

Реферат

Дипломный проект содержит _____ страниц машинописного текста, _____ рисунка, _____ таблиц, _____ использованных источника.

ВАКУУМ, КОЛОННА, БИТУМ, МАССОБМЕННЫЙ ПРОЦЕСС, УСТОЙЧИВОСТЬ, МОНТАЖ, ПРОЧНОСТЬ, ТЕПЛООБМЕННИК.

В дипломном проекте спроектирована вакуумная колонна взамен устаревшей, произведен поверочный расчет теплообменника и подбор емкости. Установка находится в республике Узбекистан, Ферганская область, г. Фергана, Ферганский НПЗ.

В данном дипломном проекте были произведены технологический расчет процесса переработки мазута, расчет колонны на прочность, на ветровую нагрузку, расчет опорных стоек, укрепление отверстий, расчет фланцевых соединений. Подобрана емкость для заданного расхода. В разделе промышленная безопасность описаны мероприятия по безопасному ведению процесса.

Переработка нефти имеет большое значение для промышленности и экономики, и эту отрасль необходимо развивать.

Оглавление

Введение	11
1. Техничко–экономические обоснования	12
2. Технологическая часть.....	14
2.1 Вакуумная перегонка мазута.....	14
2.1.1 Определение рабочего флегмового числа.....	14
2.1.2 Материальный баланс колонны.....	17
2.1.3 Расчет физико-химических свойств смеси 1-й секции.....	21
2.1.4 Скорость пара и диаметра колонны 1-й секции.....	24
2.1.5 Гидравлическое сопротивление насадки 1-й секции.....	30
2.1.6 Определение рабочего флегмового числа для 2-й секции.....	31
2.1.7 Расчет физико-химических свойств смеси во 2-й секции.....	35
2.1.8 Скорость пара и диаметр колонны 2-й секции.....	37
2.1.9 Гидравлическое сопротивление насадки 2-й секции.....	40
2.1.10 Тепловой баланс колонны.....	41
2.1.11 Расчет теплоизоляции.....	45
2.1.12 Расчет диаметров штуцеров колонны.....	46
3. Конструктивно-механический раздел.....	48
3.1 Механический расчет колонны.....	48
3.1.1 Расчет обечайки.....	50
3.1.2 Расчет днища и крышки.....	54
3.1.3 Выбор стандартных штуцеров.....	56
3.1.4 Расчет укрепления отверстий.....	57
3.1.5 Расчет весовых характеристик колонны.....	59
3.1.6 Расчет на ветровую нагрузку.....	61
3.1.6.1 Определение периода собственных колебаний колонны.....	61
3.1.6.2 Определение изгибающего момента от ветровой нагрузки.....	63
3.1.7 Расчет опорной обечайки.....	68
3.1.7.1 Элементы опорного узла.....	71
3.1.7.2 Расчет анкерных болтов.....	72
3.1.8 Проверка корпуса колонны.....	72
3.1.8.1 Проверка прочности колонны на прочность при рабочих условиях.....	72
3.1.8.2 Проверка прочности колонны на прочность при условиях монтажа.....	73
3.1.8.3 Проверка на устойчивость колонны	74
3.1.8.4 Расчет и проверка опасных сечений колонны.....	75

3.1.9 Расчет опорных решеток.....	78
3.1.10 Расчет фланцев.....	79
3.2 Проверочный расчет теплообменника	88
3.2.1 Вспомогательные величины.....	102
3.2.2 Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение трубы с решеткой.....	109
3.2.3 Расчетные напряжения в элементах конструкции.....	113
3.2.4 Проверка прочности трубных решеток.....	116
3.2.5 Проверка жесткости трубных решеток.....	117
3.2.6 Расчет прочности и устойчивости кожуха.....	118
3.2.7 Расчет труб на прочность, устойчивость и жесткость и расчет крепления труб в решетке.....	120
3.2.8 Проверка прочности крепления трубы в решетке.....	122
3.2.9 Дополнительные требования к толщинам трубных решеток.....	123
3.2.10 Перегородки между ходами по трубному пространству кожухотрубчатых теплообменных аппаратов.....	124
3.3 Расчет емкости для сбора вакуумного газойля.....	125
3.3.1 Расчет обечайки.....	127
3.3.2 Расчет днищ.....	128
3.3.3 Выбор стандартных штуцеров.....	130
3.3.4 Расчет укрепления отверстий.....	130
3.3.5 Расчет фланцевого соединения.....	132
3.3.6 Расчет седлообразных опор.....	142
4. Механо-технологический раздел.....	144
4.1 Подъем оборудования методом поворота вокруг шарнира монтажными мачтами.....	145
4.1.1 Расчет такелажной оснастки.....	145
4.1.2 Расчет якоря.....	149
4.1.3 Расчет мачты.....	151
5. Автоматизация производства	154
5.1 Необходимость процесса автоматизации.....	158
6. Социальная ответственность	160
6.1 Производственная безопасность	161
6.1.1 Загазованность рабочей зоны	161
6.1.2 Недостаточное производственное освещение.....	163
6.1.3 Повышенный уровень шума на производстве	164
6.1.4 Электробезопасность	165
6.1.5 Пожарная безопасность.....	166

6.1.6 Термическая опасность. Повышенные температуры поверхностей	168
6.2 Экологическая безопасность	168
6.2.1 Защита селитебной зоны	169
6.2.2 Воздействие объекта на атмосферу	169
6.2.3 Воздействие объекта на гидросферу	170
6.2.4 Воздействие объекта на литосферу	170
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	171
6.3.1 Первичные средства пожаротушения	173
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	174
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	175
7.1 Расчёт производственной мощности	175
7.2 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству	176
7.2.1 Расчет численности персонала	176
7.2.2 Расчет годового фонда заработной платы персонала	178
7.2.3 Расчет затрат на производство продукции	179
7.3 Определение цены готовой продукции	181
7.4 Анализ безубыточности по действующему производству	182
7.5 Расчет производственной мощности на плановый период при увеличении объема производства до 400 000 т	183
7.6 Определение технико-экономических показателей	185
Заключение	187
Список использованной литературы	188

Введение

За последние десятилетия нефть стала основным источником энергии. Продукты переработки нефти применяют практически во всех отраслях промышленности, на всех видах транспорта, в военном и гражданском строительстве, сельском хозяйстве, энергетике, в быту и т.д.

Российская Федерация является одной из основных стран мира по добыче нефти, так же обладает большими запасами нефтяного сырья. Но возникает проблема в рациональной глубокой переработки нефти, получения качественных продуктов с улучшенными экологическими свойствами.

В этой связи подготовка нефти к переработке и первичная переработка - прямая перегонка - имеют огромное значение. Разделение нефти на фракции на атмосферно-вакуумных установках - важная стадия в общей схеме переработки, обеспечивающая сырьем все технологические установки нефтеперерабатывающего предприятия.

В данной дипломной работе проведен расчет и конструирование основного оборудования — насадочной ректификационной колонны непрерывного действия для вакуумной перегонки мазута.

1. Техничко–экономические обоснования

Битум – твердый смесь углеводородом и их азотистых, кислородсодержащих, сернистых и металлосодержащих соединений.

Основное назначения процесса вакуумной перегонки мазута – подготовка сырья для битумного производства.

Битум получают вследствие окисления гудрона в реакторах.

Перегонку мазута проводят под вакуумом и в присутствии водяного пара. Водяной пар подается в колонну для предотвращения разложения сырья под действием высоких температур.

Водяной пар подается в змеевик печи для турбулизации потока сырья, что уменьшает отложение кокса в трубках.

Качество гудрона и дистиллятов, получаемых в вакуумной колонне, регулируются изменением режима работы колонны, в частности, изменением расхода циркуляционных орошений, изменением температуры сырья на выходе из печи, изменением расхода водяного пара, подаваемого в колонну, изменением количества выводимых дистиллятов, установленных регламентом.

Особое внимание уделяется качеству гудрона, которое обеспечивает для получения битумов в соответствии с ГОСТом.

Вакуум в колонне создается за счет конденсации в поверхностных конденсаторах водяного пара и удаления газов разложения паровыми эжекторами.

Процесс окисления гудрона кислородом осуществляется следующим превращением:

Углеводороды – смолы – асфальтены, в результате которых, в зависимости от глубины окисления и качества исходного сырья получают битумы различных марок.

Часть кислорода (1 – 2% на битум) взаимодействующего с сырьем расходуется на окисление гудрона, остальная часть кислорода идёт на образование паров воды и углекислого газа, которые удаляются вместе с

углеводородными газами разложения и азотом воздуха из процесса в виде газов окисления.

Процесс окисления гудрона сопровождается выделением тепла, поэтому предусмотрен отвод тепла с поверхности реакторов.

В качестве окислительных аппаратов на установке применены трубчатые змеевиковые реакторы, которые характеризуются высокой эффективностью использования кислорода воздуха и позволяют получать высокопластичные битумы.

Качество битумов обеспечивается поддержанием необходимой температуры окисления, соотношением расходов воздуха, сырья и рециркулята.

Полученный битум хранится в горячем жидком состоянии в резервуарах с подогревом. В качестве теплоносителя используется масло АМТ-300 ТУФ. Для слива битумов самотёком резервуары возведены на постаменты.

Битум с установки отгружают двумя способами: в горячем жидком или охлаждённом твёрдом состоянии.

Дорожные битумы отгружаются в жидком виде в железнодорожные бункера, вагоноцистерны и автобитумовозы.

Установка позволяет получать битумы сразу 2 сортов. Показатели действующей установки около 30 т/ч, проектируемой около 40 т/ч. При этом снижаются затраты энергии на получение пара. Так как давление в колонне снижено, то температура кипения снижена.

2. Технологическая часть

2.1. Вакуумная перегонка мазута

2.1.1 Материальный баланс колонны

Материальный баланс колонны составляем на основе данных о выходах (табл. 1) продуктов из сырья.

В колонну поступает сырье(мазут) $G_M := 126100$ кг/ч.

Продуктами перегонки являются:

1)Фракция НК-350 °С(пары и газы разложения);

2)Фракция 350-500 °С(вакуумный погон);

3)Фракция ВК-500 °С(гудрон).

Остаточное давление верха колонны $P_V := 13330$ Па.

Остаточное давление в зоне питания колонны $P_N := 19990$ Па.

Атмосферное давление $P_{атм} := 10^5$ Па

Массовая концентрация вакуумного погона 1-й секции $x_{fM} := 34.3$ %

Массовая концентрация вакуумного погона 2-й секции $x_{fV} := 8.04$ %

Массовая концентрация газов разложения $x_{fгн} := 3$ %

Молярная масса н-гексакозан $M_A := 366$ кг/кмоль.

Молярная масса н-пентатриоконтан $M_B := 492$ кг/кмоль.

Молярная масса н-гексадекан $M_C := 266$ кг/кмоль.

Мольный объем н-пентатриоконтан $v_{БК} := 856.5$

Мольный объем н-гексакозан $v_{НК} := 626.2$

Расход пара , кг/ч $G_{пара} := 5000$

Ускорение свободного падения, м/с² $g_{sp} := 9.81$

Порозность насадки, $\epsilon_1 := 0.9$

Удельная поверхность насадки, м²/м³ $a := 175$

Молярная масса воды, кг/кмоль $M := 18$

Давление пара, Па $P_{пара} := 15 \cdot 10^5$

Коэффициент смачиваемости насадки, $\psi := 1$

Температура пара, °C $t_{\text{пара}} := 420$

Коэффициент зависящий от насадки, $\varepsilon_2 := 0.152$

Энтальпия ВЦО, кДж/кг*К $I_{\text{ВЦО}2} := 75.98$

$$I_{\text{ВЦО}1} := 200.97$$

Вязкость паров н-гексакозан, Па*с $\mu_{\text{pA}} := 0.008 \cdot 10^{-3}$

Вязкость паров н-гексадекан, Па*с $\mu_{\text{pB}} := 0.009 \cdot 10^{-3}$

$$d_{15} := 0.855 \quad t_1 := 420 \quad d_{\Gamma\text{д}} := 1.077 \quad d_{15\text{ВП}} := 0.917$$

$$V_c := 0.74 \quad v_{\text{НК}1} := 377$$

Таблица 2.1

Наименование продукта	Выход, % масс.
Вакуумный погон (фр. 350 – 500 °C)	34,3
Гудрон (фр. свыше 500 °C)	62,7
Газы разложения	3
Итого:	100

Расчет:

1) Расход вакуумного погона

$$G_{\text{ВП}} := \frac{34.3}{100} \cdot G_{\text{M}} = 4.325 \times 10^4 \text{ кг/ч} \quad (2.1.1)$$

2) Расход гудрона

$$G_{\Gamma} := \frac{62.7}{100} \cdot G_{\text{M}} = 7.906 \times 10^4 \text{ кг/ч} \quad (2.1.2)$$

3) Расход газов разложения

$$G_{\Gamma\text{Р}} := \frac{3}{100} \cdot G_{\text{M}} = 3.783 \times 10^3 \text{ кг/ч} \quad (2.1.3)$$

Все результаты заносим в таблицу 2:

Таблица 2.2

Приход		Расход	
Наименование	Расход, кг/ч	Наименование	Расход, кг/ч
Мазут	126100	Пары разложения	3780
		Вакуумный погон	43250
		Гудрон	79060
Итого:	126100	Итого:	126100

Считаем материальный баланс по каждой секции:

Материальный баланс 1-ой секции (Таблица 3):

Таблица 2.3

Приход			Расход		
Наименование	%	кг/ч	Наименование	%	кг/ч
Мазут			(пар.фаза)		
(пар.фаза)			Пары разложения	37,30	3780
Пары разложения	37,30	3780	Вакуумный погон		43250
Вакуумный погон		43250	(жидкая фаза)		
Гудрон	62,70	79060	Гудрон	62,70	79060
Итого:	100	126100	Итого:	100	126100

Материальный баланс 2-ой секции (Таблица 4):

Таблица 2.4

Приход			Расход		
Наименование	%	кг/ч	Наименование	%	кг/ч
(пар.фаза)			(пар.фаза)		
Пары разложения	8,04	3780	Пары разложения	8,04	3780
Вакуумный погон	91,96	43250	(жидкая фаза)		
			Вакуумный погон	91,96	43250
Итого:	100	47030	Итого:	100	47030

2.1.2 Определение рабочего флегмового числа для 1-й секции.

Для выполнения расчёта заменяем имеющиеся фракции углеводородов на простые алканы нормального строения:

1. Фракция НК-350 °С. Так как данная фракция состоит преимущественно из паров дизельного топлива, то за НК примем температуру равную 240 °С. Средняя температура равна: $(350+240)/2=295$ °С.

Принимаем: н-гексадекан ($C_{16}H_{34}$), $t_{кип}=287$ °С, $M=226$ кг/кмоль.

2. Фракция 350-500 °С. $t_{cp}=(350+500)/2 = 425$ °С.

Принимаем: н-гексакозан ($C_{26}H_{54}$), $t_{кип}=417$ °С, $M=366$ кг/кмоль.

3. Фракция 500-КК °С

Принимаем: н-пентатриаконтан ($C_{35}H_{72}$), $t_{кип}=511$ °С, $M=492$ кг/кмоль.

Заменяем перегоняемую смесь углеводородов в 1-й секции на бинарную смесь. В качестве низкокипящего (НК) компонента принимаем н-гексакозан ($C_{26}H_{54}$), а в качестве высококипящего (ВК) - н-пентатриаконтан ($C_{35}H_{72}$).

Производим расчёт мольных концентрация на входе и на выходах из секции.

Мольную концентрацию на входе определяем на основе массовой концентрации, которую рассчитали в материальном балансе 1-й секции (табл. 3).

$$x_{f1} := \frac{\frac{\frac{(x_{fnp}+x_{fm})}{100}}{M_A}}{\frac{\frac{(x_{fnp}+x_{fm})}{100}}{M_A} + \frac{1 - \frac{(x_{fnp}+x_{fm})}{100}}{M_B}} = 0.444 \text{ мол.долей} \quad (2.1.4)$$

Рассчитаем состав куба и дистиллята:

Параметры уравнения для каждого компонента приведены ниже:

Параметры уравнения Антуана [1,стр.168]

н-гексадекан: $a1 := 7.03044$, $b1 := 1831.317$, $c1 := 154.528$;

н-гексакозан: $a2 := 7.62867$, $b2 := 2434.747$, $c2 := 96.1$;

н-пентатриаконтан: $a3 := 5.778045$, $b3 := 1598.23$, $c3 := 40.5$.

Расчет состава куба при $t_{\text{kub}} := 500\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Найдем давления индивидуальных компонентов при температуре фракции, по уравнению Антуана.

$$P_{\text{HKk}} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_{\text{kub}}}} \cdot 132.89 = 4.653 \times 10^5 \text{ Па} \quad (2.1.5)$$

$$P_{\text{BKk}} := 10^{a3 - \frac{b3}{c3 + t_{\text{kub}}}} \cdot 132.89 = 8.802 \times 10^4 \text{ Па} \quad (2.1.6)$$

Расчет состава дистиллята при $t_{\text{dis}} := 425\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Найдем давления индивидуальных компонентов при температуре фракции, по уравнению Антуана.

$$P_{\text{HKd}} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_{\text{dis}}}} \cdot 132.89 = 1.202 \times 10^5 \text{ Па} \quad (2.1.7)$$

$$P_{\text{BKd}} := 10^{a3 - \frac{b3}{c3 + t_{\text{dis}}}} \cdot 132.89 = 2.939 \times 10^4 \text{ Па} \quad (2.1.8)$$

Состав куба и дистиллята определяется на основе средних температур кипения фракции и рассчитывается по формуле:

Состав куба:

$$x_W := \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{BKk}}}{P_{\text{HKk}} - P_{\text{BKk}}} = 0.032 \text{ мол.доли} \quad (2.1.9)$$

Состав дистиллята:

$$x_D := \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{BKd}}}{P_{\text{HKd}} - P_{\text{BKd}}} = 0.778 \text{ мол.доли} \quad (2.1.10)$$

Температура на выходе из дистиллята равна: $t_D := 363\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура на выходе из куба равна: $t_W := 408\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура на входе равна: $t_F := 376\text{ }^{\circ}\text{C}$

Определяем относительную летучесть α по формуле:

При температуре $t_D = 363 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$P_{HKd1} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_D}} \cdot 132.89 = 2.811 \times 10^4 \text{ Па} \quad (2.1.11)$$

$$P_{BKd1} := 10^{a3 - \frac{b3}{c3 + t_D}} \cdot 132.89 = 8.722 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.12)$$

$$\alpha_1 := \frac{P_{HKd1}}{P_{BKd1}} = 3.223 \quad (2.1.13)$$

При температуре $t_W = 408 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$P_{HKk1} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_W}} \cdot 132.89 = 8.361 \times 10^4 \text{ Па} \quad (2.1.14)$$

$$P_{BKk1} := 10^{a3 - \frac{b3}{c3 + t_W}} \cdot 132.89 = 2.178 \times 10^4 \text{ Па} \quad (2.1.15)$$

$$\alpha_2 := \frac{P_{HKk1}}{P_{BKk1}} \quad (2.1.16)$$

Средняя относительная летучесть:

$$\alpha := \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = 3.531 \quad (2.1.17)$$

Строим кривую равновесия по формуле:

$$y = \alpha \cdot x / (1 + (\alpha - 1) \cdot x)$$

$$y := \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

$$y1 := x$$

$$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1 \end{pmatrix}$$

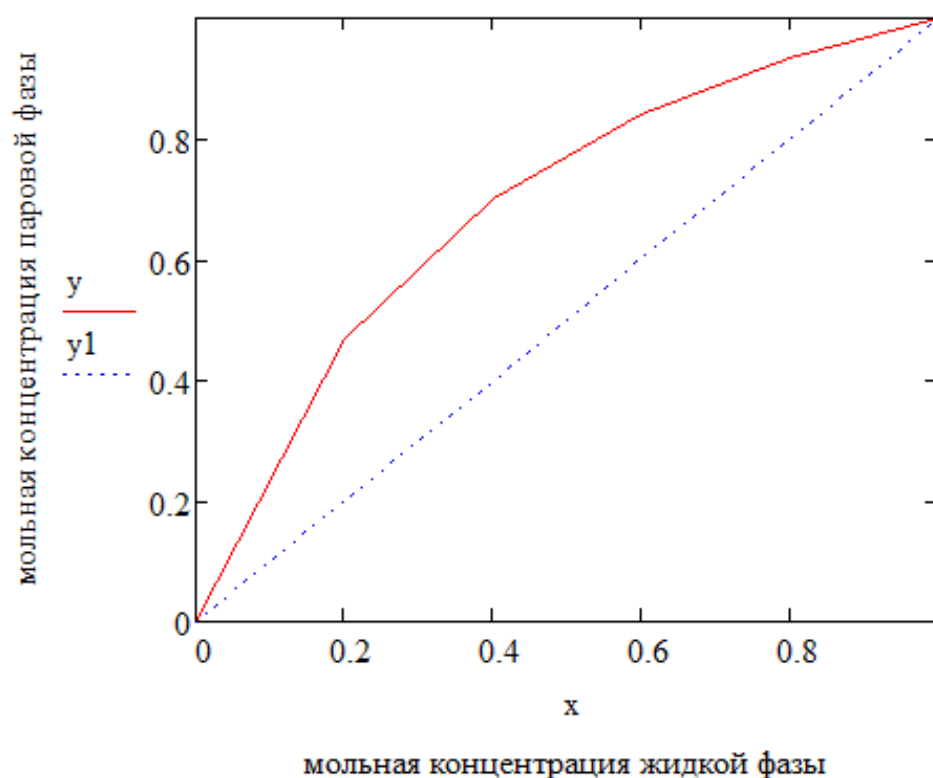


Рис.2.1 Кривая равновесия

Равновесный состав паровой фазы $y_f := 0.738$ мол.долей

Рассчитаем $R_{\min}$:

$$R_{\min} := \frac{x_D - y_f}{y_f - x_{f1}} = 0.135 \quad (2.1.18)$$

Графики с изображением нахождения числа ступеней и оптимального числа приведены в приложении А.

Определение оптимального флегмового числа (см.таблицу 2.5)

Таблица 2.5

$\beta = 1.07$	$R_1 = 0.183$	$N_{T1} = 12$	$N(R+1) = 14.196$	$b_1 = 0.67$
$\beta = 1.36$	$R_2 = 0.23$	$N_{T2} = 8$	$N(R+1) = 9.84$	$b_2 = 0.64$
$\beta = 1.74$	$R_3 = 0.3$	$N_{T3} = 7$	$N(R+1) = 9.1$	$b_3 = 0.61$
$\beta = 2.33$	$R_4 = 0.4$	$N_{T4} = 6$	$N(R+1) = 8.4$	$b_4 = 0.56$
$\beta = 3.3$	$R_5 = 0.56$	$N_{T5} = 5$	$N(R+1) = 7.8$	$b_5 = 0.51$
$\beta = 5.16$	$R_6 = 0.88$	$N_{T6} = 5$	$N(R+1) = 9.4$	$b_6 = 0.42$

где β -коэффициент избытка флегмы;
 R -флегмовое число при β ;
 N -число ступеней;
 b -отрезок, отсекаемый рабочей линией укрепляющей части колонны на оси ординат.

из графика (приложение Б) видно что $R_{\text{опт}} := 0.59$

Число теоретических тарелок $N_T = 5$

2.1.3 Расчёт физико-химических свойств смеси 1-й секции

Расчёт средних концентраций жидкости:

$$x_H := \frac{x_{f1} + x_W}{2} = 0.238 \quad \text{кмоль} \quad (2.1.19)$$

$$x_B := \frac{x_{f1} + x_D}{2} = 0.611 \quad \text{кмоль} \quad (2.1.20)$$

Расчёт средних концентраций пара $y_W := x_W, y_D := x_D$:

$$y_H := \frac{y_f + y_W}{2} = 0.385 \quad \text{кмоль} \quad (2.1.21)$$

$$y_B := \frac{y_f + y_D}{2} = 0.758 \quad \text{кмоль} \quad (2.1.22)$$

Средние температуры верха и низа:

$$t_H := 388$$

$$t_B := 369$$

Средние молекулярные массы пара:

$$Mn_H := y_H \cdot M_A + (1 - y_H) \cdot M_B = 443.506 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.23)$$

$$Mn_B := y_B \cdot M_A + (1 - y_B) \cdot M_B = 396.51 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.24)$$

Средние молекулярные массы жидкости:

$$Mj_H := x_H \cdot M_A + (1 - x_H) \cdot M_B = 462.006 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.25)$$

$$Mj_B := x_B \cdot M_A + (1 - x_B) \cdot M_B = 415.01 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.26)$$

Средние плотности пара:

$$\rho^{nH} := \frac{Mn_H \cdot P_V}{8314 \cdot (t_H + 273)} = 1.076 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.27)$$

$$\rho^{nB} := \frac{Mn_B \cdot P_V}{8314 \cdot (t_B + 273)} = 0.99 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.28)$$

Средние массовые доли:

$$X_H := \frac{x_H \cdot M_A}{Mj_H} = 0.189 \text{ масс.доли} \quad (2.1.29)$$

$$X_B := \frac{x_B \cdot M_A}{Mj_B} = 0.539 \text{ масс.доли} \quad (2.1.30)$$

Средние плотности жидкости:

Плотность НК компонента при температуре $t_H=388 \text{ }^\circ\text{C}$ равна

$$\rho_{A388} := 543.94 \text{ кг/м}^3$$

Плотность ВК компонента при температуре $t_H=388 \text{ }^\circ\text{C}$ равна

$$\rho_{B388} := 571.54 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho^j_H := \frac{1}{\frac{X_H}{\rho_{A388}} + \frac{1 - X_H}{\rho_{B388}}} = 566.123 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.31)$$

Плотность НК компонента при температуре $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\rho_{A20} := 837.5 \text{ кг/м}^3$$

Плотность ВК компонента при температуре $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\rho_{B20} := 778.5 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{j20} := \frac{1}{\frac{X_H}{\rho_{A20}} + \frac{1 - X_H}{\rho_{B20}}} = 788.982 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.32)$$

Плотность НК компонента при температуре $t_B=369\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\rho_{A369} := 561.32 \text{ кг/м}^3$$

Плотность ВК компонента при температуре $t_B=369\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\rho_{B369} := 587.46 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{jB} := \frac{1}{\frac{X_B}{\rho_{A369}} + \frac{1 - X_B}{\rho_{B369}}} = 573.079 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.33)$$

Средние вязкости жидкости:

Вязкость НК компонента при температур $t_H=388\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\mu_{A388} := 5.95 \cdot 10^{-4} \text{ Па*с}$$

Вязкость ВК компонента при температур $t_H=388\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\mu_{B388} := 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ Па*с}$$

$$\mu_{jA} := 10^{x_H \cdot \log(\mu_{A388}) + (1 - x_H) \cdot \log(\mu_{B388})} = 2.788 \times 10^{-4} \text{ Па*с} \quad (2.1.34)$$

Вязкость НК компонента при температуре $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\mu_{A20} := 5.11 \cdot 10^{-3} \text{ Па*с}$$

Вязкость ВК компонента при температуре $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна

$$\mu_{B20} := 7.24 \cdot 10^{-3} \text{ Па*с}$$

$$\mu_{j20} := 10^{x_H \cdot \log(\mu_{A20}) + (1-x_H) \cdot \log(\mu_{B20})} = 6.664 \times 10^{-3} \text{ Па*с} \quad (2.1.35)$$

Вязкость НК компонента при температуре $t_B=369^\circ\text{C}$ равна

$$\mu_{A369} := 5.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па*с}$$

Вязкость ВК компонента при температуре $t_B=369^\circ\text{C}$ равна

$$\mu_{B369} := 2.9 \cdot 10^{-4} \text{ Па*с}$$

$$\mu_{jB} := 10^{x_B \cdot \log(\mu_{A369}) + (1-x_B) \cdot \log(\mu_{B369})} = 4.476 \times 10^{-4} \text{ Па*с} \quad (2.1.36)$$

2.1.4 Скорость пара и диаметр колонны 1-й секции

Определяем количество пара поднимающегося вверх по колонне. Примем допущение, что расход пара во всей колонне является величиной постоянной и находится:

$$G_{\Pi} := (G_{В\Pi} + G_{ГР}) \cdot \frac{(R_{\text{опт}} + 1)}{3600} = 20.774 \text{ кг/с} \quad (2.1.36)$$

Определяем расход жидкости в верхней и нижней части колонны:

$$L_V := (G_{В\Pi} + G_{ГР}) \cdot \frac{R_{\text{опт}}}{3600} = 7.709 \text{ кг/с} \quad (2.1.37)$$

$$L_N := \frac{[(G_{В\Pi} + G_{ГР}) \cdot R_{\text{опт}} + G_M]}{3600} = 42.736 \text{ кг/с} \quad (2.1.38)$$

Предельная скорость пара в нижней части равна:

$$\omega_{\Pi H} := \sqrt{\frac{1.2e^{\left[-4 \cdot \left(\frac{L_N}{G_{\Pi}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{nH}}{\rho_{jH}}\right)^{0.125}\right] \cdot (g_{sp} \cdot \epsilon_1^3 \cdot \rho_{jH})}{a \cdot \rho_{nH} \cdot \mu_A^{0.16}}} = 3.273 \text{ м/с} \quad (2.1.39)$$

Предельная скорость пара в верхней части равна:

$$\omega_{\text{ПВ}} := \sqrt{\frac{1.2e^{-4 \cdot \left(\frac{L_V}{G_{\text{П}}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{нВ}}}{\rho_{\text{жВ}}}\right)^{0.125}} \cdot (g_{\text{сп}} \cdot \epsilon_1^3 \cdot \rho_{\text{жВ}})}{a \cdot \rho_{\text{нВ}} \cdot \mu_{\text{жВ}}^{0.16}}} = 4.879 \text{ м/с} \quad (2.1.40)$$

Примем рабочую скорость пара на 30 % ниже предельной.

Скорость пара в нижней части:

$$\omega_{\text{Н}} := 0.7 \cdot \omega_{\text{ПН}} = 2.291 \text{ м/с} \quad (2.1.41)$$

Скорость пара в верхней части:

$$\omega_{\text{В}} := 0.7 \cdot \omega_{\text{ПВ}} = 3.415 \text{ м/с} \quad (2.1.42)$$

Диаметр ретификационной колонны определим из уравнения расхода:

нижней части

$$d_{\text{Н}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{П}}}{\pi \cdot \omega_{\text{Н}} \cdot \rho_{\text{нН}}}} = 3.276 \text{ м} \quad (2.1.43)$$

верхней части

$$d_{\text{В}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{П}}}{\pi \cdot \omega_{\text{В}} \cdot \rho_{\text{нВ}}}} = 2.797 \text{ м} \quad (2.1.44)$$

Принимаем диаметр колонны $D_{\text{К}} := 3.2 \text{ м}$.

Тогда действительные рабочие скорости равны:

нижней части:

$$\omega_{\text{НД}} := \frac{(4 \cdot G_{\text{П}})}{\pi \cdot D_{\text{К}}^2 \cdot \rho_{\text{нН}}} = 2.732 \text{ м/с} \quad (2.1.45)$$

верхней части:

$$\omega_{\text{ВД}} := \frac{(4 \cdot G_{\Pi})}{\pi \cdot D_K^2 \cdot \rho n_B} = 2.968 \text{ м/с} \quad (2.1.46)$$

Из графиков находим площадь под кривой (Приложение Д). Численное значение соответствует общему числу единиц переноса [2, стр.232].

в нижней части:

$$n_{\text{oyN}} := 5.31$$

в верхней части:

$$n_{\text{oyV}} := 0.983$$

Найдем коэффициенты диффузии для жидкости и пара.

для низа 1-й секции:

коэффициент диффузии пара:

$$D_{\Pi H} := \left[\frac{4.22 \cdot 10^{-2} \cdot (t_H + 273)^{\frac{3}{2}}}{P_N \cdot (v_{HK}^{0.33} + v_{BK}^{0.33})^2} \right] \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = 7.941 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.47)$$

коэффициент диффузии жидкости при 20 °С:

$$D_{ЖH20} := \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{\mu_{j20} \cdot 1000} \cdot (v_{HK}^{0.33} + v_{BK}^{0.33})^2} = 8.575 \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.48)$$

температурный коэффициент b равен:

$$b := 0.2 \cdot \frac{\sqrt{\mu_{j20}}}{\sqrt[3]{\rho_{j20}}} = 1.767 \times 10^{-3} \quad (2.1.49)$$

коэффициент диффузии при температуре $t=388$

$$D_{ЖН} := D_{ЖН20} \cdot [1 + b \cdot (t_H - 20)] = 1.415 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.50)$$

для верха 1-й секции:

коэффициент диффузии пара:

$$D_{ПВ} := \left[\frac{4.22 \cdot 10^{-2} \cdot (t_B + 273)^{\frac{3}{2}}}{P_N \cdot (v_{НК}^{0.33} + v_{БК}^{0.33})^2} \right] \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = 7.601 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.51)$$

коэффициент диффузии жидкости при 20 °С:

$$D_{ЖВ20} := \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{\mu_{j20} \cdot 1000} \cdot (v_{НК}^{0.33} + v_{БК}^{0.33})^2} = 8.575 \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.52)$$

температурный коэффициент b равен:

$$b := 0.2 \cdot \frac{\sqrt{\mu_{j20}}}{\sqrt[3]{\rho_{j20}}} = 1.767 \times 10^{-3} \quad (2.1.53)$$

коэффициент диффузии при температуре $t=369$

$$D_{ЖВ} := D_{ЖВ20} \cdot [1 + b \cdot (t_B - 20)] = 1.386 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.54)$$

Найдем критерии Рейнольдса и Прандтля:

для жидкой фазы:

для верхней части 1-й секции:

$$Re_V := \frac{4 \cdot L_V}{0.785 \cdot D_K^2 \cdot a \cdot \mu_{jA}} = 89.454 \quad (2.1.55)$$

для нижней части 1-й секции:

$$Re_n := \frac{4 \cdot L_N}{0.785 \cdot D_K^2 \cdot a \cdot \mu_{jB}} = 308.911 \quad (2.1.56)$$

для паровой фазы:

для верхней части 1-й секции:

$$Re_{v1} := \frac{4 \cdot G_{\Pi}}{0.785 \cdot D_K^2 \cdot a \cdot \mu_{pA}} = 8.401 \times 10^3 \quad (2.1.57)$$

для нижней части 1-й секции:

$$Re_{n1} := \frac{4 \cdot G_{\Pi}}{0.785 \cdot D_K^2 \cdot a \cdot \mu_{pB}} = 7.468 \times 10^3 \quad (2.1.58)$$

для жидкой фазы:

для верхней части 1-й секции:

$$Pr_{жв} := \frac{\mu_{jA}}{\rho_{jB} \cdot D_{жв}} = 3.509 \times 10^3 \quad (2.1.59)$$

для нижней части 1-й секции:

$$Pr_{жн} := \frac{\mu_{jB}}{\rho_{jH} \cdot D_{жн}} = 5.587 \times 10^3 \quad (2.1.60)$$

для паровой фазы:

для верхней части 1-й секции:

$$Pr_{пв} := \frac{\mu_{pA}}{\rho_{пB} \cdot D_{пв}} = 1.063 \quad (2.1.61)$$

для нижней части 1-й секции:

$$Pr_{пн} := \frac{\mu_{pB}}{\rho_{пH} \cdot D_{пн}} = 1.054 \quad (2.1.62)$$

Найдем частные высоты единиц переноса в жидкой и паровой фазах:

для нижней части 1-й секции:
для жидкой фазы:

$$h_{\text{жн}} := 119 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}}^2 \cdot g_{\text{сп}}} \right)^{0.33} \cdot \text{Re}_n^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{жн}})^{0.5} = 1.206 \text{ м} \quad (2.1.63)$$

для паровой фазы:

$$h_{\text{пн}} := \frac{V_{\text{с}}}{a \cdot \psi \cdot \varepsilon_2} \cdot \text{Re}_{\text{н1}}^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{пн}})^{0.67} \text{ м} \quad (2.1.64)$$

для верхней части части 1-й секции:
для жидкой фазы:

$$h_{\text{жв}} := 119 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}}^2 \cdot g_{\text{сп}}} \right)^{0.33} \cdot \text{Re}_v^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{жв}})^{0.5} = 0.951 \text{ м} \quad (2.1.64)$$

для паровой фазы:

$$h_{\text{пв}} := \frac{V_{\text{с}}}{a \cdot \psi \cdot \varepsilon_2} \cdot \text{Re}_{\text{в1}}^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{пв}})^{0.67} = 0.277 \text{ м} \quad (2.1.64)$$

Коэффициент распределения[3, стр.26]:

$$m_{\text{н}} := 1.862$$

$$m_{\text{в}} := 1.214$$

высота единиц переноса
для нижней части 1-й секции:

$$h_{\text{он}} := h_{\text{жн}} + m_{\text{н}} \cdot h_{\text{пн}} \cdot \frac{G_{\text{П}}}{L_{\text{Н}}} = 1.448 \text{ м} \quad (2.1.65)$$

для верхней части 1-й секции

$$h_{\text{ов}} := h_{\text{жв}} + m_{\text{в}} \cdot h_{\text{пв}} \cdot \frac{G_{\text{П}}}{L_{\text{В}}} = 1.858 \text{ м} \quad (2.1.66)$$

Высота слоя насадки:
нижней части 1-й секции

$$H_{\text{слН}} := n_{\text{oyN}} \cdot h_{\text{он}} = 7.691 \text{ м} \quad (2.1.67)$$

верхней части 1-й секции

$$H_{\text{слВ}} := n_{\text{oyV}} \cdot h_{\text{ов}} = 1.827 \text{ м} \quad (2.1.68)$$

Общая высота насадки 1-й секции:

$$H_{\text{сл1}} := H_{\text{слН}} + H_{\text{слВ}} = 9.517 \text{ м} \quad (2.1.69)$$

$n := 3$ число ступеней

Общая высота 1-й секции :

$$H_1 := H_{\text{сл1}} + (n - 1)0.5 + 1.4 + 2.5 = 14.417 \text{ м} \quad (2.1.70)$$

2.1.5 Гидравлическое сопротивление насадки 1-й секции

Плотность орошения:

в верхней части 1-й секции:

$$U_V := \frac{L_V}{(\rho j_B \cdot 0.785 \cdot D_K^2)} = 1.904 \times 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2.1.71)$$

в нижней части 1-й секции:

$$U_N := \frac{L_N}{(\rho j_H \cdot 0.785 \cdot D_K^2)} = 0.011 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2.1.72)$$

$d_э := 0.022 \text{ м}$ эквивалентный диаметр насадки

Критерий Рейнольдса:

для верхней части 1-й секции:

$$Re_{yV} := \frac{\omega_{\text{вд}} \cdot d_э \cdot \rho_{\text{нВ}}}{\epsilon_1 \cdot \mu_{\text{рА}}} = 8.98 \times 10^3 \quad (2.1.73)$$

для нижней части 1-й секции:

$$Re_{yN} := \frac{\omega_{\text{нд}} \cdot d_э \cdot \rho_{\text{нН}}}{\epsilon_1 \cdot \mu_{\text{рВ}}} = 7.982 \times 10^3 \quad (2.1.74)$$

Коэффициент сопротивления сухой насадки:

для верхней части 1-й секции:

$$\lambda_V := \frac{18.5}{\text{Re}_{yV}^{0.6}} = 0.079 \quad (2.1.75)$$

для нижней части 1-й секции:

$$\lambda_N := \frac{18.5}{\text{Re}_{yN}^{0.6}} = 0.084 \quad (2.1.76)$$

Гидравлическое сопротивление сухой неорошаемой насадки:

в верхней части 1-й секции:

$$\Delta P_{cV} := \lambda_V \cdot \frac{H_{clB}}{d_3} \cdot \frac{\omega_{вд}^2 \cdot \rho_{nB}}{2 \cdot \epsilon_1^2} = 35.119 \text{ Па} \quad (2.1.77)$$

в нижней части 1-й секции:

$$\Delta P_{cN} := \lambda_N \cdot \frac{H_{clH}}{d_3} \cdot \frac{\omega_{нд}^2 \cdot \rho_{nH}}{2 \cdot \epsilon_1^2} = 146.073 \text{ Па} \quad (2.1.78)$$

Гидравлическое сопротивление насадки:

в верхней части 1-й секции:

$$\Delta P_V := 10^{169 \cdot U_V} \cdot \Delta P_{cV} = 73.673 \text{ Па} \quad (2.1.79)$$

в нижней части 1-й секции:

$$\Delta P_N := 10^{169 \cdot U_N} \cdot \Delta P_{cN} = 9.34 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.80)$$

Общее гидравлическое сопротивление насадки 1-й секции:

$$\Delta P := \Delta P_N + \Delta P_V = 9.413 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.81)$$

2.1.6 Определение рабочего флегмового числа для 2-й секции.

Для выполнения расчёта заменяем имеющиеся фракции углеводородов на простые алканы нормального строения:

1. Фракция НК-350 °С. Так как данная фракция состоит преимущественно из паров дизельного топлива, то за НК примем температуру равную 240 °С. Средняя температура равна: $(350+240)/2=295$ °С.

Принимаем: н-гексадекан ($C_{16}H_{34}$), $t_{кип}=287\text{ }^{\circ}C$, $M=226\text{ кг/кмоль}$.

2. Фракция 350-500 $^{\circ}C$. $t_{cp}=(350+500)/2 = 425\text{ }^{\circ}C$.

Принимаем: н-гексакозан ($C_{26}H_{54}$), $t_{кип}=417\text{ }^{\circ}C$, $M=366\text{ кг/кмоль}$.

3. Фракция 500-КК $^{\circ}C$

Принимаем: н-пентатриаконтан ($C_{35}H_{72}$), $t_{кип}=511\text{ }^{\circ}C$, $M=492\text{ кг/кмоль}$.

Заменяем перегоняемую смесь углеводородов в 1-й секции на бинарную смесь. В качестве низкокипящего (НК) компонента принимаем н-гексакозан ($C_{16}H_{34}$), а в качестве высококипящего (ВК) - н-пентатриаконтан ($C_{26}H_{54}$).

Производим расчёт мольных концентрация на входе и на выходах из секции.

Мольную концентрацию на входе определяем на основе массовой концентрации, которую рассчитали в материальном балансе 1-й секции (табл. 3).

$$x_{f2} := \frac{\frac{\frac{x_{fv}}{100}}{M_C}}{\frac{\frac{x_{fv}}{100}}{M_C} + \frac{1 - \frac{x_{fv}}{100}}{M_B}} = 0.139 \text{ мол.долей} \quad (2.1.82)$$

Рассчитаем состав дистиллята:

Расчет состава дистиллята при $t_{дис} := 295\text{ }^{\circ}C$:

Найдем давления индивидуальных компонентов при температуре фракции, по уравнению Антуана [1, стр.168].

$$P_{НКк} := 10^{a1 - \frac{b1}{c1 + t_{дис}}} \cdot 132.89 = 1.202 \times 10^5 \text{ Па} \quad (2.1.83)$$

$$P_{ВКк} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_{дис}}} \cdot 132.89 = 3.363 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.84)$$

Состав дистиллята определяется на основе средних температур кипения фракции и рассчитывается по формуле:

Состав дистиллята:

$$x_{D1} := \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{ВКк}}}{P_{\text{НКк}} - P_{\text{ВКк}}} = 0.827 \text{ мол.долей} \quad (2.1.85)$$

Температура на выходе из дистиллята равна: $t_{D1} := 235^\circ\text{C}$

Температура на входе равна: $t_{F1} := 308^\circ\text{C}$

Определяем относительную летучесть α :

При температуре $t_{D1} = 235^\circ\text{C}$:

$$P_{\text{НКд}} := 10^{a1 - \frac{b1}{c1 + t_{D1}}} \cdot 13.289 = 2.835 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.86)$$

$$P_{\text{ВКд}} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_{D1}}} \cdot 132.89 = 250.411 \text{ Па} \quad (2.1.87)$$

$$\alpha_1 := \frac{P_{\text{НКд}}}{P_{\text{ВКд}}} = 11.322 \quad (2.1.88)$$

При температуре $t_{F1} = 308^\circ\text{C}$:

$$P_{\text{НКд1}} := 10^{a1 - \frac{b1}{c1 + t_{F1}}} \cdot 13.289 \text{ Па} \quad (2.1.88)$$

$$P_{\text{ВКд1}} := 10^{a2 - \frac{b2}{c2 + t_{F1}}} \cdot 132.89 \text{ Па} \quad (2.1.89)$$

$$\alpha_2 := \frac{P_{\text{НКд1}}}{P_{\text{ВКд1}}} = 2.934$$

Средняя относительная летучесть:

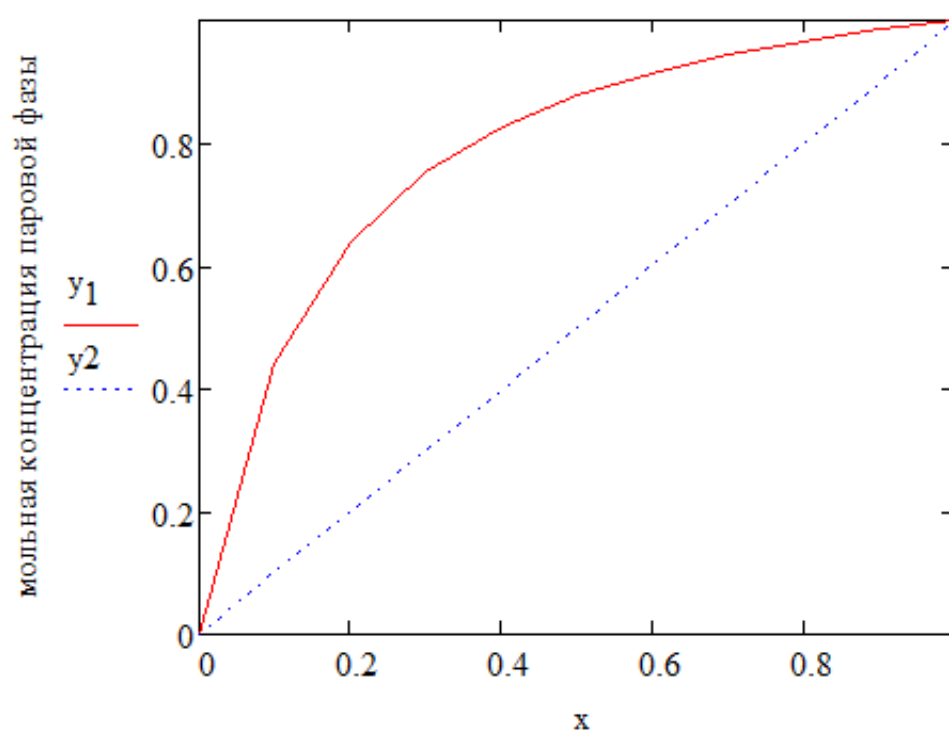
$$\alpha_3 := \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

Строим кривую равновесия по формуле:
 $y = \alpha \cdot x / (1 + (\alpha - 1) \cdot x)$

$$y_1 := \frac{\alpha_3 \cdot x}{1 + (\alpha_3 - 1) \cdot x}$$

$$y_2 := x$$

$$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.1.90)$$



мольная концентрация жидкой фазы

Рис.2.2 Кривая равновесия

Равновесный состав паровой фазы $y_{f1} := 0.555$ мол.долей

Рассчитаем $R_{\min}$:

$$R_{\min 1} := \frac{x_{D1} - y_{f1}}{y_{f1} - x_{f2}} = 0.654 \quad (2.1.91)$$

Определение оптимального флегмового числа (см.таблицу 2.6).

Приложение В

Таблица 2.6

$\beta = 1.07$	$R_1 = 0.699$	$N_{T1} = 2$	$N(R+1) = 3.399$	$b_1 = 0.082$
$\beta = 1.36$	$R_2 = 0.889$	$N_{T2} = 2$	$N(R+1) = 3.778$	$b_2 = 0.074$
$\beta = 1.74$	$R_3 = 1.137$	$N_{T3} = 2$	$N(R+1) = 4.275$	$b_3 = 0.065$
$\beta = 2.33$	$R_4 = 1.523$	$N_{T4} = 2$	$N(R+1) = 5.046$	$b_4 = 0.055$
$\beta = 3.3$	$R_5 = 2.157$	$N_{T5} = 2$	$N(R+1) = 6.314$	$b_5 = 0.044$
$\beta = 5.16$	$R_6 = 3.373$	$N_{T6} = 2$	$N(R+1) = 8.746$	$b_6 = 0.032$

где β -коэффициент избытка флегмы;

R -флегмовое число при β ;

N -число ступеней;

b -отрезок, отсекаемый рабочей линией укрепляющей части колонны на оси ординат.

из графика (Приложение Б) видно

что $R_{\text{опт}1} := 0.699$

Число теоретических тарелок $N_T = 2$

2.1.7 Расчёт физико-химических свойств смеси во 2-й секции.

Расчёт средних концентраций жидкости:

$$x_1 := \frac{x_{f2} + x_{D1}}{2} = 0.483 \text{ кмоль/кмоль} \quad (2.1.92)$$

Расчёт средних концентраций пара $y_{D1} := x_{D1}$:

$$y_{\Pi} := \frac{y_{f1} + y_{D1}}{2} = 0.691 \text{ кмоль/кмоль} \quad (2.1.93)$$

Средние температуры верха и низа:

$$t := 256 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Средние молекулярные массы пара:

$$M_{n1} := y_{\Pi} \cdot M_C + (1 - y_{\Pi}) \cdot M_B = 335.857 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.94)$$

Средние молекулярные массы жидкости:

$$M_{j1} := x_1 \cdot M_C + (1 - x_1) \cdot M_B = 382.843 \text{ кг/кмоль} \quad (2.1.95)$$

Средние плотности пара:

$$\rho_{n1} := \frac{M_{n1} \cdot P_V}{8314 \cdot (t + 273)} = 1.018 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.96)$$

Средние массовые доли:

$$X_1 := \frac{x_1 \cdot M_C}{M_{j1}} = 0.336 \text{ масс.доли} \quad (2.1.97)$$

Средние плотности жидкости:

Плотность НК компонента при температуре $t=256 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна

$$\rho_{C256} := 598.59 \text{ кг/м}^3$$

Плотность ВК компонента при температуре $t=256 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна

$$\rho_{B256} := 648.42 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{j1} := \frac{1}{\frac{X_1}{\rho_{C256}} + \frac{1 - X_1}{\rho_{B256}}} = 630.798 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.98)$$

Средние вязкости жидкости:

Вязкость НК компонента при температур $t=256 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна

$$\mu_{C256} := 1.666 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

Вязкость ВК компонента при температур $t=256 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна

$$\mu_{B256} := 6.165 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

$$\mu_{j1} := 10^{x_1 \cdot \log(\mu_{C256}) + (1-x_1) \cdot \log(\mu_{B256})} = 3.277 \times 10^{-4} \text{ Па*с} \quad (2.1.99)$$

2.1.8 Скорость пара и диаметр колонны 2-й секции

Определяем количество пара поднимающегося вверх по колонне. Примем допущение, что расход пара во всей колонне является величиной постоянной и находится:

$$G_{П1} := G_{ГР} \cdot \frac{(R_{опт1} + 1)}{3600} = 1.785 \text{ кг/с} \quad (2.1.100)$$

Определяем расход жидкости во 2-й секции:

$$L_1 := G_{ГР} \cdot \frac{R_{опт}}{3600} = 0.62 \text{ кг/с} \quad (2.1.101)$$

Предельная скорость пара во 2-й секции равна:

$$\omega_{\Pi} := \sqrt{\frac{1.2e^{-4 \cdot \left(\frac{L_1}{G_{П1}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{n1}}{\rho_{j1}}\right)^{0.125}} \cdot (g_{sp} \cdot \epsilon_1^3 \cdot \rho_{j1})}{a \cdot \rho_{n1} \cdot \mu_{j1}^{0.16}}} = 5.268 \text{ м/с} \quad (2.1.102)$$

Примем рабочую скорость пара на 30 % ниже предельной.

Скорость пара во 2-й секции:

$$\omega_{\text{пара}} := 0.7 \cdot \omega_{\Pi} = 3.687 \text{ м/с} \quad (2.1.103)$$

Диаметр ректификационной колонны определим из уравнения расхода:

$$d_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{П1}}{\pi \cdot \omega_{\text{пара}} \cdot \rho_{n1}}} = 0.778 \text{ м} \quad (2.1.104)$$

Принимаем диаметр колонны $D_{K1} := 3.2 \text{ м}$, т.к не дефицита в металле.

Тогда действительная рабочая скорость равна:

$$\omega_{\text{нд1}} := \frac{(4 \cdot G_{\text{П1}})}{\pi \cdot D_{\text{K1}}^2 \cdot \rho n_1} = 0.218 \text{ м/с} \quad (2.1.105)$$

Из графиков находим площадь под кривой (Приложение Д).
Численное значение соответствует общему числу единиц переноса [2, стр. 232].

$$n_{\text{oy}} := 2.748$$

Найдем коэффициенты диффузии для жидкости и пара.

для 2-й секции:

коэффициент диффузии пара:

$$D_{\text{П}} := \left[\frac{4.22 \cdot 10^{-2} \cdot (t + 273)^{\frac{3}{2}}}{P_{\text{N}} \cdot (v_{\text{HK1}}^{0.33} + v_{\text{BK}}^{0.33})^2} \right] \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{C}}} + \frac{1}{M_{\text{B}}}} = 7.296 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.106)$$

коэффициент диффузии жидкости при 20 °С:

$$D_{\text{Ж20}} := \frac{10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{C}}} + \frac{1}{M_{\text{B}}}}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{\mu_{\text{J1}} \cdot 1000} \cdot (v_{\text{HK1}}^{0.33} + v_{\text{BK}}^{0.33})^2} = 4.962 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.107)$$

температурный коэффициент b равен:

$$b := 0.2 \cdot \frac{\sqrt{\mu_{\text{J20}}}}{\sqrt[3]{\rho_{\text{J20}}}} = 1.767 \times 10^{-3} \quad (2.1.108)$$

коэффициент диффузии при температуре t=235

$$D_{\text{Ж}} := D_{\text{Ж}20} \cdot [1 + b \cdot (t - 20)] = 7.032 \times 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.1.109)$$

Найдем критерии Рейнольдса и Прандтля:
для жидкой фазы:

$$\text{Re}_1 := \frac{4 \cdot L_1}{0.785 \cdot D_{\text{К}1}^2 \cdot a \cdot \mu_{\text{ж}1}} = 5.38 \quad (2.1.110)$$

для паровой фазы:

$$\text{Re}_2 := \frac{4 \cdot G_{\text{П}1}}{0.785 \cdot D_{\text{К}1}^2 \cdot a \cdot \mu_{\text{п}A}} = 634.585 \quad (2.1.111)$$

для жидкой фазы:

$$\text{Pr}_{\text{ж}} := \frac{\mu_{\text{ж}1}}{\rho_{\text{ж}1} \cdot D_{\text{Ж}}} = 738.798 \quad (2.1.112)$$

для паровой фазы:

$$\text{Pr}_{\text{п}} := \frac{\mu_{\text{п}A}}{\rho_{\text{п}1} \cdot D_{\text{П}}} = 1.077 \quad (2.1.113)$$

Найдем частные высоты единиц переноса в жидкой и паровой фазах:

для 2-й секции:

для жидкой фазы:

$$h_{\text{ж}} := 119 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ж}1}^2}{\rho_{\text{ж}1}^2 \cdot g_{\text{сп}}} \right)^{0.33} \cdot \text{Re}_1^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{ж}})^{0.5} = 0.165 \text{ м} \quad (2.1.114)$$

для паровой фазы $V_{\text{с}} := 0.9$, $\varepsilon_2 := 0.152$:

$$h_{\text{п}} := \frac{V_{\text{с}}}{a \cdot \psi \cdot \varepsilon_2} \cdot \text{Re}_2^{0.25} \cdot (\text{Pr}_{\text{п}})^{0.67} = 0.178 \text{ м} \quad (2.1.115)$$

Коэффициент распределения [3, стр. 26]:

$$m_1 := 2.476$$

высота единиц переноса

для 2-й секции:

$$h_1 := h_{ж} + m_1 \cdot h_{п} \cdot \frac{G_{П1}}{L_1} = 1.438 \text{ м} \quad (2.1.116)$$

Высота слоя насадки:

для 2-й секции

$\underline{n} := 2$ число ступеней

$$H_{сл1} := n_{oy} \cdot h_1 = 3.951 \text{ м} \quad (2.1.117)$$

Общая высота 2-й секции :

$$H_2 := H_{сл1} + (n - 1)0.5 + 0.6 + 1.5 = 6.551 \text{ м} \quad (2.1.118)$$

2.1.9 Гидравлическое сопротивление насадки 2-й секции

Плотность орошения:

для 2-й секции:

$$U_1 := \frac{L_1}{\left(\rho_{j1} \cdot 0.785 \cdot D_{K1}^2\right)} = 1.223 \times 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (2.1.119)$$

Критерий Рейнольдса:

для 2-й секции:

$$Re_{y1} := \frac{\omega_{нд1} \cdot d_{э} \cdot \rho_{n1}}{\epsilon_1 \cdot \mu_{j1}} = 16.56 \quad (2.1.120)$$

Коэффициент сопротивления сухой насадки:

для верхней части 1-й секции:

$$\lambda_1 := \frac{16}{Re_{y1}^{0.2}} = 9.127 \quad (2.1.121)$$

Гидравлическое сопротивление сухой неорошаемой насадки:
для 2-й секции:

$$\Delta P_c := \lambda_1 \cdot \frac{H_{сл1}}{d_э} \cdot \frac{\omega_{нд}^2 \cdot \rho_{n1}}{2 \cdot \epsilon_1^2} = 7.686 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.122)$$

Гидравлическое сопротивление насадки:
для 2-й секции:

$$\Delta P_1 := 10^{169 \cdot U_1} \cdot \Delta P_c = 8.06 \times 10^3 \text{ Па} \quad (2.1.123)$$

2.1.10 Тепловой баланс колонны

Для расчёта энтальпий углеводородов воспользуемся формулами:

Расчет 1-й секции:

Приход:

Паровая фаза

1. фракция НК-350°C

$$I_R := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_1 + 0.00014 \cdot t_1^2 \right) \cdot (4 - d_{15}) - 73.8 \quad (2.1.124)$$

$$I_R = 1.516 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_R := I_R \cdot G_{ГР} = 5.737 \times 10^6 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.125)$$

2. фракция НК-350-500

$$I_{ВП} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_1 + 0.00014 \cdot t_1^2 \right) \cdot (4 - d_{15ВП}) - 73.8 \quad (2.1.126)$$

$$I_{ВП} = 1.485 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{ВП} := I_{ВП} \cdot G_{ВП} = 6.423 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.127)$$

3. водяной пар (15 ата, 420)

$$I_{пара} := 3282.4 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{пара}} := I_{\text{пара}} \cdot G_{\text{пара}} = 1.641 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.128)$$

Жидкая фаза:

1. фракция НК-500 °C

$$I_{\Gamma\text{д}} := 4.19 \cdot \left(0.403 \cdot t_1 + 0.000405 \cdot t_1^2 \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{\Gamma\text{д}}}} = 971.82 \text{ кДж/кг} \quad (2.1.129)$$

$$Q_{\Gamma\text{д}} := I_{\Gamma\text{д}} \cdot G_{\Gamma} = 7.684 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.130)$$

Температура н-гексадекана $t_2 := 385 \text{ °C}$

Расход:

Паровая фаза:

1. фракция НК-350 °C

$$I_{\text{R1}} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_2 + 0.00014 \cdot t_2^2 \right) \cdot (4 - d_{15}) - 73.8 \quad (2.1.131)$$

$$I_{\text{R1}} = 1.414 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{R1}} := I_{\text{R1}} \cdot G_{\Gamma\text{P}} = 5.35 \times 10^6 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.132)$$

2. фракции 350-500 °C

$$I_{\text{ВП1}} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_2 + 0.00014 \cdot t_2^2 \right) \cdot (4 - d_{15\text{ВП}}) - 73.8 \quad (2.1.133)$$

$$I_{\text{ВП1}} = 1.385 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{ВП1}} := I_{\text{ВП1}} \cdot G_{\text{ВП}} = 5.99 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.134)$$

3. водяной пар (15 ата, $t=420 \text{ °C}$)

$$I_{\text{пара}} := 3282.4 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{пара}} := I_{\text{пара}} \cdot G_{\text{пара}} = 1.641 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.135)$$

Температура н-гексакозан $t_3 := 400$

Жидкая фаза:

1. фракция НК-500 °С

$$I_{ГД} := 4.19 \cdot (0.403 \cdot t_3 + 0.000405 \cdot t_3^2) \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{ГД}}} = 912.462 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{ГД} := I_{ГД} \cdot G_{ГД} = 7.214 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.136)$$

Тепловой баланс 1-й секции колонны сведем в таблицу 2.7.

Таблица 2.7

Тепловой баланс 1-й секции колонны

Приход					Расход				
Наименование	t, °С	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч	Наименование	t, °С	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч
Мазут					Паровая фаза:				
Паровая фаза:					нк - 350	385	3783	141.4	535000.0
нк - 350 °С	420	3783	1516	573700.0	фр. 350 - 500	385	26068	1384.908	5990000.0
фр. 350 - 500	420	43250	1485	6423000.0	Вод. пар	385	5000	3251.5	1641000.0
Жидкая фаза:					Жидкая фаза				
Гудрон	420	79060	971	7684000.0	Гудрон	400	47652	912.462	7214000.0
Вод. пар	420	5000	3282.4	1641200.0					
Итого:		131100		16320000.0	Итого:		131100		15380000.0

Избыток тепла в 1-й секции составляет:

$$\Delta Q := 163200000 - 153800000 = 9.4 \times 10^6 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.137)$$

Расчет 2-й секции:

Приход:

Паровая фаза

1. фракция НК-350°С

$$I_{R2} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_2 + 0.00014 \cdot t_2^2 \right) \cdot (4 - d_{15}) - 73.8 \quad (2.1.138)$$

$$I_{R2} = 1.414 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{R2} := I_{R2} \cdot G_{ГР} = 5.737 \times 10^6 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.139)$$

2. фракция НК-350-500

$$I_{ВП2} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_2 + 0.00014 \cdot t_2^2 \right) \cdot (4 - d_{15ВП}) - 73.8$$

$$I_{ВП2} = 1.385 \times 10^3 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{ВП2} := I_{ВП} \cdot G_{ВП} = 6.423 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.140)$$

3. водяной пар (15 ата, t=420)

$$I_{\text{пара}} := 3282.4 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{пара}} := I_{\text{пара}} \cdot G_{\text{пара}} = 1.641 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.141)$$

Температура флегмы $t_4 := 100$

Расход:

Паровая фаза:

1. фракция НК-350 °С

$$I_{R3} := 4.19 \left(50.2 + 0.109 \cdot t_4 + 0.00014 \cdot t_4^2 \right) \cdot (4 - d_{15}) - 73.8 \quad (2.1.142)$$

$$I_{R3} = 749.797 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{R3} := I_{R3} \cdot G_{ГР} = 2.836 \times 10^6 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.143)$$

2. водяной пар (15 ата, t=420 °С)

$$I_{\text{пара}} := 3282.4 \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{\text{пара}} := I_{\text{пара}} \cdot G_{\text{пара}} = 1.641 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.144)$$

Жидкая фаза:

1. фракция 350-500 °С

$$I_{ВП3} := 4.19 \cdot \left(0.403 \cdot t_2 + 0.000405 \cdot t_2^2 \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{15ВП}}} = 941.551 \text{ кДж/кг} \quad (2.1.145)$$

$$Q_{ВП3} := I_{ВП3} \cdot G_{ВП} = 4.072 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.146)$$

Тепловой баланс 2-й секции колонны сведем в таблицу 2.8

Таблица 2.8

Приход					Расход				
Наименование	t, °C	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч	Наименование	t, °C	кг/ч	кДж/кг	кДж/ч
Паровая фаза:					Паровая фаза:				
нк - 350	385	3783	1414,16	57370000	нк - 350	100	3783	749,797	2836000
фр. 350 - 500	385	43250	1384,91	64230000	Вод. пар	100	5000	2689,9	13449500
Вод. пар	385	5000	3251,5	16257500	Жидкая фаза				
					фр. 350 - 500	385	43250	941,64	40720000
Итого:		52040		86220000	Итого:		52040		57010000

Избыток тепла в 2-й секции составляет:

$$\Delta Q_1 := 86220000 - 57010000 = 2.921 \times 10^7 \text{ кДж/ч} \quad (2.1.147)$$

Избытки тепла в секциях снимаются за счёт циркуляционных орошений.

В качестве НЦО примем флегму 1-й секции.

Температуру, до которой необходимо охладить флегму, найдём из энтальпии возвращаемой флегмы:

$$I_2 := I_{ГД} - \frac{\Delta Q}{(G_{ВП} + G_{ГР}) \cdot R_{опт}} = 573.733 \text{ кДж/кг} \quad (2.1.148)$$

$$I_2 = 4.19 \cdot (0.403 \cdot t + 0.000405 \cdot t^2) \cdot 1/\sqrt{0.917} = 573.733 \text{ кДж/кг} \quad (2.1.149)$$

Решая это уравнение получим значение температуры:

$$t_{охлF} := 258 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Избыток тепла во второй секции снимаем за счёт подачи охлаждённой флегмы до 40 °C, а так же за счёт ВЦО:

Расход ВЦО найдём по уравнению:

$$G_{ВЦО} := \frac{\Delta Q_1 - G_{ГР} \cdot R_{опт1} \cdot (I_{R3} - I_{ВЦО2})}{I_{ВЦО1} - I_{ВЦО2}} = 2.194 \times 10^5 \text{ кг/ч} \quad (2.1.150)$$

2.1.11 Расчет теплоизоляции

В качестве теплоизолирующего материала примем минеральную вату. Принимаем температуру окружающего воздуха $t_B := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ и ветер, движущийся со скоростью $w=10 \text{ м/с}$.

Так же принимаем коэффициент теплоотдачи от изоляционного материала в окружающую среду $\alpha_{\text{КТ}} := 29 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Температура стенки изоляционного материала по технике безопасности не должна превышать 45°C .

Принимаем её равной $t_{\text{ИЗ}} := 40^\circ \text{C}$.

Тепловые потери:

$$q := \alpha_{\text{КТ}} \cdot (t_{\text{ИЗ}} - t_{\text{В}}) = 580 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.1.150)$$

Приблизённо принимаем, что всё термическое сопротивление сосредоточено в слое изоляции, тогда толщина слоя изоляционного материала определяется уравнением $\lambda_{\text{ИЗ}} := 0.403$:

$$\delta_{\text{ИЗ}} := \frac{\lambda_{\text{ИЗ}}}{q} \cdot (t_{\text{ОХЛФ}} - t_{\text{ИЗ}}) = 0.151 \text{ м} \quad (2.1.152)$$

2.1.12 Расчет диаметров штуцеров колонны

1. Внутренний диаметр штуцера для входа исходного сырья:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{с}} := 0.75 \text{ м/с}$:

$$D_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{М}}}{\pi \cdot 3600 \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \omega_{\text{с}}}} = 0.324 \text{ м} \quad (2.1.153)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_1=0.35 \text{ м}$

2. Внутренний диаметр штуцера для входа водяного пара:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{пара1}} := 30 \text{ м/с}$:

$$\rho_{\text{ВП}} := \frac{M \cdot P_{\text{пара}}}{8314 \cdot (t_{\text{пара}} + 273)} = 4.686 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.154)$$

$$D_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{пара}}}{\pi \cdot 3600 \cdot \rho_{\text{ВП}} \cdot \omega_{\text{пара1}}}} = 0.112 \text{ м} \quad (2.1.155)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_2=0.15 \text{ м}$.

3. Внутренний диаметр штуцера для выхода гудрона:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{гудрона}} := 0.75 \text{ м/с}$:

$$D_3 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\Gamma}}{\pi \cdot 3600 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \omega_{\text{гудрона}}}} = 0.257 \text{ м} \quad (2.1.156)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_3=0.3$ м

4. Внутренний диаметр штуцера для выход вакуумного погона:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{ВП}} := 0.75$ м/с:

$$D_4 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{ВП}}}{\pi \cdot 3600 \cdot \rho_{\text{В}} \cdot \omega_{\text{ВП}}}} = 0.189 \text{ м} \quad (2.1.157)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_4=0.2$ м

5. Внутренний диаметр штуцера для входа флегмы в 1-ю секцию:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{фл}} := 0.75$ м/с:

$$D_5 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{пара}}}{\pi \cdot 3600 \cdot \rho_{\text{В}} \cdot \omega_{\text{фл}}}} = 0.064 \text{ м} \quad (2.1.158)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_5=0.1$ м

6. Внутренний диаметр штуцера для выхода паров углеводородов с верха колонны:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{пара2}} := 15$ м/с:

$$\rho_{\text{ВП1}} := \frac{M_{\text{н1}} \cdot P_{\text{В}}}{8314 \cdot (t_4 + 273)} = 1.444 \text{ кг/м}^3 \quad (2.1.159)$$

$$D_6 := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{П1}}}{\pi \cdot \rho_{\text{ВП1}} \cdot \omega_{\text{пара2}}}} = 0.324 \text{ м} \quad (2.1.160)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_6=0.35$ м.

7. Внутренний диаметр штуцера для входа флегмы во 2-ю секцию:

Принимаем скорость движения сырья $\omega_{\text{с1}} := 0.75$ м/с:

$$D_7 := \sqrt{\frac{4 \cdot L_1}{\pi \cdot \rho_{\text{Л}} \cdot \omega_{\text{с1}}}} = 0.041 \text{ м} \quad (2.1.161)$$

Принимаем штуцер с внутренним диаметром $D_7=0.04$ м.

В результате технологического расчета получилась колонна высотой 21 м, и диаметром 3.2 м.

3 Конструктивно-механический раздел

3.1 Механический расчет колонны

Расчетное давление:

Исходные данные:

$P := 0.01333$ Остаточное давление, МПа

$P_{atm} := 0.1$ Атмосферное давление, МПа

$H := 21$ Высота колонны, м

$H_{ц} := H - 1.8 = 19.2$ Высота цилиндрической части колонны, м

$E_a := 1.755 \cdot 10^5$ Модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа

$l_{пр} := H_{ц} \cdot 1000$ Приведенная расчетная длина, мм

$n_y := 2.4$ Коэффициент запаса устойчивости

$\rho := 657$ Плотность среды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$\rho_m := 7850$ Плотность металла кг/м^3

$g := 9.807$ Ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

$D := 3200$ Внутренний диаметр аппарата, мм

$\rho_{мв} := 250$ Плотность минеральной ваты, кг/м^3

$s_{из} := 0.15$ Толщина слоя минеральной ваты, м

$\rho_{ал} := 2500$ Плотность алюминиевой фольги, кг/м^3

$s_{ал} := 0.8 \cdot 10^{-3}$ Толщина алюминиевой фольги, м

$\rho_{ж} := 1000$ Плотность жидкости, кг/м^3

$D_B := 3.2$ Внутренний диаметр колонны, м

$s_{ст} := 0.03$ Толщина стенки колонны, м

$H_{оп} := 2$ Высота опорной обечайки, м

$H_K := H + H_{оп} = 23$ Высота колонны с опорной обечайкой, м

$$x_{0ц} := 2 + 11.75 + \frac{11.75}{2} \quad \text{Высота первого участка центра масс, м}$$

$$x_{1ц} := 2 + \frac{11.75}{2} \quad \text{Высота второго участка центра масс, м}$$

$$x_{2ц} := 1 \quad \text{Высота третьего участка центра масс, м}$$

$$E_{vt} := 1.75 \cdot 10^{11} \quad \text{Модуль продольной упругости стали, Па}$$

$$C_{vtF} := 6 \cdot 10^7 \quad \text{Коэффициент неравномерности сжатия грунта, Н/м}^3$$

Вычислим расчетное давление [4, стр.4] :

$$P_p := P_{atm} - P = 0.087 \quad \text{МПа} \quad (3.1)$$

Пробное давление:

Для обечайки выбираем материал - сталь 12X18H10T.

Данные:

$$t_c := 400 \quad \text{Наибольшая температура среды, } ^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{T20} := 240 \quad \text{Минимальное значение предела текучести при температуре +20}^\circ\text{C принимаем по таблице II, МПа [4, стр.17]}$$

$$\sigma_1 := 120 \quad \text{нормативное допускаемое напряжение при расчетной температуре принимаем по таблице 1.3, МПа [4, стр.11]}$$

т.к. обечайка колонны выполняется из листового проката, то принимаем поправочный коэффициент, учитывающий вид заготовки $\eta := 1$ [4, стр.6]

$$\sigma_{d20} := 160 \quad \text{Допускаемое напряжение для материала при температуре +20}^\circ\text{C принимаем по таблице 1.3, МПа [7, с. 11]}$$

Допускаемое напряжение [4, стр.5]:

для рабочего состояния:

$$\sigma_d := \sigma_1 \cdot \eta \quad (3.3)$$

$$\sigma_d = 120 \quad \text{МПа}$$

при испытаниях:

$$\sigma_{dи} := \frac{\sigma_{T20}}{1.1} \quad (3.4)$$

$$\sigma d_{\text{н}} = 218.182 \quad \text{МПа}$$

Вычислим пробное давление [4, стр.4]:

$$P_{\text{н}} := \max \left(1.5 \cdot P \cdot \frac{\sigma d_{20}}{\sigma d}, 0.2 \right) \quad (3.5)$$

$$P_{\text{н}} = 0.2 \quad \text{МПа}$$

Расчетная температура стенки [4,стр.4]: (3.6)

$$t := \max(t_c, 20)$$

$$t = 400 \quad ^\circ\text{C}$$

Коэффициент прочности сварных и паяных соединений принимаем равным $\phi := 0.95$ по таблице Д.1, т.к. сварка ручная дуговая [4,стр.22].

Прибавка к расчетным толщинам:

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии [4,стр.8]:

Для стали 12X18H10T соответствует проницаемость среды равная $\Pi := 0.1 \text{ мм/год}$ [8,с 273], срок службы аппарата принимаем равным $\tau_{\text{в}} := 20 \text{ лет}$

$$c_1 := \Pi \cdot \tau_{\text{в}} = 2 \quad \text{мм} \quad (3.7)$$

Прибавка на минусовое значение по толщине листа принимаем 5% и далее не учитываем

$$c_2 := 0$$

Технологическую прибавку на компенсацию утонения стенки аппарата принимаем равной $c_3 := 1 \text{ мм}$

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 3 \quad \text{мм} \quad (3.8)$$

3.1.1 Расчет обечайки

Расчет обечайки на прочность

При внутреннем избыточном давлении

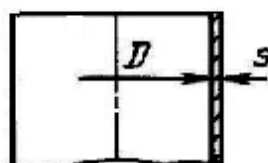


Рисунок 3.1 Расчетная схема обечайки аппарата [5,стр.5].

Расчетная толщина стенки аппарата определяется по формулам[5,стр.6]:

$$s_p := \max \left(\frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d - P_p}, \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_H - P_H} \right) = 1.545 \quad \text{мм} \quad (3.9)$$

Толщина стенки:

$$s_v := s_p + c = 4.545 \quad \text{мм} \quad (3.10)$$

Принимаем исполнительную толщину обечайки равной 10 мм, по техническим требованиям [8,с. 410].

следовательно принимаем:

$$s_{\text{ис}} := 10 \quad \text{мм}$$

Допускаемое давление[5,стр.6]:

в рабочем состоянии

$$Pd := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d \cdot (s_v - c)}{D + s_v - c} = 0.498 \quad \text{МПа} \quad (3.11)$$

при испытаниях

$$Pd_H := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_H \cdot (s_v - c)}{D + s_v - c} = 0.905 \quad \text{МПа} \quad (3.12)$$

Условия применения расчетных формул [5,стр.5]:

$$Usl_1 := \begin{cases} Usl_1 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{s_v - c}{D} \leq 0.1 \\ Usl_1 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_1 = \text{"условие выполняется"}$

При наружном давлении

Расчетная толщина стенки аппарата определяется по формулам

Коэффициент В:

$$B := \max \left[1, 0.47 \cdot \left(\frac{P_{atm}}{10^{-5} \cdot E_a} \right)^{0.067} \cdot \left(\frac{H_{II} \cdot 1000}{D} \right)^{0.4} \right] = 1 \quad (3.13)$$

$$s_{rn} := \max \left[1.06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{P_{atm} \cdot H_{II} \cdot 1000}{10^{-5} \cdot E_a \cdot D} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot P_{atm} \cdot D}{2 \cdot \sigma d - P_{atm}} \right] = 22.08 \quad \text{мм} \quad (3.14)$$

Толщина стенки:

$$s_n := s_m + c = 25.08 \text{ мм} \quad (3.15)$$

Принимаем исполнительную толщину обечайки равной 30 мм, по техническим требованиям [8, с. 410].

следовательно принимаем:

$$s_{in} := 30 \text{ мм}$$

Допускаемое давление [5, стр. 7]:

Коэффициент B_1 :

$$B_1 := \min \left[1.0, 9.45 \cdot \frac{D}{H_{\Pi} \cdot 1000} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s_{in} - c)}} \right] = 1 \quad (3.16)$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$Pd_E := \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E_a \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot (H_{\Pi} \cdot 1000)} \cdot \left[\frac{100(s_{in} - c)}{D} \right]^{2.5} = 0.166 \text{ МПа} \quad (3.17)$$

Допускаемое давление из условия прочности:

$$Pd_{\Pi} := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot (s_{in} - c)}{D + (s_{in} - c)} = 2.008 \text{ МПа} \quad (3.18)$$

Допускаемое наружное давление:

$$Pd_N := \frac{Pd_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Pd_{\Pi}}{Pd_E} \right)^2}} = 0.165 \text{ МПа} \quad (3.19)$$

Условия применения расчетных формул [5, стр. 5]:

$$Usl_2 := \begin{cases} Usl_2 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{s_{in} - c}{D} \leq 0.1 \\ Usl_2 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_2 = \text{"условие выполняется"}$

При осевой сжимающей силе

Осевая сжимающая сила, действующая на обечайку:

$$F_s := P_{atm} \cdot \pi \cdot D^2 = 3.217 \times 10^6 \text{ Н} \quad (3.20)$$

Расчетная толщина стенки аппарата определяется по формулам[5,стр.7]:

$$s_{rf} := \frac{F_s}{\pi \cdot D \cdot \sigma_d \cdot \phi} = 2.807 \text{ мм} \quad (3.21)$$

Толщина стенки:

$$s_f := s_{rf} + c = 5.807 \text{ мм} \quad (3.22)$$

Принимаем исполнительную толщину обечайки равной 10 мм, по техническим требованиям [8,с. 410].

следовательно принимаем:

$$s_{if} := 10 \text{ мм}$$

$$H_{ц} \cdot \frac{1000}{D} = 6$$

Т.к $H_{ц} \cdot 1000/D < 10$, то $F_{dE} = F_{dE1}$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости:

$$F_{dE} := \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E_a}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100(s_{if} - c)}{D} \right]^{2.5} = 5.195 \times 10^6 \text{ Н} \quad (3.23)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{d\Pi} := \pi \cdot (D + s_{if} - c) \cdot (s_{if} - c) \cdot \sigma_d = 8.463 \times 10^6 \quad (3.24)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$F_{dS} := \frac{F_{d\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{d\Pi}}{F_{dE}} \right)}} = 5.22 \times 10^6 \text{ Н} \quad (3.25)$$

Условия применения расчетных формул [7,с. 19]:

$$Us1_3 := \begin{cases} Us1_3 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{s_{if} - c}{D} \leq 0.1 \\ Us1_3 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us1_3 = \text{"условие выполняется"}$

Выберим из толщин максимальную

$$s_{\text{нн}} := \max(s_v, s_{\text{ин}}, s_{\text{иф}}) = 30 \text{ мм} \quad (3.26)$$

Проверка на устойчивость

$$\text{Prov_pr} := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{P}{Pd_N} + \frac{F_s}{Fd_S} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov_pr = "Условие устойчивости выполняется"

Проверка на прочность выполняется, следовательно выбираем толщину обечайки равной 30 мм.

3.1.2 Расчет днища и крышки

Расчет днища и крышки при внутреннем избыточном давлении

При гидравлических испытаниях крышка и днище будут нагружены внутренним избыточным давлением, следовательно проведем расчет толщины при внутреннем избыточном давлении.

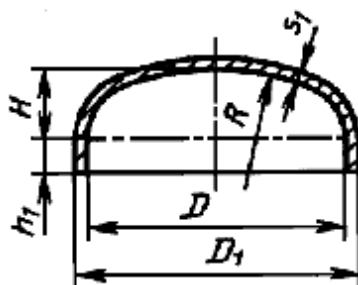


Рисунок 3.2 Крышка эллиптическая [5,стр.13].

Исполнительную толщину стенки днища и крышки определяют по формулам[5,стр.14]

$$s_{P1} := \max\left(\frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - 0.5 \cdot P_p}, \frac{P_{\text{и}} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{d_{\text{и}}} - 0.5 \cdot P_{\text{и}}}\right) = 1.544 \text{ мм} \quad (3.27)$$

исполнительная толщина стенки днища и крышки:

$$s_1 := s_{P1} + c = 4.544 \text{ мм} \quad (3.28)$$

Принимаем толщину днища и крышки стандартного значения $s_{\text{нн}} := 10 \text{ мм}$, по таблице 16.1 [8, с. 441]

Допускаемое давление[5,стр.14]:

в рабочем состоянии

$$Pd_1 := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d \cdot (s_1 - c)}{D + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 0.498 \text{ МПа} \quad (3.29)$$

при испытаниях

$$Pd_{1и} := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_H \cdot (s_1 - c)}{D + 0.5 \cdot (s_1 - c)} = 0.906 \text{ МПа} \quad (3.30)$$

Условия применения расчетных формул[5,стр.14]:

$$Usl_4 := \begin{cases} Usl_4 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{s_1 - c}{D} \leq 0.1 \\ Usl_4 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.31)$$

$Usl_4 = \text{"условие выполняется"}$

Длину цилиндрической отбортованной части днища и крышки принимаем равной $h_1 := 100 \text{ мм}$ по таблице 16.1 [8,с. 440]

Радиус кривизны в вершине днища[5,стр. 14]:

Высоту выпуклой части днища и крышки без учета цилиндрической части принимаем равной $H_1 := 800 \text{ мм}$ по таблице 16.1 [8,с. 440]

$$R := \frac{D^2}{4 \cdot H_1} = 3200 \text{ мм} \quad (3.32)$$

Расчет толщины стенки днища и крышки нагруженных наружным давлением

Колонна работает под вакуумом, на нее действует атмосферное давление. Произведем расчет толщины стенки крышки и днища при действии наружного давления.

Исполнительную толщину стенки днища и крышки определяют по формулам[5,стр.15]

Коэффициент x :

$$x := 10 \cdot \frac{s_1 - c}{D} \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right) = 1.666 \quad (3.33)$$

Коэффициент K_3 :

$$K_3 := \frac{1 + (2.4 + 8x) \cdot x}{1 + (3.0 + 10x)x} = 0.806 \quad (3.34)$$

Расчетная толщина стенки крышки и днища:

$$s_{1r} := \max \left(\frac{K_3 \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_{atm}}{10^{-5} \cdot E_a}}, \frac{1.2 \cdot P_{atm} \cdot R}{2 \cdot \sigma d} \right) = 5.924 \text{ мм} \quad (3.35)$$

исполнительная толщина стенки днища и крышки:

$$s_{1n} := s_{1r} + c = 8.924 \text{ мм} \quad (3.36)$$

Принимаем толщину днища и крышки стандартного значения $s_{1n} := 10 \text{ мм}$, по таблице 16.1 [8, с. 441]

Допускаемое давление [5, стр.15]:

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$Pd_{E1} := \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E_a}{n_y} \cdot \left[\frac{100(s_{1n} - c)}{K_9 \cdot R} \right] = 0.437 \text{ МПа} \quad (3.37)$$

Допускаемое давления из условия прочности:

$$Pd_{П1} := \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot (s_{1n} - c)}{R + 0.5(s_{1n} - c)} = 0.444 \text{ МПа} \quad (3.38)$$

Допускаемое наружное давление:

$$Pd1 := \frac{Pd_{П1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Pd_{П1}}{Pd_{E1}} \right)^2}} = 0.311 \text{ МПа} \quad (3.39)$$

Условия применения расчетных формул [5, стр.15]:

$$Usl_5 := \begin{cases} Usl_5 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0.1 \\ Usl_5 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5 = \text{"условие выполняется"}$$

По результатам расчетов выбираем толщину крышки равной 16 мм.

3.1.3 Выбор стандартных штуцеров.

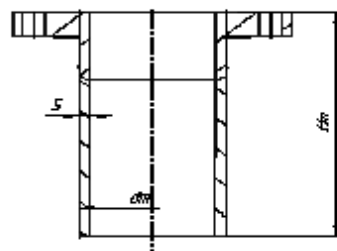


Рисунок 3.3 Схема штуцера с плоским фланцем.

Основные размеры патрубков, стандартных стальных фланцевых тонкостенных штуцеров приведены в таблице 3.1

Основные размеры патрубков, стандартных стальных фланцевых тонкостенных штуцеров [8, с. 659]

Таблица 3.1

Обозначение	D_y , мм	d_T , мм	давление условное P_y , МПа	S_T , мм	H_T , мм
A, E	350	377	0.2	27	600
B ₂	150	159	1.5	9	260
B	300	325	0.2	25	560
Г	200	219	0.2	19	315
Д	100	108	0.2	8	230
Ж	40	45	0.2	5	145

3.1.4 Расчет укрепления отверстий

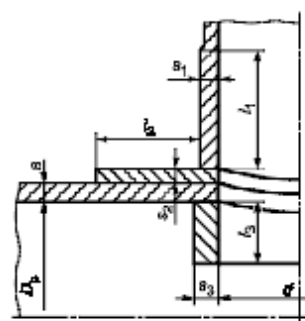


Рисунок 3.4. Основная расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда [6, стр.19]

Расчетные диаметры укрепляемых элементов определяются по формулам [6, стр.5]

- для цилиндрической обечайки [6, стр.5]

для штуцеров А, Б

$$D_p := D = 3200 \quad \text{мм} \quad (3.40)$$

- для стандартного эллиптического днища [6, стр.5]

для штуцеров В, Г

$r := 0$ мм расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища.

$$D_{p1} := 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{r}{D} \right)^2} = 6400 \quad \text{мм} \quad (3.41)$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле [6, с. 7]

$$d_0 := 2 \cdot \left(\frac{s - c}{s_{rn}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 248.559 \text{ мм} \quad (3.42)$$

Так как диаметры патрубков А,Е,В больше d_0 , выполним укрепление отверстий.

Для патрубка В выберем укрепление отверстия штуцером ($d_{p2} := 300$).

Толщина стенки штуцера:

$$s_{ш1} := \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d - P_p} = 1.217 \text{ мм} \quad (3.43)$$

Исполнительная толщина штуцера:

$$s_{ши1} := s_{ш1} + c = 4.217 \text{ мм} \quad (3.44)$$

Принимаем исполнительную толщину штуцера $s_{и1} := 13 \text{ мм}$.

Расчетная внутренняя и внешняя длины штуцера, участвующая в укреплении:

- внешняя длина штуцера

$$l_{1p1} := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{p2} + 2 \cdot c) \cdot (s_{и1} - c)} = 69.147 \text{ мм} \quad (3.45)$$

- внутренняя длина штуцера

$$l_{3p1} := 0.5 \cdot \sqrt{(d_{p2} + 2 \cdot c) \cdot (s_{и1} - c)} = 27.659 \text{ мм} \quad (3.46)$$

$$X1 := l_{1p1} \cdot (s_{и1} - s_{ш1} - c) + l_{3p1} \cdot (s_{и1} - c - c) \quad (3.47)$$

Условие укрепления отверстия:

$$Us1_uk1 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } X1 \geq 0.5 \cdot (d_{p2} - d_0) \cdot s \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_uk1 = \text{"условие выполняется"}$$

Для патрубка А,Е $d_{p2} := 350$ выбираем укрепление штуцером и накладным кольцом.

Толщина стенки штуцера:

$$s_{\text{ш}} := \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P_p} = 1.217 \text{ мм} \quad (3.48)$$

Исполнительная толщина штуцера:

$$s_{\text{ши}} := s_{\text{ш}} + c = 4.217 \text{ мм} \quad (3.49)$$

Принимаем исполнительную толщину штуцера $s_{\text{ш1}} := 10$ мм, а толщину накладного кольца $s_{\text{нк}} := 5$ мм.

Расчетная внутренняя и внешняя длины штуцера, участвующая в укреплении:

- внешняя длина штуцера

$$l_{1p} := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{p2} + 2 \cdot c) \cdot (s_{\text{ш1}} - c)} = 62.4 \text{ мм} \quad (3.50)$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \sqrt{D \cdot (s_{\text{нк}} + s - c)} = 320 \text{ мм} \quad (3.51)$$

- внутренняя длина штуцера

$$l_{3p} := 0.5 \cdot \sqrt{(d_{p2} + 2 \cdot c) \cdot (s_{\text{ш1}} - c)} = 24.96 \text{ мм} \quad (3.52)$$

$$X := l_{1p} \cdot (s_{\text{ш1}} - s_{\text{ш}} - c) + l_{2p} \cdot s_{\text{нк}} + l_{3p} \cdot (s_{\text{ш1}} - c - c) \quad (3.53)$$

Условие укрепления отверстия:

$$\text{Usl_uk} := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } X1 \geq 0.5 \cdot (d_{p2} - d_0) \cdot s \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl_uk1} = \text{"условие выполняется"}$$

Условие выполняется, следовательно укрепление отверстий выполняется.

3.1.5 Расчет весовых характеристик колонны

Вес цилиндрической части корпуса:

$$G_{\text{Ц}} := [\pi \cdot (D_{\text{в}} + s_{\text{ст}}) s_{\text{ст}} \cdot H_{\text{Ц}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot g] = 4.5 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.54)$$

Вес крышки и днища колонны:

$$G_{\text{Д}} := \pi \cdot (D_{\text{в}} + 2s_{\text{ст}})^2 s_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot g = 7.711 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.55)$$

Вес корпуса:

$$G_K := G_{\text{Ц}} + G_{\text{Д}} = 5.271 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.56)$$

Плотность изоляции:

$$\rho_{\text{из}} := \frac{\rho_{\text{мв}} \cdot s_{\text{из}} + \rho_{\text{ал}} \cdot s_{\text{ал}}}{s_{\text{из}} + s_{\text{ал}}} = 261.936 \text{ кг/м}^3 \quad (3.57)$$

Вес изоляции цилиндрической части колонны:

$$G_{\text{из.ц}} := \pi \cdot [D_{\text{в}} + 2s_{\text{ст}} + (s_{\text{из}} + s_{\text{ал}}) \cdot (s_{\text{из}} + s_{\text{ал}}) \cdot H_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{из}} \cdot g] = 3533.834 \text{ Н} \quad (3.58)$$

Вес изоляции крышки и днища:

$$G_{\text{из.д}} := \left[\pi \cdot (D_{\text{в}} + 2s_{\text{ст}})^2 s_{\text{ст}} \cdot (s_{\text{из}} + s_{\text{ал}}) \cdot \rho_{\text{из}} \cdot g \right] = 388.007 \text{ Н} \quad (3.59)$$

Вес изоляции колонны:

$$G_{\text{из}} := G_{\text{из.ц}} + G_{\text{из.д}} = 3921.841 \text{ Н} \quad (3.60)$$

Вес внутренних устройств:

Вес насадки одной ступени:

$$G_{n1s} := 3050 \text{ Н}$$

Количество ступеней $n_s := 5$

Вес насадки всех ступеней:

$$G_{ns} := G_{n1s} \cdot n_s = 1.525 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.61)$$

Вес распределительной и перераспределительных устройств:

$$G_{\text{pt}} := 15000 \text{ Н}$$

Вес отбойника:

$$G_{\text{от}} := 838 \text{ Н}$$

$$G_{\text{в.у}} := G_{ns} + G_{\text{pt}} + G_{\text{от}} = 3.109 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.62)$$

Вес жидкости в рабочих условиях [вес жидкости удерживаемой насадкой]:

$$G_{\text{ж}} := 23400 \text{ Н} \quad (3.63)$$

Вес наружных устройств:

$$G_{\text{н.у}} := 0.1 \cdot G_K = 5.271 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.64)$$

Вес колонны при рабочих условиях:

$$G_A := G_K + G_{ИЗ} + G_{н.у} + G_{в.у} + G_{ж} = 6.382 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.65)$$

Вес колонны при монтаже:

$$G_{A.M} := G_K + G_{ИЗ} + G_{н.у} + G_{в.у} = 6.148 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.66)$$

3.1.6 Расчет на ветровую нагрузку

3.1.6.1 Определение периода собственных колебаний колонны

Колонну разбиваем по высоте на три участка.

Вес участка аппарата принимают сосредоточенным в его середине. Нагрузку от веса аппарата прикладывают вертикально, а ветровую горизонтально.

Высота первого участка:

$$H_0 := \frac{H}{2} = 10.5 \text{ м} \quad (3.67)$$

Высота второго участка:

$$H_{11} := H_0 = 10.5 \text{ м} \quad (3.68)$$

Высота третьего участка:

$$H_2 := 2 \text{ м} \quad (3.69)$$

Вес 1-ого метра колонны:

$$G_{1\text{метр}} := \frac{G_A}{H} = 3.039 \times 10^4 \text{ Н/метр} \quad (3.70)$$

Вес первого участка:

$$G_0 := G_{1\text{метр}} \cdot H_0 = 3.191 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.71)$$

Вес второго участка:

$$G_1 := G_{1\text{метр}} \cdot H_{11} = 3.191 \times 10^5 \text{ Н} \quad (3.72)$$

Вес третьего участка:

$$G_2 := \left[\pi \cdot \left[(D_B + 2s_{CT}) + s_{CT} \right] s_{CT} \cdot H_{оп} \cdot \rho_m \cdot g \right] = 4.774 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.73)$$

Момент сечения колонны:

-первого участка

$$J_0 := \frac{\pi}{8} \cdot \left(D_B + s_{CT} - \frac{c}{1000} \right)^3 \cdot \left(s_{CT} - \frac{c}{1000} \right) = 0.356 \text{ м}^4 \quad (3.74)$$

-второго участка

$$J_1 := \frac{\pi}{8} \cdot \left(D_B + s_{CT} - \frac{c}{1000} \right)^3 \cdot \left(s_{CT} - \frac{c}{1000} \right) = 0.356 \text{ м}^4 \quad (3.75)$$

-третьего участка

$$J_2 := \frac{\pi}{8} \cdot \left[\left(D_B - s_{CT} \right) + s_{CT} - \frac{c}{1000} \right]^3 \cdot \left(s_{CT} - \frac{c}{1000} \right) = 0.346 \text{ м}^4 \quad (3.76)$$

Момент сечения подошвы фундамента (диаметр фундамента $D_{KH} := 4.7 \text{ м}$):

$$J_F := 0.065 \cdot D_{KH}^4 = 0.306 \text{ м}^4 \quad (3.77)$$

коэффициент Δ :

$$\Delta := \frac{1}{3} + \frac{J_0 \cdot H_{11}}{J_1 \cdot H_0} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{H_{11}}{H_0} \right)^2 + \frac{H_{11}}{H_0} + 1 \right] = 2.667 \quad (3.78)$$

коэффициент λ :

$$\lambda_{vt} := \frac{J_0 \cdot H_2}{J_2 \cdot H_0} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{H_2}{H_0} \right)^2 + \frac{H_2}{H_0} + 1 \right] = 0.236 \quad (3.79)$$

коэффициент μ :

$$\mu_{vt} := \frac{J_0 \cdot H_2}{J_1 \cdot H_{11}} \cdot \left(\frac{H_2}{H_{11}} + 1 \right) = 0.227 \quad (3.80)$$

коэффициент β :

-первого участка

$$\beta_{vt0} := \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_{0\Pi}}{H_K} \right)^2 - \left(\frac{x_{0\Pi}}{H_K} \right)^3 \right] = 0.781 \quad (3.81)$$

- второго участка

$$\beta_{vt1} := \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_{1\Pi}}{H_K} \right)^2 - \left(\frac{x_{1\Pi}}{H_K} \right)^3 \right] = 0.156 \quad (3.82)$$

- третьего участка

$$\beta_{vt2} := \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{x_{2ц}}{H_K} \right)^2 - \left(\frac{x_{2ц}}{H_K} \right)^3 \right] = 0.003 \quad (3.83)$$

Коэффициент γ :

$$\gamma_{vt} := \frac{2}{H_K^3} \cdot \left[H_0^3 \cdot (\Delta + \lambda_{vt}) + H_{11}^3 \cdot \mu_{vt} + 2 \cdot \frac{J_0}{J_2} + H_0 \cdot H_{11} \cdot H_2 \right] \quad (3.84)$$

$$\gamma_{vt} = 0.632$$

Относительное перемещение центров тяжести:

- первого участка

$$\alpha_{vt0} := \gamma_{vt} \frac{H_K \cdot \beta_{vt0}}{2 \cdot E_{vt} \cdot J_0} + \frac{x_{0ц}}{H_K \cdot C_{vtF} \cdot J_F} = 4.664 \times 10^{-8} \quad (3.85)$$

- второго участка

$$\alpha_{vt1} := \gamma_{vt} \frac{H_K \cdot \beta_{vt1}}{2 \cdot E_{vt} \cdot J_0} + \frac{x_{1ц}}{H_K \cdot C_{vtF} \cdot J_F} = 1.87 \times 10^{-8} \quad (3.86)$$

- третьего участка

$$\alpha_{vt2} := \gamma_{vt} \frac{H_K \cdot \beta_{vt2}}{2 \cdot E_{vt} \cdot J_0} + \frac{x_{2ц}}{H_K \cdot C_{vtF} \cdot J_F} = 2.372 \times 10^{-9} \quad (3.87)$$

Период основного тона собственных колебаний аппарата переменного сечения:

$$T_{pok} := 2 \cdot H_K \cdot \sqrt{\frac{G_0 \cdot \alpha_{vt0}^2 + G_1 \cdot \alpha_{vt1}^2 + G_2 \cdot \alpha_{vt2}^2}{g \cdot \left(\gamma \cdot \frac{H_K}{2 \cdot E_{vt} \cdot J_0} + \frac{1}{C_{vtF} \cdot J_F} \right)}} = 1.784 \text{ с} \quad (3.88)$$

3.1.6.2 Определение изгибающего момента от ветровой нагрузки

При расчете ветровая нагрузка, распределенная непрерывно по высоте аппарата, заменяется сосредоточенными горизонтальными силами P_i , приложенными в серединах участков.

$$q_0 := 380 \text{ Н/м}^2 \quad \text{Ветровая статическая нагрузка}$$

$K := 0.7$ Коэффициент аэродинамический

Коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте аппарата:

-первого участка

$$\theta_0 := \left(\frac{x_{0ц}}{10} \right)^{0.31} = 1.232 \quad (3.89)$$

- второго участка

$$\theta_1 := \left(\frac{x_{1ц}}{10} \right)^{0.31} = 0.929 \quad (3.90)$$

- третьего участка

$$\theta_2 := \left(\frac{x_{2ц}}{10} \right)^{0.31} = 0.49 \quad (3.91)$$

Значение статической составляющей ветровой нагрузки на середине i -го участка колонны:

-первого участка

$$q_{0st} := q_0 \cdot \theta_0 \cdot K = 327.833 \text{ Н/м}^2 \quad (3.92)$$

- второго участка

$$q_{1st} := q_0 \cdot \theta_1 \cdot K = 247.013 \text{ Н/м}^2 \quad (3.93)$$

- третьего участка

$$q_{2st} := q_0 \cdot \theta_2 \cdot K = 130.281 \text{ Н/м}^2 \quad (3.94)$$

Параметр ϵ :

$$\epsilon_{vt} := \frac{T_{pok} \cdot \sqrt{q_0}}{790} = 0.044 \quad (3.95)$$

Коэффициент динамичности:

$$\xi := 1.1 + \sqrt{15.5 \cdot \epsilon_{vt}} = 1.926 \quad (3.96)$$

Коэффициент пространственной корреляции пульсации ветра:

$$\nu := 0.968 - 0.025 \cdot \sqrt{H_K} = 0.848 \quad (3.97)$$

Статическая составляющая ветровой нагрузки:

-первого участка

$$P_{0st} := q_{0st} \cdot (D_B + 2s_{CT}) \cdot H_0 = 1.122 \times 10^4 \text{ Па} \quad (3.98)$$

- второго участка

$$P_{1st} := q_{1st} \cdot (D_B + 2s_{CT}) \cdot H_{11} = 8455.245 \text{ Па} \quad (3.99)$$

- третьего участка

$$P_{2st} := q_{2st} \cdot (D_B + 2s_{CT}) \cdot H_2 = 849.433 \text{ Па} \quad (3.100)$$

Коэффициент m_n :

-первого участка

$$m_0 := 0.76 \cdot \left(\frac{x_{0II}}{10} \right)^{-0.15} = 0.687 \quad (3.101)$$

- второго участка

$$m_1 := 0.76 \cdot \left(\frac{x_{1II}}{10} \right)^{-0.15} = 0.788 \quad (3.102)$$

- третьего участка

$$m_2 := 0.6 \quad (3.103)$$

Приведенное относительное ускорение центра тяжести:

-первого участка

$$\eta_0 := \alpha_{vt0} \cdot \frac{\alpha_{vt0} \cdot m_0 \cdot P_{0st}}{\alpha_{vt0}^2 \cdot G_0} = 0.024 \quad (3.104)$$

- второго участка

$$\eta_1 := \alpha_{vt1} \cdot \frac{\alpha_{vt1} \cdot m_1 \cdot P_{1st}}{\alpha_{vt1}^2 \cdot G_1} = 0.021 \quad (3.105)$$

- третьего участка

$$\eta_2 := \alpha_{vt2} \cdot \frac{\alpha_{vt2} \cdot m_2 \cdot P_{2st}}{\alpha_{vt2}^2 \cdot G_2} = 0.011 \quad (3.106)$$

Динамическая составляющая ветровой нагрузки:

-первого участка

$$P_{0\text{din}} := \nu \cdot G_0 \cdot \xi \cdot \eta_0 = 1.259 \times 10^4 \text{ Па} \quad (3.107)$$

- второго участка

$$P_{1\text{din}} := \nu \cdot G_1 \cdot \xi \cdot \eta_1 = 1.088 \times 10^4 \text{ Па} \quad (3.108)$$

- третьего участка

$$P_{2\text{din}} := \nu \cdot G_2 \cdot \xi \cdot \eta_2 = 832.482 \text{ Па} \quad (3.109)$$

Ветровая нагрузка:

-первого участка

$$P_0 := P_{0\text{st}} + P_{0\text{din}} = 2.381 \times 10^4 \text{ Па} \quad (3.110)$$

- второго участка

$$P_1 := P_{1\text{st}} + P_{1\text{din}} = 1.933 \times 10^4 \text{ Па} \quad (3.111)$$

- третьего участка

$$P_2 := P_{2\text{st}} + P_{2\text{din}} = 1681.915 \text{ Па} \quad (3.112)$$

Расстояние от низа колонны до j-ой обслуживающей площадки:

$$x_{j0} := H_K - 2.5 = 20.5 \text{ м} \quad (3.113)$$

$$x_{j1} := x_{j0} - 2.5 = 18 \text{ м} \quad (3.114)$$

$$x_{j2} := x_{j1} - 2.5 = 15.5 \text{ м} \quad (3.115)$$

$$x_{j3} := x_{j2} - 2.5 = 13 \text{ м} \quad (3.116)$$

$$x_{j4} := x_{j3} - 2.5 = 10.5 \text{ м} \quad (3.117)$$

$$x_{j5} := x_{j4} - 2.5 = 8 \text{ м} \quad (3.118)$$

$$x_{j6} := x_{j5} - 2.5 = 5.5 \text{ м} \quad (3.119)$$

Коэффициент χ для j-ого участка:

$$\chi_0 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j0}}{H_K} \right)^{1.6} = 1.298 \quad (3.120)$$

$$\chi_1 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j1}}{H_K} \right)^{1.6} = 1.054 \quad (3.121)$$

$$\chi_2 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j2}}{H_K} \right)^{1.6} = 0.83 \quad (3.122)$$

$$\chi_3 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j3}}{H_K} \right)^{1.6} = 0.626 \quad (3.123)$$

$$\chi_4 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j4}}{H_K} \right)^{1.6} = 0.445 \quad (3.124)$$

$$\chi_5 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j5}}{H_K} \right)^{1.6} = 0.288 \quad (3.125)$$

$$\chi_6 := 1.56 \cdot \left(\frac{x_{j6}}{H_K} \right)^{1.6} = 0.158 \quad (3.126)$$

Изгибающий момент j-ого участка на обслуживаемые площадки
($A_0 := 3.96 \text{ м}^2$ площадь поперечного сечения площадки):

$$M_{v0} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (H_K - x_{j0}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_0 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.127)$$

$$M_{v0} = 9015.288 H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v1} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (x_{0\text{ц}} - x_{j1}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_1 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.128)$$

$$M_{v1} = 5240.317 \quad H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v2} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (x_{0\text{ц}} - x_{j2}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_2 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.129)$$

$$M_{v2} = 1.186 \times 10^4 H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v3} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (x_{0\text{ц}} - x_{j3}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_3 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.130)$$

$$M_{v3} = 1.693 \times 10^4 H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v4} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (x_{0\text{ц}} - x_{j4}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_4 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.131)$$

$$M_{v4} = 2.073 \times 10^4 H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v5} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_0 \cdot (x_{0\text{ц}} - x_{j5}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_5 \cdot m_0) \cdot A_0 \quad (3.132)$$

$$M_{v5} = 2.356 \times 10^4 H^*_{\text{м}}$$

$$M_{v6} := 0.85 \cdot q_0 \cdot \theta_1 \cdot (x_{1ц} - x_{j6}) \cdot (1 + 0.75 \cdot \xi \cdot \chi_6 \cdot m_1) \cdot A_0 \quad (3.133)$$

Суммарный момент всех участков: $M_{v6} = 3328.457 \text{ Н*м}$

$$M_{sv} := M_{v0} + M_{v1} + M_{v2} + M_{v3} + M_{v4} + M_{v5} + M_{v6} \quad (3.134)$$

$$M_{sv} = 9.067 \times 10^4 \text{ Н*м}$$

Изгибающий момент:

$$M_v := P_0 \cdot \left(x_{0ц} - \frac{H_K}{2} \right) + P_1 \cdot (x_{1ц} - H_{оп}) + P_2 \cdot (x_{2ц} - 0) + M_{sv} \quad (3.135)$$

$$M_v = 3.994 \times 10^5 \text{ Н*м}$$

Для данной колонны рассчитан изгибающий момент от ветровой нагрузки для условий 3 ветрового района.

3.1.7 Расчет опорной обечайки

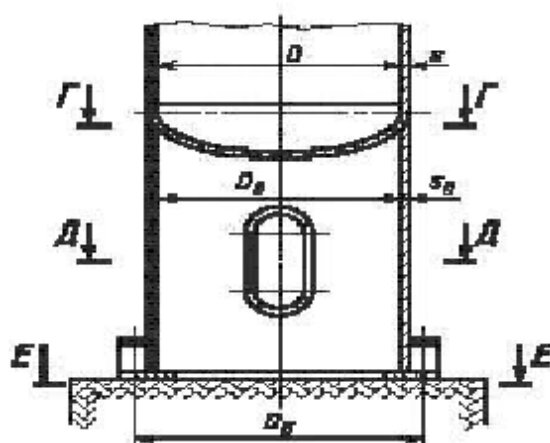


Рисунок 3.5 Расчетное сечение опорной обечайки[9,стр. 2]

Опорную обечайку проверяют на прочность и устойчивость для рабочего условия и условия испытания, расчет проводим для условия испытания т.к. при этом условие обечайка будет испытывать максимальное усилие на сжатие.

Осевое сжимающее усилие:

$$F_{os} := \left[G_A + \left(0.785 \cdot D_B^2 \cdot H_{ц} + 0.523 \cdot D_B^3 \right) \cdot \rho_{ж} \cdot g \right] = 2.32 \times 10^6 \text{ Н} \quad (3.136)$$

Проверка прочности:

продольное напряжение σ_x рассчитываем по уравнению (2)[9,стр. 4]:

$D_0 := 3200$ внутренний диаметр цилиндрической опорной обечайки, мм

$s_0 := 12$ исполнительная толщина стенки опорной обечайки, мм

$c := 3$

$p := 0$ давление в опорной обечайке, МПа

$$\sigma_x := \frac{p \cdot (D_0 + s_0)}{4(s_0 - c)} - \frac{F_{os}}{\pi \cdot D_0 \cdot (s_0 - c)} + \frac{4 \cdot M_v}{\pi \cdot D_0^2 \cdot (s_0 - c) \cdot 1000} \quad (3.137)$$
$$\sigma_x = -25.64 \quad \text{МПа}$$

кольцевые напряжения σ_y рассчитываем по уравнению (4)[9,стр.4]:

$$\sigma_y := \frac{p \cdot (D_0 + s_0)}{2 \cdot (s_0 - c)} = 0 \quad \text{МПа} \quad (3.104)$$

эквивалентное напряжения σ_E рассчитываем по уравнению (5)[9,стр. 4]:

$$\sigma_E := \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 25.64 \quad \text{МПа} \quad (3.138)$$

Условие прочности[9,стр. 4]:

$\sigma_{d0} := 140$ допускаемое напряжение для материала опорной обечайки ВСт3сп
находим по таблице 1.2, Мпа [4,стр. 11]

$\phi := 0.95$

$$Us1_31 := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(|\sigma_x|, \sigma_E) \leq \sigma_{d0} \cdot \phi \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Us1_31 = \text{"условие прочности выполняется"}$

Проверка устойчивости[9, стр.5]:

Для рабочих условий ($n_y = 2,4$) допускаемое сжимающее усилие вычисляем по формуле (20)[4,с. 9]

$\phi1 := 0.9$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия местной устойчивости при осевом сжатии, определяем по рисунку 5[5,стр.10] ;

$\phi2 := 1$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия общей устойчивости при осевом сжатии, определяем по рисунку 6[5,стр. 10] ;

$\phi3 := 0.9$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия местной устойчивости при изгибе, определяем по рисунку 7[5,стр. 11].

$$F_d := \pi \cdot (D_0 + s_0 - c) \cdot (s_0 - c) \cdot \sigma_{d0} \cdot \min(\phi1, \phi2) = 1.143 \times 10^7 \quad \text{Н} \quad (3.139)$$

Для рабочих условий ($n_y = 2,4$) допускаемый изгибающий момент вычисляем по формуле(24)[5,стр. 9]

$$M_d := \frac{\pi}{4} \cdot D_0 \cdot (D_0 + s_0 - c) \cdot (s_0 - c) \cdot \sigma_{d0} \cdot \phi_3 = 9.146 \times 10^9 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (3.140)$$

$$Usl_a := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{F_d} + \frac{M_v}{M_d \cdot 1000} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_a = "условие выполняется"

Проверка прочности сварного шва[9,стр. 5]:

a := 11 катет сварного шва в месте приварки опорной обечайки, мм

$$Usl_b := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot a} \cdot \left(\frac{4 \cdot M_v}{D_0 \cdot 1000} + F_{os} \right) \leq \sigma_{d0} \cdot 0.8 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_b = "условие выполняется"

Проверка устойчивости опорной обечайки в зоне отверстия (сечение Д-Д)[9,стр. 5]:

Площадь наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки

$\underline{r} := 1630$ внутренний радиус наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки, мм

$\underline{R} := 1654$ наружный радиус наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки, мм

$$A := \pi \cdot (R^2 - r^2) - 1000 = 2.466 \times 10^5 \text{ мм}^2 \quad (3.141)$$

$$\phi_1 := \frac{A}{\pi \cdot D_0 \cdot (s_0 - c)} = 2.726 \quad (3.142)$$

Наименьший момент сопротивления

$$\underline{W} := \pi \cdot r^2 \cdot s_0 = 1.002 \times 10^8 \text{ мм}^3 \quad (3.143)$$

$$\phi_2 := \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot D_0^2 \cdot (s_0 - c)} = 1.384 \quad (3.144)$$

$Y_0 := 1654$ координата центра тяжести наиболее ослабленного сечения опорной обечайки, мм

$$\phi_3 := \frac{Y_0}{D_0} = 0.517 \quad (3.145)$$

$$Usl_c := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{M_v + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D_0}{\phi_2 \cdot M_d \cdot 1000} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_c = \text{"условие выполняется"}$

Проверка устойчивости в зоне Д-Д выполняется.

3.1.7.1 Элементы опорного узла

Определяем диаметры опорного кольца[10,стр.15]

$k_0 := 0.2$ коэффициент, определяемый графически

Наружный диаметр опорной обечайки

$$D_H := D_0 + 2 \cdot s_0 = 3224 \text{ мм} \quad (3.146)$$

Внутренний диаметр опорного фундаментного кольца

$$D_1 := D_H \cdot (1 - 0.65 \cdot k_0) = 2804.88 \text{ мм} \quad (3.147)$$

Наружный диаметр опорного фундаментного кольца

$$D_2 := D_H \cdot (1 + 1.35 \cdot k_0) = 4094.48 \text{ мм} \quad (3.148)$$

Площадь опорного кольца:

$$F_o := \pi \cdot \frac{D_2^2 - D_1^2}{4} = 6.988 \times 10^6 \text{ мм}^2 \quad (3.149)$$

Момент сопротивления изгибу опорного кольца[10,стр.15]

$$W_0 := \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{D_2^4 - D_1^4}{D_2} \right) = 5.255 \times 10^9 \text{ мм}^3 \quad (3.150)$$

Максимальное напряжение на опорной поверхности кольца

$$\sigma_{\max} := \frac{F_{os}}{F_o} + \frac{M_v}{W_0 \cdot 1000} = 0.332 \text{ МПа} \quad (3.151)$$

Толщина опорного кольца определяется[10,стр.16]:

$\phi_0 := 1$ коэффициент, учитывающий увеличение жесткости конструкции при наличии ребер. Для колец без ребер $\phi_0 = 0.5-1$.

$$b := \frac{D_2 - D_H}{2} = 435.24 \text{ мм} \text{ выступающая часть кольца} \quad (3.152)$$

$$\delta_K := \max \left(b \cdot \phi_0 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sigma_{\max}}{\sigma_{d0}}}, s_0 + 6 \right) = 36.71 \text{ мм} \quad (3.153)$$

3.1.7.2 Расчет анкерных болтов

Расчет анкерных болтов (диаметр болтовой окружности $D_{б.о.к} := 3480$) необходимо проводить для условий монтажа.

$$Usl_d := \begin{cases} \text{"Расчет необходимо проводить"} & \text{if } M_v > 0.44 \cdot G_A \cdot M \cdot D_{б.о.к} \\ \text{"Количество принимать конструктивно"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$399 > 0.44 \cdot 6.769 \times 10^5 \cdot 3480$$

$$Usl_d = \text{"Количество принимать конструктивно"}$$

Принимаем анкерные болты диаметром $d=36$ мм, в количестве $n=24$.

3.1.8 Проверка корпуса колонны

Стенки корпуса колонны проверяются на прочность и устойчивость. Проверку прочности проводим для рабочего условия и условия монтажа. Проверку на устойчивость проводим для рабочего условия и условий испытаний.

3.1.8.1 Проверка корпуса колонны на прочность при рабочих условиях

Продольные напряжения на наветренной стороне ($M := M_v$):

$$\sigma_{x1} := \frac{P \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{G_A}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c) 1000} = -1.953 \text{ МПа} \quad (3.154)$$

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} := \frac{P \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{G_A}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c) 1000} = -1.953 \text{ МПа} \quad (3.155)$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y := \frac{P \cdot (D + s)}{2(s - c)} = 0.797 \text{ МПа} \quad (3.156)$$

Эквивалентные напряжения:

- на наветренной стороне

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.953 \text{ МПа} \quad (3.157)$$

- на подветренной стороне

$$\sigma_{E2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 1.953 \text{ МПа} \quad (3.158)$$

Условие прочности:
-на наветренной стороне

$\sigma_{d0} := 120$ допускаемое напряжение для материала обечайки 12X18H10T
находим по таблице А3 , МПа [4,с. 11]
 $\phi := 0.95$

$Usl_e := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(|\sigma_{x1}|, \sigma_{E1}) \leq \sigma_{d0} \cdot \phi \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$Usl_e = \text{"условие прочности выполняется"}$

- на подветренной стороне

$Usl_f := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(|\sigma_{x2}|, \sigma_{E2}) \leq \sigma_{d0} \cdot \phi \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$Usl_f = \text{"условие прочности выполняется"}$

3.1.8.2 Проверка корпуса колонны на прочность при условии монтажа

Продольные напряжения на наветренной стороне($P_m := 0$):

$$\sigma_{x1} := \frac{P_m \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{G_{A.M}}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c) 1000} = -2.265 \text{ МПа} \quad (3.159)$$

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} := \frac{P_m \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{G_{A.M}}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c) 1000} = -2.265 \text{ МПа} \quad (3.160)$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y := \frac{P_m \cdot (D + s)}{2(s - c)} = 0 \text{ МПа} \quad (3.161)$$

Эквивалентные напряжения:

- на наветренной стороне

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 2.265 \text{ МПа} \quad (3.162)$$

- на подветренной стороне

$$\sigma_{E2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = 2.265 \text{ МПа} \quad (3.163)$$

Условие прочности:

-на наветренной стороне

$\sigma_{d0} := 120$ допускаемое напряжение для материала обечайки 12X18H10T
находим по таблице 1.2, МПа [4,стр. 11]
 $\phi := 0.95$

$Usl_g := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(|\sigma_{x1}|, \sigma_{E1}) \leq \sigma_{d0} \cdot \phi \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$Usl_g = \text{"условие прочности выполняется"}$

- на подветренной стороне

$Usl_h := \begin{cases} \text{"условие прочности выполняется"} & \text{if } \max(|\sigma_{x2}|, \sigma_{E2}) \leq \sigma_{d0} \cdot \phi \\ \text{"условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$Usl_h = \text{"условие прочности выполняется"}$

3.1.8.3 Проверка на устойчивость колонны

Проверка устойчивости при условиях испытаний [9,стр. 5]:

Для рабочих условий ($n_y = 2,4$) допускаемое сжимающее усилие вычисляем по формуле (20)[5,стр.9]

$\phi1 := 0.9$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия местной устойчивости при осевом сжатии, определяем по рисунку 5[5,стр. 10] ;

$\phi2 := 1$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия общей устойчивости при осевом сжатии, определяем по рисунку 6[5,стр. 10] ;

$\phi3 := 0.9$ коэффициент снижения допускаемых напряжений при расчете на устойчивость из условия местной устойчивости при изгибе, определяем по рисунку 7[5,стр. 11].

$$F_{dk} := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_{d0} \cdot \min(\phi1, \phi2) = 2.956 \times 10^7 \text{ Н} \quad (3.164)$$

Для рабочих условий ($n_y = 2,4$) допускаемый изгибающий момент вычисляем по формуле(24)[5,стр. 9]

$$M_{dk} := \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_{d0} \cdot \phi3 = 2.365 \times 10^{10} \text{ Н*мм}$$

$Usl_j := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_s}{F_{dk}} + \frac{M_v}{M_{dk} \cdot 100} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$$\frac{3.217 \times 10^6}{2.956 \times 10^7} + \frac{399}{2.365 \cdot 10^{10}} \leq 1$$

Usl_j = "условие выполняется"

Проверка устойчивости при рабочих условиях

$$Usl_k := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{P_{atm}}{Pd_N} + \frac{F_s}{F_{dk}} + \frac{M_v}{M_{dk} \cdot 1000} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{0.1}{0.146} + \frac{3.217 \times 10^6}{2.956 \times 10^7} + \frac{399}{2.365 \cdot 10^{10}} \leq 1$$

Usl_k = "условие выполняется"

3.1.8.4 Расчет и проверка опасных сечений колонны

К опасным сечениям относятся сечения с присоединением площадок, люками-лазами, патрубками.

Проверка устойчивости обечайки в зоне люка-лаза (сечение 1-1)[10,стр. 5]:

Площадь наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки

$r := 1600$ внутренний радиус наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки, мм

$R := 1630$ наружный радиус наиболее ослабленного сечения в опорной обечайки, мм

$$A := \pi \cdot (R^2 - r^2) - 1000 = 3.034 \times 10^5 \text{ мм}^2 \quad (3.165)$$

$$\phi_1 := \frac{A}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} = 1.118 \quad (3.166)$$

Наименьший момент сопротивления

$$W := \pi \cdot r^2 \cdot s = 2.413 \times 10^8 \text{ мм}^3 \quad (3.167)$$

$$\phi_2 := \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = 1.111 \quad (3.168)$$

$Y_0 := 1630$ координата центра тяжести наиболее ослабленного сечения опорной обечайки, мм

$$\phi_3 := \frac{Y_0}{D} = 0.509 \quad (3.169)$$

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{M_{v0}}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{9.015 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

$Usl_1 = \text{"условие выполняется"}$

Аналогично для остальных люков-лазов

(Для сечения 2-2)

$$Usl_11 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{|M_{v1}|}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{5.24 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

$Usl_11 = \text{"условие выполняется"}$

(Для сечения 3-3)

$$Usl_12 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{M_{v2}}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{11.86 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

$Usl_12 = \text{"условие выполняется"}$

(Для сечения 4-4)

$$Usl_13 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{M_{v3}}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{16.93 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

Usl_13 = "условие выполняется"

(Для сечения 5-5)

$$Usl_14 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{M_{v4}}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{20.73 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

Usl_14 = "условие выполняется"

(Для сечения 6-6)

$$Usl_15 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{M_{v5}}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{23.56 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

Usl_15 = "условие выполняется"

(Для сечения 7-7)

$$Usl_16 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{F_{os}}{\phi_1 \cdot F_d} + \frac{\frac{|M_{v6}|}{1000} + F_{os} \cdot \phi_3 \cdot D}{\phi_2 \cdot M_{dk}} \leq 1 \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{2.579 \times 10^6}{1.302 \times 10^7} + \frac{3.328 + 2.579 \times 10^6 \cdot 0.509 \cdot 3200}{1.111 \cdot (2.365 \times 10^{10})} \leq 1$$

Usl_16 = "условие выполняется"

3.1.9 Расчет опорных решеток

Нагрузка на опорную решетку:

$$Q_r := G_{n1s} = 3050 \text{ Н} \quad (3.170)$$

Распределенная нагрузка на опорную решетку:

$$P_{or} := \frac{4 \cdot Q_r}{\pi \cdot D_B^2} = 379.236 \text{ Па} \quad (3.171)$$

$$R_{or} := \frac{D_B}{2} = 1.6 \text{ м} \quad (3.172)$$

Цилиндрическая жесткость N :

$E := 2.02 \cdot 10^{11}$ модуль продольной упругости материала опорной решетки, Па

$s_{or} := 0.05$ толщина опорной решетки, м

$$\mu := \frac{1}{3}$$

$$N_{or} := \frac{E \cdot s_{or}^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 2.367 \times 10^6 \text{ Н·м} \quad (3.173)$$

$$\omega_{or} := 4.08 \cdot \frac{P_{or} \cdot R_{or}^4}{64 \cdot N_{or}} = 6.693 \times 10^{-5} \text{ ;} \quad (3.174)$$

$$Usl_t := \begin{cases} \text{"прогиб решеток НЕ превышает допустимый"} & \text{if } \omega_{or} \leq \frac{D}{2000} \\ \text{"прогиб решеток превышает допустимый"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_t = \text{"прогиб решеток НЕ превышает допустимый"}$

Прогиб решеток не превышает допустимый, следовательно выбираем толщину опорной решетки 50 мм.

3.1.10 Расчет фланцев

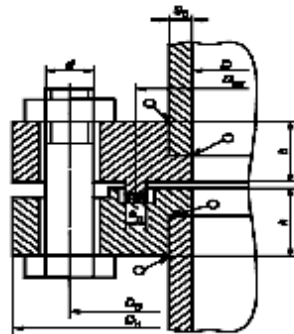


Рис 3.6. Плоский фланец

Расчет фланца Ж

Материал фланца - сталь 12X18H10T, материал болтов - сталь 35X

Т.к производство пожаро-взрывоопасное, выбираем фланцевое соединение типа "шип-паз" с плоским фланцем, для обеспечения герметичности фланцевого соединения [8, с. 551]

- Конструктивные размеры фланца.

толщину втулки принимаем равной исполнительной толщине штуцера

$$s_{фл} := 2.5 \quad \text{мм}$$

выбираем болты М12, количество $n := 4$ штук

Внутренний диаметр фланца

$$D_{фл.в} := 40 \quad \text{мм}$$

Диаметр болтовой окружности

$$D_б := 100 \quad \text{мм}$$

Наружный диаметр фланца

$$D_{фл.н} := 130 \quad \text{мм}$$

Условия применимости формул [7, стр. 9]:

$$Usl_38 := \begin{cases} Usl_38 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{D_{фл.н}}{D_{фл.в}} \leq 5 \\ Usl_38 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_38 = "условие выполняется"

Высота фланца

$h := 10 \text{ мм}$ $h1 := h$ $h2 := h$

$$Usl_39 := \begin{cases} Usl_39 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{2 \cdot h}{D_{\text{фл.н}} - D_{\text{фл.в}}} \geq 0.25 \\ Usl_39 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_39 = "условие НЕ выполняется"

Наружный диаметр прокладки по формуле [7,стр.11]

$e := 30$ нормативный параметр см. таблицу И1 [7,стр.30]

$D_{\text{н.п.}} := D_6 - e = 70 \text{ мм}$ (3.175)

Средний диаметр прокладки

$b_{\text{п}} := 12$ ширина плоской неметаллической прокладки опр. по таблице И1 [7,стр. 30], мм

$D_{\text{с.п.}} := D_{\text{н.п.}} - b_{\text{п}} = 58 \text{ мм}$ (3.176)

выбираем материал прокладки - фторопласт 4 по таблице 7.2 [8, с. 239]

- Нагрузки действующие на фланец

Равнодействующая внутреннего давления [7,стр.11]

$$Q_d := P_p \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{с.п.}}^2}{4} = 228.98 \text{ Н}$$
 (3.177)

Реакция прокладки[7,стр.11]

b_0 эффективная ширина прокладки

$b_0 := b_{\text{п}} = 12 \text{ мм}$ (3.178)

$m := 2.5$ прокладочный коэффициент см. таблицу И1 [7,стр.30]

$R_{\text{п}} := \pi \cdot D_{\text{с.п.}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P_p = 473.77 \text{ Н}$ (3.179)

Усилие Q_t возникающее от температурных деформаций[7,стр. 11]

$\alpha_{\text{ф1}} := 17 \cdot 10^{-6}$ коэффициент линейного расширения материала фланцев, опр. по таблице Ж2, 1°C [7,стр. 29]

$\alpha_{\text{ф2}} := \alpha_{\text{ф1}}$

$\alpha_6 := 12.1 \cdot 10^{-6}$ коэффициент линейного расширения материала болтов, опр. по таблице Ж2, 1°C [7,стр.29]
 $t := 80 \text{ }^\circ\text{C}$

расчетная температура неизолированных фланцев по таблице В1 [7,стр.21]

$$t_{\phi 1} := 0.96 \cdot t = 76.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_{\phi 2} := t_{\phi 1} \quad (3.180)$$

расчетная температура болтов по таблице В1 [7,стр.21]

$$t_b := 0.95 \cdot t = 76 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.181)$$

$E_b := 2.15 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости для болтов из стали 35Х,
МПа

$f_b := 113.04$ Расчетная площадь поперечного сечения болта, мм² [7,стр.25]

Для болтов диаметром равным $d_b := 12$ мм принимаем диаметр

отверстия под болты равным $d := 14$ мм по таблице 21.2[8,с. 539]

Жесткость фланцевого соединения γ [7,стр. 27]

Плечи действия усилий в болтах (шпильках):

$$b := 0.5 \cdot (D_b - D_{с.п.}) = 21 \text{ мм} \quad (3.182)$$

$E_{b20} := 2.18 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости для болтов из стали 35Х
при 20 °С, МПа

$E_1 := 2.02 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости материала фланца, МПа

$$E_2 := E_1$$

$E_{120} := 2.05 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости материала фланца при 20
°С, МПа

$$E_{220} := E_{120}$$

Податливость прокладки y_{Π} вычисляют по формуле

$h_{\Pi} := 2$ высота стандартной прокладки, мм

$K_{обж} := 1$ Коэффициент обжатия прокладки, опр. по таблице И1[7,стр 30]

$E_{\Pi} := 0.02 \cdot 10^5$ условный модуль сжатия прокладки, МПа[7,стр. 30];

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{с.п.} \cdot b_{\Pi}} = 4.573 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (3.183)$$

Податливость болтов y_b вычисляют по формуле

Эффективная длина болта L_b при определении податливости, мм;

$L_{b0} := 22$ расстояние между опорными поверхностями гайки и головки
болта или опорными поверхностями
гаек, мм;

$$L_b := L_{b0} + 0.28 \cdot d = 25.92 \text{ мм} \quad (3.184)$$

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{620} \cdot f_6 \cdot n} = 2.63 \times 10^{-7} \text{ мм/Н} \quad (3.185)$$

Угловую податливость фланца y_Φ при затяжке вычисляют по формуле

$\beta_V := 0.6$ расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров втулки фланца, определяют по рисунку К.2[7, стр. 34];

параметр длины втулки l_0

$$l_0 := \sqrt{D_{\text{фл.в}} \cdot s_0} = 10 \text{ мм} \quad (3.186)$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру вычисляют по формуле

$$K := \frac{D_{\text{фл.н}}}{D_{\text{фл.в}}} = 3.25 \quad (3.187)$$

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.148 \quad (3.188)$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 1.907 \quad (3.189)$$

$\beta_F := 0.9$ расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров втулки фланца, определяют по рисунку К.2[7, стр. 34];

Коэффициент λ вычисляют по формуле

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = 6.69 \quad (3.190)$$

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{120} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 6.37 \times 10^{-9} \text{ мм/Н} \quad (3.191)$$

$$\gamma := \frac{1}{y_{\Pi} + y_6 \cdot \frac{E_{620}}{E_6} + \left(y_\Phi \cdot \frac{E_{120}}{E_1} + y_\Phi \cdot \frac{E_{220}}{E_2} \right) \cdot b^2} = 1.556 \times 10^5 \text{ Н/мм} \quad (3.192)$$

$$Q_t := \gamma \cdot [\alpha_{\Phi 1} \cdot h_1 \cdot (t_{\Phi 1} - 20) + \alpha_{\Phi 2} \cdot h_2 \cdot (t_{\Phi 2} - 20) - \alpha_6 \cdot (h_1 + h_2) \cdot (t_6 - 20)]$$

$$Q_t = 896.374 \text{ Н} \quad (3.193)$$

Расчетную нагрузку $P_{мб}$ на болты фланцевых соединений вычисляют по формулам:

- при затяжке фланцевого соединения [7, стр. 12]:

расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$F := 0$ внешняя осевая сила

Принимаем внешний изгибающий момент равным $M := 0$.

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев принимается равным [7, стр. 26]:

$$e_{\phi} := 0.5 \cdot (D_{с.п.} - D_{\phi л.в} - s_0) = 7.75 \text{ мм} \quad (3.194)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой α , вычисляют по формуле (Е.11) [7, стр. 27]

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - (y_{\phi} \cdot e_{\phi} + y_{\phi} \cdot e_{\phi}) \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\phi} + (y_{\phi} + y_{\phi}) \cdot b^2} = 1.255 \quad (3.195)$$

Угловую податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом, вычисляют по формуле (К.15) [7, стр. 33]:

$$y_{\phi.н} := \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{D_{\phi л.н} \cdot E_{120} \cdot h^3} = 1.818 \times 10^{-9} \quad (3.196)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом α_m , вычисляют по формуле (Е.13) [7, стр. 27]

$$\alpha_m := \frac{y_{\phi} + 2 \cdot y_{\phi.н} \cdot b \cdot \left(b + e_{\phi} - \frac{e_{\phi}^2}{D_{с.п.}} \right)}{y_{\phi} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\phi}}{D_{с.п.}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi.н} \cdot b^2} = 0.737 \quad (3.197)$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{б1} := \max \left[\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_m \cdot |M|}{D_{с.п.}}, \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_m \cdot |M|}{D_{с.п.}} - Q_t \right]$$

$$P_{б1} = 761.143 \quad \text{Н} \quad (3.198)$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке, вычисляют по формуле (8) [7,стр. 11],

$q_{обж} := 10$ удельное давление обжатия прокладки определяем по таблице 1.44[7,стр.30] , МПа:

$$P_{обж} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{с.п.} \cdot b_{п.} \cdot q_{обж} = 1.093 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.199)$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм²;

с учетом 4 болтов - получается

$$A_б := n \cdot f_б = 452.16 \text{ мм}^2 \quad (3.200)$$

$\sigma_{д60} := 230$ допускаемое напряжение для болтов из стали 35Х при 20 °С, опр. по таблице 1.38[4,с. 11] , МПа

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{б2} := \max(P_{обж}, 0.4 \cdot A_б \cdot \sigma_{д60}) = 4.16 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.201)$$

$$P_{мб} := \max(P_{б1}, P_{б2}) = 4.16 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.202)$$

- в рабочих условиях [11,с. 12]:

$$P_{рб} := P_{мб} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m) \cdot |M|}{D_{с.п.}} = 4.244 \times 10^4 \quad (3.203)$$

Проверка прочности болтов и прокладки:

Расчетные напряжения в болтах[7,стр. 12]:

- при затяжке:

$$\sigma_{б1} := \frac{P_{мб}}{A_б} = 92 \text{ МПа} \quad (3.204)$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{б2} := \frac{P_{рб}}{A_б} = 93.853 \text{ МПа} \quad (3.205)$$

Условия прочности болтов[7,стр.12]:

Номинальное допускаемое напряжение для болтов

$\sigma_{др} := 230$ допускаемое напряжение для болтов из стали 35Х при рабочей температуре, опр. по таблице А2 [4,стр.11] , МПа

- при затяжке:

$$Us1_40 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{б1} \leq \sigma_{д60} \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_40 = "условие выполняется"

- в рабочих условиях:

Usl_41 := $\begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{62} \leq \sigma_{dp} \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl_41 = "условие выполняется"

Условие прочности прокладки

$$q := \frac{\max(P_{мб}, P_{рб})}{\pi \cdot D_{с.п.} \cdot b_{п}} = 19.408 \quad \text{МПа} \quad (3.206)$$

$q_d := 40$ удельное давление обжатия прокладки определяем по таблице 1.44[7,стр.30] , МПа:

Usl_42 := $\begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } q \leq q_d \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl_42 = "условие выполняется"

Расчет фланцев на статическую прочность[7,стр.13]

Расчетный изгибающий момент M_M , действующий на фланец при затяжке

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами

$$C_F := \max \left(1, \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m \cdot 0.5}}} \right) = 1.017 \quad (3.207)$$

$$M_M := C_F \cdot P_{мб} \cdot b = 8.88 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (3.208)$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p := C_F \cdot \max \left[P_{рб} \cdot b + (Q_d + F) \cdot e_{\phi}, |Q_d + F| \cdot e_{\phi} \right] = 9.077 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (3.209)$$

$$\beta_Y := \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0.69 + 4.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{K^2 - 1} \right) = 2.259 \quad (3.210)$$

Usl_43 := $\begin{cases} \text{"1"} & \text{if } s_0 \leq 16 \wedge \frac{D_{\text{фл.в}}}{s_0} \leq 300 \wedge \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D_{\text{фл.в}}} \leq \sigma_{d60} \wedge \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D_{\text{фл.в}}} \leq \sigma_{dp} \\ \text{"2"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl_43 = "1"

- 1 - проверку допускается не проводить
2 - проверку необходимо проводить

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца [7,стр. 16]:

$$\Theta := M_p \cdot y_{\Phi} \cdot \frac{E_{120}}{E_1} = 0.006 \quad \text{рад} \quad (3.211)$$

Допустимый угол поворота фланца равен $\Theta_d := 0.006$ рад [7,стр.16]

Usl_44 := $\begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \Theta \leq \Theta_d \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Usl_44 = "условие выполняется"

Аналогично проведем расчеты для фланцев А,Б,В,Г,Д,Е.Сведем результаты в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

	А	Б	В	Г	Д	Е
h-высота фланца, мм	22	17	24	15	11	22
b _п -ширина прокладки, мм	12	12	12	12	12	12
d _б -диаметр болтов, мм	20	20	20	16	16	20
n-количество болтов (шпилек)	16	8	12	8	4	16
σ _{б1} -расчетное напряжение в болтах, МПа/допускаемое	96,975/230	110/230	141/230	107/230	92/230	96,975/230
σ _{б2} -расчетное напряжение в болтах, МПа/допускаемое	128,2/160	109/160	169/220	118/225	95/225	128,2/160
q _{сб} -удельное давления обжатия прокладки, МПа/допускаемое	39,66/60	30/60	37/60	21/38	16/40	39,66/60
Θ-угол поворота фланца/допустимый угол поворота	0,004/0,006	0,005/0,006	0,004/0,006	0,003/0,006	0,005/0,006	0,004/0,006

Продолжение таблицы 3.2.

Ø-угол поворота фланца/допускае мый угол поворота	0,004/0,00 6	0,005/0,00 6	0,004/0,00 6	0,003/0,00 6	0,005/0,0 06	0,004/0,00 6
D_{фл.к} -диаметр фланца внутренний, мм	350	150	300	200	100	350
D_б -диаметр болтовой окружности, мм	445	225	395	280	170	445
D_{фл.н} -диаметр фланца наружный, мм	485	260	435	315	205	485
Материал прокладки	Алюмини й А 95	Алюмини й А 95	Алюмини й А 95	Асбестоа люминий	Фторопл аст-4	Алюмини й А 95

Все выбранные фланцы рассчитаны на герметичность и прочность.

3.2 Проверочный расчет теплообменника

Обозначения:

A — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

A_B — суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм²;

$A_{\text{ком}}$ — коэффициент формы компенсатора;

A_{p1}, A_{p2} — вспомогательные коэффициенты, используемые при расчете теплообменных аппаратов с расширителем на кожухе;

A_y — коэффициент для определения максимального прогиба трубы, мм;

a — внутренний радиус кожуха, мм;

a_n — расстояние от оси пучка до оси наиболее удаленной трубы, мм;

a_1 — расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, мм;

B — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

B_n — ширина канавки под прокладку в многоходовом аппарате, мм;

$B_{\text{пер}}$ — ширина перегородки в трубном пространстве, мм;

B_{p1}, B_{p2} — вспомогательные коэффициенты, используемые при расчете теплообменных аппаратов с расширителем на кожухе;

B_0 — внутренний размер камеры аппарата воздушного охлаждения в поперечном направлении, мм;

B_1 — ширина зоны решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, в пределах которой толщина решетки равна s_1 , мм;

B_2 — наружный размер прокладки в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

B_3 — расстояние между осями болтов (шпилек) в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

B_4 — наружный размер в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

B_p — расчетный поперечный размер решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

B_T — расчетная ширина перфорированной зоны решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

b_i — ширина промежуточных пролетов камер (см. рисунки 23, 24), мм;

b_{Π} — ширина плоской прокладки, мм;

b_0 — эффективная ширина прокладки, мм;

b_1 — ширина тарелки фланца кожуха, мм;

b_2 — ширина тарелки фланца камеры, мм;

C_f — параметр компенсатора;

c — расчетная прибавка к толщине трубной решетки, крышке плавающей головки, элементам аппаратов воздушного охлаждения, мм. При назначении величины «с» для трубной решетки и крышки плавающей головки следует учитывать коррозию как со стороны трубного, так и межтрубного пространства;

c_k — расчетная прибавка к толщине стенки кожуха, мм;

c_{Π} — расчетная прибавка к толщине перегородки теплообменного аппарата или аппарата воздушного охлаждения, мм. При назначении величины «сп» следует учитывать, что перегородка подвергается двусторонней коррозии;

c_p — глубина канавки под прокладку под пробку в задней стенке неразъемной камеры, мм;

D — внутренний диаметр кожуха или плавающей головки, мм;

D_B — наименьший диаметр утоненной части решетки, мм;

D_E — диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь, мм;

$D_{\text{ком}}$ — наружный диаметр компенсатора, мм;

D_H — наружный диаметр фланца, мм;

D_p — диаметр сечения полукольца плавающей головки, имеющего наименьшую толщину, мм;

$D_{с.п}$ — средний диаметр прокладки, мм;

D_1 — внутренний диаметр расширителя, мм;

d_E — эффективный диаметр отверстия в трубной решетке или задней стенке, мм;

$k_{ом}$ — внутренний диаметр компенсатора, мм;

$d_{пi}$ — размер отверстий i -й перегородке, мм;

$d_{пр}$ — диаметр резьбы пробок в задних стенках камер аппаратов воздушного охлаждения, мм;

d_T — наружный диаметр трубы, мм;

d_o — диаметр отверстия в решетке, мм;

E — модуль продольной упругости материала крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, МПа;

E_p — модуль продольной упругости материала решетки, МПа;

E_{p1} — модуль продольной упругости материала 1-й решетки, если модули упругости двух трубных решеток отличаются друг от друга, МПа;

E_{p2} — модуль продольной упругости материала 2-й решетки, если модули упругости двух трубных решеток отличаются друг от друга, МПа;

E_D — модуль продольной упругости материала камеры, МПа;

E_K — модуль продольной упругости материала кожуха, МПа;

$E_{ком}$ — модуль продольной упругости материала компенсатора, МПа;

$E_{п}$ — модуль продольной упругости материала прокладки, МПа;

E_T — модуль продольной упругости материала труб, МПа;

E_1 — модуль продольной упругости материала фланца кожуха, МПа;

E_2 — модуль продольной упругости материала фланца камеры, МПа;

F — суммарная осевая сила, действующая на кожух, Н;

$F_{п}$ — усилие на прокладке плавающей головки, Н;

F_B — усилие в болтах (шпильках) камеры аппарата воздушного охлаждения в условиях эксплуатации, Н;

F_0 — усилие в болтах (шпильках) камеры аппарата воздушного охлаждения в условиях испытания или

монтажа, Н;

F_1 — усилие от болтовой нагрузки на единицу длины решетки или крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, Н/мм;

f_n — коэффициент, зависящий от соотношения сторон перегородки по трубному пространству;

f_0 — коэффициент, зависящий от соотношения сторон перфорированной зоны решетки аппарата воздушного охлаждения;

f_1 — коэффициент, зависящий от соотношения сторон крышки аппарата воздушного охлаждения;

f_2 — коэффициент, зависящий от соотношения сторон крышки аппарата воздушного охлаждения;

f_3 — коэффициент, зависящий от соотношения сторон задней стенки камеры аппарата воздушного охлаждения;

f_4 — коэффициент, зависящий от соотношения сторон боковой стенки камеры аппарата воздушного охлаждения;

H — глубина крышки камеры аппарата воздушного охлаждения (см. рисунки 15—18), мм;

h — выступающая часть отбортовки эллиптического днища плавающей головки, мм;

h_n — толщина прокладки, мм;

h_1 — толщина тарелки фланца кожуха, мм;

h_2 — толщина тарелки фланца камеры, мм; i — число труб;

$K_{\text{ком}}$ — жесткость компенсатора, Н/мм;

K_q — коэффициент изменения жесткости системы трубы — кожух при действии осевой силы;

T — отношение осевого перемещения компенсатора или расширителя при действии растягивающей силы к осевому перемещению краев корпуса

межтрубного пространства без компенсатора и расширителя от действия той же силы;

K_p — коэффициент изменения жесткости системы трубы — кожух при действии давления;

S — отношение осевого перемещения компенсатора или расширителя при действии давления к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора и расширителя от действия того же давления;

$K_{рас}$ — жесткость расширителя, Н/мм;

K_y — модуль упругости основания (системы труб), Н/мм³;

K_{σ} — эффективный коэффициент концентрации напряжения;

K_{ϕ} — коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе, Н мм;

$K_{\phi 1}$ — коэффициент жесткости фланца кожуха при изгибе, Н мм;

$K_{\phi 2}$ — коэффициент жесткости фланца камеры при изгибе, Н мм;

K_1 — коэффициент жесткости втулки фланца кожуха при изгибе, Н мм;

K_2 — коэффициент жесткости втулки фланца камеры при изгибе, Н мм;

K_T — коэффициент условий работы при расчете труб на устойчивость;

$L_{рас}$ — длина расширителя, мм;

L_p — расчетный размер решетки аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;

$L_{пер}$ — длина перегородки в трубном пространстве, мм;

L_0 — внутренний размер камеры аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;

L_2 — наружный размер прокладки в продольном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

l — половина длины трубы теплообменного аппарата или аппарата воздушного охлаждения, мм;

$l_{пр}$ — приведенная длина трубы, используемая при расчете прогиба труб и изгибающего момента, действующего на трубу, мм;

l_b — глубина развальцовки труб, мм;

l_{π} — расстояние от решетки до перегородки, мм;
 $l_{\pi i}$ — расстояние между отверстиями i -й перегородке, мм;
 l_R — расчетная длина труб при продольном изгибе, мм;
 l_1 — плечо изгибающего момента, действующего на решетку аппарата воздушного охлаждения, мм;
 l_2 — плечо изгибающего момента, действующего на фланец крышки аппарата воздушного охлаждения, мм;
 l_{1R} — максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой, мм; l_{2R} — максимальный пролет трубы между перегородками, мм;
 $M_{\max}$ — максимальный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки, Н мм/мм;
 M — расчетный изгибающий момент, действующий на крышку плавающей головки, Н мм;
 M_a — изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной части трубной решетки, Н мм/мм;
 M_k — изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха, Н мм/мм;
 M_{π} — изгибающий момент, распределенный по периметру трубной решетки, Н мм/мм;
 M_T — изгибающий момент, действующий на трубу, Н мм;
 $[M]$ — допускаемый изгибающий момент для фланца крышки плавающей головки, Н мм;
 $[M]_{кр}$ — допускаемый изгибающий момент для днища крышки плавающей головки, Н мм;
 m — прокладочный коэффициент;
 m_A — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;
 m_{cp} — коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб;

m_{Π} — относительная характеристика беструбного края трубной решетки;

m_1 — коэффициент влияния давления на изгиб1-го фланца, мм²;

m_2 — коэффициент влияния давления на изгиб2-го фланца, мм²;

J_T — момент инерции поперечного сечения трубы, мм⁴;

N — количество циклов нагружения за расчетный срок службы (если количество циклов не оговорено, рекомендуется принимать $N = 2000$);

N_T — осевая сила, действующая на трубу, Н;

$[N]_{\text{пр}}$ — допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой способом развальцовки, Н;

$n_{\text{ком}}$ — число линз (волн) компенсатора;

n_B — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

p — расчетное давление в камере аппарата воздушного охлаждения, МПа;

$p_{\text{пр}}$ — пробное давление при испытании в камере аппарата воздушного охлаждения, МПа;

p_m — расчетное давление в межтрубном пространстве, МПа;

p_T — расчетное давление в трубном пространстве, МПа;

p_p — расчетное давление, действующее на решетку кожухотрубчатого теплообменного аппарата, МПа. Принимается равным максимально возможному перепаду давлений, действующих на решетку;

p_0 — приведенное давление на решетку, МПа;

p_1 — приведенное давление на фланцы, МПа;

$[p_1]$ — допускаемое избыточное давление из условий прочности краевой зоны сферического неотбортованного днища, МПа.

P_6 — усилие в шпильках плавающей головки, Н;

Z — усилие в шпильках плавающей головки в условиях монтажа, Н;

$Z^!$ — усилие в шпильках плавающей головки в рабочих условиях, Н;

Q_a — перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки, Н/мм;

Q_d — равнодействующая давления, действующего на крышку плавающей головки, Н;

Q_k — усилие, распределенное по периметру кожуха, Н/мм;

Q_p — перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки, Н/мм;

$[q]$ — допускаемая нагрузка на единицу площади сечения трубного пучка из условия прочности труб, МПа;

$[q]_s$ — допускаемая нагрузка на единицу площади сечения трубного пучка из условия прочности крепления трубы в решетке, МПа;

R — радиус гиба в углу крышки камеры аппарата воздушного охлаждения;

R_1 — радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха, мм;

R_2 — радиус центра тяжести тарелки фланца камеры, мм;

$r_{ком}$ — радиус гиба при вершине волны компенсатора, мм;

s_k — толщина стенки кожуха, мм;

s_n — толщина трубной решетки в сечении канавки, мм;

$s_э$ — эквивалентная толщина втулки фланца, мм;

s_p — толщина трубной решетки, мм;

s_{1p} — толщина 1-й решетки, если две трубные решетки отличаются друг от друга, мм;

s_{2p} — толщина 2-й решетки, если две трубные решетки отличаются друг от друга, мм;

s_{pr} — толщина трубной решетки в месте уплотнения под кольцевую прокладку, мм;

V_s^s — расчетная толщина трубной решетки, мм;

s_t — толщина стенки трубы, мм;

s_1 — толщина стенки кожуха в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм;

s_2 — толщина стенки камеры в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм;

s_{1p} — толщина решетки в зоне кольцевой канавки, мм;

$s_{пер}$ — толщина перегородки по трубному пространству, мм;

$s_{1пЛ}$ — толщина донышка плавающей головки, мм;

s_{1A} — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения в пределах зоны перфорации, мм;

s_{2A} — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения в месте уплотнения, мм;

s_{3A} — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения вне зоны уплотнения, мм;

s_{4A} — толщина донышка крышки для камер по рисункам 15—18, толщина задней стенки для камер по рисункам 19—23, мм;

s_{5A} — толщина стенки крышки в месте присоединения к фланцу — для камер. Толщина верхней и нижней стенок — для камер—23, мм.

s_{6A} — толщина фланца крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

s_{7A} — толщина боковой стенки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

s_{ni} — толщина i -й перегородки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

T — общая толщина полукольца, мм;

$T_{ш}$ — ширина шипа, мм;

T_1, T_2, T_3 — коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб;

t — безразмерный параметр;

t_1 — шаг расположения отверстий в решетке аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;

t_2 — шаг расположения отверстий в решетке аппарата воздушного охлаждения в поперечном направлении, мм;

t_n — расстояние между осями рядов отверстий, расположенных с двух сторон от паза, мм;

t_p — шаг расположения отверстий в решетке, мм;

t_k — средняя температура стенки кожуха, °C;

t_t — средняя температура стенок труб, °C;

t_0 — температура сборки аппарата, °C ($t_0 \approx 20$ °C) ;

W — максимальный прогиб трубной решетки, мм; $[W]$ — допустимый прогиб трубной решетки, мм;

Y — прогиб трубы, мм;

$X_{\text{ком}}, Y_{\text{ком}}$ — безразмерные параметры формы волны компенсатора;

$\backslash^s_+$ — угловая податливость крышки от действия внутреннего давления, 1/ Н мм²;

$\backslash^0$ — угловая податливость крышки от действия болтового изгибающего момента, 1/Н мм;

$\backslash^s_s$ — угловая податливость решетки от действия внутреннего давления, 1/Н мм²;

$\backslash^0_s$ — угловая податливость решетки от действия болтового изгибающего момента, 1/Н мм;

y_b — линейная податливость шпилек (болтов), мм/Н;

y_n — линейная податливость прокладки, мм/Н;

y_f — угловая податливость фланца (полукольца) плавающей головки, 1/Н мм;

z — число рядов труб в поперечном направлении;

α — коэффициент жесткости фланцевого соединения плавающей головки при нагружении внутренним давлением;

α_k — коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре t_k , 1/ °C;

α_t — коэффициент линейного расширения материала труб при температуре t_t , 1/ °C;

β — коэффициент системы решетка — трубы, 1/мм;

β_0 — угол наклона стенки расширителя (см. рис. 6) ...°;
 β_1 — коэффициент системы кожух — решетка, 1/мм;
 β_2 — коэффициент системы обечайка — фланец камеры, 1/мм;
 β_Y — расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров фланца крышки плавающей головки;
 $\beta_{\text{ком}}$ — отношение внутреннего диаметра компенсатора к наружному диаметру;
 β_p — отношение диаметра кожуха к диаметру расширителя;
 β_n — коэффициент формы днища крышки плавающей головки;
 γ — жесткость фланцевого соединения плавающей головки, Н/мм;
 δ — высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, мм;
 $\delta_{\text{ком}}$ — толщина стенки компенсатора, мм;
 δ_p — толщина стенки расширителя, мм;
 $\Delta_{\sigma 1}$ — размах первых главных напряжений, МПа;
 $\Delta_{\sigma 2}$ — размах вторых главных напряжений, МПа;
 $\Delta_{\sigma 3}$ — размах третьих главных напряжений, МПа;
 Δ_p — перепад давлений между ходами по трубному пространству, МПа;
 η — относительная характеристика площади решетки аппарата воздушного охлаждения;
 η_m, η_t — коэффициенты влияния давления на трубную решетку со стороны межтрубного и трубного пространства;
 η_p — коэффициент податливости фланцевого соединения крышки и решетки аппарата воздушного охлаждения;
 $\Lambda_{\text{кр}}$ — безразмерная характеристика нагружения крышки аппарата воздушного охлаждения болтовым изгибающим моментом;
 Λ_p — безразмерная характеристика нагружения решетки аппарата воздушного охлаждения болтовым изгибающим моментом;
 λ — параметр, используемый при расчете на продольный изгиб;

λ_p — относительная ширина беструбного края решетки аппарата воздушного охлаждения;

λ_y — параметр, используемый при расчете прогиба трубы;

ρ — приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха;

ρ_1 — приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения;

σ_{p1} — изгибные напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом, МПа;

σ_{p2} — изгибные напряжения в перфорированной части трубной решетки, МПа;

σ_{mx} — мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;

σ_{ux} — изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;

$\sigma_{m\phi}$ — мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;

$\sigma_{u\phi}$ — изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;

σ_1 — суммарные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;

σ_{1T} — мембранные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;

σ_{2T} — мембранные напряжения в трубах в окружном направлении, МПа;

$[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала камеры аппарата воздушного охлаждения, МПа;

$[\sigma_A]$ — допускаемая амплитуда упругих напряжений, МПа;

$[\sigma]_k$ — допускаемое напряжение для материала кожуха теплообменного аппарата или крышки аппарата

воздушного охлаждения, МПа;

$[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение для материала решетки теплообменного аппарата или аппарата воздушно-

го охлаждения, МПа;

$[\sigma]_n$ — допускаемое напряжение для материала перегородки, МПа;

$[\sigma]_T$ — допускаемое напряжение для материала труб, МПа;

$[\sigma]_t$ — допускаемое напряжение для фланца крышки плавающей головки, МПа;

$[\sigma]_1$ — допускаемое напряжение для днища крышки плавающей головки, МПа;

$>\sigma_{@ \%}$ — допускаемое напряжение для болтов (шпилек) при затяжке, МПа;

$>\sigma_{@ \% W}$ — допускаемое напряжение для болтов (шпилек) в рабочих условиях, МПа;

τ_1 — касательные напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом, МПа;

τ_2 — касательные напряжения в перфорированной части трубной решетки, МПа;

τ — напряжения среза в шве приварки трубы к решетке, МПа;

ν — относительная характеристика площади сечения трубы аппарата воздушного охлаждения;

Φ_1, Φ_2, Φ_3 — коэффициенты, учитывающие поддерживающее влияние труб;

ϕ — коэффициент прочности сварного шва;

$\phi_1 - \phi_6$ — коэффициенты формы крышек камер аппаратов воздушного охлаждения (см. рисунки 15—18);

ϕ_c — коэффициент прочности шва приварки трубы к решетке;

ϕ_p — коэффициент ослабления решеток кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками и компенсатором на кожухе;

ϕ_E — эффективный коэффициент ослабления решеток кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с плавающей головкой и U-образными трубами и решетки и задней стенки камер аппаратов воздушного охлаждения;

ϕ_T — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе;

$\chi_{кр}, \chi_c$ — коэффициент сопротивления фланцевой части крышки аппарата воздушного охлаждения;

$\Psi_{кр}$ — безразмерная характеристика нагружения крышки аппарата воздушного охлаждения давлением, действующим на ее фланцевую часть;

Ψ_p — безразмерная характеристика нагружения решетки аппарата воздушного охлаждения давлением, действующим на беструбную зону;

ψ — угол между касательной к сферическому сегменту в краевой зоне днища крышки плавающей головки

и вертикальной осью, град.;

ψ_0 — коэффициент жесткости перфорированной плиты;

Ω — коэффициент несущей способности трубного пучка аппарата воздушного охлаждения;

ω — безразмерный параметр системы решетка — трубы.[13]

Расчетные схемы

Кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой приведен на рис. 3.2.1. Для поверочного расчета выбран теплообменник ТП 800.

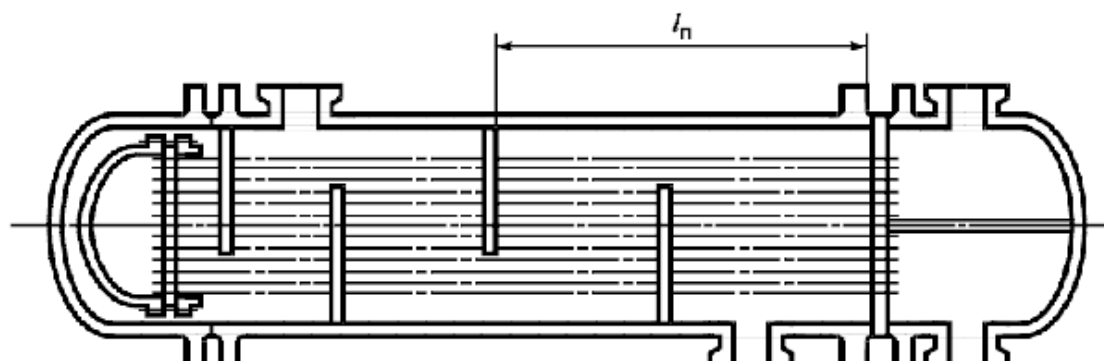


Рис.3.2.1. Теплообменник с плавающей головкой

3.2.1 Вспомогательные величины

Относительную характеристику беструбного края трубной решетки вычисляют по формуле

$a := 400$ внутренний радиус кожуха, мм

$D := 2 \cdot a$ внутренний диаметр кожуха, $D = 800$ мм

$a_1 := 202.5$ расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, мм

определяется по ГОСТ 15118-79

$$m_n := \frac{a}{a_1} \quad m_n = 1.975 \quad (3.2.1)$$

Коэффициенты влияния давления на трубную решетку вычисляют по формулам:

- со стороны межтрубного пространства:

$i := 618$ число труб

$d_T := 25$ наружный диаметр трубы, мм

$$\eta_M := 1 - \frac{i \cdot d_T^2}{4 \cdot a_1^2} \quad \eta_M = -1.355 \quad (3.2.2)$$

- со стороны трубного пространства:

$s_T := 2$ толщина стенки трубы, мм

$$\eta_T := 1 - \frac{i \cdot (d_T - 2 \cdot s_T)^2}{4a_1^2} \quad \eta_T = -0.662 \quad (3.2.3)$$

Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

Модуль упругости основания (системы труб) вычисляют по формуле

$$E_T := 1.9 \cdot 10^5 \text{ модуль продольной упругости материала труб, МПа}$$

$$l := 3000 \text{ половина длины трубы теплообменного аппарата, мм}$$

$$K_y := \frac{E_T \cdot (\eta_T - \eta_M)}{1} \quad K_y = 43.906 \quad \frac{H}{\text{мм}^3} \quad (3.2.4)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха вычисляют по формуле

$$E_K := 1.9 \cdot 10^5 \text{ модуль продольной упругости материала кожуха, МПа}$$

$$s_K := 14 \text{ толщина стенки кожуха, мм}$$

$$\rho := \frac{K_y \cdot a_1 \cdot l}{E_K \cdot s_K} \quad \rho = 10.028 \quad (3.2.5)$$

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы — кожух вычисляют по формулам:

$$K_{q1} := 0 \quad K_{p1} := 0$$

$$K_q := 1 + K_{q1} \quad K_q = 1 \quad (3.2.6)$$

$$K_p := 1 + K_{p1} \quad K_p = 1 \quad (3.2.7)$$

Для аппаратов с неподвижными трубными решетками $K_{p1}=K_{q1}=0$

Для аппаратов с компенсатором на кожухе, расширителем на кожухе и компенсатором на расширителе K_{p1} и K_{q1} определяют по приложению А.

Коэффициент системы решетка — трубы вычисляют по формуле:

$$s_p := 40 \text{ толщина трубной решетки, мм}$$

Т а б л и ц а Б.1 — Коэффициент жесткости перфорированной плиты ψ_0

η_T	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
ψ_0	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

$\psi_0 := 0.12$ Коэффициент прочности перфорированной трубы

$E_p := 1.9 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости материала трубной решетки, МПа

Материал труб и трубной решетки:

material := 2

Если материалы труб и трубной решетки различны необходимо ввести данные для них:

$E_{p1} := E_p$ $s_{p1} := s_p$ $E_{p2} := E_p$ $s_{p2} := s_p$

$$\beta := \begin{cases} \beta \leftarrow \frac{1.82}{s_p} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y \cdot s_p}{\psi_0 \cdot E_p}} & \text{if material} = 1 \\ \beta \leftarrow 1.53 \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y}{\psi_0} \cdot \left(\frac{1}{E_{p1} \cdot s_{p1}^3} + \frac{1}{E_{p2} \cdot s_{p2}^3} \right)} & \text{if material} = 2 \end{cases} \quad (3.2.8)$$

$\beta = 0.024$

Безразмерный параметр системы решетка — трубы вычисляют по формуле

$$\omega := \beta \cdot a_1 \quad \omega = 4.853 \quad (3.2.10)$$

Коэффициенты ослабления трубной решетки ϕ_p , ϕ_E , жесткости перфорированной плиты ψ_0 , а также коэффициенты системы кожух — решетка β_1 , обечайка — фланец камеры β_2 и коэффициенты жесткости фланцевого соединения при изгибе K_f приведены в приложениях Б—Е.

Приложение Б

Приложение Б (обязательное)

Коэффициенты влияния перфорации на параметры трубной решетки

Б.1 Коэффициент ослабления трубной решетки при расчете кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками и компенсатором на кожухе вычисляют по формуле

$d_0 := 25.5$ диаметр отверстия в решетке, мм

$t_{\text{шр}} := 1.2 \cdot d_T + 3$ $t_{\text{шр}} = 33$ шаг расположения отверстий в решетке, мм

$$\phi_p := 1 - \frac{d_0}{t_{\text{шр}}} \quad \phi_p = 0.227 \quad (\text{Б1})$$

Приложение В

Определение коэффициентов системы кожух — решетка, обечайка — фланец камеры и коэффициента жесткости фланцевого соединения при изгибе

Коэффициенты системы кожух — решетка, обечайка — фланец камеры и коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе вычисляют по формулам:

$s_1 := 14$ толщина кожуха в месте соединения с трубной решеткой или фланцем, мм

$s_2 := 14$ толщина стенки распределительной камеры в месте соединения с трубной решеткой или фланцем

$D_H := 975$ диаметр фланца, мм

$R_1 := \frac{D_H + D}{4}$ $R_1 = 443.75$ радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха

$E_D := 1.9 \cdot 10^5$ модуль упругости материала распределительной камеры, МПа

Так как диаметр распределительной камеры и кожуха равны, то $R_2 := R_1$
фланец для распределительной камеры выполнен из того же материала что и фланец для кожуха следовательно

$E_1 := 1.9 \cdot 10^5$ МПа $E_2 := E_1$

$h_1 := 27$ толщина тарелки фланца кожуха, мм

$h_2 := 27$ толщина тарелки фланца распределительной камеры, мм

$$\beta_1 := \frac{1.3}{\sqrt{a \cdot s_1}} \quad (B1)$$

$$\beta_2 := \frac{1.3}{\sqrt{a \cdot s_2}} \quad (B2)$$

$$K_1 := \frac{\beta_1 \cdot a \cdot E_K \cdot s_1^3}{5.5 \cdot R_1} \quad (B3)$$

$$K_2 := \frac{\beta_2 \cdot a \cdot E_D \cdot s_2^3}{5.5 \cdot R_2} \quad (B4)$$

Для аппаратов воздушного охлаждения необходимо задаться

$$B_1 := 800 \quad B_2 := 900$$

$$K_{\phi 1} := \frac{E_1 \cdot h_1^3 \cdot B_1}{12 \cdot R_1^2} + K_1 \cdot \left(1 + \frac{\beta_1 \cdot h_1}{2} \right) \quad K_{\phi 1} = 3.099 \times 10^6 \quad (B5)$$

$$K_{\phi 2} := \frac{E_2 \cdot h_2^3 \cdot B_2}{12 \cdot R_2^2} + K_2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_2 \cdot h_2}{2} \right) \quad K_{\phi 2} = 3.257 \times 10^6 \quad (B6)$$

$$K_{\phi} := K_{\phi 1} + K_{\phi 2} \quad K_{\phi} = 6.356 \times 10^6 \quad (B7)$$

Приложение Г

ГОСТ Р 52857.7—2007

Приложение Г (обязательное)

Коэффициенты T_1 , T_2 , T_3 , A и B , используемые в формулах для определения сил и моментов в элементах кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

Коэффициенты T_1 , T_2 , T_3 в зависимости от ω и m_n приведены в таблице Г.1, коэффициент A в зависимости от ω и m_A — в таблице Г.2, коэффициент B в зависимости от ω и p_B — в таблице Г.3

Т а б л и ц а Г.1 — Коэффициенты T_1 , T_2 , T_3

m_n	ω														
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
T_1															
1,0	2,00	2,00	2,06	2,28	2,79	3,58	4,50	5,39	6,19	7,65	9,08	10,5	11,9	13,4	14,8
1,1	2,20	2,35	2,59	3,07	4,02	5,51	7,39	9,44	11,6	16,2	21,6	28,1	35,6	44,3	54,3
1,2	2,40	2,73	3,21	4,04	5,61	8,14	11,5	16,5	19,8	30,2	43,4	60,0	80,4	105	134
1,3	2,60	3,14	3,92	5,22	7,64	11,6	17,1	23,9	31,6	50,8	76,3	109	151	202	263
1,4	2,80	3,59	4,74	6,86	10,2	16,0	24,4	36,0	47,5	79,2	122	179	261	341	450
1,5	3,00	4,07	5,67	8,35	13,3	21,6	33,7	49,3	68,0	116	183	273	387	529	703
T_2															
1,0	0,00	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59	4,13	5,13	6,13	7,17	8,19	9,20	10,2
1,1	0,00	0,02	0,22	0,75	1,69	2,92	4,18	5,36	6,46	8,75	11,3	14,2	17,4	20,9	24,6
1,2	0,00	0,02	0,24	0,88	2,06	3,68	5,43	7,13	8,79	12,4	16,6	21,3	26,7	32,5	39,0
1,3	0,00	0,02	0,27	1,01	2,44	4,44	6,67	8,90	11,1	16,0	21,8	28,4	35,9	44,2	53,4
1,4	0,00	0,03	0,30	1,14	2,81	5,21	7,91	10,7	13,4	19,6	27,0	35,5	45,1	55,9	67,8
1,5	0,00	0,03	0,32	1,28	3,18	5,97	9,16	12,4	15,8	23,2	32,2	42,5	54,4	67,6	82,2
T_3															
1,0	0,00	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36	6,03	7,38	8,81	10,2	11,7	13,1	14,5
1,1	0,00	0,21	0,84	1,81	3,02	4,14	5,11	5,90	6,63	8,12	9,69	11,3	12,8	14,4	15,9
1,2	0,00	0,23	0,91	1,98	3,30	4,51	5,58	6,43	7,24	8,86	10,6	12,3	14,0	15,7	17,4
1,3	0,00	0,25	0,99	2,14	3,57	4,89	6,04	6,97	7,84	9,59	11,4	13,3	15,2	17,0	18,8
1,4	0,00	0,27	1,06	2,31	3,85	5,26	6,51	7,50	8,44	10,3	12,3	14,3	16,3	18,3	20,3
1,5	0,00	0,28	1,14	2,47	4,12	5,64	6,97	8,04	9,04	11,1	13,2	15,4	17,5	19,6	21,7

Таблица Г.2 — Коэффициент А

m_A	σ							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	≥ 10
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898
-0,9	0,656	0,683	0,712	0,740	0,781	0,797	0,802	0,811
-0,8	0,586	0,613	0,641	0,668	0,705	0,716	0,720	0,724
-0,7	0,516	0,543	0,570	0,596	0,628	0,636	0,637	0,637
-0,6	0,446	0,473	0,500	0,524	0,551	0,555	0,554	0,550
-0,5	0,376	0,403	0,429	0,451	0,474	0,474	0,471	0,463
-0,4	0,306	0,333	0,358	0,379	0,397	0,393	0,388	0,376
-0,3	0,236	0,262	0,287	0,307	0,320	0,313	0,305	0,289
-0,2	0,166	0,192	0,214	0,235	0,245	0,237	0,228	0,208
-0,1	0,096	0,116	0,133	0,148	0,157	0,150	0,140	0,125
0	0,144	0,284	0,402	0,461	0,376	0,370	0,392	0,414
0,1	0,214	0,353	0,466	0,514	0,420	0,426	0,450	0,474
0,2	0,284	0,422	0,530	0,567	0,470	0,485	0,511	0,537
0,3	0,354	0,491	0,593	0,620	0,523	0,546	0,575	0,603
0,4	0,424	0,559	0,657	0,672	0,580	0,610	0,641	0,671
0,5	0,494	0,628	0,721	0,725	0,639	0,677	0,709	0,742
0,6	0,564	0,697	0,785	0,778	0,701	0,745	0,779	0,814
0,7	0,634	0,766	0,849	0,831	0,765	0,814	0,851	0,888
0,8	0,704	0,834	0,913	0,884	0,830	0,885	0,923	0,963
0,9	0,773	0,903	0,977	0,937	0,896	0,956	0,997	1,040
1,0	0,843	0,972	1,041	0,991	0,964	1,030	1,071	1,117

Таблица Г.3 — Коэффициент В

n_B	σ							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	≥ 10
1,0	0,843	0,972	1,041	0,991	0,964	1,029	1,071	1,117
0,9	0,829	0,943	1,000	0,949	0,940	1,000	1,040	1,083
0,8	0,815	0,914	0,960	0,908	0,910	0,971	1,009	1,051
0,7	0,800	0,886	0,920	0,871	0,884	0,944	0,979	1,020
0,6	0,786	0,858	0,880	0,836	0,860	0,918	0,951	0,990
0,5	0,771	0,829	0,840	0,804	0,839	0,894	0,925	0,963
0,4	0,757	0,801	0,799	0,777	0,819	0,871	0,900	0,938
0,3	0,742	0,773	0,761	0,754	0,802	0,852	0,878	0,915
0,2	0,728	0,744	0,732	0,737	0,789	0,835	0,860	0,896
0,1	0,714	0,716	0,714	0,727	0,780	0,823	0,846	0,882
0	0,700	0,702	0,709	0,725	0,776	0,816	0,837	0,874
-0,1	0,703	0,707	0,716	0,732	0,778	0,815	0,835	0,873
-0,2	0,705	0,712	0,723	0,741	0,787	0,821	0,841	0,876
-0,3	0,708	0,717	0,730	0,750	0,796	0,828	0,846	0,879
-0,4	0,711	0,722	0,738	0,759	0,805	0,835	0,852	0,882
-0,5	0,713	0,728	0,745	0,768	0,814	0,842	0,857	0,884
-0,6	0,716	0,733	0,753	0,777	0,823	0,850	0,863	0,887
-0,7	0,718	0,738	0,760	0,786	0,832	0,857	0,869	0,890
-0,8	0,721	0,743	0,768	0,795	0,841	0,864	0,874	0,893
-0,9	0,723	0,748	0,775	0,804	0,849	0,871	0,880	0,895
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898

Приложение Д

Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений при работе материала в условиях ползучести

При температуре рассчитываемых элементов теплообменных аппаратов из низколегированных и коррозионно-стойких хромистых сталей от 420 °С до 500 °С допускается определять $[\sigma_A]$ по графику, приведенному на рисунке Д.1.

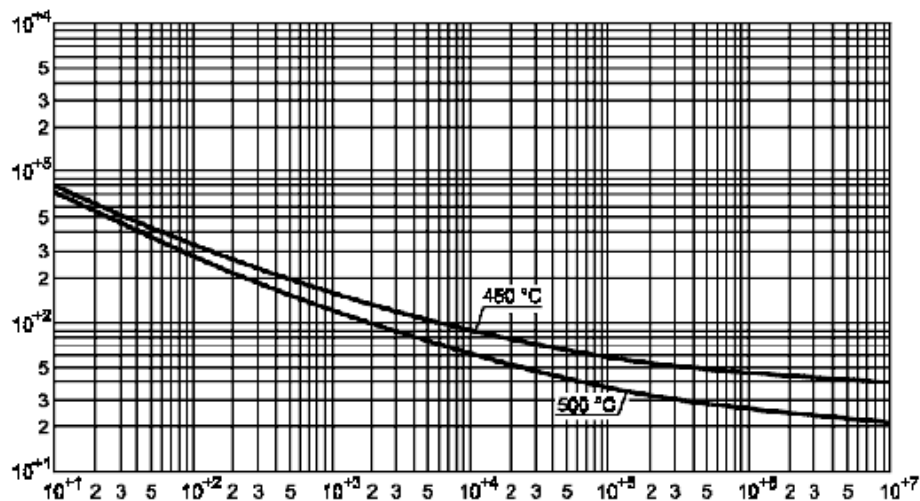


Рисунок Д.1 — Расчетные кривые усталости для низколегированных и коррозионно-стойких хромистых сталей при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

При температурах рассчитываемых элементов из аустенитных сталей от 525 °С до 600 °С допускается определять $[\sigma_A]$ по графику, приведенному на рисунке Д.2.

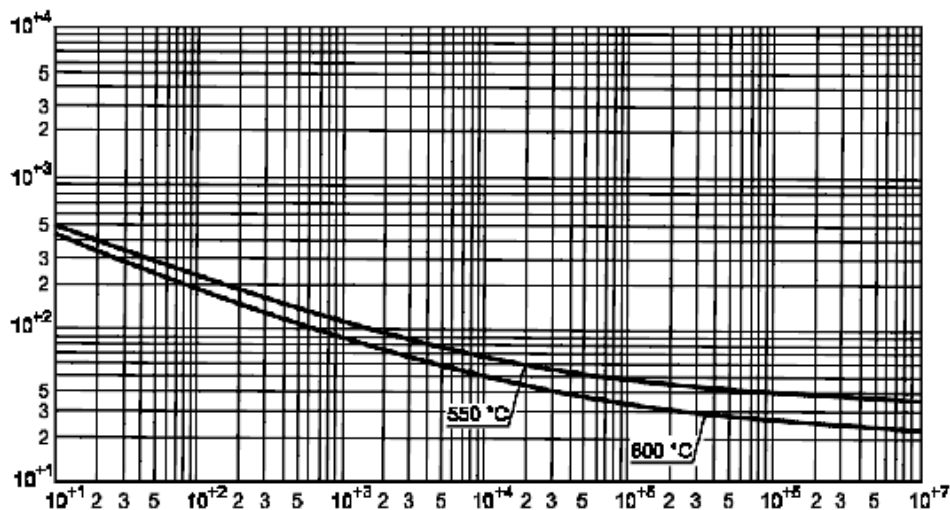


Рисунок Д.2 — Расчетные кривые усталости коррозионно-стойких сталей аустенитного класса при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Если температура рассматриваемых элементов из углеродистых сталей превышает 380 °С, из низколегированных коррозионно-стойких хромистых сталей — 500 °С и из аустенитных сталей — 600 °С, следует при выполнении расчета элементов теплообменных аппаратов на малоцикловую усталость принимать:

$$[\sigma_A] = 0,65 [\sigma], \quad (Д.1)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение по ГОСТ Р 52857.2 для рассчитываемого элемента при расчетной температуре.

Приложение Е

3.2.2 Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение трубы с решеткой

При отсутствии более точных данных допускается вычислять допускаемую нагрузку на вальцовочное соединение трубы с решеткой по формулам:

iii := 2

Принимаем развальцовку для труб, завальцованных в пазы при наличии одного паза.

$\sigma_{dT} := 148$ допускаемое напряжение для труб, МПа

$\sigma_{dp} := 148$ допускаемое напряжение для трубной решетки, МПа

Так как трубы развальцовываются на всю толщину трубной решетки, то глубина развальцовки труб равна:

$l_B := s_p$

$$N_{dTp} := \begin{cases} \left[0.5 \cdot \pi \cdot s_T \cdot (d_T - s_T) \cdot \min\left(\frac{l_B}{d_T}, 1.6\right) \cdot \min(\sigma_{dT}, \sigma_{dp}) \right] & \text{if } iii = 1 \\ \left[0.6 \cdot \pi \cdot s_T \cdot (d_T - s_T) \cdot \min(\sigma_{dT}, \sigma_{dp}) \right] & \text{if } iii = 2 \\ \left[0.8 \cdot \pi \cdot s_T \cdot (d_T - s_T) \cdot \min(\sigma_{dT}, \sigma_{dp}) \right] & \text{if } iii = 3 \end{cases}$$

Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение трубы с решеткой:

$$N_{dTp} = 1.283 \times 10^4 \text{ Н}$$

Определение усилий в элементах теплообменного аппарата

Приведенное давление p_0 вычисляют по формуле

$$\alpha_K := 18 \cdot 10^{-6} \quad \text{коэффициент линейного расширения кожуха, ГОСТ Р52857.1-2007} \\ \text{таблица Г.1, } 1/^\circ\text{C}$$

$$\alpha_T := \alpha_K \quad \text{так как материал идентичен}$$

$$t_K := 300 \quad \text{средняя температура стенки кожуха, } ^\circ\text{C}$$

$$t_0 := 20 \quad \text{температура сборки аппарата, } ^\circ\text{C}$$

$$t_T := 300 \quad \text{средняя температура стенок труб, } ^\circ\text{C}$$

где m_{sr} — коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб:

$$m_{cp} := 0.15 \cdot \frac{i \cdot (d_T - s_T)^2}{a_1^2} \quad m_{cp} = 1.196 \quad (3.2.11)$$

$p_T := 1.6$ расчетное давление в трубном пространстве, МПа

$p_M := 1.6$ расчетное давление в межтрубном пространстве, МПа

$$A1 := [\alpha_K \cdot (t_K - t_0) - \alpha_T \cdot (t_T - t_0)] \cdot K_y \cdot l$$

$$A2 := [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.5 \cdot \rho \cdot K_q)] \cdot p_T$$

$$A3 := [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.3 \cdot \rho \cdot K_p)] \cdot p_M$$

$$p_0 := A1 + A2 - A3 = 7.448 \text{ МПа} \quad (3.2.12)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения вычисляют по формуле

$$\rho_1 := \frac{K_y \cdot a \cdot a_1}{\beta^2 \cdot K_\Phi \cdot R_1} \quad \rho_1 = 2.196 \quad (3.2.13)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , определяют по таблице 1.

Таблица 1

Т а б л и ц а 1 — Коэффициенты Φ_1 , Φ_2 , Φ_3

ω	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Φ_1	2	2,0	2,06	2,28	2,79	3,58	4,5	5,39
Φ_2	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59
Φ_3	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36

Окончание таблицы 1

ω	4	5	6	7	8	9	10	> 10
Φ_1	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2\omega}$
Φ_2	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,2	10,21	ω
Φ_3	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,5	$\sqrt{2\omega}$

Согласно таблице 1 при $\omega > 10$:

$$\Phi_1 := 6.19$$

$$\Phi_2 := 4.13$$

$$\Phi_3 := 6.03$$

Значения T_1 , T_2 , T_3 определяют по приложению Ж в зависимости от ω и m_n или вычисляют по формулам:

$$t := 1 + 1.4 \cdot \omega \cdot (m_n - 1) \quad t = 7.626 \quad (3.2.14)$$

$$T_1 := \Phi_1 \cdot [m_n + 0.5 \cdot (1 + m_n \cdot t) \cdot (t - 1)] \quad T_1 = 341.648 \quad (3.2.15)$$

$$T_2 := \Phi_2 \cdot t \quad T_2 = 31.495 \quad (3.2.16)$$

$$T_3 := \Phi_3 \cdot m_n \quad T_3 = 11.911 \quad (3.2.17)$$

Изгибающий момент и перерезывающую силу, распределенные по краю трубной решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента, H^*mm/mm :

Коэффициент влияния давления на изгиб 1 и 2 го фланца, mm^2 :

$$m_1 := \frac{1 + \beta_1 \cdot h_1}{2 \cdot \beta_1^2} \quad m_1 = 2.434 \times 10^3 \quad (3.2.18)$$

$$m_2 := \frac{1 + \beta_2 \cdot h_2}{2 \cdot \beta_2^2} \quad m_2 = 2.434 \times 10^3 \quad (3.2.19)$$

Приведенное давление на фланцы, МПа:

$$p_1 := \frac{K_y}{\beta \cdot K_\Phi} \cdot (m_1 \cdot p_M - m_2 \cdot p_T) \quad p_1 = 0 \quad (3.2.20)$$

$$M_\Pi := \left(\frac{a_1}{\beta} \right) \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - p_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} \quad M_\Pi = -499.383 \quad (3.2.21)$$

- для перерезывающей силы, H/mm :

$$Q_\Pi := a_1 \cdot \frac{p_0 \cdot (T_3 + \rho_1) - p_1 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} \quad Q_\Pi = 5.36 \quad (3.2.22)$$

5.2.2.6 Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$$M_a := M_\Pi + (a - a_1) \cdot Q_\Pi \quad M_a = 559.251 \quad H \cdot \frac{mm}{mm} \quad (3.2.23)$$

$$Q_a := m_n \cdot Q_{\Pi} \quad Q_a = 10.588 \quad \frac{H}{\text{мм}} \quad (3.2.24)$$

Осевую силу и изгибающий момент, действующие на трубу, вычисляют по формулам:

- для осевой силы:

$$N_T := \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot \left[(\eta_M \cdot p_M - \eta_T \cdot p_T) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a \right] \quad (3.2.25)$$

$$N_T = -106.778 \quad H$$

- для изгибающего момента:

$$J_T := \frac{\pi \cdot d_T^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_T - 2 \cdot s_T}{d_T} \right)^4 \right] \quad J_T = 9.628 \times 10^3 \quad \text{мм}^4$$

$$jj := 1$$

Максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой:

$$l_{1R} := 390 \quad \text{мм}$$

$$l_{\text{пр}} := \begin{cases} 1 & \text{if } jj = 2 \\ \frac{l_{1R}}{3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$l_{\text{пр}} = 130 \quad \text{мм}$$

$$M_T := \frac{E_T \cdot J_T \cdot \beta}{K_y \cdot a_1 \cdot l_{\text{пр}}} \cdot (\Phi_2 \cdot Q_a + \Phi_3 \cdot \beta \cdot M_a) \quad M_T = 4.724 \times 10^3 \quad (3.2.26)$$

Усилия в кожухе вычисляют по формулам:

- усилие, распределенное по периметру кожуха:

$$Q_K := \frac{a}{2} \cdot p_T - Q_{\Pi} \quad Q_K = 314.64 \quad \frac{H}{\text{мм}} \quad (3.2.27)$$

- изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха, Н*мм/мм:

$$M_K := \frac{K_1}{\rho \cdot K_{\Phi} \cdot \beta} \cdot (T_2 \cdot Q_{\Pi} + T_3 \cdot \beta \cdot M_{\Pi}) - \frac{p_M}{2 \cdot \beta_1^2} \quad M_K = -2.625 \times 10^3 \quad (3.2.28)$$

- суммарная осевая сила, действующая на кожух:

$$F := \pi \cdot D \cdot Q_K \quad F = 7.908 \times 10^5 \quad H \quad (3.2.29)$$

3.2.3 Расчетные напряжения в элементах конструкции

Расчетные схемы присоединения решетки к кожуху приведены на рисунках 7—10.

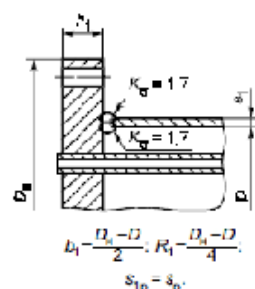


Рисунок 7 — решетка, приваренная встав к обечайке кожуха

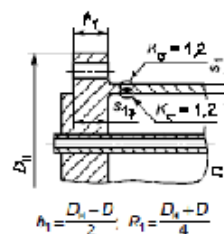


Рисунок 8 — решетка, приваренная встык к обечайке кожуха

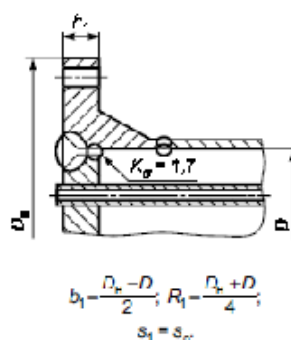


Рисунок 9 — решетка, приваренная во фланец

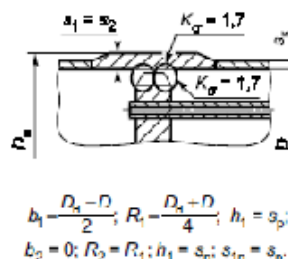


Рисунок 10 — решетка, приваренная в кожух

$$b_1 := \frac{D_H - D}{2}$$

$$b_1 = 87.5$$

$$R_1 = 443.75$$

$$s_{1p} := s_p$$

$$s_{1p} = 40$$

$$b_2 := 0$$

b_1 — ширина тарелки фланца кожуха, мм;

b_2 — ширина тарелки фланца камеры, мм;

D — внутренний диаметр кожуха или плавающей головки, мм;

D_H — наружный диаметр фланца, мм;

h_1 — толщина тарелки фланца кожуха, мм

R_1 — радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха, мм

R_2 — радиус центра тяжести тарелки фланца камеры, мм;

s_p — толщина трубной решетки, мм;

s_1 — толщина стенки кожуха в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм;

s_{1p} — толщина решетки в зоне кольцевой канавки, мм;

s_2 — эквивалентная толщина втулки фланца, мм;

В первом приближении принимаем эквивалентную толщину втулки фланца равной толщине кожуха

$$s_2 := s_K$$

$$s_{1p} := s_2$$

Расчетные напряжения в трубных решетках.

Напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом вычисляют по формулам:

c — расчетная прибавка к толщине трубной решетки, крышке плавающей головки, элементам аппаратов воздушного охлаждения, мм. При назначении величины « c » для трубной решетки и крышки плавающей головки следует учитывать коррозию как со стороны трубного, так и межтрубного пространства;

$$c := 3$$

-изгибные:

$$\sigma_{p1} := \frac{6 \cdot |M_{\Pi}|}{(s_{1p} - c)^2} \quad \sigma_{p1} = 2.189 \quad \text{МПа} \quad (3.2.30)$$

- касательные:

$$\tau_{p1} := \frac{|Q_{\Pi}|}{s_{1p} - c} \quad \tau_{p1} = 0.145 \quad \text{МПа} \quad (3.2.31)$$

Напряжения в перфорированной части трубной решетки вычисляют по формулам

A — коэффициент, определяемый по приложению Г в зависимости от ω и m_A :

B — коэффициент, определяемый по приложению Г, в зависимости от ω и n_B :

ω - Безразмерный параметр системы решетка — трубы вычисляют по формуле 10

$$m_a := \frac{\beta \cdot M_a}{Q_a} \quad m_a = 1.266$$

$$n_B := \frac{Q_a}{\beta \cdot M_a} \quad n_B = 0.79$$

$$A := 0.964$$

$$B := 1.025$$

$$M_{\max} := \begin{cases} A \cdot \frac{|Q_a|}{\beta} & \text{if } -1 \leq \frac{\beta \cdot M_a}{Q_a} \leq 1 \\ B \cdot |M_a| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2.32)$$

$$M_{\max} = 573.233 \quad \text{Н} \cdot \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$$

- изгибные:

$$\sigma_{p2} := \frac{6 \cdot M_{\max}}{\phi_p \cdot (s_p - c)^2} \quad \sigma_{p2} = 11.054 \quad \text{МПа} \quad (3.2.33)$$

- касательные:

$$\tau_{p2} := \frac{|Q_a|}{\phi_p \cdot (s_p - c)} \quad \tau_{p2} = 1.259 \quad \text{МПа} \quad (3.2.34)$$

Напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке вычисляют по формулам:

ск — расчетная прибавка к толщине стенки кожуха, мм;

$$c_k := 3 \quad \text{мм}$$

- в меридиональном направлении:
мембранные:

$$\sigma_{Mx} := \frac{|Q_k|}{(s_1 - c_k)} \quad \sigma_{Mx} = 28.604 \quad \text{МПа} \quad (3.2.35)$$

изгибные:

$$\sigma_{ux} := \frac{6 \cdot |M_k|}{(s_1 - c_k)^2} \quad \sigma_{ux} = 130.182 \quad \text{МПа} \quad (3.2.36)$$

- в окружном направлении:
мембранные:

$$\sigma_{M\phi} := \frac{|p_M| \cdot a}{s_1 - c_k} \quad \sigma_{M\phi} = 58.182 \quad \text{МПа} \quad (3.2.37)$$

изгибные:

$$\sigma_{u\phi} := 0.3 \cdot \sigma_{ux} \quad \sigma_{u\phi} = 39.055 \quad \text{МПа} \quad (3.2.38)$$

Напряжения в трубах вычисляют по формулам:

- в осевом направлении:
мембранные:

$$\sigma_{1T} := \frac{|N_T|}{\pi(d_T - s_T) \cdot s_T} = 0.739 \text{ МПа} \quad (3.2.39)$$

суммарные:

$$\sigma_1 := \sigma_{1T} + \frac{d_T \cdot |M_T|}{2J_T} = 6.871 \text{ МПа} \quad (3.2.40)$$

в окружном направлении:

$$\sigma_{2T} := \frac{(d_T - s_T) \cdot \max(|p_T|, |p_M|, |p_T - p_M|)}{2 \cdot s_T} = 9.2 \text{ МПа} \quad (3.2.41)$$

3.2.4 Проверка прочности трубных решёток

Проверка статической прочности

$$\max(\tau_{p1}, \tau_{p2}) \leq 0.8 \cdot \sigma_{др} \quad (3.2.42)$$

Проверку трубной решётки на малоцикловую прочность проводят по ГОСТ Р 52857.6.

В случае, если в расчёте должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочность по приложению Д.

При проверке трубной решётки на малоцикловую прочность следует принимать:

в месте соединения с кожухом:

$$\Delta\sigma_1 := \sigma_{p1} \quad \Delta\sigma_1 = 2.189 \text{ МПа} \quad (3.2.43)$$

$$\Delta\sigma_2 := 0 \quad (3.2.44)$$

$$\Delta\sigma_3 := \Delta\sigma_2$$

K_σ определяют по рисункам 7-10

в перфорированной части:

$$\Delta\sigma_1 := \sigma_{p1} \quad (3.2.45)$$

$$\Delta\sigma_2 := 0 \quad (3.2.46)$$

$$\Delta\sigma_3 := \Delta\sigma_2$$

$$K_\sigma := 1.7 \quad (3.2.47)$$

Для многоходовых по трубному пространству теплообменных аппаратов прочность трубных решёток в зоне паза под перегородку проверяют по формулам, приведенным в 5.6.

При этом следует принимать:

$\sigma_{дА}$ - допускаемая амплитуда упругих напряжений по
ГОСТР52857.6, МПа

$\sigma_{дА} := 200 \text{ МПа}$

$$s_{pp} := (s_p - c) \cdot \frac{\sigma_{p2}}{2 \cdot \sigma_{дА}} \quad s_{pp} = 1.023 \text{ мм} \quad (3.2.48)$$

$$\text{Проверка} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } (\max(\tau_{p1}, \tau_{p2}) \leq 0.8 \cdot \sigma_{dp}) \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Проверка = "Условие выполняется"

3.2.5 Проверка жесткости трубных решеток

Проверку проводят в случаях, когда к жесткости трубных решеток предъявляются какие-либо дополнительные требования, например для аппаратов со стекающей пленкой, с перегородками по трубному пространству, если недопустим переток между ходами.

Условие жесткости:

Необходимые данные:

K_y модуль упругости основания (системы труб), Н/мм³;

a_1 расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, мм;

T_1 T_2 коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб;

$Q_{п}$ перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки, Н/мм;

β коэффициент системы решетка — трубы, 1/мм;

$M_{п}$ изгибающий момент, распределенный по периметру трубной решетки, Н * мм/мм;

$$W := \frac{1.2}{K_y \cdot a_1} \cdot |T_1 \cdot Q_{п} + T_2 \cdot \beta \cdot M_{п}|$$

$W = 0.196 \text{ мм}$

W_d Рекомендуемая допустимая величина прогиба трубной решетки, мм, в зависимости от диаметра аппарата

$$W_d := \begin{cases} W_d \leftarrow 0.7 & \text{if } D \leq 600 \\ W_d \leftarrow 0.9 & \text{if } 600 < D \leq 1000 \\ W_d \leftarrow 1.1 & \text{if } 1000 < D \leq 2000 \\ W_d \leftarrow 1.2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$W_d = 0.9 \text{ мм}$$

Проверка условия жесткости:

$$Usl_525 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " } & \text{if } W \leq W_d \\ \text{"Условие НЕ выполняется " } & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_525 = \text{"Условие выполняется "}$$

3.2.6 Расчет прочности и устойчивости кожуха

Проверку прочности кожуха в месте присоединения к решетке следует проводить только для конструкций, **приведенных на рисунках 7, 8 и 10**

Условие статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

σ_{Mx} мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;

σ_{dk} допускаемое напряжение для материала кожуха теплообменного аппарата или крышки аппарата воздушного охлаждения, МПа;

$$\sigma_{dk} := 142 \text{ МПа}$$

$$Usl_5261 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " } & \text{if } \sigma_{Mx} \leq 1.3 \cdot \sigma_{dk} \\ \text{"Условие НЕ выполняется " } & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5261 = \text{"Условие выполняется "}$$

Проверку кожуха на малоцикловую прочность в месте присоединения к решетке проводят по ГОСТ Р 52857.6. В случае, если в расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочность по приложению Д

При проверке кожуха на малоцикловую прочность следует принимать:

σ_{ux} изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;

$\sigma_{M\phi}$ мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;

$\sigma_{u\phi}$ изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;

$$\Delta\sigma_1 := \sigma_{Mx} + \sigma_{ux} \quad \Delta\sigma_1 = 158.786 \quad (3.2.49) \quad K_\sigma = 1.7$$

$$\Delta\sigma_2 := \sigma_{M\phi} + \sigma_{u\phi} \quad \Delta\sigma_2 = 97.237 \quad (3.2.50)$$

$$\Delta\sigma_3 := 0 \quad \Delta\sigma_3 = 0 \quad (3.2.51)$$

К.σ - смотри рисунки 7-10

Допускается амплитуду напряжений вычислять по формуле ГОСТ Р 52857.6 (9):

$$\sigma_a := \frac{K_\sigma}{2} \cdot \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 - \Delta\sigma_1 \cdot \Delta\sigma_2} \quad \sigma_a = 117.866 \quad (3.2.52)$$

Допускаемую амплитуду напряжений определяют по формуле

$$A_m := 0.45 \cdot 10^5 \text{ характеристика материала, МПа;}$$

$$R_{mt} := 440 \text{ временное сопротивление материала при расчетной температуре, МПа;}$$

$$B_m := 0.4 \cdot R_{mt} \text{ характеристика материала, МПа; } B_m = 176$$

A_m и B_m, C_t выбираем по табл. 3 ГОСТ Р 52857.6, R_{mt} по ГОСТ Р 52857.1-2007

C_t поправочный коэффициент, учитывающий температуру;

n_N коэффициент запаса прочности по числу циклов;

n_σ коэффициент запаса прочности по напряжениям;

$$\text{Для легированной стали: } C_t := \frac{2300 - t_K}{2300} \quad C_t = 0.87$$

$$n_N := 10 \quad n_\sigma := 2 \text{ с. 17, ГОСТ Р 52857.6}$$

с. 15, ГОСТ Р 52857.6

$$N_d := \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A_m}{\sigma_a - \frac{B_m}{n_\sigma}} \cdot C_t \right)^2 = 1.717 \times 10^5 \text{ допускаемое число циклов}$$

принимаем число циклов нагружения; $N := 5 \cdot 10^3$

$$\sigma_{da} := C_t \cdot \frac{A_m}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B_m}{n_\sigma} \quad \sigma_{da} = 262.997$$

Условие малоциклового прочност будет выполняться, если

$$Usl_5262 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } \sigma_a \leq \sigma_{da} \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5262 = \text{"Условие выполняется "}$$

Если условие прочност кожуха в месте соединения с решеткой не выполняется, можно установить переходный пояс увеличенной толщины длиной не менее $2 \cdot \sqrt{D \cdot s_1}$

В случае, если осевая сила в кожухе $F < 0$, следует провести проверку кожуха на местную устойчивость от действия сжимающей силы F по ГОСТ Р 52857.2.

3.2.7 Расчет труб на прочност, устойчивость и жесткост и расчет крепления труб в решетке

Условие статической прочност труб:

- σ_{1T} мембранные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;
- σ_{2T} мембранные напряжения в трубах в окружном направлении, МПа;
- σ_{dT} допускаемое напряжение для материала труб, МПа;

$$Usl_5271 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } \max(\sigma_{1T}, \sigma_{2T}) \leq \sigma_{dT} \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5271 = \text{"Условие выполняется "}$$

Проверку труб на малоцикловую прочност проводят по ГОСТ Р 52857.6. В случае, если при расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочност по приложению Д.

При проверке труб на малоцикловую прочност следует принимать

- σ_1 суммарные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;

$$\Delta\sigma_1 := \sigma_1$$

$$\Delta\sigma_2 := 0$$

$$\Delta\sigma_3 := 0$$

$$K_{\sigma} := 1$$

Допускается амплитуду напряжений
вычислять по формуле

$$\sigma_a := \frac{K_{\sigma}}{2} \cdot \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 - \Delta\sigma_1 \cdot \Delta\sigma_2} \quad \sigma_a = 5.841 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{da} := C_t \cdot \frac{A_m}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B_m}{n_{\sigma}} \quad \sigma_{da} = 262.997 \quad \text{МПа}$$

Условие малоциклового прочностии будет выполняться, если

$$Usl_5272 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } \sigma_a \leq \sigma_{da} \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_5272 = \text{"Условие выполняется "}$$

Проверку труб на устойчивость проводят в случае, если $N_t < 0$.
Условие устойчивости:

ϕ_t коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при
продольном изгибе, определяемый по графику на рисунке 11, в
зависимости от λ .

E_T модуль продольной упругости материала
труб, МПа;

d_T наружный диаметр трубы, мм;

s_T толщина стенки трубы, мм;

условие := 1

где $K_r = 1,3$ — для рабочих условий;

$K_r = 1,126$ — для условий гидроиспытания;

$l_R = l$ — для аппаратов без перегородок;

$l_R = \max\{l_{2R}; 0,7l_{1R}\}$ — для аппаратов с перегородками.

$$K_T := \begin{cases} 1.3 \text{ if } \text{условие} = 2 \\ 1.126 \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$l_{2R} := 400$$

$$l_R := \max(l_{2R}, 0.7 \cdot l_{1R}) \quad l_R = 400$$

$$\lambda := K_T \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{dT}}{E_T}} \cdot \frac{l_R}{(d_T - s_T)} \quad \lambda = 0.547$$

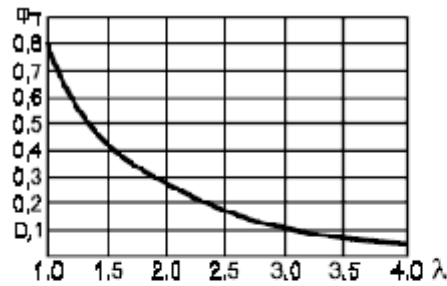


Рисунок 11 — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе

Проверка жесткости труб

Проверку проводят в случаях, когда к жесткости труб предъявляют какие-либо дополнительные требования, например для аппаратов со стекающей пленкой. Проверку жесткости труб проводят только при $N_T < 0$.

Прогиб трубы вычисляют по формуле

$$A_y := 0.002$$

$$Y := A_y \cdot \frac{|M_T|}{|N_T|} \quad Y = 0.088 \text{ мм}$$

где A_y — коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рисунке 12, в зависимости от λ_y

$$J_T := \frac{\pi}{64} \cdot [d_T^4 - (d_T - 2 \cdot s_T)^4] \quad J_T = 9.628 \times 10^3 \text{ мм}^4$$

$$\lambda_y := \frac{|N_T| \cdot l_{\text{пр}}^2}{E_T \cdot J_T} \quad \lambda_y = 9.864 \times 10^{-4}$$

где $l_{\text{пр}} = l$ — для аппаратов без перегородок в кожухе.

$l_{\text{пр}} = \frac{l_R}{3}$ — для аппаратов с перегородками.

Во всех случаях прогиб трубы не должен превышать зазор между трубами в пучке и приводить к их соприкосновению.

3.2.8 Проверка прочности крепления трубы в решетке

Если трубы крепятся в решетке с помощью развальцовки, должно выполняться условие:

$$Us1_5275 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } |N_T| \leq N_{\text{dтр}} \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_5275 = \text{"Условие выполняется "}$$

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой N_{dTp} определяется на основании испытаний или по нормативным документам.

При отсутствии данных о прочности вальцовочного соединения допускается принимать N_{dTp} по приложению Е.

δ — высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, мм;

$\delta := 10$

$\phi_c := \min(0.5, 0.95 - 0.2 \cdot \log(N)) \quad \phi_c = 0.21$

$$\tau := \frac{|N_T| \cdot d_T + 4 \cdot |M_T|}{\pi \cdot d_T^2 \cdot \delta} \quad \tau = 1.098 \text{ МПа}$$

Usl_52751 := $\begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } \tau \leq \phi_c \cdot \min(\sigma_{dT}, \sigma_{dp}) \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$

Usl_52751 = "Условие выполняется "

В случае крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой должно выполняться условие:

Usl_52752 := $\begin{cases} \text{"Условие выполняется " if } 1 \leq \max\left(\frac{\phi_c \cdot \min(\sigma_{dT}, \sigma_{dp})}{\tau} + 0.6 \cdot \frac{N_{dTp}}{|N_T|}, \frac{N_{dTp}}{|N_T|}\right) \\ \text{"Условие НЕ выполняется " otherwise} \end{cases}$

Usl_52752 = "Условие выполняется "

3.2.9 Дополнительные требования к толщинам трубных решеток

При наличии беструбной зоны (см. рисунок 14) принятая толщина трубной решетки должна дополнительно удовлетворять условию

$D_E := 100$ — величина определяется по конкретному исполнению трубной решетки

$p_p := \max(p_T, p_M) \quad p_p = 1.6 \text{ МПа}$

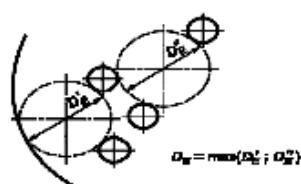


Рисунок 14 — Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь

$$\text{USL551} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } s_p \geq 0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{p_p}{\sigma_{dp}}} + c \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

USL551 = "Условие выполняется"

3.2.10 Перегородки между ходами по трубному пространству кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

Толщина перегородки должна отвечать условию

$B_{\text{пер}} := 800$ ширина перегородки, мм

$L_{\text{пер}} := 560$ длина перегородки, мм

$\Delta p := 0.2 \cdot p_T$ $\Delta p = 0.32$ Реально проводят гидравлический расчет

$\sigma_{d\Pi} := 148$ Допускаемое напряжение для материала перегородки, МПа

$c_{\Pi} := 3$ Прибавка на коррозию перегородки, мм

$s_{\text{пер}} := 20$ Толщина перегородки, мм

$$f_{\Pi} := \frac{1}{1 + \frac{B_{\text{пер}}}{L_{\text{пер}}} + \left(\frac{B_{\text{пер}}}{L_{\text{пер}}}\right)^2} = 0.224$$

$$\text{USL56} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } s_{\text{пер}} \geq 0.71 \cdot B_{\text{пер}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot f_{\Pi}}{\sigma_{d\Pi}}} + c_{\Pi} \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

USL56 = "Условие выполняется"

Выбранный теплообменник проверен на прочность, трубная решетка на жесткость, прочность, а также перегородки на прочность.

3.3 Расчет емкости для сбора вакуумного газойля

Исходные данные:

$P_e := 1.25$ МПа Рабочее давление

$L_e := 6040$ мм Длина емкости

$D_e := 2200$ мм Диаметр

$\rho_{lvg} := 905$ кг/м³ Плотность легкого вакуумного газойля

$t_e := 285$ °C Максимальная температура стенки

$g_{svp} := 9.81$ м/с² Ускорение свободного падения

$G_e := 0.07$ МН Вес аппарата

$G_{ob} := 0.32$ МН Вес общий (аппарат+жидкость)

$V_e := 20$ м³ Объем емкости

$L_{ц} := \frac{L_e}{1000} - 1.2 = 4.84$ м Длина цилиндрической части емкости

$H_d := 0.6$ м Высота эллиптической крышки

$a_d := 0.5 \cdot \frac{D_e}{1000} = 1.1$ расстояние от центра крайней опоры до эллиптической крышки, м

$\psi_1 := 0.8$

$l_e := 3.2$ м

Вычислим гидростатическое давление среды:

$$P_{ге} := \frac{\rho_{lvg} \cdot g_{svp} \cdot D_e}{10^9} \quad (3.3.1)$$

$P_{ге} = 0.02$ МПа

Вычислим расчетное давление [4,стр.5] :

$$P_{ре} := P_e + P_{ге} \quad (3.3.2)$$

$P_{ре} = 1.27$ МПа

Пробное давление:

Для обечайки емкости выбираем по таблице 2.8 [8,с.68] материал - сталь 16ГС.

Данные:

$t_c := t_e$ Наибольшая температура среды, °C

$\sigma_{t20} := 300$ Минимальное значение предела текучести при температуре +20°C принимаем по таблице А1 ,МПа [4, стр.15]

$\sigma_1 := 151$ нормативное допускаемое напряжение при расчетной температуре принимаем по таблице А1 , МПа [4, стр.9]

т.к. обечайка емкости выполняется из листового проката, то принимаем поправочный коэффициент, учитывающий вид заготовки $\eta := 1$ [4, стр.5]

$\sigma_{d20} := 196$ Допускаемое напряжение для материала при температуре +20°C принимаем по таблице А1,МПа [4, стр.9]

Допускаемое напряжение [4, стр. 5]:

для рабочего состояния:

$$\sigma_d := \sigma_1 \cdot \eta \quad (3.3.3)$$

$$\sigma_d = 151 \quad \text{МПа}$$

при испытаниях:

$$\sigma_{d_{\text{и}}} := \frac{\sigma_{t20}}{1.1} \quad (3.3.4)$$

$$\sigma_{d_{\text{и}}} = 272.727 \quad \text{МПа}$$

Вычислим пробное давление[4, стр. 4]:

$$P_{\text{и}} := \max\left(1.25 \cdot P_e \cdot \frac{\sigma_{d20}}{\sigma_d}\right) = 2.028 \quad \text{МПа} \quad (3.3.5)$$

Расчетная температура стенки [4,стр.4]:

$$t := \max(t_c, 20) \quad (3.3.6)$$

$$t = 285 \quad ^\circ\text{C}$$

Коэффициент прочности сварных и паяных соединений принимаем равным $\phi := 0.95$ по таблице Д2, т.к. сварка ручная дуговая [4, стр. 22].

Прибавка к расчетным толщинам:

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии [4, стр. 4]:

Для стали 16ГС соответствует проницаемость среды равная $\Pi := 0.294 \text{ мм/год}$ [8, с 281], срок службы аппарата принимаем равным $\tau_B := 15 \text{ лет}$

$$c_1 := \Pi \cdot \tau_B = 4.4 \text{ мм} \quad (3.3.7)$$

Прибавка на минусовое значение по толщине листа принимаем 5% и далее не учитываем.

$$c_2 := 0$$

Технологическую прибавку на компенсацию утонения стенки аппарата принимаем равной $c_3 := 1 \text{ мм}$

$$c_e := c_1 + c_2 + c_3 = 5.41 \text{ мм} \quad (3.3.8)$$

3.3.1 Расчет обечайки

Расчет обечайки нагруженной внутренним избыточным давлением

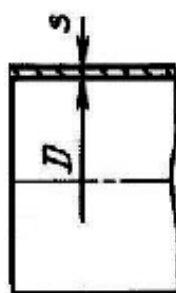


Рисунок 3.3.1 Расчетная схема обечайки аппарата [5, стр. 5].

Расчетная толщина стенки аппарата определяется по формулам [5, стр. 6]:

$$s_{pe} := \max \left(\frac{P_{pe} \cdot D_e}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_d - P_{pe}}, \frac{P_{и} \cdot D_e}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{dи} - P_{и}} \right) = 9.778 \text{ мм} \quad (3.3.9)$$

Толщина стенки:

$$s_e := s_{pe} + c_e = 15.188 \text{ мм} \quad (3.3.10)$$

Принимаем исполнительную толщину обечайки равной 16 мм, по техническим требованиям [8,с. 410].

следовательно принимаем:

$$s_a := 16 \text{ мм}$$

Допускаемое давление[5,стр.6]:

в рабочем состоянии

$$Pd := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d \cdot (s_e - c_e)}{D_e + s_e - c_e} = 1.374 \text{ МПа} \quad (3.3.11)$$

при испытаниях

$$Pd_{и} := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_{и} \cdot (s_e - c_e)}{D_e + s_e - c_e} = 2.482 \text{ МПа} \quad (3.3.12)$$

Условия применения расчетных формул [7,с. 19]:

$$Usl_1 := \begin{cases} Usl_1 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{s_e - c_e}{D_e} \leq 0.1 \\ Usl_1 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Usl_1 = \text{"условие выполняется"}$

3.2 Расчет днищ

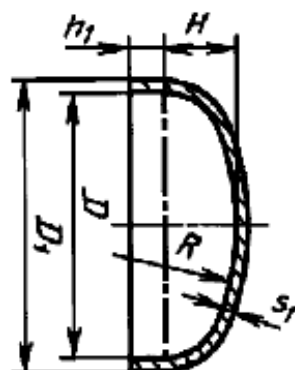


Рисунок 3.3.2 Крышка эллиптическая [5,стр. 13].

Исполнительную толщину стенки днищ определяют по формулам[5,стр.14]

$$s_{pe1} := \max\left(\frac{P_{pe} \cdot D_e}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d - 0.5 \cdot P_{pe}}, \frac{P_{и} \cdot D_e}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_{и} - 0.5 \cdot P_{и}}\right) \quad (3.3.13)$$

$$s_{pe1} = 9.757 \quad \text{мм}$$

исполнительная толщина стенки днища и крышки:

$$s_{e1} := s_{pe1} + c_e = 15.167 \quad \text{мм} \quad (3.3.14)$$

Принимаем толщину днища и крышки стандартного значения $s_{e1} := 16 \quad \text{мм}$, по таблице 16.1 [8, с. 441]

Допускаемое давление[5,стр.14]:

в рабочем состоянии

$$Pd_{e1} := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d \cdot (s_{e1} - c_e)}{D_e + 0.5 \cdot (s_{e1} - c_e)} = 1.378 \quad \text{МПа} \quad (3.3.15)$$

при испытаниях

$$Pd_{e1и} := \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma d_{и} \cdot (s_{e1} - c_e)}{D_e + 0.5 \cdot (s_{e1} - c_e)} = 2.488 \quad \text{МПа} \quad (3.3.16)$$

Условия применения расчетных формул[7,с. 19]:

$$Usl_2 := \begin{cases} Usl_2 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{e1} - c_e}{D_e} \leq 0.1 \\ Usl_2 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_2 = \text{"условие выполняется"}$$

Длину цилиндрической отбортованной части днища и крышки принимаем равной $h_1 := 50 \quad \text{мм}$ по таблице 16.1 [8,с. 440]

Радиус кривизны в вершине днища [5,стр.9]:

Высоту выпуклой части днища и крышки без учета цилиндрической части принимаем равной $H_1 := 550 \quad \text{мм}$ по таблице 16.1 [8,с. 440]

$$R_e := \frac{D_e^2}{4 \cdot H_1} = 2.2 \times 10^3 \quad \text{мм} \quad (3.3.17)$$

Подобраны днища с толщиной стенки 16 мм.

3.3.1 Выбор стандартных штуцеров.

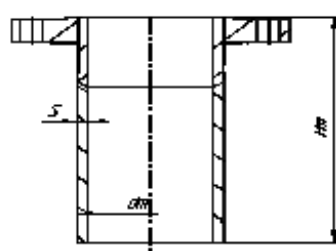


Рисунок 3.3.3 Схема штуцера с плоским фланцем .

Таблица 3.3. Основные размеры патрубков, стандартных стальных фланцевых тонкостенных штуцеров[8,с. 659]

Таблица 3.3

Обозначение	Ду, мм	d _т , мм	давление условное Р _у , МПа	S _т , мм	H _т , мм
А	500	532	1.25	16	335
В,Ж	80	89	1.25	4.5	220
Б,Г, Д, Е	50	57	1.25	3.5	260

3.3.4 Расчет укрепления отверстий

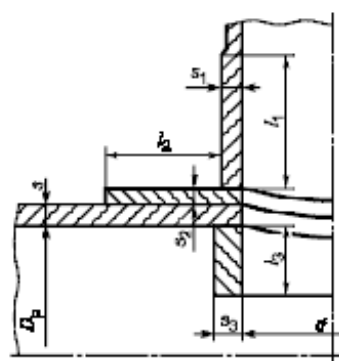


Рисунок 3.3.4. Основная расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда[6, стр.19]

Расчетные диаметры укрепляемых элементов определяются по формулам [6, стр.5]

- для цилиндрической обечайки [6, стр.5]

для штуцеров А, Ж,Д,Е,Г

$$D_{p.e} := D_e = 2.2 \times 10^3 \text{ мм} \quad (3.3.18)$$

- для стандартного эллиптического днища [6, стр.5]

для штуцеров Б, В

$r := 950 \text{ мм}$ расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища.

$$D_{pe} := \frac{D_e^2}{2 \cdot H_1} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D_e^2 - 4H_1^2)}{D_e^4} \cdot r^2} = 2.921 \times 10^3 \text{ мм} \quad (3.3.19)$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, вычисляют по формуле [6, стр.7]

$$d_0 := 2 \cdot \left(\frac{s_e - c_e}{s_{pe}} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_{p.e} \cdot (s_e - c_e)} = 86.397 \text{ мм} \quad (3.3.20)$$

Укрепление отверстий требуется для патрубка А.

Для патрубка А выберем укрепление отверстия штуцером ($d_{p1} := 500$) и накладным кольцом ($s_{nk} := 15$).

Толщина стенки штуцера[6, стр.6]:

$$s_{ш} := \frac{P_{pe} \cdot D_{p.e}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma d - P_{pe}} = 9.778 \text{ мм} \quad (3.3.21)$$

Исполнительная толщина штуцера:

$$s_{ши} := s_{ш} + c_e = 15.188 \text{ мм} \quad (3.3.22)$$

Принимаем исполнительную толщину штуцера $s_{ш} := 16 \text{ мм}$.

Расчетная внутренняя и внешняя длины штуцера, участвующая в укреплении[6, стр.6]:

- внешняя длина штуцера

$$l_{1p} := 1.25 \cdot \sqrt{(d_{p1} + 2 \cdot c_e) \cdot (s_{и} - c_e)} = 91.937 \text{ мм} \quad (3.3.23)$$

- внутренняя длина штуцера

$$l_{3p} := 0.5 \cdot \sqrt{(d_{p1} + 2 \cdot c_e) \cdot (s_{и} - c_e)} = 36.775 \text{ мм} \quad (3.3.24)$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} := \sqrt{D_{p.e} \cdot (s_{нк} + s_e - c_e)} = 237.272 \text{ мм} \quad (3.3.25)$$

$$X := l_{1p} \cdot (s_{и} - s_{ш} - c_e) + l_{2p} \cdot s_{нк} + l_{3p} \cdot (s_{и} - c_e - c_e) \quad (3.3.26)$$

Условие укрепления отверстия:

$$Usl_uk := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } X \geq 0.5 \cdot (d_{p1} - d_0) \cdot s_e \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_uk = \text{"условие выполняется"}$$

3.3.5 Расчет фланцевого соединения

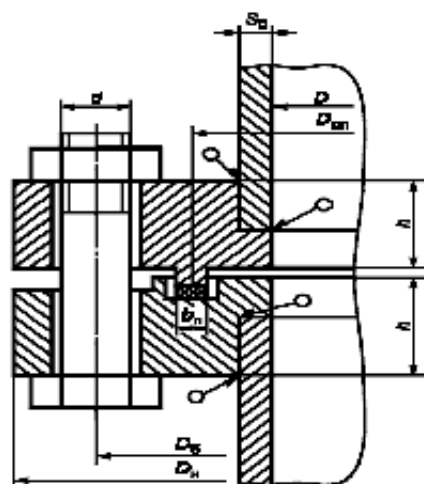


Рис.3.3.5 Плоский фланец

Расчет фланца В

Материал фланца - сталь 16ГС, материал болтов - сталь 35Х

Т.к производство пожаро-взрывоопасное, выбираем фланцевое соединение типа "шип-паз" с плоским фланцем, для обеспечения герметичности фланцевого соединения [8, с. 551]

- Конструктивные размеры фланца.

толщину втулки принимаем равной исполнительной толщине штуцера

$$s_0 := 9 \quad \text{мм}$$

выбираем болты М16, количество $n := 4$ штук

Внутренний диаметр фланца

$$D_{\text{фл.в}} := 80 \quad \text{мм}$$

Диаметр болтовой окружности

$$D_6 := 150 \quad \text{мм}$$

Наружный диаметр фланца

$$D_{\text{фл.н}} := 185 \quad \text{мм}$$

Условия применимости формул [7, стр. 9]:

$$Us1_38 := \begin{cases} Us1_38 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{D_{\text{фл.н}}}{D_{\text{фл.в}}} \leq 5 \\ Us1_38 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_38 = \text{"условие выполняется"}$$

Высота фланца

$$h := 17 \quad \text{мм} \quad h1 := h \quad h2 := h$$

$$Us1_39 := \begin{cases} Us1_39 \leftarrow \text{"условие выполняется"} & \text{if } \frac{2 \cdot h}{D_{\text{фл.н}} - D_{\text{фл.в}}} \geq 0.25 \\ Us1_39 \leftarrow \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1_39 = \text{"условие выполняется"}$$

Наружный диаметр прокладки [7, стр. 11]

$$e := 30 \quad \text{нормативный параметр см. таблицу И2 [7, стр. 30]}$$

$$D_{\text{н.п.}} := D_6 - e = 120 \quad \text{мм} \quad (3.3.27)$$

Средний диаметр прокладки

$b_{\pi} := 12$ ширина плоской металлической прокладки опр. по таблице И2 [7,стр.30], мм

$$D_{с.п.} := D_{н.п.} - b_{\pi} = 108 \quad \text{мм} \quad (3.3.28)$$

выбираем материал прокладки - алюминий А 95 по таблице 7.2 [8, с. 239]

- Нагрузки действующие на фланец

Равнодействующая внутреннего давления [7,стр. 11]

$$Q_d := P_{pe} \cdot \frac{\pi \cdot D_{с.п.}^2}{4} = 1.163 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.3.29)$$

Реакция прокладки [7,стр 11]

b_0 эффективная ширина прокладки

$$b_0 := b_{\pi} = 12 \text{ мм} \quad (3.3.30)$$

$m := 4$ прокладочный коэффициент см. таблицу И2 [7,стр. 30]

$$R_{\pi} := \pi \cdot D_{с.п.} \cdot b_0 \cdot m \cdot P_{pe} = 2.068 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.3.31)$$

Усилие Q_{ϕ} возникающее от температурных деформаций [7,стр. 11]

$\alpha_{\phi 1} := 13.1 \cdot 10^{-6}$ коэффициент линейного расширения материала фланцев, опр. по таблице Г1, $1/^{\circ}\text{C}$ [4,стр.21]

$$\alpha_{\phi 2} := \alpha_{\phi 1}$$

$\alpha_6 := 12.1 \cdot 10^{-6}$ коэффициент линейного расширения материала болтов, опр. по таблице Г1, $1/^{\circ}\text{C}$ [4,стр.21]
 $t := 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$

расчетная температура неизолированных фланцев по таблице 1.37 [7,с. 92]

$$t_{\phi 1} := 0.96 \cdot t = 273.6 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_{\phi 2} := t_{\phi 1} \quad (3.3.32)$$

расчетная температура болтов по таблице В1 [7,стр.21]

$$t_6 := 0.95 \cdot t = 270.75 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.3.31)$$

$E_6 := 1.71 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости для болтов из стали 35Х, МПа

$f_6 := 200.96$ Расчетная площадь поперечного сечения болта, мм^2 [7,стр.25]

Для болтов диаметром равным $d_b := 16$ мм принимаем диаметр отверстия под болты равным $d := 18$ мм по таблице 21.2[8,с. 539]

Жесткость фланцевого соединения γ [7,стр 27]

Плечи действия усилий в болтах (шпильках):

$$b := 0.5 \cdot (D_6 - D_{с.п.}) = 21 \quad \text{мм} \quad (3.3.32)$$

$E_{620} := 2.18 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости для болтов из стали 35Х при 20 °С, МПа

$E_1 := 1.71 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости материала фланца, МПа

$$E_2 := E_1$$

$E1_{20} := 1.99 \cdot 10^5$ модуль продольной упругости материала фланца при 20 °С, МПа

$$E2_{20} := E1_{20}$$

Податливость прокладки y_{Π} вычисляют по формуле

$h_{\Pi} := 2$ высота стандартной прокладки, мм

$K_{обж} := 1$ Коэффициент обжатия прокладки, опр. по таблице И1[7,стр.30]

$E_{\Pi} := 0.02 \cdot 10^5$ условный модуль сжатия прокладки, МПа[7,стр. 30];

$$y_{\Pi} := \frac{h_{\Pi} \cdot K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{с.п.} \cdot b_{\Pi}} = 2.456 \times 10^{-7} \quad \text{мм/Н} \quad (3.3.33)$$

Податливость болтов y_6 вычисляют по формуле

Эффективная длина болта L_6 при определении податливости, мм;

$L_{60} := 40$ расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек, мм;

$$L_6 := L_{60} + 0.28 \cdot d = 45.04 \quad \text{мм} \quad (3.3.34)$$

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{620} \cdot f_6 \cdot n} = 2.57 \times 10^{-7} \quad \text{мм/Н} \quad (3.3.35)$$

Угловую податливость фланца y_{ϕ} при затяжке вычисляют по формуле

$\beta_v := 0.6$ расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров втулки фланца, определяют по рисунку К.2[7,стр. 34];
параметр длины втулки l_0

$$l_0 := \sqrt{D_{\text{фл.в}} \cdot s_0} = 26.833 \text{ мм} \quad (3.3.36)$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру вычисляют по формуле

$$K := \frac{D_{\text{фл.н}}}{D_{\text{фл.в}}} = 2.313 \quad (3.3.37)$$

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.397 \quad (3.3.38)$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 2.705 \quad (3.3.39)$$

$\beta_F := 0.9$ расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров втулки фланца, определяют по рисунку К.2[7,стр.34];

Коэффициент λ вычисляют по формуле

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_v \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot s_0^2} = 1.625 \quad (3.3.40)$$

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_v}{E_{120} \cdot \lambda \cdot s_0^2 \cdot l_0} = 7.766 \times 10^{-10} \text{ мм/Н} \quad (3.3.41)$$

$$\gamma := \frac{1}{y_\Pi + y_6 \cdot \frac{E_{620}}{E_6} + \left(y_\Phi \cdot \frac{E_{120}}{E_1} + y_\Phi \cdot \frac{E_{220}}{E_2} \right) \cdot b^2} = 7.297 \times 10^{-5} \text{ Н/мм} \quad (3.3.42)$$

$$Q_t := \gamma \cdot [\alpha_{\Phi 1} \cdot h_1 \cdot (t_{\Phi 1} - 20) + \alpha_{\Phi 2} \cdot h_2 \cdot (t_{\Phi 2} - 20) - \alpha_6 \cdot (h_1 + h_2) \cdot (t_6 - 20)]$$

$$Q_t = 7.147 \times 10^3 \text{ Н} \quad (3.3.42)$$

Расчетную нагрузку R_{M6} на болты фланцевых соединений вычисляют по формулам:

- при затяжке фланцевого соединения[7,стр. 12]:

расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$F := 0$ внешняя осевая сила

Принимаем внешний изгибающий момент равным $M := 0$.

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев принимается равным[7,стр. 26]:

$$e_{\phi} := 0.5 \cdot (D_{с.п.} - D_{\phi.в} - s_0) = 9.5 \quad \text{мм} \quad (3.3.43)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой α , вычисляют по формуле (Е.11) [7,стр. 27]

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\Pi} - (y_{\phi} \cdot e_{\phi} + y_{\phi} \cdot e_{\phi}) \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\phi} + (y_{\phi} + y_{\phi}) \cdot b^2} = 1.054 \quad (3.3.44)$$

Угловую податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом, вычисляют по формуле(К.15) [7,стр. 33]:

$$y_{\phi.н} := \left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \cdot \frac{D_{\phi}}{D_{\phi.н} \cdot E_{l20} \cdot h^3} = 4.018 \times 10^{-10} \quad (3.3.45)$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом α_M , вычисляют по формуле (Е.13) [7,стр. 27]

$$\alpha_M := \frac{y_{\phi} + 2 \cdot y_{\phi.н} \cdot b \cdot \left(b + e_{\phi} - \frac{e_{\phi}^2}{D_{с.п.}} \right)}{y_{\phi} + y_{\Pi} \cdot \left(\frac{D_{\phi}}{D_{с.п.}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\phi.н} \cdot b^2} = 0.698 \quad (3.3.46)$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{\phi 1} := \max \left[\alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{с.п.}}, \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{с.п.}} - \right]$$

$$P_{61} = 3.294 \times 10^4 \quad \text{Н} \quad (3.3.47)$$

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке, вычисляют по формуле (8) [7, стр. 11],

$q_{\text{обж}} := 60$ удельное давление обжатия прокладки определяем по таблице 1.44 [7, с. 98], МПа:

$$P_{\text{обж}} := 0.5 \cdot \pi \cdot D_{\text{с.п.}} \cdot b_{\text{п}} \cdot q_{\text{обж}} = 1.221 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (3.3.48)$$

Суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм²;

с учетом 4 болтов - получается

$$A_6 := n \cdot f_6 = 803.84 \quad \text{мм}^2 \quad (3.3.49)$$

$\sigma_{d60} := 230$ допускаемое напряжение для болтов из стали 35Х при 20 °С, опр. по таблице А1 [4, стр. 9], МПа

Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов:

$$P_{62} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{d60}) = 1.221 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (3.3.50)$$

$$P_{\text{мб}} := \max(P_{61}, P_{62}) = 1.221 \times 10^5 \quad \text{Н} \quad (3.3.51)$$

- в рабочих условиях [11, с. 12]:

$$P_{\text{рб}} := P_{\text{мб}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_{\text{т}} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{м}}) \cdot |M|}{D_{\text{с.п.}}} = 1.287 \times 10^5 \quad (3.3.52)$$

Проверка прочности болтов и прокладки:

Расчетные напряжения в болтах [7, стр. 12]:

- при затяжке:

$$\sigma_{61} := \frac{P_{\text{мб}}}{A_6} = 151.9 \quad \text{МПа} \quad (3.3.53)$$

- в рабочих условиях:

$$\sigma_{62} := \frac{P_{\text{рб}}}{A_6} = 160.061 \quad \text{МПа} \quad (3.3.54)$$

Условия прочности болтов [7, стр. 12]:

Номинальное допускаемое напряжение для болтов

$\sigma_{dp} := 230$ допускаемое напряжение для болтов из стали 35Х при рабочей температуре, опр. по таблице А1[4,стр. 9] , МПа

- при затяжке:

$$Usl_40 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{61} \leq \sigma_{d60} \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_40 = \text{"условие выполняется"}$$

- в рабочих условиях:

$$Usl_41 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \sigma_{62} \leq \sigma_{dp} \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_41 = \text{"условие выполняется"}$$

Условие прочности прокладки

$$q := \frac{\max(P_{m6}, P_{p6})}{\pi \cdot D_{c.п.} \cdot b_{п}} = 31.601 \quad \text{МПа} \quad (3.3.55)$$

$q_d := 60$ удельное давление обжатия прокладки определяем по таблице И1[7,стр. 30] , МПа:

$$Usl_42 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } q \leq q_d \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_42 = \text{"условие выполняется"}$$

Расчет фланцев на статическую прочность[7,стр 13]

Расчетный изгибающий момент M_M , действующий на фланец при затяжке

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между болтами

$$C_F := \max \left(1, \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m \cdot 0.5}}} \right) = 1.164 \quad (3.3.54)$$

$$M_M := C_F \cdot P_{m6} \cdot b = 2.985 \times 10^6 \quad \text{Н} \quad (3.3.55)$$

Расчетный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{p6} \cdot b + (Q_d + F) \cdot e_\phi, |Q_d + F| \cdot e_\phi] = 3.273 \times 10^6 \text{ Н} \quad (3.3.56)$$

$$\beta_Y := \frac{1}{K-1} \cdot \left(0.69 + 4.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{K^2 - 1} \right) = 1.649 \quad (3.3.57)$$

$$Usl_43 := \begin{cases} "1" & \text{if } s_0 \leq 16 \wedge \frac{D_{\text{фл.в}}}{s_0} \leq 300 \wedge \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D_{\text{фл.в}}} \leq \sigma_{d60} \wedge \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D_{\text{фл.в}}} \leq \sigma_{dp} \\ "2" & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_43 = "1" 1 - проверку допускается не проводить
 2 - проверку необходимо проводить

Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца [7, стр. 16]:

$$\Theta := M_p \cdot y_\phi \cdot \frac{E_{120}}{E_1} = 2.958 \times 10^{-3} \quad \text{рад} \quad (3.3.58)$$

Допустимый угол поворота плоского фланца равен $\Theta_d := 0.006$ рад [7, стр. 16]

$$Usl_44 := \begin{cases} \text{"условие выполняется"} & \text{if } \Theta \leq \Theta_d \\ \text{"условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_44 = "условие выполняется"

Аналогично проведем расчет фланцевых соединений, результаты сведем в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

	А	Б, Д, Е	В, Г
h-высота фланца, мм	44	17	13
b _п -ширина прокладки, мм	12	12	12
d _б -диаметр болтов, мм	30	16	16
n- количество болтов (шпилек)	16	4	4
σ _{б1} -расчетное напряжение в болтах, МПа/допускаемое	96,975/230	110/230	141/230
σ _{б2} -расчетное напряжение в болтах, МПа/допускаемое	128,2/160	109/160	169/220
q _{обж} -удельное давления обжатия прокладки, МПа/допускаемое	39,66/60	30/60	37/60
Θ-угол поворота фланца/допускаемый угол поворота	0,004/0,006	0,005/0,006	0,004/0,006

Продолжение таблицы 3.4

D _{ф1} -диаметр фланца внутренний, мм	500	80	50
D _б -диаметр болтовой окружности, мм	650	150	125
D _{ф2} -диаметр фланца наружный, мм	710	195	160
Материал прокладки	Алюминий А 95	Алюминий А 95	Алюминий А 95

Все фланцы рассчитаны на герметичность и прочность, болты и прокладка проверяются на прочность.

3.3.6 Расчет седлообразных опор.

Реакция опор:

$$Q := \frac{\psi_1 \cdot G_{ob}}{3} = 0.085 \text{ МН} \quad (3.3.59)$$

Принимаем опору ОГ-II-2000-30 МН 5132-63

$h_1 := 0.2$ высота ребра опоры, м

$h_2 := 0.84$ высота ребра опоры, м

По графикам, представленным в [8, с. 296], подбираем коэффициенты f_1 , f_2 , f_3 , f_4 :

$$f_1 := 0.24 \quad f_2 := 1.07 \quad f_3 := 0.03 \quad f_4 := 0.94$$

Изгибающий момент в середине аппарата:

$$M_1 := Q \cdot (f_1 \cdot L_{\text{ц}} - a_d) = 5.257 \times 10^{-3} \text{ МН*м} \quad (3.3.60)$$

Изгибающий момент в сечении над опорой:

$$M_2 := \frac{0.125 \cdot G_{ob} \cdot l_e^2}{\left(L_{\text{ц}} + \frac{4 \cdot H_d}{3} \right)} = 0.073 \quad (3.3.61)$$

Изгибающий момент в сечении над приварной седловой опорой в случае ее скольжения по опорной плите:

$$M_{2c} := M_2 + 0.08 \cdot Q \cdot (h_1 + h_2) = 0.08 \text{ МН*м} \quad (3.3.62)$$

Перерезывающая сила:

$$Q_{\text{п}} := f_4 \cdot Q = 0.08 \text{ МН} \quad (3.3.63)$$

Прочность стенки от совместного действия внутреннего давления и изгиба от реакции опор проверяется в двух сечениях:

посреди пролета:

$$A_{11} := \frac{P_e \cdot D_e}{4 \cdot (s_e - c_e)} = 64.92 \quad (3.3.64)$$

$$B_{11} := \frac{|M_1|}{D_e^2 \cdot (s_e - c_e)} = 1.026 \times 10^{-10} \quad (3.3.65)$$

Так как $\frac{a}{D} = 0.5 > 0.25$ то

$$C_{11} := \frac{Q_{\pi}}{D_e \cdot (s_e - c_e)} = 3.443 \times 10^{-6} \quad (3.3.68)$$

Проверка14 := $\begin{cases} \text{"Прочность стенки выполняется"} & \text{if } (2 \cdot K_7 \cdot C_{11} < 0.8 \cdot \sigma d) \\ \text{"Прочность стенки НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Проверка14 = "Прочность стенки выполняется"

Условия прочности для данной опоры выполняются, следовательно опора подобрана правильно.

Prov_a := $\begin{cases} \text{"Прочность стенки выполняется"} & \text{if } A_{11} + 1.275 \cdot B_{11} < \phi \cdot \sigma d \\ \text{"Прочность стенки НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Prov_a = "Прочность стенки выполняется"

над опорой

$K_6 := 0.14$ коэффициент для обечаек, не укрепленных кольцами жесткости, [8, с299].

$$A_{12} := \frac{P_e \cdot D_e}{4 \cdot (s_e - c_e)} = 64.92 \quad (3.3.66)$$

$$B_{12} := \frac{|M_2|}{D_e^2 \cdot (s_e - c_e)} = 1.417 \times 10^{-9} \quad (3.3.67)$$

Prov_b := $\begin{cases} \text{"Прочность стенки выполняется"} & \text{if } A_{12} + 1.275 \cdot B_{12} < \phi \cdot \sigma d \\ \text{"Прочность стенки НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Prov_b = "Прочность стенки выполняется"

Напряжение среза в опорном сечении обечайки при установке аппарата на трех опорах определяют следующим образом

$K_7 := 0.8$ коэффициент, [8, с. 295].

4 Механо-технологический раздел

В том случае, когда подъем и установка в проектное положение различного технологического оборудования и конструкций с помощью монтажных кранов невозможны или экономически не выгодно, используются различные такелажные средства. При этом используется целый ряд исходных данных, таких как габарит, масса и конфигурация монтируемого оборудования, способ его строповки, высотная отметка фундамента или постамент, характеристика монтажной площадки, наличие грузоподъемных средств, их характеристика и возможность размещения в рабочем положении на данном объекте.

Метод монтажа и грузоподъемные средства выбираются для каждого конкретного случая монтажа с учетом этих исходных данных и при условии соблюдения технической возможности и экономической целесообразности их использования. Например, вертикальное оборудование: аппараты колонного и башенного типа, высотные металлоконструкции, металлические дымовые и вентиляционные трубы, мачты могут устанавливаться как в полностью собранном виде методами скольжения и поворота вокруг шарнира, так и укрупненными блоками способами наращивания или подращивания. В данном дипломном проекте необходимо смонтировать ректификационную колонну высотой $H_k := 23$ м, диаметром $D := 3.2$ м, массой при монтаже $G_A := 61.4$ т, на фундамент высотой $h_\phi := 0.5$ м методом поворота вокруг шарнира.

Подъем и установка монтируемого оборудования могут выполняться такими грузоподъемными такелажными средствами, как одиночные или парные монтажные мачты, порталы и шевры. Для дипломного проекта используем парные мачты.

Мачты устанавливаются за поворотным шарниром (рис.4.1). В этом случае оборудование поднимается до нейтрального положения в один этап и далее с помощью тормозной оттяжки плавно опускается на фундамент в проектное вертикальное положение под действием собственной массы. Данная схема представлена на рис.4.1.

4.1 Подъем оборудования методом поворота вокруг шарнира монтажными мачтами.

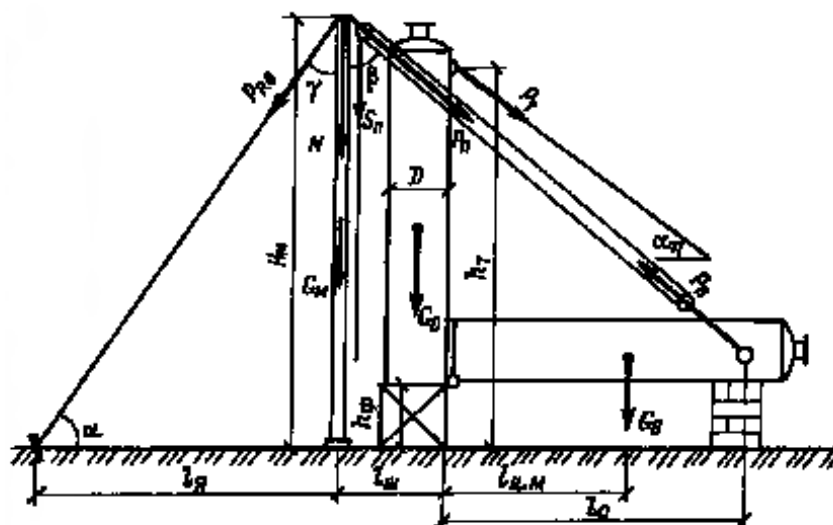


Рис.4.1 Подъем оборудования методом поворота вокруг шарнира

Этот способ обычно применяется для подъема аппаратов колонного типа, металлических дымовых труб и высотных металлоконструкций, располагающихся на невысоких фундаментах (до 2 м), в связи со сложностью установки поворотных шарниров и соединения с ними поднимаемого оборудования на высоте. Он обладает следующими преимуществами:

- максимальные нагрузки возникают в такелажной оснастке в начальный момент подъема, что повышает безопасность такелажных работ;
- масса поднимаемого оборудования может значительно превышать грузоподъемность такелажных средств.

4.1.1 Расчет такелажной оснастки

Определяют необходимую высоту мачты (м), зная расстояние от центра массы оборудования до его основания $l_{цм} := 11.5$ м:

$$H_M := 2.4 \cdot l_{цм} = 27.6 \text{ м} \quad (4.1)$$

$l_c := 20$ м расстояние от места оборудования до его основания

$l_{ш} := 5$ м расстояние от оси шарнира до мачты

Угол подъема между мачтой и подъемным полиспастом:

$$\beta := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{l_c + l_{ш}}{H_M - h_{\phi} - 0.5D}\right) \cdot 180}{\pi} = 44.433^\circ \quad (4.2)$$

Находят усилие в полиспасте (кН) в начальный момент подъема при угле наклона продольной оси оборудования к горизонту $\varphi=0^\circ$:

-при парных мачтах:

$$P_{\Pi} := \frac{5 \cdot G_A \cdot l_{цм}}{(H_M - h_{\phi}) \cdot \sin(\beta) - l_{ш} \cdot \cos(\beta)} = 483.834 \quad \text{кН} \quad (4.3)$$

По усилию P_{Π} рассчитываем подъемные полиспасты.

Находим усилие (кН), действующее на неподвижный блок полиспаста:

$$P_H := 1.15 \cdot P_{\Pi} = 556.409 \quad \text{кН} \quad (4.4)$$

1,15 – величина коэффициента, учитывающая дополнительную нагрузку от усилия в сбегавшей ветви полиспаста и масс подвижного блока и рабочих нитей полиспаста, зависящая от грузоподъемности полиспаста (от 30 до 50 т)

Подбираем оба блока по наибольшему усилию P_H со следующими характеристиками (БМ-75): грузоподъемность $gr := 75$ т, количество роликов – 7 шт, диаметр роликов $d_{rol} := 0.475$ м, диаметр каната $d_{kan} := 0.026$ м, длина полиспаста в стянутом виде – $l_{pct} := 3.1$ м, масса блока – 1667 кг. Таким образом в полиспасте, состоящем из двух блоков, общее количество роликов $m_n := 7 \cdot 2 = 14$ шт, масса

$$G_b := 2 \cdot 1667 = 3.334 \times 10^3 \quad \text{кг.} \quad (4.5)$$

$\eta_b := 0.722$ – коэффициент полезного действия полиспаста для общего количества роликов 16 шт (14 полиспастных и 2 отводных) для блоков с роликами на подшипниках качения.

Усилие в сбегающей ветви:

$$S_{\Pi} := \frac{P_{\Pi}}{(m_n \cdot \eta_b)} = 47.866 \text{ кН} \quad (4.6)$$

$$T_{\text{к}} \frac{d_{\text{rol}}}{d_{\text{kan}}} = 18.269, \text{ то выбираем } k_3 := 4$$

Разрывное усилие в сбегающей ветви полиспаста:

$$R_H := S_{\Pi} \cdot k_3 = 191.466 \text{ кН} \quad (4.7)$$

По таблице ГОСТа выбираем для оснастки полиспаста канат типа ЛК-РО конструкции 6*36(1+7+7/7+14)+1 о.с. (ГОСТ 7668-80) с характеристиками:

временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{кр}} := 1764 \text{ МПа}$, разрывное усилие каната $Q_{\text{kan}} := 215 \text{ кН}$, диаметр каната $d_k := 0.02 \text{ м}$, масса 1000 м каната $m_{\text{k1000m}} := 1520 \text{ кг}$.

Подсчитываем длину каната для оснастки полиспаста, задаваясь длиной сбегающей ветви $l_{\text{sbv}} := 50 \text{ м}$ и считая длину полиспаста в растянутом виде равной высоте подъема аппарата $l_{\text{пр}} := 25 \text{ м}$, расчетный запас каната $l_{\text{зап.к}} := 10 \text{ м}$:

$$L_{\text{kan}} := m_n \cdot (l_{\text{sbv}} + \pi \cdot d_{\text{rol}}) + l_{\text{пр}} + l_{\text{зап.к}} = 755.892 \text{ м} \quad (4.8)$$

Находим суммарную массу полиспаста:

$$G_{\Pi} := \frac{G_b}{1000} + \frac{L_{\text{kan}} \cdot m_{\text{k1000m}}}{10^6} = 4.483 \text{ т} \quad (4.9)$$

Определяем усилие на канат, закрепляющий неподвижный блок полиспаста:

$$P_6 := 5G_A + 10 \cdot G_{\Pi} + S_{\Pi} = 399.696 \text{ кН} \quad (4.10)$$

Приняв канат, для крепления верхнего блока полиспаста из 6 ветвей, и определив коэффициент запаса прочности $k_{3c} := 6$, как для стропа, подсчитываем разрывное усилие в каждой ветви крепящего каната:

$$R_k := \frac{P_6 \cdot k_{3c}}{6} = 399.696 \text{ кН} \quad (4.11)$$

По таблице ГОСТа подбираем канат типа ТЛК-О конструкции 6*37(1+6+15+15)+1о.с. (ГОСТ 3079-80) с характеристиками: временное сопротивление разрыву $\sigma_{kr1} := 1764$ МПа, разрывное усилие каната $Q_{kan1} := 441.5$ кН, диаметр каната $d_{k1} := 0.029$ м, масса 1000 м каната $m_{k1000m1} := 3015$ кг.

По усилию в сбегающей ветви полиспаста S_n подбираем электролебедку типа СЛ5-78 с тяговым усилием 50 кН и канатоемкостью 1200 м.

Угол между мачтой и рабочей вантой:

$$l_{я} := 5 \cdot l_{цм} = 57.5 \text{ м} \quad (4.12)$$

$$\gamma_1 := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{l_{я}}{H_M}\right) \cdot 180}{\pi} = 64.359^\circ$$

Усилие в задней (рабочей) ванте:

$$P_{p.v} := \frac{P_n \cdot \sin(\beta)}{\sin(\gamma_1)} = 210.842 \text{ кН} \quad (4.13)$$

По усилию $P_{p.v}$ рассчитывают канат для задней ванты и якорь для нее

Расчет каната коэффициент запаса прочности каната $k_{зкан} := 4$:

$$R_{p.v} := P_{p.v} \cdot k_{зкан} = 843.368 \text{ кН} \quad (4.14)$$

По таблице ГОСТа подбираем канат типа ТЛК-О конструкции 6*37(1+6+15+15)+1о.с. (ГОСТ 3079-80) с характеристиками: временное сопротивление разрыву $\sigma_{kr2} := 1764$ МПа, разрывное усилие каната $Q_{kan2} := 980$ кН, диаметр каната $d_{k2} := 0.043$ м, масса 1000 м каната $m_{k1000m2} := 6675$ кг.

4.1.2 Расчет якоря:

Т.к вес усилия для поднятия аппарата превышают 1000 кН, будем применять усиленные заглубленные якоря.

-усилие в сбегающей ветви полиспаста

$$N_{sb} := P_{p.v} = 210.842 \quad \text{кН} \quad (4.15)$$

- угол между рабочей вантой и горизонтом:

$$\alpha := \frac{\text{atan}\left(\frac{H_M}{l_{\text{я}}}\right) \cdot 180}{\pi} = 25.641^\circ \quad (4.16)$$

-горизонтальная составляющая усилия N:

$$N_1 := N_{sb} \cdot \cos(\alpha) = 184.19 \quad \text{кН} \quad (4.17)$$

-вертикальная составляющая усилия N:

$$N_2 := N_{sb} \cdot \sin(\alpha) = 102.609 \quad \text{кН} \quad (4.18)$$

- коэффициент трения для чернозема плотного сырого $f := 0.45$

Масса земли котлована:

- ширина котлована $a_k := 4 \text{ м}$

-высота котлована $h_{\text{kotl}} := 3 \text{ м}$

- масса одного м^3 земли $\gamma_3 := 1.5 \text{ т}$

$$G_3 := a_k \cdot h_{\text{kotl}} \cdot \gamma_3 = 18 \quad \text{т} \quad (4.19)$$

Коэффициент устойчивости якоря $k_{y.o} := 2$

Сила трения заглубленного блока:

$$T_t := N_1 \cdot f = 82.885 \quad \text{кН} \quad (4.20)$$

Проверяем якорь на отрыв от грунта:

$$\text{Otr} := \begin{cases} \text{"Якорь НЕ оторвется"} & \text{if } 10G_3 + T_t > k_{y.o} \cdot N_2 \\ \text{"Якорь оторвется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Otr = "Якорь НЕ оторвется"

Удельное давление грани анкера на стенку котлована ($c_{я} := 1$):

- коэффициент уменьшения допускаемого давления $\eta_{36} := 0.25$;

- высота заглубленного щита $h_{36} := 3$ м;

- длина анкера $l_{36} := 5$ м

$$\sigma_{\Gamma} := \frac{N_1 \cdot 1000}{l_{36} \cdot h_{36} \cdot \eta_{36}} = 4.912 \times 10^4 \text{ Па} \quad (4.21)$$

- допустимое удельное давление для слежавшегося грунта $\sigma_{d\Gamma} := 0.5$ МПа

Условие выполняется, $\sigma_{\Gamma} < \sigma_{d\Gamma}$

Выбираем якорь с двумя тягами.

$$M_{я} := \frac{N_{sb} \cdot (c_{я} \cdot 100)^2}{2 \cdot l_{36} \cdot 100} = 2.108 \times 10^3 \text{ кН*см} \quad (4.22)$$

Требуемый момент сопротивления сечения бревен:

$$W_{tr} := \frac{M_{я}}{(0.785 \cdot 0.1 \cdot 13)} = 2.066 \times 10^3 \text{ см}^3 \quad (4.23)$$

Диаметр бревен : $n_6 := 3$ количество бревен

$$d_6 := \sqrt[3]{\frac{(10 \cdot W_{tr})}{n_6}} = 19.026 \text{ см} \quad (4.24)$$

Расчет анкера на прочность:

- суммарная площадь сечения бревен

$$F_6 := 0.785 \cdot d_6^2 \cdot n_6 = 852.458 \text{ см}^2 \quad (4.25)$$

$$Usl_ank := \begin{cases} \text{"Анкер выдержит"} & \text{if } \frac{N_{sb}}{F_6} + \frac{M_{я}}{W_{tr}} \leq 0.1 \cdot 13 \\ \text{"Анкер не выдержит"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_ank = \text{"Анкер выдержит"}$$

$$m_{1mt} := 188.57 \text{ кг/м} \quad \text{масса 1 метра мачты}$$

$$k_{\Pi} := 1.1$$

$$k_d := 1.1 \quad \text{коэффициенты}$$

$$n_{н.в} := 2 \quad \text{количество не рабочих вант}$$

$$P_{н.в} := 25 \quad \text{усилие в не рабочей ванте}$$

$$\alpha_{\alpha} := 20 \quad \text{угол между не рабочей вантой и горизонтом}$$

Определяют суммарное сжимающее усилие, действующее по оси мачты:

- масса мачты

$$G_m := H_M \cdot \frac{m_{1mt}}{1000} = 5.205 \text{ т} \quad (4.26)$$

$$C_2 := P_{\Pi} \cdot k_{\Pi} \cdot k_d \cdot \cos(\beta) + P_{р.в} \cdot \cos(\gamma_1) \quad (4.27)$$

$$N_M := C_2 + 10G_m \cdot k_{\Pi} + 10 \cdot G_{\Pi} \cdot k_{\Pi} + n_{н.в} \cdot P_{н.в} \cdot \sin(\alpha) + S_{\Pi} \quad (4.28)$$

$$N_M = 715.009 \quad \text{кН}$$

4.1.3 Расчет мачты.

Выбираем трубчатую мачту.

Минимальная высота мачты: $\phi_0 := 0.4$ коэффициент продольного изгиба

$$h_{min} := h_{\phi} + l_c + 0.5 = 21 \quad (4.29)$$

Требуемая площадь поперечного сечения трубы:

$$F_{tr} := \frac{N_M}{\phi_0 \cdot 0.85 \cdot 0.1 \cdot 210} = 100.141 \text{ см}^2 \quad (4.30)$$

Гибкость мачты:

- радиуса инерции $r_T := 12.8$

$$\lambda_m := \frac{h_{min} \cdot 100}{r_T} = 164.063 \quad (4.31)$$

$$\lambda_d = 180$$

$$\lambda_m < \lambda_d \quad \text{условие выполняется}$$

$$m_{10} := 0.85 \quad \text{коэффициент условия работы}$$

$$\phi_T := 0.278 \quad \text{коэффициент продольного изгиба}$$

$$h_t := 16 \text{ м}$$

$$\alpha_t := 150$$

$$R_s := 210 \quad \text{расчетное сопротивление МПа}$$

$$F_{tr1} := 160 \text{ см}^2 \quad \text{Поперечное сечение трубы}$$

Условие на устойчивость трубы:

$$Ust_t := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \frac{N_M \cdot 10}{F_{tr1} \cdot \phi_T} \leq m_{10} \cdot R_s \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ust_t = \text{"Условие выполняется"}$$

Расчет дотягивающей системы сводится к определению усилия в ней

$$P_t := 10G_A \cdot 0.6 \cdot \frac{D}{h_t \cdot \cos(\alpha_t)} = 105.37 \text{ кН} \quad (4.32)$$

По усилию P_t подбираем канат и лебедку.

Канат

По таблице ГОСТа подбираем канат типа ТЛК-О конструкции 6*37(1+6+15+15)+1о.с. (ГОСТ 3079-80) с характеристиками: временное сопротивление разрыву $\sigma_{kr3} := 1764$ МПа, разрывное усилие каната $Q_{kan3} := 124$ кН, диаметр каната $d_{k3} := 0.0155$ м, масса 1000 м каната $m_{k1000m3} := 136$ кг.

Лебедка:

По усилию в канате P_t подбираем электролебедку типа ЛМ-12.5 с тяговым усилием 125 кН и канатоемкостью 800 м.

Для подъема колонны подобрана мачта, якорь, полиспаст, лебедка.

5. Автоматизация производства

Описание технологической схемы установки вакуумной перегонки мазута.

Сырьё (мазут) поступает на установку из резервуаров топливно – сырьевого парка завода.

Сырьё насосом Н – 1/1 прокачивается через фильтры Ф – 1/1,2 и поступает в трубное пространство теплообменников:

Т – 2/1, где нагревается за счет фракции тепла до 350°C;

Т – 1/1, где нагревается за счет тепло фракции 350 - 495°C;

Т – 2/2, где нагревается за счет тепла фракции 400 - 540°C;

Т – 4/1,2, где нагревается за счет тепла фракции 500°C и выше.

После теплообменников поступает в нагревательную двухсекционную печь П – 1/1,2.

Расход сырья на установку контролируется и регистрируется приборами поз.1.

Температура сырья перед теплообменником Т – 1/1 контролируется прибором поз. 2.

Температура на выходе их Т – 4/1,2 контролируется и регистрируется прибором поз. 3.

Давление сырья на входе в печь П – 1/1,2 по каждому потоку регистрируется и контролируется приборами поз.28,29.

При минимальном расходе сырья в печь, по каждому потоку , срабатывает сигнализация и блокировка, прекращающая подачу жидкого и газообразного топлива к форсункам печи, закрываются задвижки на линиях подачи топлива и выводятся газы разложения на факел.

Для увеличения скорости потоков в змеевиках печи и увеличении доли отгона на выходе из печи предусмотрена подача насыщенного водяного пара (НВП).

Расход НВП в змеевик печи П – 1/1,2 регистрируется и регулируется прибором поз.

Температура сырья на входе в печь П – 1/1,2 контролируется прибором, поз.13.

Температура сырья на выходе из печи П – 1/1,2 контролируется, регистрируется и регулируется приборами, поз.4,5.

При достижении максимальной температуры сырья по потокам на выходе из печи срабатывает сигнализация.

Сырье нагретое в печи П-1/1,2 до температуры 410°C, двумя потоками поступает в вакуумную колонну К – 1 под блок 1 насадки.

Снизу колонны К – 1 под 1 блок насадки подается перегретый водяной пар из пароперегревателя печи П1/1,2 с температурой 400°C.

Температура перегретого водяного пара на выходе из печи П - 1/1,2 контролируется прибором, поз.25

Температура низа колонны К – 1 контролируется, регистрируется и регулируется прибором, поз.26 с сигнализацией по нижнему и верхнему пределу.

Уровень К – 1 контролируется, регистрируется и регулируется прибором, поз.21 с сигнализацией по нижнему и верхнему пределу. Регулирующий клапан расположен на линии откачки гудрона с установки.

Давление верха колонны К – 1 контролируется, регистрируется прибором, поз.12 с сигнализацией по верхнему и нижнему пределу.

Температура верха колонны контролируется, регистрируется и регулируется прибором поз.14. Регулирующий клапан установлен на линии подачи верхнего циркуляционного орошения (ВЦО) в колонну К – 1.

Фракция до 350°C выводится с 8 блока насадки вакуумной колонны К – 1 в емкость Е – 4, из Е – 4 поступает на прием насоса Н – 6/1. На выходе из насоса, поток делится на два потока:

- Первый поток проходит теплообменник Т – 2/1, воздушный холодильник ХВ – 9 и подается на 10 блок насадки вакуумной колонны К – 1 в качестве ВЦО.

- Второй поток после выкида насоса Н – 6/1 на 8 блок насадки вакуумной колонны К – 1 в качестве горячего орошения для регулирования температуры кипения фракции до 350°C.

Уровень в емкости Е – 4 контролируется, регистрируется, регулируется прибором, поз. 15 с сигнализацией по минимальному и максимальному значению.

Температура вывода фракции 350°C из колонны К – 1 и емкости Е – 4 контролируется прибором поз.16.

Расход холодного ВЦО в колонну К – 1 регистрируется и регулируется прибором по температуре верха колонны К – 1. Регулирующий клапан расположен на линии подачи ВЦО в колонну К – 1.

Расход фракции до 350°C в колонну К – 1 в качестве горячего орошения регистрируется и регулируется прибором, поз. 8 по температуре паров под блоков вводе фракции до 350°C из К – 1.

Легкий вакуумный газойль (ЛВГ), фракция 350 - 495°C выводится с насадки блока 5 колонны К – 1 в емкость Е – 3, из емкости поступает на прием насоса Н – 5/1, прокачивается через сырьевой теплообменник Т – 1/1, поступает в воздушный холодильник ХВ – 6/2 и подается на 6 блок насадки в К – 1 в качестве холодного промежуточного циркуляционного орошения (ПЦО). Балансовый избыток фракции 350 - 495°C после охлаждения в ХВ – 6/2 выводится с установки.

Уровень в емкости Е – 3 контролируется, регистрируется, регулируется прибором, поз. 17 с сигнализацией по минимальному и максимальному значению.

Расход холодного ПЦО в К – 1 регистрируется и регулируется прибором, поз.18.

Расход ЛВГ с установки контролируется, регистрируется и регулируется прибором, поз.19

Фракция 400 - 540°C - тяжелый вакуумный газойль (ТВГ) выводится с блока насадки вакуумной колонны К – 1 в емкость Е – 9, поступает на прием насоса Н – 4/1, после насоса фракция делится на два потока:

- Первый поток ТВГ пройдя теплообменник Т – 2/2 подается на 4 блок насадки колонны К – 1 в качестве холодного нижнего циркуляционного орошения (НЦО). Балансовый избыток ТВГ выводится через воздушный холодильник ХВ – 7.

- Второй поток подается после насоса Н – 4/1 на 3 блок насадки колонны К – 1 в качестве горячего орошения для регулирования температуры конца кипения ТВГ.

Уровень в емкости Е – 9 контролируется, регистрируется, регулируется прибором, поз. 10 с сигнализацией по минимальному и максимальному значению.

Фракция 500 - 550°C - затемненный вакуумный газойль (СЛОП) выводится из 1 блока насадки колонны К – 1 на прием насоса Н – 7/1 и после делится на два потока:

- Первый поток СЛОП подается в теплообменник Т – 5, где охлаждается маслом АМТ – 300 и выводится с установки, охлаждаясь в воздушном холодильнике.

- Второй поток СЛОП подается на 1 блок насадки колонны К – 1 для промывки паров газойлевых фракций.

Расход СЛОП с установки контролируется, регистрируется, регулируется прибором, поз. 20.

Гудрон с низа вакуумной колонны К – 1 поступает на прием насоса Н – 2/1, делится на два потока:

- Первый поток проходя через сдвоенные теплообменники Т – 4/1,2 поступает на воздушный холодильник ХВ – 5/1, охлаждается и выводится с установки.

- Второй поток подается на окисление в буферную емкость Е – 6 битумного блока.

Температура на выходе из колонны К – 1 контролируется прибором, поз.22.

Температура гудрона после каждого теплообменника Т – 4/1,2, контролируется, регулируется и регистрируется приборами, поз.23, 24.

5.1 Необходимость процесса автоматизации

Химическое производство является сложным технологическим процессом, где требуется контроль таких параметров, как давление, температура, расход, уровень, концентрация веществ и т.п.

Для того, чтобы облегчить процесс производства, а так же улучшить качество производимой продукции, снизить себестоимость, уменьшить неблагоприятное воздействие на окружающую среду, применяется автоматическое управление технологическим процессом.

Автоматический контроль процесса на производстве является неотъемлемой частью ведения технологии. При помощи средств автоматизации появляется возможность автоматического управления(с использованием микропроцессорной техники), а именно:

- Автоматический пуск и остановка химического производства;
- Контроль технологических параметров;
- Прогнозирование ведения технологического процесса;
- Поддержание заданного технологического режима;
- Повышение качества производимой продукции;
- Повышение производительности технологического оборудования и увеличение объема производства;
- Безопасность ведения технологического процесса;
- Снижение затрат сырья, энергии и материалов на производство.
- Предупреждение загрязнения окружающей среды.

Таблица 5.1 – Контрольно – измерительные приборы

Стадии процесса, показатели режима	Единицы измерения	Нормы и технические показатели	Методы испытания и средства контроля
Расход мазута на установку	м ³ /ч	80 – 180	Метран – 360 Класс точности: ±1
Температура мазута на выходе из печи	°С	Не выше 140	Rossemount 648 Класс точности: ±1
Расход мазута на выходе из печи	м ³ /ч	40 – 90	Метран – 360 Класс точности: ±1
Расход вакуумного газойля с установки	м ³ /ч	0 – 25	Метран – 360 Класс точности: ±1
Температура вакуумного газойля с установки	°С	300	Rossemount 648 Класс точности: ±1
Температура мазута на выходе из теплообменника	°С	300	Rossemount 648 Класс точности: ±1
Давление верха колонны	мм. рт. ст.	Не более 100	Rossemount 3051S Класс точности: ±1
Уровень в Е - 9	%	20 – 80	Rossemount 5600 Класс точности: ±1
Расход вакуумного газойля из Е - 9	м ³ /ч	0 - 20	Метран – 360 Класс точности: ±1

Таблица 5.2 – Условное обозначение приборов для измерения параметров

Позиция	Параметр измерения
2,3,4,5,13,14,16,22,23,24,25,26	Температура
12,27,28	Давление
10,15,17,21	Уровень
1,6,7,8,9,11,18,19,20	Расход

6. Социальная ответственность

Перегонку мазута осуществляют при низком давлении в вакуумной установке АВТ. Вакуум создается конденсаторами при помощи конденсации водяных паров в вакуумсоздающей системе и отводя несконденсированные части нефтяных паров и газов при помощи паровых эжекторов. Вакуум при перегонке мазута предотвращает его разложение и за счет этого достигается определенное качество дистиллята.

Вакуумная перегонка мазут является высокотемпературным процессом. Температура процесса выкипания составляет 350 - 500°C и оборудование, непосредственно работающее в данном процессе имеет высокие температуры.

Установка для вакуумной перегонки мазута является частью технологического процесса получения мазута. Установка включается в себя массообменные и теплообменные аппараты, а так же емкостное оборудование.

Аппараты находятся на открытых площадках. Наблюдение за процессом ведется операторами при помощи центрального пульта управления (ЦПУ), а так же с периодическим обходом оборудования.

6.1 Производственная безопасность

Таблица 6.1 – Опасные и вредные факторы при вакуумной перегонке мазута по ГОСТ 12.0.003-74

Источник фактора, наименование вида работы	Факторы (по ГОСТ 12.0.003 – 74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Полевые работы: 1.Очистка внутренней полости приемной емкости для мазута;	1. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 2. Загазованность рабочей зоны.	1. Проникания в организм человека через: органы дыхания; желудочно - кишечный тракт; кожные покровы и слизистые оболочки.	Параметры безопасности труда устанавливаются ГОСТ 12.0.001 – 82.[18]
2.Арматурный блок	1. Повышен уровень шума; .	1. Электрическое напряжение	Параметры определения шумовых характеристик устанавливаются ГОСТ 12.1.003 – 83.[10] Параметры электрического напряжения устанавливаются ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. [6]
3. Печь		1. Опасность термических ожогов. 2. Опасность взрыва и пожара.	Опасность термических ожогов устанавливаются по ГОСТ Р 54431-2011. Опасность взрыва и пожара по ГОСТ 12.1.010–76 ССБТ

6.1.1 Загазованность рабочей зоны

В соответствии с ГОСТ 12.1.044 мазут представляет собой горючую жидкость с температурой самовоспламенения не ниже 350 °С, температурными пределами распространения пламени 91 °С - 155 °С. Взрывоопасная концентрация паров мазута в смеси с воздухом составляет: нижний предел - 1,4%, верхний - 8%.

Мазут является малоопасным продуктом и по степени воздействия на организм человека относится к 4-му классу опасности в соответствии ГОСТ 12.1.007 [14].

Класс опасности вредных веществ устанавливают в зависимости от норм и показателей, указанных в таблице 6.2 [15].

Таблица 6. 2 – Класс опасности вредных веществ по ГОСТ 12.1.007 – 76

Наименование показателей	Норма для класса определенного опасности			
	1	2	3	4
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1 - 1	1,1 - 10	Более 10
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15 – 150	151 - 5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100 - 500	501 - 2500	Более 2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500 - 5000	5001 - 500000	Более 50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	300 - 30	29 - 3	Менее 3
Зона острого действия	Менее 6	6 - 18	18,1 - 54	Более 54
Зона хронического действия	Более 10	10 - 5	4,9 – 2,5	Менее 2,5

Воздействие на организм человека

Мазут является малоопасным продуктом и по степени воздействия на организм человека относится к 4-му классу опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.007.

В составе мазута большое разнообразие вредных веществ, таких как: серо- и азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, тяжелые металлы.

Мазут раздражает слизистую оболочку и кожные покровы человека, из-за чего возникают кожные заболевания. Продолжительная работа с мазутом повышает риск заболевания органов дыхания у человека [14].

Предельно допустимая концентрация паров углеводородов мазута в воздухе рабочей зоны — 300 мг/м³ в соответствии с ГОСТ 12.1.005.

Предлагаемые средства защиты

При контакте с мазутом применяют средства индивидуальной защиты по ГОСТ 12.4.011, ГОСТ 12.4.103, ГОСТ 12.4.111, ГОСТ 12.4.112.

Для индивидуальной защиты в местах, где концентрация паров мазута, превышает ПДК, применяют противогазы марки БКФ, шланговые противогазы марки ПШ-1 или аналогичные в соответствии с ГОСТ 12.4.034.

Для защиты кожи рук применяют защитные рукавицы, мази и пасты по ГОСТ 12.4.068.

Для защиты глаз использовать очки типа ЭП2-80.

Для коллективной защиты от воздействия паров мазута в помещениях, где проводятся работы, должны быть снабжены вытяжной вентиляцией с механическим побуждением, отвечающей требованиям ГОСТ 12.4.021. В местах превышающих ПДК веществ в воздухе рабочей зоны должны быть оборудованы местные вытяжные устройства [16].

6.1.2 Недостаточное производственное освещение

Для нормализации визуальной обстановки в рабочих помещениях представляют собой осветительные проемы, фонари, прожекторы, защитные устройства [17].

Таблица 6.3 – Нормы освещенности рабочих мест по ГОСТ Р 55710 - 2013

Наименование помещений, зрительной работы и вида деятельности	$E_{экс}$, лк	U_0 , не менее	R , не более	R_a , не менее	K_p , %, не более
Производственные процессы с дистанционным управлением.	50	0,4	-	20	-
Процессы с частичным применением ручного труда.	150		28	40	
Постоянная ручная работа на производственных установках.	300	0,6	22	80	20
Лаборатории	500		16		10

6.1.3 Повышенный уровень шума на производстве

Основным источником шума является колонна, насосная, операторская, арматурный блок. Нормирующими характеристиками постоянного шума на рабочих местах являются уровни звуковых давлений в октановых полосах 78 дБА со среднегеометрическими частотами 500 Гц. А нормирующий уровень 80 дБА. Следовательно уровень шума соответствует ГОСТ 12.1.003 – 83 [18].

Основные меры предосторожности по борьбе с шумом следующие:

- исключить из технологического процесса вибро-акустику активного оборудования;
- размещения оборудования, являющимся основным источником шума, в отдельных помещениях;

- производственный цех с повышенным уровнем шума расположить в отделении от малошумных помещений;
- применять индивидуальные средства защиты от шума и вибрации, так же проводить санитарно-профилактические мероприятия для рабочих, работающих на вибро-акустически активном оборудовании [19].

6.1.4 Электробезопасность

Источниками электрической опасности являются:

- оголенные части проводов или отсутствие изоляции;
- отсутствие заземления;
- замыкания;
- статическое напряжение.

От токоведущих частей электроустановок человека защищают изолирующие защитные средства. Они подразделяются на основные и дополнительные. Основными изолирующими средствами защиты разрешается прикасаться к токоведущим частям электроустановок, имеющих рабочее напряжение до 1000 Вольт. В первую очередь, к таким защитным средствам относится слесарно-монтажный инструмент, снабженный изолирующими рукоятками – плоскогубцы, ножи, отвертки.

Электробезопасность работающего персонала и посторонних лиц должна обеспечиваться выполнением следующими мерами:

1. Соблюдение соответствующего расстояния до оголенных токоведущих частей;
2. Изолировать токоведущие части;
3. Применение блокировочных устройств для аппаратов и ограждений для предотвращения доступа к токоведущим частям;
4. Использование предупреждающей сигнализации, надписей;
5. Применение устройств для понижения напряжения электрических и магнитных полей до допустимых пределов;
6. Применение средств защиты и приспособлений.

Все помещения должны соответствовать требованиям электробезопасности при работе с электроустановками по ГОСТ 12.1.019-79.

1. Электрооборудование превышающее 36 В, а также оборудование и механизмы, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены.

2. Для отключения электросети на вводах должны быть установлены рубильники или другие устройства. Отключение общей сети, за исключением дежурного освещения производится основным рубильником.

В целях предотвращения получения электротравм запрещается:

1. эксплуатировать неисправные электрические приборы и установки;
2. перегружать электросеть;
3. переносить и оставлять присмотра включенные электрические приборы;
4. работать вблизи открытых токоведущих частей электроустановок, прикасаться к ним;
5. загромождать доступ к электрическим устройствам.
6. запрещается прикасаться к токоведущим частям с нарушенной изоляцией и одновременно к заземленному оборудованию [20].

6.1.5 Пожарная безопасность

Печь относится к взрывопожароопасным объектам. Это связано с использованием значительного количества горючих газов (ГГ) и легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ).

Причины возникновения пожаровзрывоопасной ситуации :

- сложность технологических линий;
- большое количество легковоспламеняющихся и горючих веществ, горючих газов, твердых горючих материалов;
- большое количество резервуаров, емкостей и аппаратов, работающие с пожароопасными веществами под высоким давлением и температурой;

- высокая теплота сгорания и большая скорость сгорания веществ и материалов нового оборудования, недостаточная изученность условий обеспечения пожаровзрывоопасности этих процессов, показателей пожаровзрывоопасности сырья, полуфабрикатов и готовой продукции [21].

Таблица 6.4 – Причины аварий и их доли.

Аварийные ситуации	Доля от общего числа аварий, %
Пожары, искры, возгорания	58,5
Загазованность	17,9
Взрывы и вспышки	15,1
Прочие	8,5

Пожары, взрывы и загазованность являются следствием возникновения следующих аварийных ситуаций:

- использование неисправного оборудования;
- нарушение технологического режима;
- пуск неисправной технологической линии (аппарата) установки;
- нарушение правил ремонтных работ;
- нарушение правил остановки технологической установки [21].

Пожарно-профилактические мероприятия

На основании анализа пожарной опасности технологического процесса, с учетом режимов работы технологического оборудования проведем пожарно-профилактические мероприятия [22].

Таблица 6.5 – Пожара-профилактические мероприятия[23]

Наименование технического оборудования	Пожара-профилактические мероприятия
<u>Теплообменники:</u> защита аппаратов от перепада давления; контроль температуры; защита аппаратов от повышения температур; Предотвращение растекания жидкости;	Устанавливаются предохранительные клапана (ПК); Контроль среды в аппарате. Предусмотрены компенсаторы температур; Предусмотрены борты на расстоянии 1 м от аппаратов $h \geq 0,15$ м.
<u>Резервуары:</u> Оборудованы аварийным сливом; Линии стравливания газов защищаются; контроль уровня нефтепродуктов;	емкость объемом не менее 2500 м ³ ; Устанавливаются предохранительные клапана (ПК); оборудуются сигнализацией по верхнему и нижнему пределу.

<u>Ректификационные колонны:</u> теплоизоляция колонн; контроль уровня нефтепродуктов; контроль давления в колонне; контроль температуры; удаление избытка паров нефтепродуктов из колонны; защита отводящих трубопроводов от температурных повышений;	установка датчиков приборов в помещении КИП; требуется контроль по нижнему и верхнему пределу; дополнительный контроль с использованием термометров; требуется сброс на факел; Предусмотрены компенсаторы температур;
--	---

6.1.6 Термическая опасность. Повышенные температуры поверхностей

Источником термической опасности (ГОСТ Р 54431-2011):

- Соединительные магистрали передачи жидкостей, нагретых до высокой температуры;
- Нагретые поверхности узлов электрооборудования и гидрооборудования;
- Опасность выплеска жидкости под высоким давлением;

После контакта с данным видом термической опасности, вызывает у человека покраснение кожи, возникновение волдырей, повреждение слоя эпидермиса. Так же получение степени ожога (1,2,3,4).[24]

Для защиты рабочих от термической опасности в соответствии с ГОСТ Р 53010-2008, изолируют трубные обвязки, установленные рядом с рабочим местом оператора.

6.2 Экологическая безопасность

Переработка нефти это многостадийный процесс разделения нефти на фракции (первичная переработка) и изменение структуры молекул отдельных фракций (вторичная переработка).

Переработка нефти не является безотходным процессом. При переработке нефти выделяются отравляющие вещества, которые попадают в окружающую среду. Экология нефтепереработки включает в себя проблемы загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы.

6.2.1 Защита селитебной зоны

Для промышленно - производственных объектов и сооружений источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека устанавливаются ориентировочные размеры санитарно-защитных зон:

- промышленный объект четвертого класса - 100 м.

Так же в таблице 6.6 представлены рекомендации минимальных расстояний от магистральных трубопроводов для транспортировки нефти [25].

Таблица 6.6 - Рекомендуемые минимальные расстояния от магистральных трубопроводов для транспортировки нефти по СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03

Элементы застройки	Расстояние в м при диаметре труб, мм			
	До 300	300-600	600-1000	1000-1400
Города и поселки	75	100	150	200
Отдельные малоэтажные жилища	50	50	75	100
Гидротехнические сооружения	300	300	300	300
Водозаборы	3000	3000	3000	3000

6.2.2 Воздействие объекта на атмосферу

Основные источники загрязнения - нефтеперерабатывающие заводы. При переработке в атмосферу выбрасывается неприемлемое количество загрязняющих веществ [27].

Таблица 6.7 - Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест по ГН 2.1.6.1338 – 03

Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, мг/м ³		Класс опасности
		Максимально разовое	Средне суточное	
Безол	C ₆ H ₆	0,3	0,1	2
Хлор	Cl ₂	0,1	0,03	2
Оксид углерода	CO	5	3	4
Свинец	Pb	0,001	0,0003	1
Диоксид серы	SO ₂	0,5	0,1	3
Диоксины	C ₁₂ H ₁₄ C ₁₄ O ₂	-	0,5 пг/м ³	1
Оксид азота	NO ₂	0,085	0,04	2

6.2.3 Воздействие объекта на гидросферу

Загрязненные сточные воды на установке перегонки мазута образуются за счет конденсации насыщенного водяного пара, применяемого для предотвращения разложения сырья из-за высоких температур.

Перед очисткой загрязненный конденсат поступает в узел локальной очистки, где конденсата водяным паром выпаривают сероводород и аммиак. Очищенный конденсат пропарки выводится на очистные сооружения завода в систему канализации.

Сточные воды канализации проходят механическую очистку и доочистку на биологических очистных сооружениях завода [28].

Таблица 6.8 – Содержание загрязнения в сточных водах нефтеперерабатывающего предприятия [23]

Наименования загрязнений	Содержание, мг/л	
	в стоках I системы*	в стоках II системы**
Взвешенные вещества	200-350	600-800
Нефтепродукты	1000-2500	3000-5000
Сухой остаток	1000-1500	5000-6000
ПАВ	5-20	80-100
Фенолы	3-15	2-4
Аммонийный азот	25-30	20-30
ХПК	400-850	600-800
БПК _{полн}	250-550	300-500
рН	7,8-8,6	7,5-7,8

6.2.4 Воздействие объекта на литосферу

На предприятии по переработке 15-16 тыс. т. нефти в сутки, только в процессе глубокого обессоливания и обезвоживания нефти выделяется около 26-30т. твердых солей и механических примесей, содержащих в своем составе до 35% смеси углеводородов и 35-60% воды.

Таким образом, нефтеперерабатывающее предприятие "вырабатывают" более 100 т в сутки твердых, нефтесодержащих и пожароопасных отходов [28].

Таблица 6.9 – Утилизация твердых отходов [23]

Наименование отхода	Место складирования, транспортировка	Периодичность образования	Место захоронения, утилизация
Нефтешлам	Специально оборудованная площадка с контейнерами для сбора отходов.	Постоянно. Чистка и вывоз шлама с установки в период ремонта и чистки оборудования.	Вывоз на специально отведенное место для захоронения.
Отработанные смазочные масла и масла-теплоносители	Дренируются в емкость и откачиваются установки.	Периодически. По мере отработки и замены.	Утилизируется на предприятии, как добавка к печному топливу.
Отгон битумного блока «черный соляр»	Откачивается в технологическую емкость	Постоянно.	Используется на предприятии, как котельное топливо.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Установка вакуумной перегонки мазута является объектом повышенной опасности, т.е. объектом, на котором хранятся, перерабатываются, транспортируются вредные и опасные химические вещества.

При аварийной ситуации на объекте может произойти гибель или химическое заражение людей, сельскохозяйственных растений, животных, а также химическое заражение окружающей среды.

В состав объекта входят как площадочные опасные производственные объекты (насосы, ёмкости, колонны, печь), так и линейные (различные трубопроводы).

Возможны различные аварийные ситуаций: взрывы печей, разгерметизация колонны перегонки, разрывы трубопроводов, пожары как

последствие взрывов [29].

В таблице 6.10 приведены возможные аварийные ситуации и способы устранения.

Таблица 6.10 - Возможные виды аварийного состояния производства и способы их устранения [23]

Возможные производственные аварийные ситуации	Причины возникновения производственных аварийных ситуаций	Действия персонала по предупреждению и устранению производственных аварийных ситуаций
Взрывы, пожары, разгерметизация трубопровода	Несоблюдение режима ведения процесса, разгерметизация оборудования и трубопроводов, разлив взрыво-пожароопасных веществ	1. Включение звуковой аварийной сигнализации.
		2. Перекрыть подачу теплоносителей. Прекратить подачу сырья.
		3. Сброс давления на факел.
		4. Остановка остального оборудования.
Протечки в запорно-регулирующей арматуре или в аппаратах	Разгерметизация запорно-регулирующей арматуры или аппаратов	1. Ликвидация протечек с остановкой оборудования (если не возможно устранить по другому)
		2. Ликвидировать протечки.
Сбой системы электроснабжения	Неполадки в системе электроснабжения	1. Перекрыть подачу топлива к горелкам печей.
		2. Подать пару на паровую завесу печей.
		3. Проконтролировать отключение всего насосно-компрессорного оборудования.
Прекращение подачи хладагента	Неполадки в системе подачи водяного охлаждения или неисправность аппаратов воздушного охлаждения.	Остановка установки ВТ. После устранения проблемы выполнить процедуру запуска.
Прекращение подачи сырья.	Неполадки на установке ВТ	1. Выяснить у оператора ВТ: -если прекращение подачи сырья кратковременное, то необходимо снизить производительность насоса до 60% , при этом необходимо регулировать уровень.

6.3.1 Первичные средства пожаротушения

Здания, сооружения, помещения, технологические объекты должны быть обеспечены первичными средствами пожаротушения: огнетушителями, ящиками с песком, бочками с водой, покрывалами с негорючего теплоизоляционного полотна, грубошерстяной ткани или войлока, пожарными ведрами, совковыми лопатами, пожарным инструментом (крюками, ломы, топорами и тому подобное), которые используются для локализации и ликвидации пожаров в начальной стадии их развития [30].

Таблица 6.11 – Санитарные характеристики производственных процессов [23]

Наименование производственных зданий, помещений, наружных установок	Категория взрывопожарной и пожарной опасности помещений, зданий и наружных установок (СП12.13130.2009)	Класс взрывоопасной и пожароопасной зоны	Средства пожаротушения
Операторная	Д	невзрывоопасно	Огнетушители углекислотные (порошковые).
Насосная	Д	невзрывоопасно	Огнетушители углекислотные (порошковые).
Наружная установка (емкостной парк, наливная эстакада)	А	В-1а	1.Лафетные установки с сухотрубами. 2.Дренчерная установка водяного орошения емкостей.
Наружная установка.	АН	В-1г	Стационарное паротушение
Арматурный блок	А	В-1а	1.Хоз.противопожарный водопровод с кранами и рукавами. 2.Огнетушители углекислотные.

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. На тяжелых и физических работах с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда запрещается применение труда женщин.
2. Лицам, не достигших восемнадцатилетнего возраста, работа с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда запрещается.
3. При приеме на работу с вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) условиями труда проводится обязательные медицинские осмотры работников [31].

Таким образом, при отнесении условий труда к вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) работникам, занятым на рабочем месте, которое относится к вредными (особо вредными), опасными (особо опасными) должны предоставляться компенсации не ниже предусмотренных постановлением Правительства РФ от 20.11.2008 № 870.

В соответствии с п. 1 данного постановления работникам, занятым на перечисленных видах работ, установлены следующие компенсации:

- сокращенная продолжительность рабочего времени - не более 36 часов в неделю в соответствии со ст. 92 ТК РФ;
- ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск - не менее 7 календарных дней;
- повышение оплаты труда - не менее 4% тарифной ставки (оклада), установленной для различных видов работ с нормальными условиями труда [31].

7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

7.1 Расчёт производственной мощности

Производственная мощность действующей установки – это максимально возможный годовой выпуск готовой продукции в номенклатуре и ассортименте, предусмотренных на плановый период при наилучшем использовании производственного оборудования [32].

$$M = П \cdot T_{эфф} \cdot K_{об},$$

где П – производительность оборудования в единицу времени ($П = 1200 \text{ т/день}$);

$T_{эфф}$ – эффективный фонд времени работы оборудования;

$K_{об}$ – количество однотипного оборудования, установленного в цехе.

Эффективный фонд времени оборудования:

$$T_{эфф} = T_{ном} - T_{ППР} - T_{ТО},$$

где $T_{ном}$ – номинальный фонд работы оборудования;

$T_{ППР}$ – время простоя в ремонтах за расчетный период;

$T_{ТО}$ – время технологических остановок.

$$T_{ном} = T_{кал} - T_{вых} - T_{пр},$$

где $T_{кал}$ – календарный фонд времени;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Таблица 7.1 - Баланс рабочего времени оборудования

Показатели	Количество дней (часов)
Календарный фонд времени	360 (8 640)
Режимные потери рабочего времени • выходные • праздники	- -
Номинальный фонд рабочего времени	360 (8 640)
Простой оборудования в ремонтах	14 (336)
Эффективное время работы оборудования за год	346 (8304)

Производственная мощность равна:

$$M = 1200 \cdot 346 \cdot 1 = 415200 \text{ м / год}.$$

Для анализа использования оборудования рассчитываем экстенсивный и интенсивный коэффициенты.

Коэффициент экстенсивного использования оборудования равен:

$$K_{\text{экс}} = T_{\text{эфф}} / T_{\text{ном}} = 346 / 360 = 0,96.$$

Коэффициент интенсивного использования оборудования равен:

$$K_{\text{инт}} = Q_{\text{ин}} / Q_{\text{max}} = 1063 / 1200 = 0,89,$$

где $Q_{\text{ин}}$ – производительность единицы оборудования в единицу времени;

Q_{max} – максимальная производительность в единицу времени.

Интегральный коэффициент использования мощности:

$$K_{\text{им}} = K_{\text{экс}} \cdot K_{\text{инт}} = 0,96 \cdot 0,89 = 0,85.$$

Для определения фактического выпуска продукции рассчитывается производственная программа ($N_{\text{год}}$):

$$N_{\text{год}} = K_{\text{им}} \cdot M = 0,85 \cdot 415200 = 352920 \text{ м / год},$$

где $K_{\text{им}}$ – коэффициент использования мощности.

Вывод: установка работает на неполную мощность, степень загрузки равна 85%.

7.2 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству

7.2.1 Расчет численности персонала

Таблица 7.2 - Расчет численности ИТР, служащих и МОП

Профессия	Категория	Тарифный разряд	Количество смен в сутках	Штатная численность
Начальник установки	ИТР	Высшее	1	1
Механик установки	ИТР	Высшее	1	1
Итого				2

Старший оператор	Производственный рабочий	5	3	4
Оператор установки	Производственный рабочий	5	3	4
Помощник оператора	Вспомогательный рабочий	4	3	8
Итого				16
Дежурный слесарь по ремонту оборудования	Ремонтный персонал	4	1	4
Дежурный слесарь-электрик		4	1	4
Дежурный слесарь КИП		4	1	4
Итого				12
Итого				30

Расчет баланса эффективного годового времени одного среднесписочного работника.

Таблица 7.3 - Баланс эффективного времени одного среднесписочного работника

№	Показатели	Дни	Часы
1.	Календарный фонд рабочего времени	365	2920
2.	Нерабочие дни • выходные • праздничные	72 -	
3.	Номинальный фонд рабочего времени	293	2344
4.	Планируемые невыходы • очередные и дополнительные отпуска • невыходы по болезни • декретные отпуска • отпуск в связи с учебой без отрыва от производства • выполнение гос. обязанностей	24 12 - - 2	
5.	Эффективный фонд рабочего времени	255	2040

Количество выходных дней в году, ночных смен определяется из графика сменности.

Таблица 7.4 - График сменности

Номер смены	Часы работы	Дни месяца															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	7 – 15	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г
2	15 – 23	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В
3	23 – 7	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б
Отдых		Г	В	Б	Б	А	Г	В	В	Б	А	Г	Г	В	Б	А	А

7.2.2 Расчет годового фонда заработной платы персонала

Расчет годового фонда зарплаты ИТР, служащих и МОП производится на основании их окладов [32].

Общий фонд заработной платы рабочих за год:

$$Z_{год} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{осн}$ – основной фонд заработной платы рабочих, тыс. руб;

$Z_{доп}$ – дополнительный фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.

Основной фонд заработной платы для рабочих повременников:

$$Z_{осн} = Z_{тар} + Пр + D_{н.вр.} + D_{пр.дни} + D_{бриг},$$

где $Z_{тар}$ – тарифный фонд заработной платы, тыс. руб.;

Пр – оплата премий, тыс. руб.;

$D_{н.вр.}$ – доплата за работу в ночное время, тыс. руб.;

$D_{пр.дни}$ – доплата за работу в праздничные дни, тыс. руб.;

$D_{бриг}$ – доплата не освобожденным бригадирам, тыс. руб.

Тарифный фонд заработной платы:

$$Z_{тар} = \sum Ч_{сп} \cdot T_{ст} \cdot T_{эфф.раб},$$

где $Ч_{сп}$ – списочная численность рабочих данного разряда, чел.;

$T_{сп}$ – дневная тарифная ставка данного разряда, тыс. руб.

Размер премий принимаем равным 20–70 % от тарифного фонда заработной платы.

По отношению к тарифному фонду заработной платы доплата за праздничные дни составит 40 %.

Дополнительная зарплата ($Z_{доп}$):

$$Z_{доп} = (D_n \cdot Z_{осн}) / T_{эфф},$$

где D_n – количество дней невыхода на работу по планируемым причинам (отпуск, ученические, гособязанности).

Районный коэффициент для г. Томска – 1,3. Отчисления на социальные нужды на зарплату – 30 % от ($Z_{осн} + Z_{доп}$).

Общий фонд заработной платы ИТР за год:

Оклад ИТР – 90 тыс. руб./мес. Годовой фонд зарплаты составит:

$$90 \cdot 12 \cdot 2 = 2160 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 7.5 - Общий фонд заработной платы повременников

Наименование профессий	Списочная численность	Тарифный разряд	Тарифная ставка, руб./час	Основной фонд заработной платы, тыс. руб.					Дополнительный фонд з/п, тыс. руб.	Общий годовой фонд з/п, тыс. руб.	Общий фонд з/п с учетом районного коэф., тыс. руб.
				Тари фн. фонд	Прем ия	Допла та за ночн. время	Доплат а за работу в празд.	Основ ной фонд з/п			
Старший оператор	4	5	250	2040	408	11,2	816	3275,2	1001,83	4277,03	5560,13
Оператор установки	4	4	167	1362,72	272,54	7,48	545,09	2187,83	669,22	2857,05	3714,17
Помощник оператора	8	4	125	2040	408	11,2	816	3275,2	1001,83	4277,03	5560,13
Ремонтный персонал	12	4	130	3182,4	636,48	17,47	1272,96	5109,31	1562,85	6672,16	8673,81
Итого:	28	-	-	8625,12	1725,02	47,35	3450,048	13847,55	4235,72	18083,27	23508,25

7.2.3 Расчет затрат на производство продукции

Расчет годовой потребности в сырье и материалах [32].

Определение затрат на сырье и материалы производим исходя из принятого объема производства, удельных норм расхода сырья и материалов и планово-заготовительных цен.

Таблица 7.6 - Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Наименование сырья	Ед. изм.	Цена, тыс. руб.	Расход, т		Сумма затрат, тыс. руб.	
			На единицу готовой продукции	На весь объем производства	На единицу готовой продукции	На весь объем производства
Мазут	т	5,5	1,67	589376,4	9,185	3241570,2

Расчет годовой потребности в энергии

Таблица 7.7 - Расчет потребной энергии

Наименование	Годовой расход	Цена ед., руб.	Годовая сумма затрат, тыс. руб.
Топливо и энергия:			
1. топливо, т	500	25000	12500
2. пар, Гкал	1005	600	603
3. электроэнергия, кВт/ч	165000	4	660
Итого			13763

Таблица 7.8 - Расчет амортизационных отчислений

Наименование основных средств	Стоимость, тыс. руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортизационные отчисления, тыс. руб.
1. Здания:			
1.1. Арматурный блок	6000	5	300
1.2. Операторная	5000	5	250
Итого:	11000		550
2. Оборудование:			
2.1. Колонна	70000	10	7000
2.2. Ребойлер	2000	10	200
2.3. Змеевиковая печь	35000	10	3500
2.4. Дефлегматор	2000	10	200
2.5. Теплообменник	1700	10	170
2.6. Насос	250	10	25
Итого:	110950		11095
Итого общее:			11645

Таблица 7.9 - Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства ($Q = 352920 \text{ т/год}$)

Наименование статьи расходов	Ед. изм.	Затраты тыс. руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс. руб.	9,185	3241570,2
2. Энергия на технологические нужды	тыс. руб.	0,039	13763
3. З/П основных произв. рабочих	тыс. руб.	0,02628	9274,3
4. Отчисления на СН (30%)	тыс. руб.	0,00788	2782,29
Итого условно-переменных издержек	тыс. руб.	9,25816	3267389,79
5. Общепроизводственные накладные расходы			
5.1. РСЭО:			
- Амортизация оборудования	тыс. руб.	0,03144	11095
- Ремонт оборудования	тыс. руб.	0,00943	3328,5
- Заработная плата ремонтного персонала	тыс. руб.	0,02458	8673,81
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс. руб.	0,00737	2602,143
5.2. Заработная плата ИТР	тыс. руб.	0,00612	2160
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс. руб.	0,00184	648
5.3. Заработная плата вспомогательного персонала	тыс. руб.	0,01575	5560,13
- Отчисление на соц. нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс. руб.	0,00473	1668,04
Итого условно-постоянных издержек	тыс. руб.	0,10126	35735,62
Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)	тыс. руб.	9,35942	3303125,41
6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)	тыс. руб.	0,46797	165156,27
Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)	тыс. руб.	9,82739	3468281,68
7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)	тыс. руб.	0,09827	34682,82
Полная себестоимость (заводская себестоимость + стр.7)	тыс. руб.	9,92566	3502964,50
Условно-переменные издержки	тыс. руб.	9,25816	3267389,79
Условно-постоянные издержки	тыс. руб.	0,66750	235574,71

7.3 Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле [32]:

$$Ц = C \cdot (1 + P/100),$$

где C – полная себестоимость единицы готовой продукции;

P – рентабельность продукции (%).

Рентабельность продукции можно принять от 10% до 25%.

$$C = 9,92566 \cdot (1 + 25/100) = 12,41 \text{ тыс. руб.}$$

7.4 Анализ безубыточности по действующему производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков. В точке безубыточности выручка от продажи продукции ($B_{\text{пр}}$) равна общим затратам на производство и реализацию продукции:

$$B_{\text{пр}} = \text{Изд}_{\text{пост}} + \text{Изд}_{\text{пер}} \cdot$$

Определение точки безубыточности:

1. Аналитическим способом:

$$Q_{\text{кр}} = \frac{\text{Изд}_{\text{пост}}}{C_{1\text{ГП}} - \text{Изд}_{\text{пер}1\text{ГП}}}, \text{ т.}$$

где $C_{1\text{ГП}}$ – цена единицы готовой продукции (1 тонны);

$\text{Изд}_{1\text{ГП}}$ – удельные переменные издержки (переменные издержки на единицу готовой продукции – 1 тонну).

$$Q_{\text{кр}} = \frac{235574,71}{12,41 - 9,25816} = 74741,96 \text{ т.}$$

2. Графическим способом:

Графически точка безубыточности определяется согласно рис. 1.

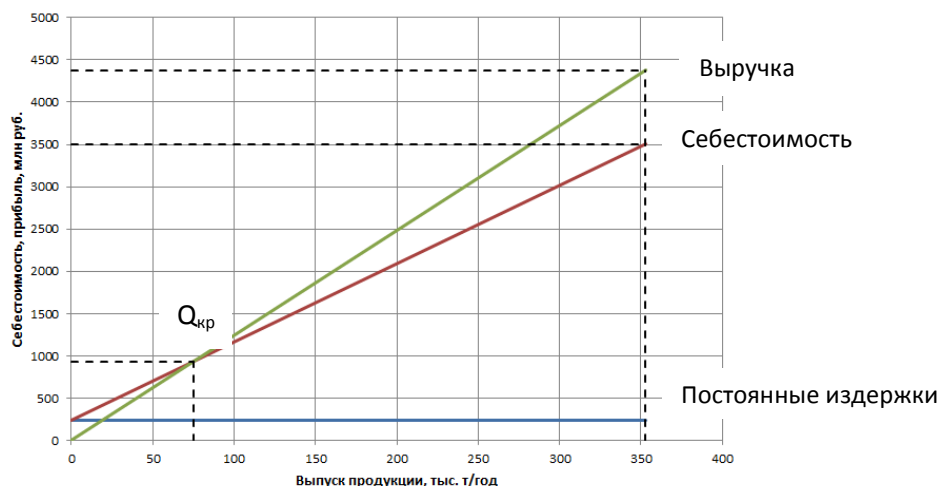


Рисунок 1 – График безубыточности

7.5 Расчет производственной мощности на плановый период при увеличении объема производства до 400 000 т

Поскольку установка работает лишь на 85% от максимальной нагрузки, произведем расчет при увеличении годового производства на 13,34%.

Таблица 7.10 - Расчет годовой потребности в сырье и материалах [32]

Наименование сырья	Ед. изм.	Цена, тыс. руб.	Расход, т		Сумма затрат, тыс. руб.	
			На единицу готовой продукции	На весь объем производства	На единицу готовой продукции	На весь объем производства
Мазут	т	5,5	1,67	668000	9,185	3674000

Таблица 7.11 - Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства ($Q = 400000 \text{ т/год}$)

Наименование статьи расходов	Ед. изм.	Затраты тыс. руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс. руб.	9,185	3674000
2. Энергия на технологические нужды	тыс. руб.	0,039	15599
3. З/П основных произв. рабочих	тыс. руб.	0,02319	9274,3
4. Отчисления на СН (30%)	тыс. руб.	0,00696	2782,29
Итого условно-переменных издержек	тыс. руб.	9,25414	3701655,59
5. Общепроизводственные накладные расходы			
5.1. РСЭО:			
- Амортизация оборудования	тыс. руб.	0,02774	11095
- Ремонт оборудования	тыс. руб.	0,00832	3328,5
- Заработная плата ремонтного персонала	тыс. руб.	0,02168	8673,81
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс. руб.	0,00651	2602,14
5.2. Заработная плата ИТР	тыс. руб.	0,00540	2160
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс. руб.	0,00162	648
5.3. Заработная плата вспомогательного персонала	тыс. руб.	0,01390	5560,13
- Отчисление на соц. нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс. руб.	0,00417	1668,04
Итого условно-постоянных издержек	тыс. руб.	0,08934	35735,62
Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)	тыс. руб.	9,34348	3737391,21
6. Управленческие расходы (5% от	тыс. руб.	0,41289	165156,27

цеховой себестоимости)			
Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)	тыс. руб.	9,75637	3902547,49
7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)	тыс. руб.	0,08671	34682,82
Полная себестоимость (заводская себестоимость +стр.7)	тыс. руб.	9,84308	3937230,30
Условно-переменные издержки	тыс. руб.	9,25414	3701655,59
Условно-постоянные издержки	тыс. руб.	0,58894	235574,71

Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле:

$$Ц = 9,84308 \cdot (1 + 25/100) = 12,30 \text{ тыс. руб.}$$

Для дальнейших расчетов примем цену 1 т гудрона 12,41 тыс. руб.

Анализ безубыточности по действующему производству [32]

Определение точки безубыточности:

1. Аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{235574,71}{12,41 - 9,25414} = 74715,9 \text{ т.}$$

2. Графическим способом:

Графически точка безубыточности определяется согласно рис. 2.

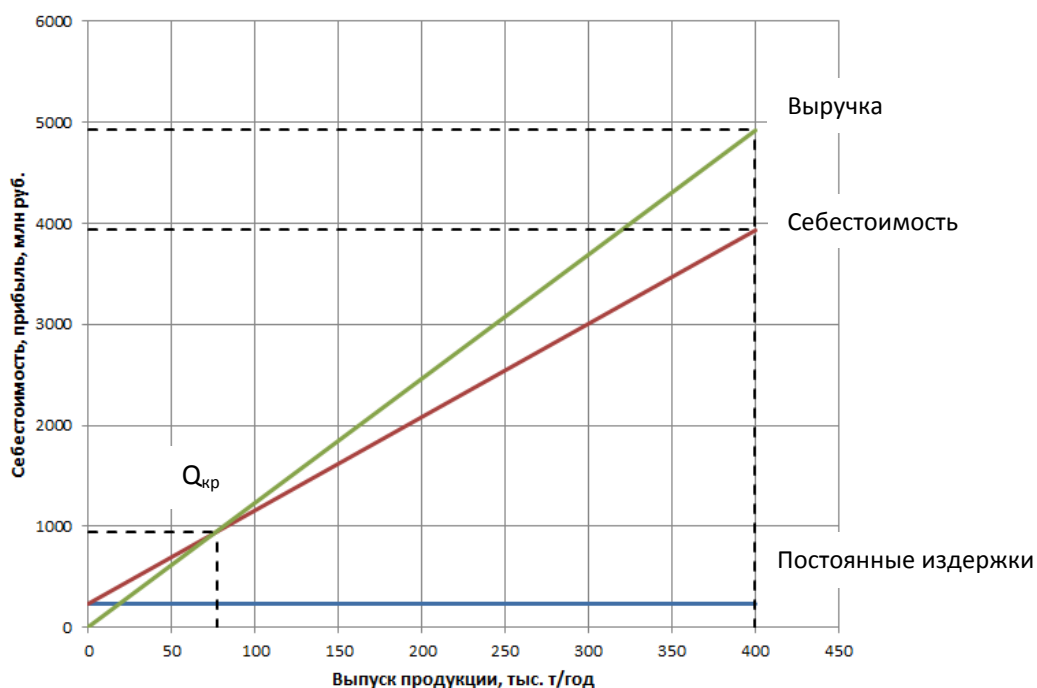


Рисунок 2 – График безубыточности

7.6 Определение технико-экономических показателей

Таблица 7.12 - Техничко-экономические показатели [32]

Наименование показателя	Ед. изм.	Отчетный год	Плановый год
1. Объем производства	т	352920	400000
2. Объем продаж	т	352920	400000
3. Цена 1 тонны	тыс. руб.	12,41	12,41
4. Выручка от продажи (2*3)	тыс. руб.	4378705,62	4962830,81
5. Суммарные издержки	тыс. руб.	3502964,50	3937230,30
5.1. Издержки переменные	тыс. руб.	3267389,79	3701655,59
5.2. Издержки постоянные	тыс. руб.	235574,71	235574,71
6. Операционная прибыль (4-5)	тыс. руб.	875741,12	1025600,51
7. Налог на прибыль (6*20%)	тыс. руб.	175148,22	205120,10
8. Чистая прибыль (6-7)	тыс. руб.	700592,90	820480,41
9. Себестоимость 1 тонны	тыс. руб.	9,9257	9,8431
10. Стоимость основных средств	тыс. руб.	110950	110950
11. Численность основных рабочих	чел.	28	28
12. Фондовооруженность (10/11)	тыс. руб./чел	3962,5	3962,5
13. Фондоотдача (4/10)	руб./руб.	39,47	44,73
14. Фондоемкость (10/4)	руб./руб.	0,0253	0,0224
15. Производительность труда (4/11)	тыс. руб./чел	156382,34	177243,96
16. Рентабельность производства (8*100%/5)	%	20	20,8390
17. Рентабельность продаж (8*100%/4)	%	16	16,5325
18. Критический объем продаж (Qкр)	тыс. т.	74,81	74,72
19. Критический объем продаж (Qкр)	тыс. руб.	928189,56	927005,93

Вывод:

В результате увеличения загрузки производственной мощности до 400 000 тыс. руб. и, соответственно, использования «эффект масштаба», мы получили следующий экономический эффект:

1. Снижение себестоимости на 1 тонну с 9,9257 тыс. руб. по 9,8431 тыс. руб. (на 0,83%);
2. Увеличение выручки от продажи с 4378705,62 тыс. руб. по 4962830,81 тыс. руб. (на 13,34%);
3. Увеличение чистой прибыли с 700592,90 тыс. руб. по 820480,41 тыс. руб. (на 17,11%);

4. Увеличение выплат по налогам с 175148,22 тыс. руб. по 205120,1 тыс. руб. (на 17,11%);
5. Увеличение показателя фондоотдачи с 39,47 руб./руб. по 44,73 руб./руб. (на 13,34%);
6. Увеличение производительности труда с 156382,34 тыс. руб./чел. по 177243,96 тыс. руб./чел. (на 13,34%);
7. Увеличение рентабельности производства с 20% до 20,839%;
8. Увеличение рентабельности продаж с 16% до 16,5325%;
9. Точка безубыточности снизилась с 74,81 тыс. т до 74,72 тыс. т.

Заключение

В выпускной квалификационной работе были произведены расчеты.

Технологический расчет:

Определены основные геометрические размеры аппаратов.

Конструктивно – механический расчет:

Определены толщины стенок аппарата, днища и крышки; Подобраны штуцера и произведен расчет по укреплению отверстий.

Расчет на ветровую нагрузку;

Расчет опорной обечайки:

Проверены на прочность корпус при гидравлических условиях и условиях монтажа; Проведён расчет и проверка опасных сечений.

Произведен расчет фланца на прочность болтов и прокладок; На статическую прочность и угол поворота фланцев.

Так же были произведены расчеты вспомогательного оборудования: теплообменника, ёмкости для приема вакуумного газойля.

Приведена автоматизация процесса получения битумов.

Список использованной литературы

1. Основные процессы и аппараты химической технологии. Дытнерский Ю.И. 1991.
2. Проектирование ректификационных колонн. Гусев В.П.
3. ГОСТ Р 52857.1-2007 Общие требования.
4. ГОСТ Р 52857.2-2007 Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ.
5. ГОСТ Р 52857.3-2007 Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внутреннем статических нагрузках.
6. ГОСТ Р 52857.4-2007 Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
7. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Справочник. Лашинский А.А, Толчинский А.Р. 2008
8. ГОСТ Р 51274-99 - Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность
9. АТК 24.200.04-90 Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и размеры
10. Примеры расчеты такелажной оснастки .Матвеев В.В, Крупин Н.Ф.1987
11. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
12. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
13. ГОСТ Р52857.7 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты.
14. ГОСТ 10585 – 99. Топливо нефтяное. Мазут.
15. ГОСТ 12.1.007 – 76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

16. ГОСТ 12.4.011–89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
17. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».
18. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
19. СП 51.13330.2011. Защита от шума.
20. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
21. ГОСТ 12.1.004. – 91. Пожарная безопасность. Общие требования.
22. Горячев С.А., Клубань В.С. Пожарная профилактика технологических процессов производств. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983.
23. Технологический регламент «Вакуумная перегонка мазута».
24. ГОСТ Р 54431-2011 Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности.
25. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
26. ГН 2.1.6.1338 – 03. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
27. ГОСТ 17.1.3.13–86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.
28. Абросимов А.А. Экологические аспекты производства и применения нефтепродуктов. М.: БАРС, 1999 – 732с.
29. ГОСТ Р 22.9.22. – 2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.
30. РД 34.49.503. – 94. Первичные средства пожаротушения на объекта энергетической отрасли.
31. ТК РФ. Трудовой кодекс РФ.
32. Рыжакина Т.Г. Экономика и управления производством. Расчет экономической части дипломного проекта. Учебное издание ТПУ – 2013 г.