуре металлической основы и графитовым включениям ведется по следующему государственному стандарту: ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.

Имея количественные данные в процентах о площади, занимаемой в шлифе сплава различными структурными составляющими (П - перлит, Ц - цементит, Л - ледебурит, Г - графит), можно выполнить расчет примерного количества углерода в сталях и чугунах по следующей общей формуле:

$$C = 0,8П + 6,67Ц + 4,3Л / 100 + 30Г / 100, \%$$

В доэвтектических белых чугунах для определения соотношения между П и Ц принято: если  $P + C_2 = 100 \%$ , то количество П составляет 80 %, а цементита вторичного 20 % ( $P = 4C_2$ )

Вычисления по приведенной формуле действительны для сплавов, находящихся в равновесном состоянии.

Примеры вычислений:

Сталь доэвтектоидная: 40 % П; 60 % Ф:  $C = 0,8 \cdot 40/100 = 0,32 \%$ .

Сталь заэвтектоидная: 88% П; 12 % Ц<sub>2</sub>:  $C = 0,8 \cdot 88/100 + 6,67 \cdot 12/100 = 1,50 \%$ .

Чугун ЧПГ: 30 % П; 58 % Ф; 12 % Г:  $C = 0,8 \cdot 30/100 + 30 \cdot 12/100 = 3,84 \%$ .

Чугун белый доэвтектический: 40% Л; 60 % (П+Ц<sub>2</sub>), то есть 48% П и 12% Ц<sub>2</sub>:

$C = 0,8 \cdot 48/100 + 6,67 \cdot 12/100 + 4,3 \cdot 40/100 = 2,9 \%$ .

Чугун белый заэвтектический: 60 % Ц<sub>1</sub>; 40 % Л:

$C = 6,67 \cdot 60/100 + 4,3 \cdot 40/100 = 5,7 \%$ .

Таблица 8. Перечень микрошлифов сталей и чугунов из лабораторных коллекций (типовые примеры)

№№ микро шлифа	Материал	Химический состав, %		Структурн ый класс	Описание микроструктур ы
		углеро д С	другие компоненты		
1	2	3	4	5	6
<b>УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ</b>					
1.	Углеродистая качественная конструкционная	0,20	-	Доэвтектои дная сталь	Светлые зерна феррита и темные участки

	сталь 20, ГОСТ 1050-88				перлита
3.	Инструментальная нелегированная сталь У8, ГОСТ 1435-90	0,80	-	Эвтектоидн ая сталь	Перлит пластинчатый
4.	Инструментальная нелегированная сталь У8, ГОСТ 1435-90, после отжига	0,80	-	Эвтектоидн ая сталь	Перлит зернистый
5.	Инструментальная нелегированная сталь У10, ГОСТ 1435-90	1,00	-	Заэвтектои дная сталь	Темные участки перлита и светлая тонкая сетка вторичного цементита
<b>КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ С СТРУКТУРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ</b>					
7.	Сталь конструкционная после перегрева	0,40	-	Доэвтектои дная сталь	Крупные темные участки перлита и светлая широкая сетка феррита



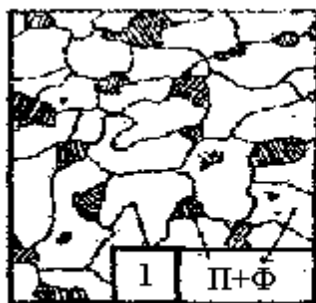
8.	Сталь конструкционная с полосчатостью феррито-перлитной структуры	0,25	-	Доэвтектоидная сталь	Перлит и феррит расположены в виде чередующихся полос.
9.	Сталь инструментальная с обезуглероживанием поверхностного слоя	0,80	-	Эвтектоидная сталь	Перлит в сердцевине, феррит и перлит в поверхностном слое
<b>ОБРАЗЕЦ СТАЛИ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ</b>					
10.	Сталь с неметаллическими включениями (полированный шлиф без травления)	данных нет	-	-	Темные неметаллические включения, вытянутые по направлению деформации
<b>ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ</b>					
34.	Легированная конструкционная сталь 40Х, ГОСТ 4543-71	0,40	0,8...1,1 Cr	Доэвтектоидная сталь	Темные участки перлита и светлый феррит

38.	Инструментальная легированная сталь X12, ГОСТ 5950-73	2,0	11,5...13,0 Cr	Сталь карбидного класса	Перлит мелкозернистый, крупные белые первичные карбиды и более мелкие вторичные карбиды
39.	Коррозионностойкая сталь 12X17, ГОСТ 5632-72	менее 0,12	16...18 Cr	Сталь ферритного класса	Светлые зерна легированного феррита
40.	Коррозионностойкая сталь 12X18Н10Т, ГОСТ 5632-72	менее 0,12	17...19 Cr; 9...11 Ni; не более 0,5 Ti	Сталь аустенитного класса	Светлые зерна легированного аустенита

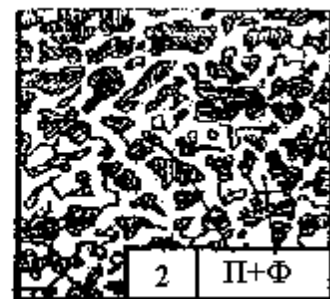
Продолжение табл. 8

ЧУГУНЫ					
12.	Белый заэвтектический чугун	5,1	данных нет	Чугун белый	Темно-белые участки ледебурита и светлые пластины первичного цементита

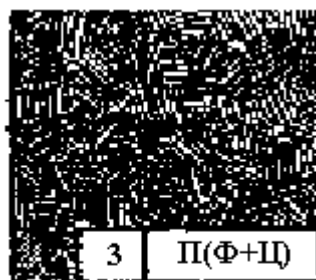
14.	Чугун ЧПГ марки СЧ15, ГОСТ 1412-85	3,4	2,2Si ; 0,7 Mn	Чугун с пластинчатым графитом	Темный перлит, светлый феррит и тонкие черные пластины графита
16.	Чугун ЧХГ марки КЧ30-6, ГОСТ 1215-79	2,7	1,2Si ; 0,5 Mn	Чугун с хлопьевидным графитом	Светлые зерна феррита и темный хлопьевидный (компактный) графит
18.	Чугун ВЧШГ марки ВЧ 60, ГОСТ 7293-85	3,5	2,1Si ; 0,6 Mn	Чугун с шаровидным графитом	Темный перлит, светлый феррит и черный шаровидный графит



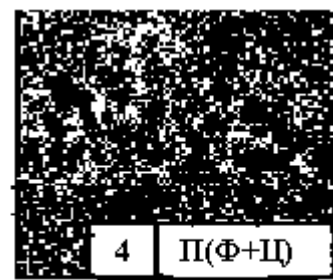
x100



x100



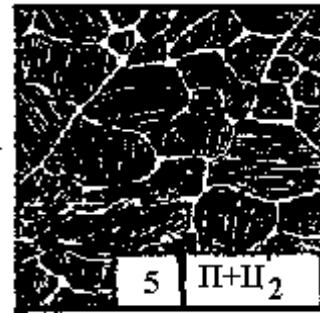
x600



x 100



x600



x100

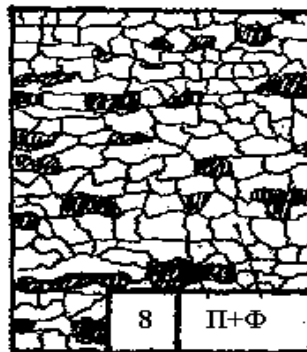
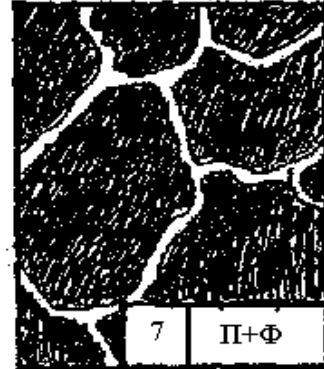
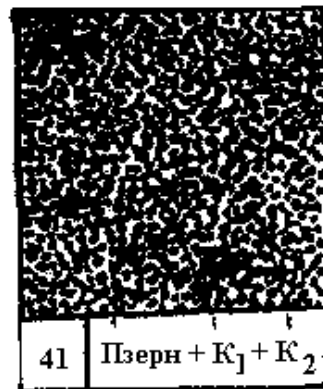
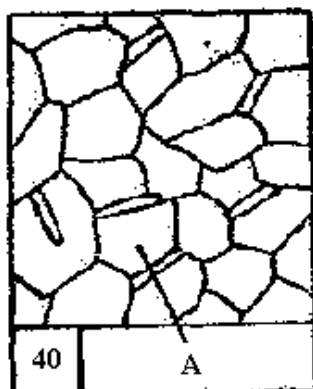
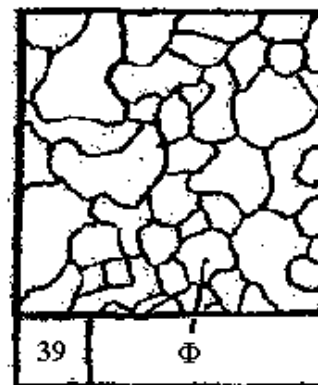
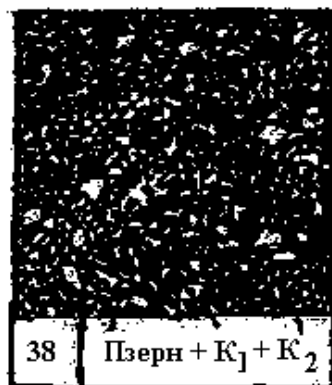
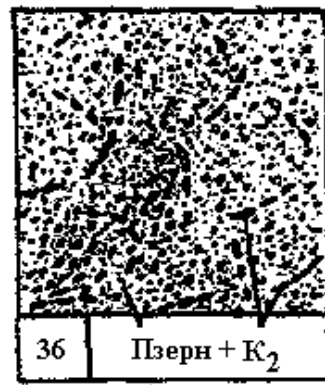
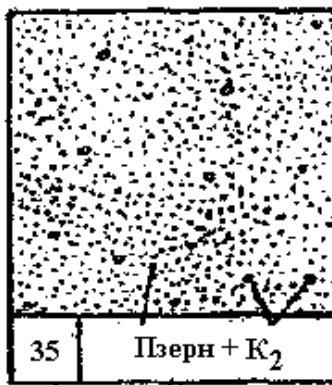
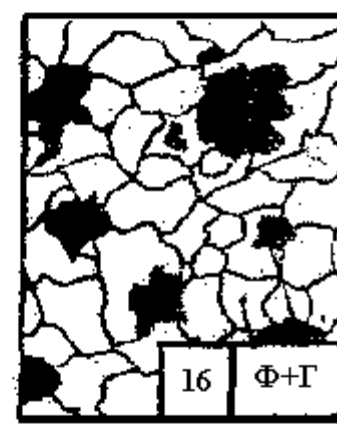


Рис. 7. Схемы микроструктур сталей и чугунов



Продолжение рис. 7.



Продолжение рис. 7.

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Итоги проведенной работы оформляют в отчете, который должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Теоретические положения: понятие о микроанализе и микроструктуре. Характеристика фаз и структурных составляющих сталей и чугунов. Перечисление структурных классов сталей и чугунов.
3. Зарисовка схем микроструктур всех изученных сплавов, наименование и марка материала, составляющие структуры, химический состав.

В конце занятия преподаватель путем устного опроса проверяет усвоение знаний студентами по вопросам для самопроверки.

Оформленные отчеты проверяются и подписываются преподавателем.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К РАБОТЕ И САМОПРОВЕРКИ**

1. Понятие микроанализа и микроструктуры материалов.
2. Какие основные части имеет металлографический микроскоп?
3. В какой последовательности проводится рассмотрение микрошлифа и изучение микроструктуры?
4. Что понимается под числовой апертурой микроскопа?
5. Из каких химических элементов (компонентов) состоят стали и чугуны?
6. Что представляют собой феррит, цементит, перлит, ледебурит?
7. Какие структурные классы имеют стали и чугуны?
8. Какую геометрическую форму имеют включения графита в чугунах ЧПГ, ВЧШГ, ЧХГ, ЧВГ?
9. Применение и механические свойства сталей и чугунов.

### Практическая работа №3.

**Тема:** Расчёт толщины стенок обечаек и днищ.

Расчёт толщины обечаек и днищ, работающих под внутренним давлением.

Исходные данные для расчёта:

$D$  – внутренний диаметр аппарата, м.

$P$  – рабочее давление в аппарате, МПа.

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва.

$C_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, м.

$t$  – рабочая температура в аппарате, °C.

Расчётная толщина стенки гладкой цилиндрической обечайки

$$S = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P} + C;$$

Для эллиптического или полусферического днища

$$S = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - 0.5 p} + C;$$

где  $R = D$  радиус кривизны в вершине днища для эллиптических днищ;

$R = 0,5 D$  – для полусферических днищ.

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение для материала обечайки и днища при расчётной температуре, выбирая по приложениям ГОСТ 14249-0/3, с. 50-53; 4, с. 11-12 /

Толщина плоских, круглых днищ и крышек

$$S = K \cdot K_0 \cdot D_R = \sqrt{\frac{P}{[\sigma] \cdot \varphi}} + C;$$

где  $K$  – коэффициент конструкции /4, с.21/

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_R} + \left(\frac{d}{D_R}\right)^2}; \quad - \text{коэффициент ослабления днища одиночным}$$

отверстием «d»,

$D_R$  – расчётный диаметр днища.

Толщина стенки конической обечайки, днища:

$$S = \frac{P \cdot D_k}{2[\sigma]\varphi} - \frac{I}{p \cdot \cos \alpha} + C;$$

где  $D_k$  – расчётный диаметр гладкой конической обечайки, обычно принимают  $D_k = D$ ,

$\alpha$  – половина угла при вершине конуса.

Прибавка к толщине стенки:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

$C_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм.

$C_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска, мм.

$C_3$  – прибавка технологическая, мм.

### Пример № 1.



Определить толщину стенки цилиндрической обечайки аппарата, нагруженного внутренним давлением, если

$$D = 1,2 \text{ м}$$

$$P = 0,6 \text{ МПа}$$

$$t = + 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Pi = 0,1 \text{ мм/год} - \text{ скорость коррозии}$$

$$\tau_{\beta} = 10 \text{ срок эксплуатации}$$

Материал – В СтЗ СП ГОСТ 380-71

Шов стыковой с подваркой корня шва, выполняемый в ручную, 50% контроль швов.

*Решение:*

Допускаемое напряжение для ВСтЗ при  $t = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^a = 1 \cdot 133 = 133 \text{ МПа}$$

$\eta - \zeta$  1 поправочный коэффициент для проката;

$\sigma^a - \zeta$  нормативное допускаемое напряжение при расчётной температуре.  $\varphi = 0,9$  Коэффициент прочности продольных сварных швов для заданных швов

$C_1 = \nu \cdot \tau_{\beta} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ мм}$  – прибавка к расчетной толщине стенки на коррозию и эрозию.

Расчетная толщина обечайки

$$S = \frac{P \cdot D}{2\varphi[\sigma] - p} + C = \frac{0,6 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,9 \cdot 133 - 0,6} + 0,001 = 0,0042 \text{ м};$$

Принимаем  $S = 6 \text{ мм}$

Допускаем внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2 \cdot 133 \cdot 0,9(0,006-0,001)}{1,2+(0,006-0,001)} = 0,8 \text{ МПа}$$

$$[p] > p;$$

$$0,8 > 0,6$$

Ответ:  $S = 6 \text{ мм}$ .

### Пример №2.

Определить толщину стенки эллиптического днища аппарата, нагруженного внутренним давлением для условий примера № 1.

*Решение:*

Расчетная толщина стенки днища

$$S = \frac{P \cdot R}{2\varphi[\sigma] - 0,5 p} + C = \frac{0,6 \cdot 1,2}{2 \cdot 1,0 \cdot 133 - 0,5 \cdot 0,6} + 0,001 = 0,0037 \text{ м}.$$

$\varphi = 1$ , т.к. днище изготавливается целой заготовки

$R = D = 1,2 \text{ м}$  – радиус кривизны в вершине днища для эллиптических днищ.

Принимаем  $S_1 = 6 \text{ мм}$ , т.к. стандартное эллиптическое днище размер  $D = 1,2 \text{ м}$  имеет минимальный размер  $S_1 = 6 \text{ мм} / 2$ , с. 116/

Допускаемое внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2(S_1 - C)\varphi[\sigma]}{R + 0,5(S_1 - C)} = \frac{2 \cdot (0,006 - 0,001) \cdot 1,0 \cdot 133}{1,2 + 0,5(0,006 - 0,001)} = 1,1 \text{ МПа}$$

$$[p] > p;$$

$$1,1 > 0,6$$

Ответ: S=6 мм.

### Пример №3.

Определить толщину стенки плоского круглого днища аппарата, нагруженного внутренним давлением, если:

$$P = 0,05 \text{ МПа}$$

$$D = 1,0 \text{ м}$$

$$d = 1,0 \text{ м}$$

$$K = 0,53$$

$$C_1 = 0,002 \text{ м}$$

$$t = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

материал днища – 16 ГС

*Решение:*

Расчетная толщина стенки плоского круглого днища

$$S = K \cdot K_0 \cdot D_R = \sqrt{\frac{P}{[\sigma] \cdot \varphi}} + C = 0,53 \cdot 1,03 \cdot 1,0 \sqrt{\frac{0,05}{160 \cdot 1}} + 0,002 = 0,0117 \text{ м.}$$

$$K_0 = \sqrt{1 + \frac{d}{D_R} + \left(\frac{d}{D_R}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{0,05}{1,0} + \frac{0,05}{(1,0)^2}} = 1,03 \quad \text{– коэффициент ослабления}$$

Днища центральным отверстием.

$D_R = D = 1,0$  – расчетный диаметр днища, М

$\varphi = 1,0$  – принимаем днище из целой заготовки

$[\sigma] = \sigma^a \cdot \eta = 160 \cdot 1 = 160 \text{ МПа}$  – допускаемое напряжение для стали 16 ГС при  $t = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Принимаем S= 12 мм.

Допускаемое давление на плоское днище

$$[p] = \left[ \frac{S - C}{(K \cdot K_0 \cdot D_R)} \right]^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi = \left[ \frac{0,012 - 0,002}{(0,53 \cdot 1,03 \cdot 1,0)} \right]^2 \cdot 160 \cdot 1,0 = 0,054 \text{ МПа} \quad [p] > p;$$

$$0,054 > 0,05$$

Ответ: S=12 мм.

### Пример №4.

Определить толщину стенки конического днища, нагруженного внутренним давлением, если:

$$P = 0,8 \text{ МПа}$$

$$D = 1,2 \text{ м} \quad \text{– внутренний диаметр аппарата}$$

$$D_0 = 0,1 \text{ м} \quad \text{– внутренний диаметр нижнего штуцера}$$

$$2 \alpha = 90^\circ$$

$$t = +180^\circ \text{ C}$$

$$C_1 = 2 \text{ мм.}$$

Материал днища – сталь 09Г2С ГОСТ 5520-79

Сварка вручную, с одной стороны, 100% контроль швов.

*Решение:*

Расчетная толщина стенки конического днища

$$s = \frac{P \cdot D}{2 \varphi [\sigma] - P} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} + C;$$

$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^a = 1 \cdot 150 = 150 \text{ МПа}$  – допускаемое напряжение для стали 09Г2С при  $t = +180^\circ \text{С}$   
 $\varphi = 0,9$  – коэффициент прочности продольного сварного шва для

ручной

Односторонней сварки при 100% контроле швов.

$$S = \frac{0,8 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,9 \cdot 150 - 0,8} \cdot \frac{1}{\cos 45^\circ} + 0,002 = 0,007 \text{ м}$$

Принимаем  $S = 8 \text{ мм}$ .

Допускаем внутреннее избыточное давление

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi (S - C)}{\frac{D}{\cos \alpha} + (S - C)} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 0,9 (0,008 - 0,002)}{\frac{1,2}{\cos 45^\circ} + (0,008 - 0,002)} = 0,95 \text{ МПа}$$

$$[p] > p;$$

$$0,95 > 0,8$$

Ответ:  $S = 8 \text{ мм}$ .

### Задание 1, 2

Определить толщину стенки цилиндрической обечайки и эллиптического днища аппарата, нагруженного внутренним давлением, если

$D$  - внутренний диаметр аппарата, м;

$p$  – рабочее давление в аппарате, МПа;

$v$  - скорость коррозии, мм/год;

$\tau_\beta$  - срок эксплуатации, год;

$t$  – температура в аппарате,  $^\circ\text{С}$ .

Номер задачи	$D$	$P$	$t$	$v$	$\tau_\beta$	Марка стали	Характеристика сварных швов
--------------	-----	-----	-----	-----	--------------	-------------	-----------------------------

1	1,0	1,6	100	0,05	15	Ст3	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
2	1,2	1,4	180	0,1	12	16ГС	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
3	1,4	2,5	160	0,1	10	20	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
4	1,6	2,0	160	0,2	10	16ГС	полуавтоматическая, 2х ст, контроль до 100%
5	1,8	1,8	150	0,2	10	09Г2С	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
6	2,0	1,0	190	0,05	15	08Х18Н10Т	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
7	2,2	0,9	120	0,08	10	12Х18Н10Т	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
8	2,4	2,5	200	0,1	10	19Г2С	ручная, односторонняя, контроль до 50%
9	2,6	3,2	120	0,1	15	20К	ручная, односторонняя, контроль до 50%
10	2,8	6,2	80	0,09	10	08Х22НТ	ручная, односторонняя, контроль до 50%

### **Задание 3**

Определить толщину стенки плоского круглого днища аппарата, нагруженного внутренним давлением, если

$D$  - внутренний диаметр аппарата, м;

$p$  – рабочее давление в аппарате, МПа;

$d$ - диаметр центрального отверстия, м;

$K$ - коэффициент учитывающий конструкцию днища;

$t$  – рабочая температура в аппарате, °С;

$C_1$ - прибавка на коррозию и эрозию, мм.

Номер задачи	$D$	$p$	$d$	$t$	$C_1$	$K$	Марка стали
1	1,4	0,2	0,1	150	2	0,53	20
2	1,2	0,03	0,15	150	2	0,5	16ГС
3	1,0	0,04	0,08	200	2	0,41	09Г2С
4	0,8	0,05	0,05	200	1	0,45	17ГС
5	0,6	0,06	0,05	150	1	0,53	Ст3
6	0,5	0,07	0,05	150	1	0,5	10Г2
7	0,4	0,08	0,04	250	2	0,41	12Х18Н10Т
8	0,309	0,019	0,04	100	2	0,45	08Х17Н13
9	0,359	0,1	0,05	100	2	0,41	08Х18Н10Т
10	0,406	0,015	0,05	180	1	0,5	16ГС

### **Задание 4**

Определить толщину стенки конического днища аппарата, нагруженного внутренним давлением, если

$D$  - внутренний диаметр аппарата, м;

$p$  – рабочее давление в аппарате, МПа;

$D_0$  - внутренний диаметр нижнего штуцера, м;

$2\alpha$ - угол при вершине конуса, °;

$C_1$ - прибавка на коррозию и эрозию, мм;

$t$  – рабочая температура в аппарате, °С.

Номер задачи	D	D <sub>0</sub>	P	t	C <sub>1</sub>	2α	Марка стали	Характеристика сварных швов
1	1,0	0,1	0,2	120	1,0	90	Ст3	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
2	1,2	0,15	0,4	100	1,0	120	16ГС	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
3	1,4	0,2	0,6	80	2,0	90	20	автоматическая, 2х ст, контроль до 50%
4	1,6	0,4	0,8	150	2,0	90	16ГС	полуавтоматическая, 2х ст, контроль до 100%
5	1,8	0,5	1,2	200	1,5	90	09Г2С	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
6	2,0	0,4	1,0	200	1,2	120	08Х18Н10Т	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
7	2,2	0,6	0,4	150	1,0	120	12Х18Н10Т	ручная, с подваркой корня, контроль 100%
8	2,4	0,4	0,2	120	1,0	120	19Г2С	ручная, односторонняя, контроль до 50%
9	0,8	0,1	0,8	140	2,0	90	20К	ручная, односторонняя, контроль до 50%
10	0,6	0,05	1,2	120	2,0	90	08Х22НТ	ручная, односторонняя, контроль до 50%

## Практическая работа №4.

**Тема:** Укрепление отверстий в стенках аппарата.

Обечайки, переходы, днища аппарата, находящихся под внутренним или внешним давлением могут быть ослаблены отверстия: это снижает прочность соответствующих элементов и вызывает необходимость укрепления отверстий. Основные способы укрепления отверстий: варивание штуцера с утолщенной стенкой, приварка накладного кольца, отбортовка отверстия.

Расчет на прочность укрепления отверстий в обечайках, переходах и днищах следует выполнять в соответствии ГОСТ 24755 - 8 “Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий”.

Не подлежат дополнительному укреплению одиночные отверстия при увеличенной толщине стенки сосуда, если соблюдаются условия:

$$d_r \leq d_o; d_o = 2 \left[ \frac{S-c}{S_r} - 0,8 \right] \sqrt{D_R (S-c)}$$

здесь  $d_R = d + 2C$  – расчетный диаметр отверстия;

$D_R - i$  – расчетный диаметр укрепляемого элемента

$D_R = D$  – для цилиндрических обечаек;

$D = \frac{D_k}{\cos \alpha} - i$  для конических обечаек, где  $D_k$  – внутренний диаметр

конической обечайки по центру закрепляемого отверстия.

$D_R = 2 \cdot R - i$  для сферических днищ

$D_R = 0,5 D$  эллиптических днищ

$S_R$  – расчетная толщина стенки укрепляемого элемента определяется по ГОСТ 14249-80.

Основной принцип укрепления отверстий заключается в том, что суммарная расчетная площадь сечения элементов в зоне укрепления должна быть не меньше расчетной площади вырезанного сечения.

*Пример:* определить наибольший допустимый диаметр выреза “ $d_o$ ” в тонкостенном аппарате, не требующий дополнительного укрепления, если

$$D = 1.2$$

$$S = 8 \text{ мм}$$

$$S_R = 5.1 \text{ мм}$$

$$C_1 = 1 \text{ мм}$$

Место резки – цилиндрическая обечайка.

*Решение:*

Наибольший допустимый диаметр выреза, не требующий дополнительного укрепления.

$$d_0 = 2 \left[ \frac{S-c}{S_r} - 0,8 \right] \sqrt{D_R(S-c)} = 2 \left[ \frac{0,008 - 0,001}{0,0051} - 0,8 \right] \sqrt{1,2(0,008 - 0,001)} = 0,105 \text{ м}$$

$D_R = D = 1,2$  для цилиндрической обечайки.

Ответ:  $d_0 = 0,105$  м.

### **Задание**

Определить наибольший допускаемый диаметр выреза “do” тонкостенном аппарате, не требующий дополнительного укрепления по данным таблицы, где;

D - внутренний диаметр аппарата (для конического перехода - диаметр по центру врезаемого отверстия), м.

S – Исполнительная толщина стенки обечайки (перехода, днища), мм.

$S_R$  – расчетная толщина стенки обечайки (перехода, днища), мм.

$C_1$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм.

Номер задачи	D	S	$S_R$	$C_1$	Место врезки
1	1,0	8	5,3	1,0	Эллиптическое днище
2	1,2	10	5,7	1,0	Коническое днище $\alpha = 45^\circ$
3	1,4	8	4,3	1,0	Цилиндрическая обечайка
4	1,6	10	7,1	0,05	Эллиптическое днище
5	1,8	8	4,2	0,05	Коническое днище $\alpha = 45^\circ$
6	2,0	10	4,9	0,05	Цилиндрическая обечайка
7	2,2	12	7,7	1,0	Цилиндрическая обечайка
8	2,4	12	7,5	2,0	Эллиптическое днище
9	2,6	16	12,1	2,0	Эллиптическое днище
10	2,8	18	10,3	1,0	Коническое днище $\alpha = 45^\circ$

## Практическая работа №5.

**Тема:** Расчет фланцевого соединения.

План:

1. Определение нагрузки на болты (шпильки).
2. Расчет болтов фланцевого соединения.
3. Приближенный метод расчета фланцевого соединения.

1. Нагрузку на болты и шпильки от внутреннего давления при расчетах определяют по формуле:

$$Q_b = Q_d + R_n = p \frac{\pi D_n^2}{4} + m \pi D_n 2b$$

где  $p$ -внутреннее давление равно  $p_y$  ( $p_{\text{раб}}$ );

$D_n$ - диаметр средней прокладке;

$m$ - коэффициент удельного давления на прокладку

$b$ - ширина прокладки

$Q_d$ - нагрузка, воспринимаемая болтами от внутреннего давления;

$R_n$ - нагрузка на прокладку, для герметичности .

2. Расчет болтов на прочность .

Число болтов фланцевого соединения (шпилек) определяется по формуле:

$$n = \frac{Q_b}{q_b}; n = \frac{Q_{b_1}}{q_b}$$

где  $q_b$  – дополнительная нагрузка на 1 болт;

$$q_b = \frac{\pi}{4} d_0^2 [\sigma]$$

Диаметр болтов (шпилек) принимают не менее 16 мм.

Число болтов и их диаметр округляют в большую сторону, учитывая, что число болтов должно быть кратно четырем ( $n=12, 16, 20$  и т.д.)

Максимальная нагрузка, которую могут воспринимать болты равна:

$$Q_{mb} = n q_b$$

Условная расчетная нагрузка:

$$Q_{бф} = \frac{Q_b + Q_{бм}}{2}$$





**Задание:**

Рассчитать цельный фланец:

$p$ -внутреннее давление равно  $p_y$  ( $p_{раб}$ );

$D_{п}$ - диаметр средней прокладке;

$m$ - коэффициент удельного давления на прокладку

$b$ - ширина прокладки

$Q_d$ - нагрузка, воспринимаемая болтами от внутреннего давления;

$R_{п}$ - нагрузка на прокладку, для герметичности

Номер задачи	$p_y$	$D_y$	$D_{п}$	$h$	$n$	$D_6$	$D_s$	$D_H$	$b$	$m$
1	1,6	500	545	44	20	650	570	535	12	2,75
2	1,8	550	595	44	20	700	620	585	12	2,75
3	1,7	600	645	44	20	750	670	635	12	2,75
4	1,5	500	545	44	20	650	570	535	12	2,75
5	1,6	450	495	44	20	600	420	485	12	2,75
6	1,9	500	545	44	20	650	570	535	12	2,75
7	1,7	550	595	44	20	700	620	585	12	2,75
8	1,8	600	645	44	20	750	670	635	12	2,75
9	1,9	450	495	44	20	600	520	585	12	2,75
10	1,6	500	545	44	20	650	570	535	12	2,75

## Практическая работа №5.

**Тема:** Расчет опор аппарата

Установка аппаратов на фундамента или специальные несущие конструкции осуществляется с помощью опор.

Вертикальные аппараты устанавливаются на подвесных лапах или на стойках, если аппарат размещается в помещении внизу. Колонные аппараты с отношением  $\frac{H}{D} > 5$  обычно имеют юбочную. (цилиндрическую или коническую) опору. Горизонтальные аппараты устанавливаются на седловых опорах. Все перечисленные опоры для стальных аппаратов стандартизованы. (ГОСТ 26-665-79, ГОСТ 26-467-78, ГОСТ 26-1265-75). Опоры выбирают по данным стандартам и рассчитывают обечайку цилиндрического аппарата, на которую действует местные нагрузки, обусловленные воздействием опор.

*Пример.*

Для вертикального аппарата выбрать по ГОСТ 26-665-79 опоры (лапы) и выполнить проверочный расчет, если

$G = 0,04$  МН – сила тяжести аппарата

$V = 20$  м<sup>3</sup> – геометрическая ёмкость

$n = 4$  – количество лап

$S = 8$  мм – толщина стенки аппарата

$P = 0,3$  МПа – давление аппарата

$D = 2,4$  м – диаметр аппарата

Материал опоры и аппарата – ВСт 3 СП ГОСТ 380-71

*Решение:*

Сила тяжести аппарата при гидроиспытании

$$G_{\max} = G + G_{\text{в}} = 0,04 + 0,2 = 0,24 \text{ МН}$$

Где  $G_1$  – сила тяжести аппарата, МН

$G_{\text{в}}$  – сила тяжести воды при гидроиспытании, МН

$$G_{\text{в}} = 200000 \text{ Н} = 0,2 \text{ МН} \text{ – для аппарата с } V = 20 \text{ м}^3$$

Выбор опоры.

Нагрузка на одну опору (лапу)

$$Q = \frac{G_{\max}}{n} = \frac{0,24}{4} = 0,06 = 60 \text{ кН}$$

**Задание:**

Для вертикального аппарата выбрать по ГОСТ 2-665-79 опоры ( лапы ) и выполнить проверочный расчет. Данные для выбора опоры взять из таблицы, где

G – сила тяжести аппарата, МН

V - геометрическая ёмкость аппарата,  $m^3$

n- количество лап;

S– толщина стенки аппарата, мм

P – внутреннее в давление аппарате МПа

Д – внутренний диаметр аппарата м

Номер задачи	G	V	n	S	P	Д	Марка стали опоры и аппарата
1	0.016	65.3	4	10	0.2	1.8	Вст3Сп : 20
2	0.033	10	4	14	0.6	2.0	Вст3Сп : 16ГС
3	0.0025	0.16	2	6	0.4	0.6	Вст3Сп: Вст3Сп
4	0.12	1.0	2	8	0.6	1.0	Вст3Кп : 09Г2С
5	0.18	1.6	2	8	0.6	1.2	16ГС : 16ГС
6	0.022	2.5	3	10	0.8	1.4	09Г2С : 09Г2С
7	0.032	4.0	3	12	1.0	1.6	Вст3пс : Вст3Сп
8	0.328	5.0	4	12	0.6	3.2	Вст3Сп : 12x18Н10Т
9	0.14	25	4	12	0.3	2.8	Вст3Сп :08 x18Н10Т
10	0.04	20	4	10	0.2	2.6	Вст3кп : Вст3Сп

## Практическое занятие №6.

**Тема:** Расчет кожухотрубчатого теплообменника на прочность

Для расчета необходимы следующие данные:

Диаметр	распределительная камера, мм	456	
	корпус, мм	460	
	эллиптическое днище, мм	460	
Материал	распределительная камера	Ст3	
	корпус	09Г2С	
	эллиптическое днище	16ГС	
Давление	трубное, МПа	$P_T=0,4$	
	межтрубное, МПа	$P_M=0,8$	
Температура	трубное, °С	100	
	межтрубное, °С	100	
Коэффициент сварного шва, $\phi$		0,9	
Прибавка на коррозию, мм		$C_1=2$	
Прокладка	внутренний диаметр, мм	478	
	внешний диаметр, мм	507	
Трубный пучок	шаг труб, см	3,2	
	диаметр труб, см	2,55	

*Решение:*

1. Расчет толщины стенки корпуса цилиндрической обечайки (межтрубное пространство)

$$[\sigma]=160\text{МПа}$$

$$C=C_1=2\text{мм}=0,002\text{м}$$

$$D=460\text{мм}=0,46\text{м}$$

$$S = \frac{pD}{2[\sigma]\phi - p} + C$$

$$S = \frac{0,8 \cdot 0,46}{2 \cdot 160 \cdot 0,9 - 0,8} + 0,002 = 0,0033 \text{ м} = 3,3 \text{ мм}$$

принимаем  $S=4\text{мм}$

$$[p] \geq p$$

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi(S-C)}{D+(S-C)}$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 160 \cdot 0,9(0,004 - 0,002)}{0,46 + (0,004 - 0,002)} = 1,2 \text{ МПа}$$

$$1,2 > 0,8$$

Ответ:  $S=4\text{MM}$

2. Расчет толщины стенки распределительной камеры (трубное пространство)

$$[\sigma]=134\text{МПа}$$

$$\phi=0,9$$

$$S = \frac{p_T D}{2[\sigma]\phi - p_T} + C$$

$$S = \frac{0,4 \cdot 0,456}{2 \cdot 134 \cdot 0,9 - 0,8} + 0,002 = 0,0027 \text{ м} = 2,7 \text{ мм}$$

принимаем  $S=3\text{мм}$

$$[p] \geq p$$

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi(S-C)}{D+(S-C)}$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 134 \cdot 0,9(0,003 - 0,002)}{0,456 + (0,003 - 0,002)} = 0,5 \text{ МПа}$$

$$0,5 > 0,4$$

Ответ:  $S=3\text{мм}$

3. Расчет толщины стенки эллиптического днища (трубное пространство)

$$[\sigma]=160\text{МПа}$$

$$\phi=1$$

$$R=D=0,46\text{м}$$

$$S_{\text{эл.д}} = \frac{p_T R}{2[\sigma]\phi - 0,5 p_T} + C$$

$$S_{\text{эл.д}} = \frac{0,4 \cdot 0,46}{2 \cdot 160 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,4} + 0,002 = 0,00257 \text{ м} = 2,57 \text{ мм}$$

принимаем  $S=3\text{мм}$

$$[p] \geq p$$

$$[p] = \frac{2[\sigma]\phi(S-C)}{R+0,5(S-C)}$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 160 \cdot 1 \cdot (0,003 - 0,002)}{0,46 + 0,5(0,003 - 0,002)} = 0,69 \text{ МПа}$$

$$0,69 > 0,4$$

Ответ:  $S=3\text{мм}$

4. Расчет толщины трубной решетки (трубное пространство)

$$D_H^{PP} = 478 \text{ мм} = 0,478 \text{ м}$$

$$D_{BH}^{PP} = 507 \text{ мм} = 0,507 \text{ м}$$

$$t_p = 3,2 \text{ см}$$

$$d_0 = 2,55 \text{ см}$$

материал – 09Г2С

$[\sigma]=160\text{МПа}$

$$S=0,238 \cdot D_{cp} \sqrt{\frac{p_T}{\psi \cdot [\sigma]} + C}$$

$$\psi = \frac{t_p - d_0}{t_p} = \frac{3,2 - 2,55}{3,2} = 0,203$$

$$D_{CP} = \frac{D_H + D_{BH}}{2} = \frac{0,507 + 0,478}{2} = 0,49$$

$$S = 0,238 \cdot 0,49 \sqrt{\frac{0,4}{0,203 \cdot 160}} + 0,002 = 0,0034 \text{ м} = 34 \text{ мм}$$

Ответ:  $S=40\text{мм}$

5. Расчет надежности закрепления труб в трубной решетке (трубное пространство)

$\sigma_{\max} \leq 0,04\text{МПа}$

$$f = t_p^2 - 0,85 \cdot d_0^2$$

$$f = 0,032^2 - 0,85 \cdot 0,0255^2 = 0,0004713 \text{ м}^2$$

$$\sigma = \frac{p \cdot f}{\pi \cdot d_0} = \frac{0,4 \cdot 0,0004713}{3,14 \cdot 0,0255} = 0,002 \text{ МПа}$$

$\sigma < \sigma_{\max}$

Ответ:  $\sigma=0,002\text{МПа}$

6. Расчет гидроиспытаний

материал – 09Г2С

$$P_{Г.И} = 1,25 \cdot P_M \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$$

$$P_{Г.И} = 1,25 \cdot 0,8 \cdot \frac{183}{160} = 1,14 \text{ МПа}$$

Ответ:  $P_{Г.И}=1,14\text{МПа}$





## Практическое занятие №7.

**Тема:** Расчет резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup> на прочность.

План:

1. Данные для расчета.
2. Рисунок.
3. Сбор нагрузок
  - 3.1 Масса резервуара
  - 3.2 Нагрузка от массы продукта
  - 3.3 Нагрузка от внутреннего избыточного давления
  - 3.4 Нагрузка от вакуума
  - 3.5 Снеговая нагрузка
  - 3.6 Ветровая нагрузка
  - 3.7 Нагрузка от массы оборудования.

Расчет резервуара

1 Данные:

Условный объем резервуара = 1000 м<sup>3</sup>

Плотность продукта = 1000 кг/м<sup>3</sup>

Снеговая нагрузка = 150 кгс/м<sup>2</sup>

Ветровая нагрузка = 45 кгс/м<sup>2</sup>

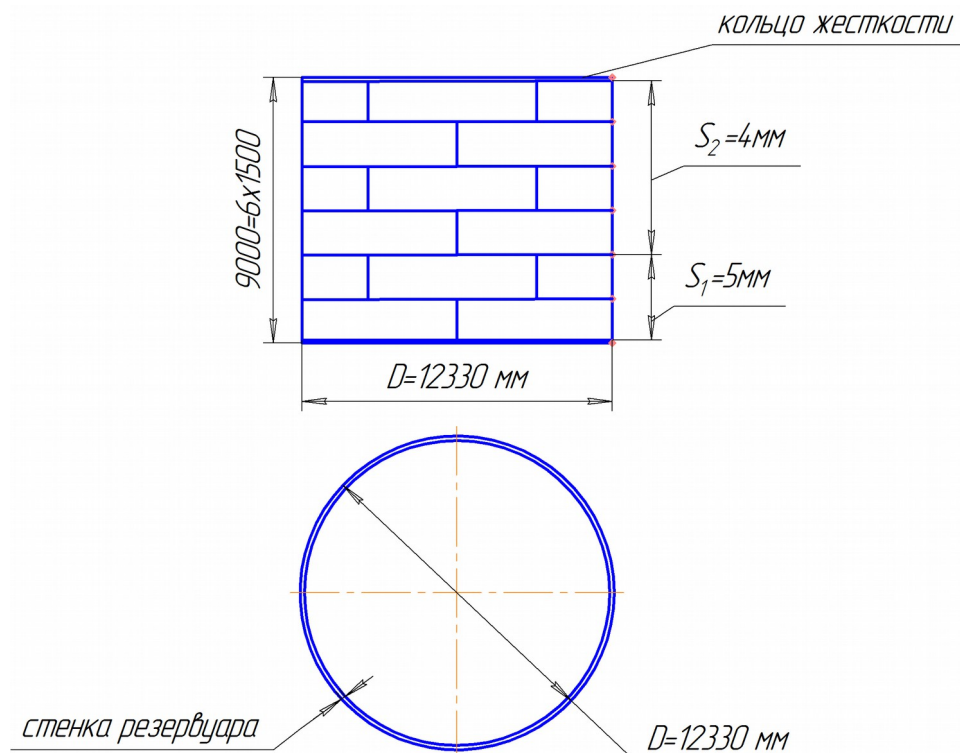
Внутреннее давление = 200 мм вод ст

Вакуум = 25 мм вод ст

Плотность стали = 7850 кгс/м<sup>3</sup>

Прибавка на коррозию = 1 мм

2 Рисунок:



### 3. Сбор нагрузок

#### 3.1. Нагрузка от массы резервуара

##### 3.1.1. Нагрузка от массы крыши:

$$G_{кр} = 6340 \text{ кгс}$$

Равномерно распределенная нормативная нагрузка от массы крыши:

$$q_H = \frac{G_{кр}}{F_{кр}} = \frac{6340}{119,53} = 53,04 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

$$F_{кр} = \pi r^2 = 3,14 (6,17)^2 = 119,53 \text{ м}^2$$

Равномерно распределенная расчетная нагрузка от массы крыши:

$$q_{кр}^p = 1,05 \cdot q_{кр}^H = 1,05 \cdot 53,04 = 54,09 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

##### 3.1.2. Нагрузка от массы стенки

Масса станки:

$$G_{см} = D \cdot \pi \cdot (2S_1 + 4S_2) \cdot \rho = 12,33 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 0,005 + 4 \cdot 0,004) \cdot 7850 = 16196 \text{ кгс}$$

Нормативная нагрузка от массы одного пояса толщиной 4 мм:

$$G_{n4}^H = 12,33 \cdot 1,5 \cdot 0,004 \cdot 3,14 \cdot 7850 = 1823 \text{ кгс}$$

Расчетная нагрузка от массы одного пояса толщиной 4 мм:

$$G_{n4}^p = 1,05 \cdot G_{n4}^H = 1,05 \cdot 1823 = 1914,15 \text{ кгс}$$

Нормативная нагрузка от массы одного пояса толщиной 5 мм:

$$G_{n4}^H = 12,33 \cdot 1,5 \cdot 0,005 \cdot 3,14 \cdot 7850 = 2279 \text{ кгс}$$

Расчетная нагрузка от массы одного пояса толщиной 5 мм:

$$G_{n5}^p = 1,05 \cdot G_{n5}^H = 1,05 \cdot 2279 = 2393 \text{ кгс}$$

##### 3.1.3 Нагрузка от массы днища

Масса днища:

$$G_{дн} = \frac{3,14 \cdot 12,33^2}{4} \cdot 0,004 \cdot 7850 = 3747 \text{ кгс}$$

Равномерно распределенная нормативная нагрузка от массы днища:

$$q_{дн}^H = 0,004 \cdot 3747 = 14,98 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

Равномерно распределенная расчетная нагрузка от массы днища:

$$q_{дн}^p = 1,05 \cdot q_{дн}^H = 1,05 \cdot 14,98 = 15,73 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

#### 3.2. Нагрузка от массы продукта

Полный объем резервуара  $949 \text{ м}^3 \approx 950 \text{ м}^3$ .

Равный объем равен около 95 % от условной емкости резервуара.

Полная масса хранимого продукта:

$$G_{пр} = 950 \cdot 1000 = 950000 \text{ кг}$$

Равномерно распределенная нагрузка от масс продукта:

$$q_{пр} = \frac{950000}{\frac{3,14 \cdot (12,33)^2}{4}} = \frac{950000}{119,34} = 7983 \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$$

#### 3.3. Нагрузка от внутреннего избыточного давления:

Нормативное давление:

$$P^H = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Расчетное давление

$$P^p = 0,02 \cdot 1,2 = 0,024 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

### 3.4 Нагрузка от вакуума

Нормативная нагрузка:

$$P_{\text{вак}}^H = 0,0025 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Расчетная нагрузка

$$P_{\text{вак}}^p = 0,0025 \cdot 1,2 = 0,003 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

### 3.5. Ветровая нагрузка

Расчетное значение ветровой нагрузки для расчета устойчивости стенки резервуара:

$$P_{\text{в}} = 45 \cdot 1,05 \cdot 0,5 = 23,63 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

### 3.6. Нагрузка от массы оборудования:

Нормативная нагрузка от массы оборудования:

$$G_o^H = 1500 \text{ кгс}$$

Расчетная нагрузка от массы оборудования:

$$G_o^p = 1,05 \cdot 1500 \approx 1575 \text{ кгс}$$

### 3.7. Снеговая нагрузка:

Полная расчетная нагрузка:

$$S = S_o \cdot \mu \cdot \gamma_f$$

$$\mu = 0,076$$

$$S_o = 150$$

$$\gamma_f = 1,6$$

$$S = 169,44$$



## Практическое занятие №9

**Тема:** Расчет на прочность колонны высокого давления

Расчет крышки.

Расчетная толщина плоских крышек.

$$D_a - 2 d_{0.ш} - \sum d_i [\sigma] \geq 3,8 \cdot F \cdot \sqrt{c p} / (D_b - D_i + P \cdot D_{cp}^3)$$

Где F- осевое усилие от действующих на крышку нагрузок;

$D_b$ - диаметр окружности центров шпилек;

$D_a$ - наружный диаметр крышки;

$D_{cp}$ - средний диаметр уплотнительной поверхности;

$D_{0.ш}$ - диаметр отверстия под крепежную шпильку;

$\sum d_i$ - максимальная сумма длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральной сечении крышки.

### Пример №1.

Произвести расчет плоской крышки корпуса колонны высокого давления, если даны следующие данные:

$$F=4,54 \text{ Н};$$

$$D_b=0,555 \text{ м};$$

$$D_a=0,7 \text{ м};$$

$$D_{cp}=0,455 \text{ м};$$

$$D_{0.ш}=0,072 \text{ м};$$

$$\sum d_i=0,04 \text{ м}.$$

*Решение:*

Подставим данные в формулу:

$$D_a - 2 d_{0.ш} - \sum d_i [\sigma] \geq 3,8 \cdot F \cdot \sqrt{c p} / (D_b - D_i + P \cdot D_{cp}^3)$$

$$0,555 - 0,455 + 20 \cdot 0,455^3$$

$$i(0,7 - 2 \cdot 0,072 - 0,04) \cdot 166$$

$$3,8 \cdot 4,54 \cdot i$$

$$S_{np} \geq 0,45 \sqrt{L}$$

Исполнительная толщина стенки

$$S_{II} \geq S_{np} + C + C_1$$

$$S_{II} \geq 0,093 + 0,002 + C_1$$

Принимаем  $S=100$  мм.

## Практическое занятие №11

### Тема: Механический расчет центрифуги

Мощность электродвигателя центрифуги определяют по периоду наибольшей нагрузки. Обычно ее рассчитывают по пусковому периоду.

Основной и ответственный элемент центрифуги- ротор. Цилиндрическая обечайка его испытывает растягивающие напряжения от действия центробежной силы, приложенной к жидкости, заполняющий ротор, и к самому материалу ротора.

Давление жидкости на стенки цилиндра при действии центробежной силы (МПа):

$$P_{жс} = 0,5 \rho_{жс} \omega^2 R^2 \psi,$$

Где  $\rho_{жс}$ - плотность жидкости, кг/мм<sup>3</sup> ;

$\omega$ - угловая скорость, с<sup>-1</sup> ;

$\psi$ - объемный коэффициент заполнения ротора.

Центробежные силы, действующие на элемент цилиндра, можно рассматривать как дополнительное значение внутреннего давления (МПа), растягивающего обечайку:

$$p_{ц} = \rho_{м} s \omega R,$$

Где  $\rho_{м}$  - плотность ротора кг/м<sup>3</sup>;

s- толщина стенки ротора, мм.

Суммарное расчетное давление

$$p = p_{жс} - p_{ц}.$$

Цилиндрическую обечайку ротора рассчитывают как обечайку под давлением:

$$S = \frac{pD}{2[\sigma]\psi} + c,$$

Где

$$\psi = \frac{t-d}{t}$$

коэффициент ослабления барабана отверстиями;

t- шаг между отверстиями;

d- диаметр отверстия.

Ротор центрифуг имеют сложную форму. Они состоят из нескольких оболочек, связанных между собой, деформирующихся в разной степени. В местах сварки оболочек возникают значительные краевые напряжения, по величине превосходящие растягивающие напряжения.

### Пример №1.

Произвести расчет на прочность цилиндрической обечайки ротора центрифуги. Давление жидкости на стенку цилиндра, при действии центробежной силы:  $\rho_{жс} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>- плотность жидкости; угловая скорость равна  $\omega = 157$  рад/с ; объемный коэффициент заполнения ротора  $\psi = 0,6$ ; ротор



выполнен из материала 08Х22Н6Т плотностью  $\rho_m=7800 \text{ кг/м}^3$  ; толщина стенки обечайки ротора 15 мм, шаг между отверстиями равен 12 мм;  $d=5\text{мм}$ -диаметр отверстия.

*Решение:*

Найдем центробежную силу, приложенную к элементу материала ротора:

$$p_u = \rho_m s \omega R = 7800 \cdot 0,015 \cdot 157^2 \cdot 0,45 = 1,3 \cdot 10^6 = 1,3 \text{ МПа}$$

Найдем давление жидкости на стенку цилиндра, при действии центробежной силы:

$$P_{жс} = 0,5 \rho_{жс} \omega^2 R^2 \psi = 0,5 \cdot 1000 \cdot 157^2 \cdot 0,45^2 \cdot 0,6 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,5 \text{ МПа}.$$

Суммарное расчетное давление:

$$p = p_{жс} + p_u = 1,5 + 1,3 = 2,8.$$

Напряжение разрыва, возникающее в стенке ротора:

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{S \cdot \psi} = \frac{2,8 \cdot 0,45}{0,015 \cdot 0,583} = 144 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 175 \text{ МПа}.$$

Коэффициент ослабления барабана ротора

$$\psi = \frac{t-d}{t} = \frac{12-5}{12} = 0,583$$

**Самостоятельно:**

Произвести расчет на прочность цилиндрической обечайки ротора центрифуги. Давление жидкости на стенку цилиндра, при действии центробежной силы:  $\rho_{жс}=1000 \text{ кг/м}^3$ - плотность жидкости; угловая скорость равна  $\omega = 183 \text{ рад/с}$  ; объемный коэффициент заполнения ротора  $\psi=0,7$ ; ротор выполнен из материала Ст3 плотностью  $\rho_m=7800 \text{ кг/м}^3$  ; толщина стенки обечайки ротора 12 мм, шаг между отверстиями равен 10 мм;  $d=4\text{мм}$ -диаметр отверстия.

## Практическое занятие №12

**Тема:** Механический расчет вращающихся барабанов

Толщину стенки барабана выбирают из соотношения  $S_6=(0,007-0,001)D_H$ , где  $D_H$ - наружный диаметр барабана  
Затем проверяют на прочность и прогиб как балку, свободно лежащую на двух опорах и нагруженную равномерно-распределенной нагрузкой от веса барабана, насадки, бандажей, загружаемого материала. Вес венцовой шестерни рассматривают как сосредоточенную силу.

Условия прочности барабана:

$$\delta = \frac{M_{max}}{W} \leq [\sigma], \text{ где}$$

$[\sigma]=5-10\text{МПа}$ - допускаемое напряжение для аппаратов из сталей Ст2, Ст3, 10, 15 без футеровки

$[\sigma]=20\text{МПа}$  – для аппаратов с футеровкой

Затем барабан проверяют на жесткость

Относительный прогиб

$$E = \frac{y_{max}}{D_\phi} \leq [E]$$

Где допускаемый относительный прогиб (барабан с футеровкой)  
 $[E] = \frac{1}{300}$

Где допускаемый относительный прогиб (барабан без футеровки)

$$[E] = \frac{1}{200}$$

Диаметр бандажей, опорных и упорных роликов предварительно выбирают по каталогу, а затем выполняют проверку их на контактную прочность.

### Пример №1.

Произвести расчет на прочность барабана сушилки, имеющей две опорных станции, если:

$D_H=3,0\text{м}$  - наружный диаметр барабана;

$S_6=20\text{ мм}$ - толщина стенки барабана;

$L=18\text{ м}$ - длина барабана;

$l_2=10,5\text{ м}$  ;  $l_1=2,5\text{ м}$ ;

$\psi=0,25$  – коэффициент заполнения барабана материалом;

$\rho_M=2000\text{ кг/м}^3$ - плотность обрабатываемого материала;

$m_K=140000\text{ кг}$ - масса корпуса барабана с насадкой;

$Q_B=150000\text{ Н}$ - нагрузка от венцовой шестерни.

$[\sigma]=10\text{ МПа}$ .

*Решение:*

Внутренний диаметр барабана

$$D_B = D_H - 2 \cdot S_6 = 3,0 - 2 \cdot 0,02 = 2,96 \text{ м.}$$

Масса материала находящегося в сушилке

$$m_M = \frac{\psi \cdot \rho_M \cdot L \cdot \pi \cdot D_B^2}{4} = \frac{0,25 \cdot 2000 \cdot 16 \cdot 3,14 \cdot 2,96^2}{4} = 61900 \text{ кг}$$

Суммарная масса барабана и материала

$$m = m_k + m_M = 140000 + 61900 = 201900 \text{ кг.}$$

Линейная нагрузка

$$q = \frac{m \cdot g}{L} = \frac{201900 \cdot 9,81}{18} = 110036 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Реакция на опорах

$$R_A = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{Q_B \cdot l_1}{l_2} = \frac{110036 \cdot 18}{2} + \frac{150000 \cdot 2,5}{10,5} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$R_B = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{Q_B \cdot (l_2 - l_1)}{l_2} = \frac{110036 \cdot 18}{2} + \frac{150000 \cdot (10,5 - 2,5)}{10,5} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Максимальный изгибающий момент, действующий на барабан

$$M_{\max} = \frac{q \cdot L(2l_2 - L)}{8} + \frac{Q_B(l_2 - l_1)l_1}{l_2} = \frac{110036 \cdot 18(2 \cdot 10,5 - 18)}{8} + \frac{150000(10,5 + 2,5)}{10,5} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ Нм}$$

Момент сопротивления сечения корпуса барабана:

$$W = \frac{S_6 \cdot D_{cp}^2}{4} = \frac{0,02 \cdot 3,14 \cdot 2,98^2}{4} = 0,139 \text{ м}^3.$$

$$D_{cp} = D_H - S_6 = 3,0 - 0,02 = 2,98 \text{ м.}$$

Напряжение в корпусе барабана

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{1,03 \cdot 10^6}{0,139} = 7,41 \cdot 10^6 \text{ Па} = 7,41 \text{ МПа}$$

Условия прочности

$$\sigma \leq [\sigma]; 7,41 \leq 10 \text{ МПа}$$

Выполняется

Расчет на жесткость.

Суммарный прогиб от действующих нагрузок

$$y_{\max} = \frac{D^3}{E J_x} (0,04 q_1 + 0,002 q_2)$$

Где

$$J_x = I \cdot \frac{S_6}{12} = \frac{1 \cdot 0,02^3}{12} = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4 \text{ - момент инерции единичного кольца барабана}$$

$E = 1,87 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  - модуль упругости Ст3 при  $t = +150^\circ\text{C}$ .

$$q_1 = \frac{g \cdot m_M}{L} = \frac{9,81 \cdot 61900}{18} = 33736 \text{ Н/м}$$

Линейная нагрузка от массы обрабатываемого материала

$$q_2 = \frac{g \cdot m_k}{L} = \frac{9,81 \cdot 140000}{18} = 76300 \text{ Н/м}$$

Нагрузка от массы барабана

$$y_{max} = \frac{2,98^2}{8 \cdot 1,87 \cdot 10^{11} \cdot 6,7 \cdot 10^{-7}} (0,04 \cdot 33736 + 0,002 \cdot 76300) = 3,96 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 0,0396 \text{ м}.$$

Относительный прогиб

$$E = \frac{y_{max}}{D_{cp}} = \frac{0,0396}{2,96} = 0,0133 = \frac{1}{75};$$

Условия жесткости  $E \leq [E]$  не выполняется, т.к.

$$\frac{1}{75} \geq \frac{1}{200}$$

Следует уменьшить  $\psi$ - коэффициент заполнения материала.

### **Задание:**

Произвести расчет барабана сушилки на прочность и жесткость по данным таблицы:

$D_H$ - наружный диаметр барабана, м;

$S_b$  - толщина стенки барабана, мм;

$L$  - длина барабана, м;

$l_2$ - расстояние от венцовой шестерни до бандаж, м;

$\psi$ - коэффициент заполнения барабана материалом;

$\rho_M$ - плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$m_K$  - масса корпуса барабана с насадкой, кг;

$Q_B$  - нагрузка от венцовой шестерни, Н

$l_1$ - расстояние между бандажками, м.

Номер задачи	$D_H$	$S_b$	$L$	$l_1$	$l_2$	$\psi$	$Q_B$	$m_K$	$\rho_M$
1	2,8	20	16	2,5	9,3	0,21	93000	60500	1500
2	2,5	16	14	2,5	8,2	0,15	72000	34200	2500
3	2,2	12	16	1,2	9,3	0,18	20900	19700	1500
4	2,0	10	10	1,2	5,9	0,21	18600	9600	2000
5	1,6	8	12	1,1	7,0	0,25	11000	7000	25000
6	1,2	6	10	0,9	5,9	0,18	7500	3000	2000
7	1,0	5	6,0	0,8	3,5	0,15	5000	1300	600
8	1,0	5	4,0	0,8	2,3	0,15	5000	900	600
9	1,2	6	6,0	0,9	3,5	0,18	7500	1900	600
10	1,6	8	8,0	1,1	4,7	0,18	11000	4800	2000

## **Практическое занятие №13**

**Тема:** Механический расчет элементов перемешивающего устройства

Расчет мешалок в основном сводится к определению усилий, действующих на лопасти; мощности, затрачиваемой на перемешивание и проверке вала на виброустойчивость.

Тип перемешивающего устройства выбирают в зависимости от вязкости среды  $\mu_c$  и ее вида. ГОСТ 20680-75 предусматривает 10 типов исполнения вертикальных аппаратов с перемешивающими устройствами.

Мощность, необходимая для перемешивания, определяется по формуле:

$$N_M = k_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_M^5;$$

Где  $k_N$ - критерий мощности, определяемый по графику, в зависимости от величины Рейнольдса-  $Re_M$

$$Re_M = \frac{\rho \cdot n \cdot d_M^2}{\mu_c};$$

Где  $\mu_c$ - динамическая вязкость, Па·с;

$\rho$ - плотность перемешиваемой среды, кг/м<sup>3</sup>;

$n$ - частота вращения, об/с;

$d_M$ - диаметр мешалки, м.

Расчет вала перемешивающего устройства сводится к определению условий работы, при которых угловая частота  $\omega$  вынужденных колебаний вала находится в определенном соотношении с частотой его собственных поперечных колебаний, соответствующей критической частоте вращения вала.

Как правило, валы перемешивающих устройств работают в режиме жесткого вала и условие устойчивости.

$$\omega \leq 0,7 \omega_{кр}$$

### Пример №1.

Рассчитать вал на виброустойчивость, если угловая скорость 3,33 рад/с; масса мешалки 32 кг,  $L=0,5$ м,  $L_1=2,6$ м,  $L_2=3,1$ м коэффициент влияния – 64.

*Решение:*

Условие виброустойчивости

$$\omega \leq 0,7 \omega_{кр}$$

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{J}{\delta_{II} \cdot m}};$$

где

$$\delta_{II} = \frac{L_2 \cdot L_1^2}{3 E J}$$

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} - i$$

Осевой момент инерции сечения вала.

$E=2 \cdot 10^{11}$  Па – модуль продольной упругости материала вала.

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{J}{\delta_{II} \cdot m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot E J}{L_2 \cdot L_1^2 \cdot m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot d^4 \cdot \pi}{64 \cdot L_2 \cdot L_1^2 \cdot m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0,06^4 \cdot 3,14}{64 \cdot 3,1 \cdot 2,6^2 \cdot 32}} = 23,85 \frac{рад}{с}.$$

$$\omega < 0,7 \omega_{кр}; 3,33 < 0,7 \cdot 23,85; 3,33 < 16,7 \text{ рад/с}$$

Условие виброустойчивости выполняется.

**Самостоятельно:**

Рассчитать вал на виброустойчивость, если угловая скорость 4,53 рад/с; масса мешалки 39 кг,  $L=0,5$  м,  $L_1=2,8$  м,  $L_2=3,7$  м коэффициент влияния – 64.

**Список использованной литературы:**

1. Генкин А.Э. Оборудование химических заводов.- М.: Высш. Шк., 1986г.
2. Плановский А.Н., Рамм В.М., Коган С.З. Процессы и аппараты химической технологии.- М.; Химия, 1986 г.
3. Поляков А.А. Механика химических производств: Учебное пособие для вузов/ под ред. Ю.И. Макарова.- М.: ООО «Путь»: ООО ТИД «Альянс», 2005 г.
4. Смирнов Н.Н., Барабаш В.М., Карпов К.А. Альбом типовой химической аппаратуры.- Санкт-Петербург, Химиздат, 2005г.
5. Фарамазов С.А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация.- М.; Химия, 1984 г.

