

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 2 рисунка, 35 таблиц, 35 источников.

Объектом разработки является установка синтеза формалина в Республике Узбекистан, г. Навои-5, АО «NAVOIYAZOT».

Цель работы – увеличение производительности установки синтеза формальдегида на 10 % и проверка основного аппарата и вспомогательного оборудования на возможность увеличения производства.

В работе содержится выбор и обоснование метода производства, схема технологическая, проведены инженерные расчеты, подбор оборудования, контроль производства, охрана труда, техника безопасности.

В результате, было показано, что такое расширение возможно, причем, без замены основного и вспомогательного оборудования. За счет увеличения производительности установки синтеза увеличен объем производства формальдегида, а также увеличена прибыль производства и снижена себестоимость продукции.

Содержание

Введение.....	11
1. Технико-экономическое обоснование	12
1.1 Обоснование в потребности продукции и мощности проектируемой установки	12
1.2 Обоснование выбора метода производства.....	13
2. Материальные расчеты	15
3. Характеристика существующего метода производства.....	22
3.1 Характеристика производимой продукции	22
3.2 Характеристика исходного сырья, материалов и полупродуктов.....	23
4. Теоретическая часть	26
4.1 Общие сведения	26
4.2 Химизм процесса	28
5. Описание технологической схемы.....	30
5.1 Получение метанола-воздушной смеси.....	30
5.2 Синтез формальдегида	31
6. Обоснование конструкции основного аппарата и выбора материала для его изготовления.....	33
7. Расчеты основного аппарата	36
7.1 Расчеты секции контактирования	36
7.1.1 Тепловые расчеты.....	36
7.1.2 Технологические расчеты	39
7.2 Расчеты подконтактного холодильника	40
7.2.1 Тепловые расчеты.....	40
7.2.2 Расчет поверхности теплопередачи	42
7.3 Механические расчеты основного аппарата	48
7.3.1 Расчет толщины стенок аппарата.....	48
7.3.2 Расчет массы аппарата	52
7.3.3 Выбор опоры	53
7.3.4 Расчет обечайки на действие осевой сжимающей силы	53
7.3.5 Расчет на ветровую нагрузку.....	54
7.3.6 Выбор монтажных штуцеров	60
7.3.7 Расчет трубной решетки	60
7.3.8 Расчет фланцевого соединения	64
7.3.9 Расчет укрепления отверстий	70
7.3.10 Расчет линзового компенсатора	79
8. Расчеты вспомогательного оборудования.....	81
8.1 Расчет спиртоиспарителя.....	81
8.1.1 Тепловые расчеты.....	81
8.1.2 Технологические расчеты	84
8.2 Расчет перегревателя.....	90
8.2.1 Тепловые расчеты.....	91
8.2.2 Технологические расчеты	92
8.3 Расчет турбовоздуходувки.....	98

8.4 Расчет промежуточных емкостей	99
8.4.1 Расчет смесителя	99
8.4.2 Технологический расчет паросборника и конденсатосборника	99
8.4.3 Механический расчет паросборника	99
9. Автоматизация производства	108
9.1 Аналитический контроль	108
9.1.1 Методы определения метанола	108
9.1.2 Методы определения формальдегида	109
9.1.3 Определение железа	110
9.1.4 Определение жесткости воды	110
9.2 Технологический контроль	111
9.2.1 Получение метанола-воздушной смеси	111
9.2.2 Синтез формальдегида	112
10. Монтаж реактора	114
11. Социальная ответственность	119
11.1 Производственная безопасность	120
11.2 Токсическое воздействие	121
11.2.1 Предлагаемые средства защиты	122
11.3 Повышенный уровень шума на производстве	122
11.4 Недостаточное производственное освещение	123
11.5 Опасность поражения электрическим током	123
11.6 Термическая опасность. Повышенные температуры поверхностей	124
11.7 Пожаро- и взрывоопасность	125
11.8 Механическая опасность	125
11.9 Экологическая безопасность	126
11.9.1 Защита селитебных зон	126
11.9.2 Воздействия объекта на гидросферу	126
11.9.3 Воздействия объекта на литосферу	127
11.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	128
11.11 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	129
12. Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	131
12.1 Расчёт производственной мощности оборудования цеха	131
12.2 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству	133
12.2.1 Расчет годового фонда заработной платы цехового персонала	133
12.2.2 Расчет баланса эффективного годового времени одного среднесписочного рабочего	133
12.2.3 Количество выходных дней в году, ночных смен определяется из графика сменности (пример графика сменности представлен в табл. 13.4)	135
12.2.4 Расчет годового фонда заработной платы основного производственного персонала и ИТР	136
12.3 Расчет затрат на производство продукции	138
12.3.1 Расчет годовой потребности в сырье и материалах	138
12.3.2 Расчет амортизационных отчислений	138
12.3.3 Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства (140000 т/год)	139
12.4 Определение цены готовой продукции	140

12.4.1 Анализ безубыточности по действующему производству	140
12.5 Расчет производственной мощности на плановый период при увеличении объема производства на 10%.....	141
12.5.1 Расчет себестоимости готового продукта в проектном году.....	141
12.5.2 Определение цены готовой продукции	142
12.5.3 Анализ безубыточности при увеличении производительности на 10%	142
Заключение	145
Список использованных источников.....	146

Введение

В настоящее время формалин приобретает все большее практическое значение как очень ценный промежуточный продукт на пути получения различных органических соединений и полимерных материалов с самым разнообразным комплексом свойств. Мировое потребление формалина все время растет. На сегодняшний день наблюдается значительный дефицит формалина, как на внутреннем рынке, так и на рынках внешних стран. В связи с этим, возникает необходимость создания новых производственных мощностей, а также реконструкции (расширения) и модернизации уже действующих производств. Большая часть выпускаемого формалина производится в промышленности путем окислительного дегидрирования метанола на катализаторах («серебряных», «медных», «хромжелезномолибденовых») при повышенных температурах и давлениях, близких к атмосферному.

Основная цель настоящего проекта заключается в определении возможности расширения производства на примере установки синтеза формалина. Ключевым моментом является установление возможности обеспечения новой, повышенной производительности уже действующим оборудованием. Также существует необходимость рассмотреть некоторые вопросы, касающиеся технологического контроля, охраны труда и экологии в изменившихся условиях эксплуатации.

1. Техничко-экономическое обоснование

1.1 Обоснование в потребности продукции и мощности проектируемой установки

Формалин является одним из многотоннажных продуктов химической промышленности.

Формальдегид, входящий в состав формалина обладает высокой реакционной способностью, доступностью и низкой стоимостью, поэтому формалин превратился в один из важнейших полупродуктов химической промышленности. Его значение для современного промышленного органического синтеза трудно переоценить. Формалин используется для производства синтетических смол, пластических масс, пластификаторов, органических красителей, различных клеящих материалов, лаков, лекарственных препаратов и других продуктов. Формалин используется также в сельском хозяйстве для протравливания семян, в кожевенной промышленности для дубления кож, в медицине и животноводстве как антисептическое средство и т.п. Мировое производство формалина оценивается на уровне 14-45 миллионов тонн в год.

В виду того, что формалин является промежуточным продуктом, потребность в нем определяется уровнем развития формалинопотребляющих производств. В таблице 1.1.1 приведена структура потребления формалина.

Таблица 1.1.1 – Структура потребления формалина

Наименование продукта	Значение показателя	
	в тыс.	в %
Карбамидные смолы	1170	62
Феноло-формальдегидные смолы	294	16
Пентаэритрит	108	6
Аминопласты	27	2
Прочие продукты	260	14
Всего	1859	100

В настоящее время наблюдается значительный дефицит формалина как на внутреннем рынке, так и на рынках внешних стран [1, с. 10]. В связи с этим, возникает необходимость создания новых производственных мощностей, а также реконструкции (расширения) и модернизации уже действующих производств. Целью настоящего проекта является определение возможности расширения действующего производства формалина в Республике Узбекистан, г. Навои-5, АО «NAVOIYAZOT».

Тот факт, что в качестве объекта выбран именно этот завод, объясняется следующими соображениями:

- близость источников природного газа и имеющиеся большие резервы производственной мощности по метанолу;
- наличие возможности потребления значительной части формалина на месте (на «NAVOIYAZOT» существует производство мочевино-формальдегидных смол);

- наличие местных источников электроэнергии.

1.2 Обоснование выбора метода производства

Основным сырьем для производства формалина в настоящее время является метанол, хотя в промышленности (за рубежом) для этих же целей иногда используют окисление природного газа и низших парафинов.

Существуют и реализованы два метода получения формалина [2, с. 6]:

- каталитическое окисление метанола на серебряных катализаторах (70% производимого формальдегида);
- каталитическое окисление метанола на оксидных катализаторах (30% производимого формальдегида).

В обоих способах процесс протекает в паро-газовой системе при повышенных температурах и давлении, близком к атмосферному.

Перечисленные выше способы отличаются друг от друга физико-химическими параметрами процесса, количеством получаемой продукции (степенью конверсии метанола и производительностью катализатора), побочными продуктами, экономическими и аппаратурными показателями. Сравнительная характеристика названных способов производства приведена в таблице 1.2.1 [2, с. 8].

Таблица 1.2.1 – Сравнительная характеристика способов производства формалина

Метод	Преимущества	Недостатки
Окисление метанола на серебряных катализаторах	1. Практически нет ограничений по мощности единичной установки; 2. Простота конструкции реактора; 3. Низкая металлоемкость и энергозатраты; 4. Высокая производительность.	1. Высокий расходный коэффициент по сырью; 2. Наличие в формалине до 10% метанола; 3. Наличие примеси муравьиной кислоты в продукте; 4. Расход драгоценного металла – серебра.
Окисление метанола на оксидных катализаторах	1. Низкий расходный коэффициент по сырью; 2. Товарный формалин содержит менее 1% примеси метанола и не более 0,02% муравьиной кислоты.	1. Повышенный расход энергии и воздуха; 2. Ограничение по единичной мощности установки; 3. Сложность конструкции реактора; 4. Повышенная металлоемкость; 5. Низкая производительность.

Согласно данным, приводимым в [2, табл. 9], капитальные затраты на 1 тонну формалина и его себестоимость, в случае использования серебряного катализатора, в среднем в 1.2-1.4 раза ниже чем для формалина, полученного на оксидных катализаторах. Однако, для формалина, получаемого на «серебре», выше затраты на катализатор и технологическую воду.

В результате, видно, что для крупнотоннажного производства формалина наиболее предпочтительным является метод окисления метанола на серебряных катализаторах.

2. Материальные расчеты

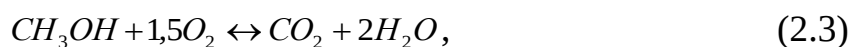
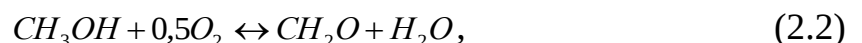
Целью материальных расчетов является составление материальных балансов стадии образования метанола-воздушной смеси и стадии контактирования.

Расчеты проведем для случая получения производящего формалина с массовой долей формальдегида 37 % в «мягком» режиме (см. раздел 4.2) для одной технологической нитки.

Настоящий проект предусматривает собой лишь определение возможностей по расширению производства без какой-либо его реконструкции, т. е. все параметры технологического режима останутся неизменными. Следовательно, исходные данные для материальных расчетов необходимо брать в соответствии с [3].

Исходные данные:

- исходная годовая производительность агрегата по формалину – $P_n = 140000$ т/год;
- годовой фонд рабочего времени – $\tau = 8467,2$ ч;
- массовая доля формальдегида в производящем формалине – $\omega_{CH_2O}^{\phi} = 0,37$;
- массовая доля метанола в производящем формалине – $\omega_{CH_3OH}^{\phi} = 0,07$;
- состав «возвратного» метанола: метанол – $\omega_{CH_3OH}^B = 0,97$, формальдегид – $\omega_{CH_2O}^B = 0,005$, вода – $\omega_{H_2O}^B = 0,025$;
- параметры подаваемого воздуха: температура $t_g = 50$ °С, давление $p = 0,65$ МПа;
- степень конверсии метанола $x = 0,555$;
- состав технического метанола: метанол – $\omega_{CH_3OH}^M = 0,999$, вода $\omega_{H_2O}^M = 0,001$.
- основные протекающие реакции:



- доля превращенного метанола, расходуемого: по реакции 2.1 – $x_1 = 0,31$, по реакции 2.2 – $x_2 = 0,59$, по реакции 2.3 – $x_3 = 0,09$, по реакции 2.4 – $x_4 = 0,01$.

Определим требуемую годовую производительность агрегата по формалину:

$$P = P_n \cdot 1,1 = 140000 \cdot 1,1 = 154000 \text{ т/год},$$

где 1,1 – коэффициент, показывающий, во сколько раз требуется увеличить годовую производительность агрегата;

- часовая производительность агрегата по формалину:

$$G_{\phi} = \frac{P \cdot 1000}{\tau} = \frac{154000 \cdot 1000}{8467,2} = 18187,83 \text{ кг/час};$$

по формальдегиду:

$$G_{CH_2O} = G_{\phi} \cdot \omega_{CH_2O}^{\phi} = 18187,83 \cdot 0,37 = 6730 \text{ кг/час.}$$

$$g_{CH_2O} = \frac{G_{CH_2O}}{M_{CH_2O}} = \frac{6730}{30,03} = 224,1 \text{ кмоль/ч,}$$

где $M_{CH_2O} = 30,03 \text{ кг/моль}$ – молярная масса формальдегида.

На его образование по реакциям 2.1 и 2.2 требуется метанола:
 $g_{CH_3OH} = g_{CH_2O} = 224,1 \text{ кмоль/ч}$ или $G_{CH_3OH} = g_{CH_3OH} \cdot M_{CH_3OH} = 224,1 \cdot 32,05 = 7182 \text{ кг/ч}$,
 где $M_{CH_3OH} = 32,05 \text{ кг/кмоль}$ – молярная масса метанола. Всего по реакциям 2.1-2.4 требуется метанола:

$$G'_{CH_3OH} = \frac{G_{CH_3OH} \cdot 100\%}{90\%} = \frac{7182 \cdot 100}{90} = 7980 \text{ кг/ч,}$$

$$g'_{CH_3OH} = \frac{G'_{CH_3OH}}{M_{CH_3OH}} = \frac{7980}{32,05} = 249 \text{ кмоль/ч.}$$

С учетом степени превращения в контактный аппарат необходимо подавать метанола (потоки 2, 4):

$$G_{CH_3OH}^2 = G_{CH_3OH}^4 = \frac{G'_{CH_3OH}}{x} = \frac{7980}{0,555} = 14378,4 \text{ кг/ч,}$$

$$g_{CH_3OH}^2 = g_{CH_3OH}^4 = \frac{G_{CH_3OH}^4}{M_{CH_3OH}} = \frac{14378,4}{32,05} = 448,6 \text{ кмоль/ч.}$$

После стадии контактирования в контактном газе остается непрореагировавшего метанола (поток 5):

$$G_{CH_3OH}^5 = (1 - x) \cdot G_{CH_3OH}^4 = (1 - 0,555) \cdot 14378,4 = 6398,4 \text{ кг/ч,}$$

$$g_{CH_3OH}^5 = \frac{G_{CH_3OH}^5}{M_{CH_3OH}} = \frac{6398,4}{32,05} = 199,6 \text{ кмоль/ч.}$$

По реакции 2.1 расходуется

- метанола:

$$G_{CH_3OH}^{1p} = G'_{CH_3OH} \cdot x_1 = 7980 \cdot 0,31 = 2473,8 \text{ кг/ч,}$$

$$g_{CH_3OH}^{1p} = \frac{G_{CH_3OH}^{1p}}{M_{CH_3OH}} = \frac{2473,8}{32,05} = 77,2 \text{ кмоль/ч.}$$

Образуется:

- формальдегида:

$$g_{CH_2O}^{1p} = g_{CH_3OH}^{1p} = 77,2 \text{ кмоль/ч,}$$

$$G_{CH_2O}^{1p} = g_{CH_2O}^{1p} \cdot M_{CH_2O} = 77,2 \cdot 30,03 = 2318,3 \text{ кг/ч;}$$

- водорода:

$$g_{H_2}^{1p} = g_{CH_3OH}^{1p} = 77,2 \text{ кмоль/ч,}$$

$$G_{H_2}^{1p} = g_{H_2}^{1p} \cdot M_{H_2} = 77,2 \cdot 2,02 = 155,9 \text{ кг/ч,}$$

где $M_{H_2} = 2,02 \text{ кг/кмоль}$ – молярная масса водорода.

По реакции 2.2 расходуется:

- метанола:

$$G_{CH_3OH}^{2p} = G'_{CH_3OH} \cdot x_2 = 7980 \cdot 0,59 = 4708,2 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_3OH}^{2p} = \frac{G_{CH_3OH}^{2p}}{M_{CH_3OH}} = \frac{4708,2}{32,05} = 146,9 \text{ кмоль/ч};$$

- кислорода:

$$g_{O_2}^{2p} = g_{CH_3OH}^{2p} \cdot 0,5 = 146,9 \cdot 0,5 = 73,45 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{O_2}^{2p} = g_{O_2}^{2p} \cdot M_{O_2} = 73,45 \cdot 32 = 2350,4 \text{ кг/ч},$$

где $M_{O_2} = 32$ кг/кмоль – молярная масса кислорода.

Образуется:

- формальдегида:

$$g_{CH_2O}^{2p} = g_{CH_3OH}^{2p} = 146,9 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{CH_2O}^{2p} = g_{CH_2O}^{2p} \cdot M_{CH_2O} = 146,9 \cdot 30,03 = 4411,4 \text{ кг/ч};$$

- водяного пара:

$$g_{H_2O}^{2p} = g_{CH_3OH}^{2p} = 146,9 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{H_2O}^{2p} = g_{H_2O}^{2p} \cdot M_{H_2O} = 146,9 \cdot 18,02 = 2647,1 \text{ кг/ч},$$

где $M_{H_2O} = 18,02$ кг/кмоль – молярная масса воды.

По реакции 2.3 расходуется:

- метанола:

$$G_{CH_3OH}^{3p} = G'_{CH_3OH} \cdot x_3 = 7980 \cdot 0,09 = 718,2 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_3OH}^{3p} = \frac{G_{CH_3OH}^{3p}}{M_{CH_3OH}} = \frac{718,2}{32,05} = 22,4 \text{ кмоль/ч};$$

- кислорода:

$$g_{O_2}^{3p} = g_{CH_3OH}^{3p} \cdot 1,5 = 22,4 \cdot 1,5 = 33,6 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{O_2}^{3p} = g_{O_2}^{3p} \cdot M_{O_2} = 33,6 \cdot 32 = 1075,2 \text{ кг/ч}.$$

Образуется:

- оксида углерода (IV):

$$g_{CO_2}^{3p} = g_{CH_3OH}^{3p} = 22,4 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{CO_2}^{3p} = g_{CO_2}^{3p} \cdot M_{CO_2} = 22,4 \cdot 44,01 = 985,8 \text{ кг/ч},$$

где $M_{CO_2} = 44,01$ кг/кмоль – молярная масса оксида углерода (IV);

- водяного пара:

$$g_{H_2O}^{3p} = g_{CH_3OH}^{3p} \cdot 2 = 22,4 \cdot 2 = 44,8 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{H_2O}^{3p} = g_{H_2O}^{3p} \cdot M_{H_2O} = 44,8 \cdot 18,02 = 807,3 \text{ кг/ч}.$$

По реакции 2.4 расходуется:

- метанола:

$$G_{CH_3OH}^{4p} = G'_{CH_3OH} \cdot x_4 = 7980 \cdot 0,01 = 79,8 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_3OH}^{4p} = \frac{G_{CH_3OH}^{4p}}{M_{CH_3OH}} = \frac{79,8}{32,05} = 2,5 \text{ кмоль/ч};$$

образуется:

- оксида углерода (II):

$$g_{CO}^{4p} = g_{CH_3OH}^{4p} = 2,5 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{CO}^{4p} = g_{CO}^{4p} \cdot M_{CO} = 2,5 \cdot 28,01 = 69,7 \text{ кг/ч},$$

где $M_{CO} = 28,01 \text{ кг/кмоль}$ - молярная масса оксида углерода (II);

- водорода:

$$g_{H_2}^{4p} = g_{CH_3OH}^{4p} \cdot 2 = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{H_2}^{4p} = g_{H_2}^{4p} \cdot M_{H_2} = 5 \cdot 2,02 = 10,1 \text{ кг/ч}.$$

Таким образом, в результате синтеза формальдегида образуется всего

- водяного пара:

$$G_{H_2O}' = G_{H_2O}^{2p} + G_{H_2O}^{3p} = 2647,1 + 807,3 = 3454,4 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2O}' = g_{H_2O}^{2p} + g_{H_2O}^{3p} = 146,9 + 44,8 = 191,7 \text{ кмоль/ч};$$

- водорода:

$$G_{H_2}^5 = G_{H_2}^{1p} + G_{H_2}^{4p} = 155,9 + 10,1 = 166 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2}^5 = g_{H_2}^{1p} + g_{H_2}^{4p} = 77,2 + 5 = 82,2 \text{ кмоль/ч}.$$

Общий расход кислорода на синтез:

$$G_{O_2}^3 = G_{O_2}^4 = G_{O_2}^{2p} + G_{O_2}^{3p} = 2350,4 + 1075,2 = 3425,6 \text{ кг/ч},$$

$$g_{O_2}^3 = g_{O_2}^4 = g_{O_2}^{2p} + g_{O_2}^{3p} = 73,45 + 33,6 = 107,05 \text{ кмоль/ч}.$$

$$\text{Молярное отношение } CH_3OH : O_2 = \frac{g_{CH_3OH}^4}{g_{O_2}^4} = \frac{448,6}{107,05} = 4,19 : 1.$$

Находим расход сухого воздуха:

$$g_{возд.} = \frac{g_{O_2}^4}{0,21} = \frac{107,05}{0,21} = 509,76 \text{ кмоль/ч},$$

где 0,21 - мольная доля кислорода в сухом воздухе;

$$G_{возд.} = g_{возд.} \cdot M_{возд.} = 509,76 \cdot 29 = 14783,04 \text{ кг/ч},$$

где $M_{возд.} = 29 \text{ кг/кмоль}$ - средняя молярная масса сухого воздуха.

Определяем количество азота в воздухе:

$$g_{N_2}^3 = g_{N_2}^4 = g_{N_2}^5 = g_{возд.} - g_{O_2}^4 = 509,76 - 107,05 = 402,71 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{N_2}^3 = G_{N_2}^4 = G_{N_2}^5 = g_{N_2} \cdot M_{N_2} = 402,71 \cdot 28,02 = 11283,9 \text{ кг/ч},$$

где $M_{N_2} = 28,02 \text{ кг/кмоль}$ - средняя молярная масса азота.

Объемное содержание водяных паров в воздухе при $t_e = 50^\circ\text{C}$:

$$\omega_{H_2O}^6 = \frac{p_{H_2O}^{50} \cdot 100\%}{p} = \frac{12580 \cdot 100\%}{0,65 \cdot 10^6} = 1,94\%$$

где $p_{H_2O}^{50} = 12580 \text{ Па}$ - парциальное давление паров воды в воздухе при температуре $t_e = 50^\circ\text{C}$ [5, с. 271, табл. 13]. Тогда, количество паров воды в воздухе (поток 3):

$$g_{H_2O}^3 = \frac{g_{возд.} \cdot \omega_{H_2O}^6}{100\% - \omega_{H_2O}^6} = \frac{509,76 \cdot 1,94}{100 - 1,94} = 10,08 \text{ кмоль/ч},$$

$$G_{H_2O}^3 = g_{H_2O}^3 \cdot M_{H_2O} = 10,08 \cdot 18,02 = 181,73 \text{ кг/ч}.$$

Находим расход метанола, который остается в продукционном формалине после ректификации:

$$G_{CH_3OH}^9 = G_\phi \cdot \omega_{CH_3OH}^\phi = 18187,83 \cdot 0,07 = 1273,15 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_3OH}^9 = \frac{G_{CH_3OH}^9}{M_{CH_3OH}} = \frac{1273,15}{32,05} = 39,72 \text{ кмоль/ч}.$$

Тогда, расход «возвратного» метанола (поток 10):

$$G_{CH_3OH}^{10} = G_{CH_3OH}^5 - G_{CH_3OH}^9 = 6398,4 - 1273,15 = 5125,25 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_3OH}^{10} = g_{CH_3OH}^5 - g_{CH_3OH}^9 = 199,6 - 39,72 = 159,88 \text{ кг/ч}.$$

Необходимо подавать в процесс «свежего» метанола:

$$G_{CH_3OH}^1 = G_{CH_3OH}^4 - G_{CH_3OH}^{10} = 14378,4 - 5125,25 = 9253,15 \text{ кг/ч}.$$

$$g_{CH_3OH}^1 = \frac{G_{CH_3OH}^1}{M_{CH_3OH}} = \frac{9253,15}{32,05} = 288,71 \text{ кмоль/ч}.$$

Со «свежим» техническим метанолом поступает воды:

$$G_{H_2O}^1 = \frac{G_{CH_3OH}^1 \cdot \omega_{H_2O}^M}{\omega_{CH_3OH}^M} = \frac{9253,15 \cdot 0,001}{0,999} = 9,26 \text{ кг/ч}.$$

$$g_{H_2O}^1 = \frac{G_{H_2O}^1}{M_{H_2O}} = \frac{9,26}{18,02} = 0,514 \text{ кмоль/ч}.$$

Всего необходимо подавать «свежего» технического метанола:

$$G^1 = G_{CH_3OH}^1 + G_{H_2O}^1 = 9253,15 + 9,26 = 9262,41 \text{ кг/ч}.$$

Найдем состав «возвратного» метанола. Расход воды в нем составляет:

$$G_{H_2O}^{10} = \frac{G_{CH_3OH}^{10} \cdot \omega_{H_2O}^6}{\omega_{CH_3OH}^6} = \frac{5125,25 \cdot 0,025}{0,97} = 132,1 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2O}^{10} = \frac{G_{H_2O}^{10}}{M_{H_2O}} = \frac{132,1}{18,02} = 7,33 \text{ кмоль/ч}.$$

Расход формальдегида в «возвратном» метаноле:

$$G_{CH_2O}^{10} = \frac{G_{CH_3OH}^{10} \cdot \omega_{CH_2O}^6}{\omega_{CH_3OH}^6} = \frac{5125,25 \cdot 0,005}{0,97} = 26,42 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_2O}^{10} = \frac{G_{CH_2O}^{10}}{M_{CH_2O}} = \frac{26,42}{30,03} = 0,88 \text{ кмоль/ч}.$$

Столько же формальдегида будет содержаться в потоках 2 и 4:

$$G_{CH_2O}^2 = G_{CH_2O}^4 = G_{CH_2O}^{10} = 26,42 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_2O}^2 = g_{CH_2O}^4 = g_{CH_2O}^{10} = 0,88 \text{ кмоль/ч}.$$

Тогда, общий расход формальдегида после контактного аппарата составит:

$$G_{CH_2O}^5 = G_{CH_2O}^2 + G_{CH_2O}^{10} = 6730 + 26,42 = 6756,42 \text{ кг/ч},$$

$$g_{CH_2O}^5 = \frac{G_{CH_2O}^5}{M_{CH_2O}} = \frac{6756,42}{30,03} = 224,99 \text{ кмоль/ч}.$$

Расход воды в потоке 2 составляет:

$$G_{H_2O}^2 = G_{H_2O}^{10} + G_{H_2O}^1 = 132,1 + 9,26 = 141,36 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2O}^2 = \frac{G_{H_2O}^2}{M_{H_2O}} = \frac{141,36}{18,02} = 7,845 \text{ кмоль/ч}.$$

Расход воды в потоке 4 составляет:

$$G_{H_2O}^4 = G_{H_2O}^2 + G_{H_2O}^3 = 141,36 + 181,73 = 323,09 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2O}^4 = \frac{G_{H_2O}^4}{M_{H_2O}} = \frac{323,09}{18,02} = 17,93 \text{ кмоль/ч}.$$

Общий расход воды после контактного аппарата составит:

$$G_{H_2O}^5 = G_{H_2O}^4 + G_{H_2O}^1 = 323,09 + 3454,4 = 3777,49 \text{ кг/ч},$$

$$g_{H_2O}^5 = \frac{G_{H_2O}^5}{M_{H_2O}} = \frac{3777,49}{18,02} = 209,63 \text{ кмоль/ч}.$$

Определим объемную концентрацию метанола в метаноле-воздушной смеси:

$$\omega_{CH_3OH}^{6030} = \frac{g_{CH_3OH}^4}{g_{6030} + g_{CH_3OH}^4} \cdot 100\% = \frac{448,6}{509,76 + 448,6} \cdot 100 = 46,8\%.$$

Таким образом $\omega_{CH_3OH}^{6030} > 36,5\%$, следовательно, объемная концентрация метанола в метаноле-воздушной смеси выше верхней границы взрывоопасных концентраций [6, с. 456], что очень важно для обеспечения взрывобезопасности и нормального протекания процесса.

В общем виде материальный баланс стадии образования метаноле-воздушной смеси представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Материальный баланс стадии образования метаноле-воздушной смеси

Приход				Расход			
№	Состав	кг/ч	кмоль/ч	№	Состав	кг/ч	кмоль/ч
1	Метанол "свежий"	9262,41	289,224	4	Метаноле-воздушная смесь,	29437,41	977,154
	в т.ч.				в т.ч.		
1.1	метанол	9253,15	288,71	4.1	метанол	14378,4	448,59
1.2	вода	9,26	0,514	4.2	формальдегид	26,42	0,88
2	Метанол "возвратный",	5283,77	168,09	4.3	вода	323,09	17,924
	в т.ч.			4.4	кислород	3425,6	107,05
2.1	метанол	5125,25	159,88	4.5	азот	11283,9	402,71
2.2	формальдегид	26,42	0,88				
2.3	вода	132,1	7,33				
3	Воздух,	14891,23	519,84				
	в т.ч.						
3.1	кислород	3425,6	107,05				
3.2	азот	11283,9	402,71				
3.3	вода	181,73	10,08				
	Всего	29437,41	977,154		Всего	29437,41	977,154

Материальный баланс стадии контактирования представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Материальный баланс стадии контактирования

Приход				Расход			
№	Состав	кг/ч	кмоль/ч	№	Состав	кг/ч	кмоль/ч
1	Метанолю-воздушная смесь,	29437,41	977,154	2	Контактные газы,	29437,71	1144,03
	в т.ч.				в т.ч.		
1.1	метанол	14378,4	448,59	2.1	метанол	6398,4	199,6
1.2	формальдегид	26,42	0,88	2.2	формальдегид	6756,42	224,99
1.3	вода	323,09	17,924	2.3	вода	3777,49	209,63
1.4	кислород	3425,6	107,05	2.4	азот	11283,9	402,71
1.5	азот	11283,9	402,71	2.5	оксид углерода (IV)	985,8	22,4
				2.6	оксид углерода (II)	69,7	2,5
				2.7	водород	166	82,2
	Всего	29437,41	977,154		Всего	29437,71	1144,03

3. Характеристика существующего метода производства

3.1 Характеристика производимой продукции

Полное наименование производства – производство формалина, «Навойский химический комбинат» АО «NAVOIYAZOT».

Технологические нитки были введены в эксплуатацию в 2000 году.

Проектная мощность производства составляет 160000 т/год формалина.

Мощность отделения получения катализатора принята из расчета загрузки трех контактных аппаратов 4 раза в год – 6613 кг/год.

В состав производства формалина входит установка синтеза формальдегида (корпуса 301, 302), установка термического обезвреживания абсорбционных газов (абгазов), предназначенная для сжигания 240000 тонн абгазов в год (корпус 1126), складирование и отгрузка формалина (корпуса 303, 304, 305).

Процесс получения формалина на установке синтеза представлен в виде трех параллельных технологических ниток, состоящих из следующих узлов:

- получение метанола-воздушной смеси;
- синтез формальдегида;
- абсорбция формальдегида;
- ректификация формалина-сырца;

и узлов, выполненных общими для трех ниток:

- сбор и переработка некондиционных и дренируемых продуктов,
- факельная установка,
- очистка газовых выбросов,
- теплопункт,
- получение катализатора.

Получение формалина осуществляется путем синтеза формальдегида из метанола и кислорода воздуха на катализаторе «серебро на пемзе» с последующей абсорбцией его водой. Получение катализатора заключается в пропитке носителя раствором азотнокислого серебра с последующим восстановлением до металлического серебра. Для защиты окружающей среды выхлопные газы (абгазы) сжигаются на факельной установке и установке термического обезвреживания, в топках водогрейных котлов, энергоресурсы которой используются для отопления производственных корпусов.

Проект производства формалина выполнен следующими организациями:

- генеральный проектировщик – ОНПО «Пластполимер» г. Ленинград;
- проектировщик технологической и строительной части основного комплекса производства формалина - АООТ «Сибхимпроект» г. Новосибирск;
- проектировщик технологической части установки термического обезвреживания абгазов – «Гипропласт» г. Москва.

3.2 Характеристика исходного сырья, материалов и полупродуктов

Основные виды исходного сырья, материалов и полупродуктов, а также их характеристика приводятся в соответствии с [3] и представлены в таблице 3.1.1. Характеристика производимой продукции приводится в соответствии с [3].

Выпускаемый готовый продукт – формалин технический.

Предусмотрен выпуск товарного формалина, с массовой долей формальдегида 37 %, соответствующего ГОСТ 1625-89, а также концентрированного формалина, с массовой долей формальдегида до 50 %, используемого для внутреннего потребления в производстве карбосмол.

Таблица 3.1.1 – Характеристика исходного сырья, материалов и полупродуктов

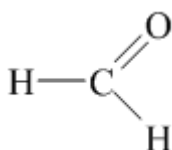
Наименование сырья, материалов или полупродуктов	ГОСТ (технические условия)	Показатели, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели с допустимыми отклонениями
1. Метанол – яд синтетический	ГОСТ 2222-78Е	1.1. Массовая доля метанола, %, не менее	99.0
2. Вода деминерализованная	Тех. регламент производства тепла, пара и воды	2.1. Жесткость, ммоль/дм ³	не более 0.005
		2.2. Содержание железа, мг/дм ³	не более 0.05
		2.3. pH	6.5-7.5
3. Кислота азотная концентрированная	ГОСТ 701-89	3.1. Массовая доля азотной кислоты, %	98,2
4. Едкий натр	ГОСТ 2263-79	4.1. Массовая доля едкого натра (марка «РР»), %	не менее 42

5. Обратная вода	Тех. регламент установки обратного водоснабжения	5.1. Содержание взвешенных частиц, мг/дм ³	не более 20
		5.2. Общая жесткость, ммоль/дм ³	не более 5
6. Пар, 18 кгс/см ²	Тех. регламент производства тепла, пара и воды	6.1. Давление, кгс/см ²	18
		6.2. Температура, °С	+350

Формалин является водным раствором формальдегида и метанола.

Эмпирическая формула формальдегида: CH₂O.

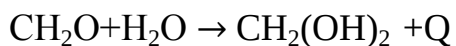
Структурная формула формальдегида:



Молярная масса 30 кг/кмоль.

При нормальных условиях формальдегид представляет собой бесцветный газ с резким раздражающим запахом. При охлаждении до минус 19°С газообразный формальдегид переходит в жидкость, которая при минус 118°С замерзает, превращаясь в твердое прозрачное кристаллическое вещество.

Как в жидком, так и в газообразном состоянии формальдегид неустойчив и легко полимеризуется. Этому благоприятствуют пониженные температуры и наличие полярных примесей. Поэтому формальдегид транспортируется и хранится либо в растворах, либо в виде полимеров – параформа и триоксана. Формальдегид хорошо растворяется в воде и спиртах. В водных растворах формальдегид не сохраняется в мономерной форме, а вступает в химическое взаимодействие с водой с образованием гидратов (метиленгликолей):



При обычных температурах водные растворы формальдегида мутнеют, вследствие выпадения в осадок продуктов полимеризации – полиоксиметиленгликолей. Для предохранения концентрированных растворов формальдегида от полимеризации к ним добавляют стабилизаторы. Основным промышленным стабилизатором служит метанол (7 ÷ 12%).

Формальдегид токсичен; предельно допустимая его концентрация в воздухе 0,001 мг/л.

По физико-химическим показателям технический формалин должен соответствовать требованиям и нормам, указанным в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Физико-химические показатели технического формалина

Наименование показателя	Норма для марки	
	ФМ ГОСТ 1625-89	
	Высший сорт ОКП 241731 0120	Первый сорт ОКП 241731 0130
1 Внешний вид	Бесцветная прозрачная жидкость. При хранении допускается образование мути или белого осадка, растворимого при температуре не выше 40°C.	
2 Массовая доля формальдегида, %	37.2±0.3	37.0±0.5
3 Массовая доля метанола, %	4÷8	4÷8
4 Массовая доля кислот в пересчете на муравьиную кислоту, %, не более	0.02	0.04
5 Массовая доля железа, %, не более	0.0001	0.0005
6 Массовая доля остатка после прокаливании, %, не более	0.008	0.008

Физические свойства технического формалина зависят от содержания в нем формальдегида и метанола и меняются в пределах:

- плотность, кг/м³ 1077-1116;
- температура кипения, °С 98,9;
- удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К) 3352;
- вязкость, Па·с (2,45÷2,58)10⁻³.

Примечание:

- Для технического формалина марки ФМ допускается, по согласованию с потребителем, устанавливать норму по показателю 3 не более 10 % (см. таблицу 3.2.1).
- Показатели 5 и 6 определяются по требованию потребителя (см. таблицу 3.2.1).

4. Теоретическая часть

4.1 Общие сведения

Реакции синтеза формальдегида относятся к гетерогенным реакциям, то есть реакциям, на границе раздела фаз. С точки зрения гетерогенного химического процесса такие реакции можно разделить на три стадии: доставка реагирующих частиц на границу раздела фаз, реакция на границе раздела фаз, вывод продуктов реакции с поверхности раздела.

В гетерогенных реакциях роль промежуточного продукта играют обычно молекулы, связанные с поверхностью химическими силами, или, как говорят, химически адсорбированные на поверхности. Кинетика химической гетерогенной реакции сильно усложняется неоднородностью поверхности. Реальная поверхность твёрдого тела никогда не бывает однородной в энергетическом и кинетическом отношении. Различные участки поверхности характеризуются различными значениями теплоты адсорбции и энергии активации.

Адсорбция на однородной поверхности подчиняется адсорбционной изотерме Лэнгмюра, согласно которой зависимость количества адсорбированного вещества от парциального давления этого вещества в газовой фазе выражается как:

$$g = g_0 \frac{p}{p + b}$$

где g_0 и b – постоянные.

Аналогичный вид должна иметь зависимость скорости реакции от концентрации реагирующих веществ в газовой фазе для однородной поверхности при, так называемой, лэнгмюровской кинетике.

Различают два вида адсорбции: физическую и химическую. При физической адсорбции действуют межмолекулярные силы типа вандерваальского или дипольного взаимодействия. Физическая адсорбция не требует энергии активации и протекает очень быстро. Количество адсорбированного вещества на поверхности определяется при этом адсорбционным равновесием и практически не зависит от скорости адсорбции.

При химической адсорбции молекулы связываются химическими силами того же типа, что и силы, осуществляющие валентную связь. Следовательно, химическая адсорбция требует энергии активации, поэтому она называется активированной адсорбцией. В этом случае адсорбционное равновесие устанавливается медленно и в реальных условиях может практически не достигаться. Отметим связь активированной адсорбции с

процессами гетерогенного катализа.

В качестве переменных, определяющих скорость реакции, наряду с концентрациями в объеме c , входят также степени заполнения поверхности θ_k различными веществами, участвующими в реакции.

Гетерогенная реакция может проходить либо в адсорбционном состоянии, либо прямым ударом. В первом случае образование конечного продукта является следствием двух последовательных процессов: адсорбции и реакции. Скорость определяется самой медленной из этих стадий. Кинетическое уравнение для адсорбции i -го вещества из многокомпонентной смеси имеет вид:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = k_i \cdot c_i \cdot \left(1 - \sum_k \theta_k\right) - k_i' \cdot \theta_i$$

Здесь k_i и k_i' – константы скоростей адсорбции десорбции.

Для большинства гетерогенных химических реакций из трёх перечисленных стадий наиболее медленным являются стадии, связанные с диффузией исходных веществ к поверхности раздела или продуктов реакции в объем системы.

Записав систему таких уравнений для всех компонентов смеси и приравняв правые части нулю, далее решают полученную систему алгебраических уравнений, в результате чего получается обобщенная изотермия Лэнгмюра.

Для одного вещества решение имеет вид:

$$\theta = \frac{k_i \cdot c}{k_i \cdot c + k_i'} = \frac{c}{c + b}$$

В простейшем случае мономолекулярной реакции в адсорбированном состоянии $A \rightarrow B$ скорость реакции пропорциональна степени заполнения, если адсорбция протекает быстро, а реакция на поверхности медленно, то заполнение можно находить по равновесной изотерме Лэнгмюра, откуда скорость реакции:

$$w = k \cdot \theta = k \frac{c}{c + b}$$

где k – константа скорости на поверхности.

При малых концентрациях реакции идут по первому, а при больших – по нулевому порядку. На этом простом примере видна важная особенность гетерогенных реакций: эффективный порядок реакции может быть меньше единицы [4].

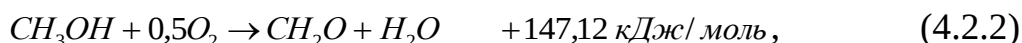
4.2 Химизм процесса

Образование формальдегида происходит при прохождении метанолю-воздушной смеси через слой катализатора «серебро на носителе» при температуре в зоне контактирования:

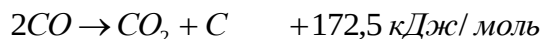
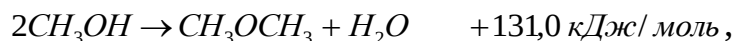
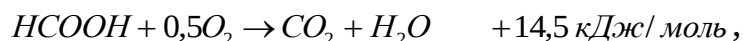
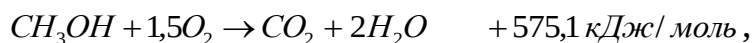
550-600°C при работе в «мягком» режиме;

660-700°C при работе в «жестком» режиме.

Образование формальдегида осуществляется в результате протекания параллельных реакций простого и окислительного дегидрирования метанола:



Наряду с этими реакциями в системе протекает целый комплекс побочных превращений:



Реакции 4.2.1 и 4.2.2 являются равновесными. Доля метанола израсходованного по реакции 4.2.2 составляет около 60 %, а остальное по реакции 4.2.1.

Превращение метанола в формальдегид происходит в результате контакта молекул спирта с кислородом, хемосорбированным на атомах серебра, т.е. активными центрами катализатора являются поверхностные окислы серебра. Время контакта составляет 0,01 – 0,03 с. Процесс получения формальдегида в целом сопровождается выделением тепла, за счет которого поддерживается необходимая температура в зоне контактирования, и равновесие реакции дегидрирования смещается вправо.

Побочные реакции снижают выход формальдегида и определяют состав выхлопных газов (абгазов). По составу выхлопных газов можно судить о работе катализатора, о наличии отклонений от норм технологического режима. Повышение содержания суммы

углеродосодержащих газов свидетельствует об усилении побочных реакций. В частности, увеличение объемной доли двуокиси углерода свыше 5% свидетельствует об избытке кислорода в метано-воздушной смеси. Увеличение содержания окиси углерода в выхлопных газах – результат перегрузки и отравления катализатора.

Объемная доля метана более 1 % бывает при высокой температуре в нижних слоях катализатора, где нет уже кислорода, кроме этого содержание метана увеличивается при отравлении каталитической массы железом или его солями, при попадании асбеста (от прокладки), что сопровождается выделением сажи. Объемная доля водорода ниже 16% указывает на малую конверсию, если температура низка, и на избыток кислорода при повышенной температуре.

Увеличение объемной доли водорода в газах (свыше 20 %) указывает на повышение степени полезной конверсии и на уменьшение побочных реакций.

5. Описание технологической схемы

Описание технологической схемы приводится в соответствии с [3]. Метод производства формалина из метанола состоит в получении формальдегида на катализаторе «серебро на носителе» при температуре $550^{\circ}\text{C} \div 700^{\circ}\text{C}$ с последующей абсорбцией его водой и ректификацией.

Процесс получения формалина для одной технологической нитки состоит из следующих стадий:

- получение метанола-воздушной смеси;
- синтез формальдегида;
- абсорбция формальдегида с получением «формалина-сырца»;
- ректификация «формалина-сырца».

Общими для всех ниток узлами являются:

- сбор и переработка некондиционных и дренируемых продуктов,
- очистка газовых выбросов,
- сжигание абсорбционных газов на факельной установке, теплоснабжение, сбор и перекачка конденсата.

Вспомогательными узлами являются:

- приготовление катализатора,
- складирование и отгрузка формалина,
- термическое обезвреживание отходов.

Графическое изображение стадии получения метанола-воздушной смеси и стадии контактирования приведено на ФЮРА ПФ 000.000 СТ.

5.1 Получение метанола-воздушной смеси

Метанол со склада поступает через обратные клапаны на «метанольные гребенки», где к «свежему» метанолу добавляется «возвратный» метанол с узлов ректификации. Метанол (для одной технологической нитки) от «метанольной гребенки» предварительно подогревается во встроенных теплообменниках абсорбционной колонны поз. К16 до 65°C и поступает для образования метанола-воздушной смеси в спиртоиспаритель. Чтобы снизить побочные реакции процесса получения формальдегида, метанол в смесителе поз. Х11 смешивается с деминерализованной или надсмольной водой.

Спиртоиспаритель состоит из испарителя поз. Е7а, выносной греющей камеры – теплообменника поз. Т7 и смонтированного под ней отстойника поз. Е7б.

Воздух из атмосферы, предварительно очищенный от пыли на фильтре поз. Ф4, подается воздуходувками поз. М5/1-3 с давлением $0,5 \div 0,8 \text{ кгс/см}^2$, температурой $30 \div 70^\circ\text{C}$ и расходом $3000 \div 11000 \text{ м}^3/\text{ч}$ через обратный клапан в верхнюю часть выносной греющей камеры поз. Т7. На каждую технологическую нитку предусмотрено по три воздуходувки производительностью $6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ каждая – две в работе, одна в резерве или ремонте.

Метанолю-водяная смесь из смесителя поз. Х11 с температурой $20 \div 65^\circ\text{C}$ и расходом $6 \div 44 \text{ м}^3/\text{ч}$ подается в отстойник спиртоиспарителя поз. Е7б, где в конической части отделяются и собираются механические примеси.

Уровень в испарителе поз. Е7а поддерживается подачей метанола. При уровне метанола в испарителе поз. Е7а 20% воздуходувки поз. М5/1-3 отключаются.

Метанол в спиртоиспарителе подогревается паром давлением 2 кг/см^2 , подаваемым из паросборника поз. Е12 в выносную греющую камеру теплообменника спиртоиспарителя поз. Т7. Температура метанола в испарителе поз. Е7а поддерживается $52 \div 85^\circ\text{C}$ в зависимости от концентрации метанола.

Образование метанолю-воздушной смеси происходит в верхней части выносной греющей камеры поз. Т7, куда через барботер подается воздух от воздуходувок поз. М5/1-3. Затем в испарителе поз. Е7а жидкий метанол отделяется, с помощью каплеотбойника, и метанолю-воздушная смесь поступает в перегреватель поз. Т8.

Метанолю-воздушная смесь в перегревателе поз. Т8 перегревается до $90 \div 145^\circ\text{C}$ паром 6 кгс/см^2 , подаваемым в межтрубное пространство, для предотвращения конденсации и попадания жидкого метанола на катализатор, который при этом зауглероживается и снижает свою активность. Перегретая метанолю-воздушная смесь, пройдя огнепреградитель поз. Х9, заполненный фарфоровыми шариками и кольцами Рашига, которые служат для предотвращения попадания открытого огня в спиртоиспаритель, поступает в верхнюю часть контактного аппарата поз. Р10, где и происходит каталитический процесс синтеза формальдегида.

5.2 Синтез формальдегида

В контактном аппарате поз. Р10 происходит образование формальдегида из метанола при прохождении метанолю-воздушной смеси через слой катализатора при температуре $550 \div 600^\circ\text{C}$ («мягкий режим»), или с добавлением воды при температуре $650 \div 700^\circ\text{C}$ («жесткий режим»).

Контактный аппарат представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, в нижней части которого расположен кожухотрубный теплообменник, в межтрубное пространство которого подается водяной конденсат с температурой 120°C и давлением 2 кгс/см², а по трубному пространству проходят реакционные газы. Катализатор укладывается на 2 слоя сетки из нержавеющей стали, 10×10 мм и 1×1 мм, высотой 120÷150 мм, а сверху помещается электрозапал.

Разогрев контактной массы, при пуске, до температуры 300÷350°C, при которой начинается реакция превращения метанола в формальдегид, осуществляется включением электрозапала, а дальнейший подъем температуры происходит за счет выделяющегося тепла реакций.

Температура в слое катализатора поддерживается автоматически, и сопровождается световой и звуковой сигнализацией при температуре в слое катализатора 620°C – в «мягком режиме» и 720°C – в «жестком режиме». При достижении температуры в слое катализатора в «мягком режиме» – 650°C, а в «жестком режиме» – 750°C происходит автоматическое отключение воздухоудовки поз. М5, т. е. прекращается подача воздуха.

В результате реакций, протекающих в слое катализатора, из метанола-воздушной смеси образуются контактные газы, в состав которых входят: формальдегид, водород, углекислый газ, окись углерода, азот, пары воды, непрореагировавший метанол.

Для предотвращения термического разложения образовавшегося формальдегида и прекращения побочных реакций, контактные газы выходящие из зоны контактирования резко охлаждаются в подконтактном холодильнике до температуры не более 200°C за счет испарения водного конденсата, поступающего из паросборника поз. Е12 в межтрубное пространство подконтактного теплообменника. Образовавшаяся в подконтактном холодильнике паро-водяная смесь за счет естественной циркуляции поступает в паросборник поз. Е12, где отделяется пар от конденсата. Давление пара в паросборнике поз. Е12 1,8÷2 кгс/см², поддерживается подачей пара в паросборник поз. Е12 из теплопункта.

Конденсат из теплообменника поз. Т7 спиртоиспарителя собирается в конденсатосборник поз. Е13, откуда насосами поз. Н14/1-2 через обратный клапан подается в паросборник поз. Е12. Контактные газы, охлажденные в подконтактном холодильнике поступают на абсорбцию.

6. Обоснование конструкции основного аппарата и выбора материала для его изготовления

Реактор (контактный аппарат поз. Р10) предназначен для окислительного дегидрирования метанола в формальдегид в газовой фазе на пемзосеребряном катализаторе.

На действующем производстве находятся в эксплуатации аппараты конструкции, представленной на ФЮРА ПФ 001.00 ВО.

Каждый такой реактор представляет собой стальной вертикальный цилиндрический аппарат, разделенный на две секции: верхнюю (секция контактирования) и нижнюю (подконтактный холодильник). В нижней части секции контактирования на свободно лежащую решетку, покрытую двумя слоями сеток, засыпан катализатор. В этой секции происходит, непосредственно, синтез формальдегида. Разогрев контактной массы, при пуске, до температуры $300\div 350^{\circ}\text{C}$, при которой начинается реакция превращения метанола в формальдегид, осуществляется включением электрозапала, представляющего собой три нихромовые спирали (диаметром 0,4 мм), уложенные поверх слоя катализатора. Дальнейший подъем температуры происходит за счет выделяющегося тепла реакций. Секция контактирования снабжена штуцером для подвода метанола-воздушной смеси, люком-лазом (для загрузки и выгрузки катализатора), двумя монтажными штуцерами (для строповки аппарата). В связи с тем, что метанола-воздушная смесь взрывоопасна, на случай аварийных ситуаций, секция контактирования снабжена, также, тремя взрывными мембранами. Для контроля температуры в слое катализатора имеются три штуцера, предназначенных для подсоединения датчиков температуры.

Синтез формальдегида протекает с выделением тепла при температурах $550\div 700^{\circ}\text{C}$ (см. раздел 4.2). При таких температурах формальдегид неустойчив и возможно его необратимое разложение, поэтому требуется быстрое охлаждение (закалка) контактных газов до температуры не выше 200°C . По этой причине непосредственно под верхней секцией контактного аппарата (в нижней секции) смонтирован теплообменник (подконтактный холодильник). Подконтактный холодильник представляет собой кожухотрубчатый одноходовой теплообменник, по трубному пространству которого движутся контактные газы, а в межтрубном пространстве происходит кипение водного конденсата. Для равномерной подачи конденсата и отвода водяного пара имеется по шесть штуцеров, расположенных радиально, соответственно в нижней и верхней частях межтрубного пространства. В нижней части холодильника имеются: штуцер для отвода контактных газов, люк-лаз (для регламентных работ), дренажный

штуцер. Для компенсации температурных напряжений на корпусе подконтактного холодильника предусмотрен линзовый компенсатор.

Контактный аппарат устанавливается на несущие балки металлоконструкции с помощью юбочной цилиндрической опоры.

На выбор конструкционных материалов для изготовления аппаратов химической промышленности влияет ряд факторов, таких как:

- агрессивность среды, с которой контактирует материал;
- температура;
- давление;
- стоимость материала;
- легкость его обработки и т. д.

Главными из этих условий являются агрессивность среды и температура.

В контактном аппарате рассматриваемой конструкции можно выделить три группы деталей и узлов: детали, соприкасающиеся с контактным газом и метано-воздушной смесью (обечайка, крышка и днище, трубы подконтактного холодильника, трубные решетки и т. д.), детали, соприкасающиеся с водяным паром и конденсатом (штуцера для подвода конденсата и отвода пара, трубчатка подконтактного холодильника и т. д.), и детали, находящиеся в контакте только с внешней средой (монтажные штуцера, опора и т. д.).

Контактный газ является агрессивной средой и имеет достаточно высокую температуру, до 700°C, поэтому узлы и детали, соприкасающиеся с ним, следует изготавливать из жаропрочных материалов с высокой коррозионной стойкостью. Этим условиям удовлетворяют высоколегированные стали. Единственный недостаток этих материалов – их высокая стоимость. В конструкции контактных аппаратов для этих целей применяется высоколегированная сталь марки 12X18H10T (ГОСТ 5632-61) [7]. Эта сталь обладает хорошими прочностными свойствами, жаропрочна при температурах до 700°C, характеризуется высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, технологична в обработке, хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях, хорошо сваривается всеми видами сварки и не требует обязательной термической обработки изделия после сварки [8, с. 79].

Другая группа деталей и узлов находится в контакте с водяным паром и конденсатом при температурах порядка 100÷150°C. Вода является менее агрессивной средой по сравнению с контактным газом, поэтому для изготовления узлов и деталей, контактирующих с водой можно использовать стали с меньшей коррозионной и жаростойкостью такие как углеродистые

или низколегированные стали. Использование сталей этих типов предпочтительно, т. к. они дешевле высоколегированных. В конструкции действующих контактных аппаратов для изготовления деталей контактирующих с водой применяется низколегированная сталь марки 09Г2С (ГОСТ 5520-62) [7]. Сталь этой марки характеризуется повышенной прочностью и ударной вязкостью, хорошо деформируется и обрабатывается резанием, легко сваривается всеми видами сварки, однако, неустойчива во многих агрессивных средах [8, с. 69].

Детали, находящиеся в контакте только с внешней средой, следует изготавливать из возможно более дешевых материалов, обладающих, однако, достаточной механической прочностью. В этом отношении наиболее удачными оказываются конструкционные углеродистые стали. В конструкции действующих контактных аппаратов для изготовления такого рода деталей используется углеродистая сталь Ст.3сп (ГОСТ 380-60) [7]. Сталь этой марки характеризуется хорошим сочетанием механических свойств, позволяющим применять ее для изготовления ответственных деталей и узлов, хорошо обрабатывается резанием и давлением, хорошо сваривается всеми видами сварки, однако, как и сталь марки 09Г2С неустойчива во многих агрессивных средах [8, с. 68].

В качестве прокладочного материала в действующих контактных аппаратах используется картон асбестовый (ГОСТ 285075). Этот материал может использоваться в агрессивных средах при рабочих давлениях среды до 6 МПа и температурах до 500°C [8, с. 240], следовательно, выбор его оправдан.

7. Расчеты основного аппарата

Целью расчетов контактного аппарата является определение: основных геометрических размеров аппарата, высоты слоя катализатора, необходимой поверхности теплообмена подконтактного холодильника.

Все расчеты, согласно техническому заданию, являются поверочными, проводятся с целью проверки обеспечения уже действующим аппаратом по производительности. Следовательно, в расчетах мы будем использовать данные аппарате, приводимые в [7].

Все расчеты будем проводить для случая получения продукционного формалина массовой долей формальдегида 37 % в «мягком» режиме (см. раздел 4.2).

Подробное описание работы контактного аппарата приводится в разделе 3. Описание конструкции контактного аппарата приведено в разделе 6. Материальный баланс стадии контактирования приводится в разделе 2 в таблице 2.2. Конструкция аппарата представлена на чертеже ФЮРА 001.00 ВО. Техническая характеристика контактного аппарата, согласно [7], приведена в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Техническая характеристика контактного аппарата

Наименование показателя	Буквенное обозначение	Численное обозначение
1. Высота аппарата общая	-	7,7 м
2. Диаметр внутренний (для секции контактирования и подконтактного холодильника)	D_v	3 м
3. Площадь поверхности теплообмена	F	1070 м^2
4. Площадь сечения трубного пространства	$S_{\text{тр}}$	$1,1 \text{ м}^2$
5. Длина трубки	L	3 м
6. Трубки	-	38x2,5 мм

7.1 Расчеты секции контактирования

7.1.1 Тепловые расчеты

Целью тепловых расчетов секции контактирования является уточнение температуры контактных газов на входе в подконтактный холодильник. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Исходные данные:

- расход метанола-воздушной смеси – $g_1 = 887,476$ кмоль/ч (см. раздел 2 таблица 2.2);
- расход контактного газа – $g_2 = 1030,969$ кмоль/ч (см. раздел 2 таблица 2.2);
- температура на входе в аппарат – $t_1 = 145^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.1);
- температура на выходе из аппарата – $t_2 = 550 \div 620^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.2);
- давление контактного газа на выходе – $p = 0,12$ МПа (см. [7]).

Уравнение теплового баланса в общем виде [5, с. 175]:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_{\text{ном}} \quad (7.1.1.1)$$

где Q_1 – тепловой поток метанола-воздушной смеси, кВт;

Q_2 – теплота, выделяющаяся за счет химических реакций, кВт;

Q_3 – тепловой поток контактного газа, кВт;

$Q_{\text{ном}}$ – теплопотери в окружающую среду, кВт.

Для определения значений Q_1 и Q_3 необходимо рассчитать средние молярные теплоемкости метанола-воздушной смеси при средней температуре $T_1 = 145 + 273 = 418$ К и контактного газа при средней температуре $T_2^* = \frac{(550 + 273) + (620 + 273)}{2} = 858$ К.

Для этого воспользуемся данными, приведенными в [5, с. 264-267, таблицы 2 и 3]. Данные о составах метанола-воздушной смеси и контактного газа возьмем из таблицы 2.2. Результаты расчета средней молярной теплоемкости метанола-воздушной смеси представлены в таблице 7.1.1.1, а расчета средней молярной теплоемкости контактного газа в таблице 7.1.1.2. В таблицах 7.1.1.1 и 7.1.1.2 сумма значений $X_i c_i$, с, представляет собой искомую среднюю молярную теплоемкость.

Таблица 7.1.1.1

Компонент	Молярная доля компонента	Средняя молярная теплоемкость компонента, Дж/(моль·К)	$X_i c_i$, Дж/(моль·К)
	X_i	C_i	
Метанол	0,459	53,83	24,708
Азот	0,412	29,665	12,222
Кислород	0,110	30,719	3,379
Вода	0,018	34,666	0,624
Формальдегид	0,001	40,495	0,040
Сумма	1	-	40,973

Таблица 7.1.1.2

Компонент	Мольная доля компонента	Средняя молярная теплоемкость компонента, Дж/(моль·К)	$X_i c_i$, Дж/(моль·К)
	X_i	C_i	
Метанол	0,174	82,691	14,388
Азот	0,352	31,544	11,103
Вода	0,183	39,234	7,180
Формальдегид	0,197	57,419	11,312
Оксид углерода (IV)	0,020	50,736	1,015
Оксид углерода (II)	0,002	31,865	0,064
Водород	0,072	30,145	2,170
Сумма	1	-	47,232

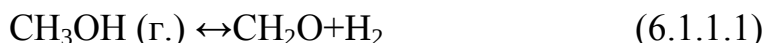
Находим тепловой поток метанола-воздушной смеси по формуле 42 [5]:

$$Q_1 = \frac{n_1 \cdot c_1^* \cdot t_1}{3600} \quad (7.1.1.2)$$

где c_1^* – средняя молярная теплоемкость метанола-воздушной смеси, Дж/(моль·К) (см. таблицу 7.1.1.1);

$$Q_1 = \frac{887,476 \cdot 40,973 \cdot 145}{3600} = 1464 \text{ кВт}$$

Для определения Q_2 необходимо знать теплоты основных протекающих реакций. Примем их согласно [5, с. 175].



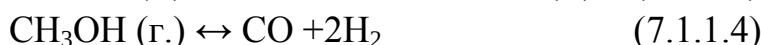
$$\Delta H_1 = 85 \text{ кДж/моль}$$



$$\Delta H_2 = -147,12 \text{ кДж/моль}$$



$$\Delta H_3 = -575 \text{ кДж/моль}$$



$$\Delta H_4 = 92,87 \text{ кДж/моль}$$

Находим Q_2 по формуле 49 [5]:

$$Q_2 = \frac{1000 \cdot \sum [g_{\text{CH}_3\text{OH}}^i \cdot (-1 \cdot \Delta H_i)]}{3600},$$

где $g_{\text{CH}_3\text{OH}}^i$ – расход метанола в i -той реакции, кмоль/ч (см. раздел 2);

ΔH_i – тепловой эффект i -той реакции, кДж/моль.

Получаем:

$$Q_2 = \frac{1000 \cdot [70,094 \cdot (-85,1) + 133,406 \cdot 147,12 + 20,35 \cdot 575,1 + 2,261 \cdot (-92,87)]}{3600} = 6987,5 \text{ кВт}$$

Принимаем, что теплотери в окружающую среду в среднем составляют 3 % от общего прихода (расхода) теплоты. Тогда, в соответствии с формулой 7.1.1.1 получаем:

$$Q_{nom} = \frac{(Q_1 + Q_2) \cdot 3\%}{100\%} = \frac{(1464.6 + 6987.5) \cdot 3\%}{100\%} = 253.6 \text{ кВт}$$

В соответствии с формулой 7.1.1.1 определяем тепловой поток контактного газа:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 - Q_{nom},$$

$$Q_3 = 1464,6 + 6987,5 - 253,6 = 8198,5 \text{ кВт}.$$

Для теплового потока контактного газа имеем формулу 42 [5]:

$$Q_3 = \frac{g_2 \cdot c_2^* \cdot t_2^u}{3600} \quad (7.1.1.3)$$

где c_2^* – средняя молярная теплоемкость контактного газа, Дж/(моль·К) (см. таблицу 7.1.1.2);

t_2^u – истинная температура контактного газа.

Находим истинную температуру контактного газа из формулы 7.1.1.3

$$t_2^u = \frac{3600 \cdot Q_3}{g_2 \cdot c_2^*}$$

$$t_2^u = \frac{3600 \cdot 8198.5}{1030.969 \cdot 47.232} = 605 \text{ °C},$$

что соответствует принятому интервалу температур.

Тепловой баланс секции контактирования контактного аппарата представлен в таблице 7.1.1.3.

Таблица 7.1.1.3 – Тепловой баланс секции контактирования

Приход			Расход		
Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %	Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %
Тепловой поток метано-воздушной смеси	1464,6	17	Тепловой поток контактного газа	8198,5	97
Теплота, выделяющаяся за счет химических реакций	6987,5	83	Теплопотери в окружающую среду	253,6	3
Всего	8452,1	100	Всего	8452,1	100

7.1.2 Технологические расчеты

Главной целью технологических расчетов секции контактирования контактного аппарата является определение высоты слоя катализатора, при которой может быть обеспечена новая производительность. Технологические расчеты носят поверочный характер. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Объемный расход метано-воздушной смеси определим по уравнению Клапейрона-Менделеева:

$$V = \frac{g \cdot R \cdot T \cdot 1000}{P} \quad (7.2.2.1)$$

где g - мольный расход метанола-воздушной смеси, кмоль/ч (см. раздел 5);
 R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T - температура, К (см. раздел 4.2);
 p - давление, Па (см. раздел 4.2).

$$V = \frac{887.476 \cdot 8.314 \cdot 418 \cdot 1000}{65000} = 47449.3 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При объемной скорости $V_{об} = 28000 \text{ ч}^{-1}$ (см. [5, с. 169]) необходимый объем катализатора равен:

$$V_k = \frac{V}{V_{об}} = \frac{47449,3}{28000} = 1,695 \text{ м}^3.$$

Находим высоту слоя катализатора, м:

$$h_k = \frac{4 \cdot V_k}{\pi \cdot D_g^2}$$

где D_g - внутренний диаметр секции контактирования, м (см. таблицу 7.1).

$$h_k = \frac{4 \cdot 1.695}{3.14 \cdot 3^2} = 0.23 \text{ м}$$

В рассматриваемом аппарате высота слоя катализатора составляет в среднем 0,15 м, следовательно, для перевода контактного аппарата на новую производительность требуется увеличить слой катализатора.

Рассчитаем объемный расход контактного газа по формуле 7.1.2.1 (мольный расход контактного газа, а также его температуру и давление см. в разделе 7.1.1):

$$V_1 = \frac{1030.969 \cdot 8.314 \cdot 878 \cdot 1000}{120000} = 62714.6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Линейная скорость газа в сечении секции контактирования:

$$h_k = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D_g^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 62714.6}{3.14 \cdot 3^2 \cdot 3600} = 2.74 \text{ м/с},$$

что соответствует оптимальному технологическому режиму [5, с. 177].

7.2 Расчеты подконтактного холодильника

7.2.1 Тепловые расчеты

Целью тепловых расчетов подконтактного холодильника является определение тепловой нагрузки холодильника и расхода парового конденсата. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Исходные данные:

- расход контактного газа - $g_1 = 1030,969$ кмоль/ч (см. раздел 2 таблица 2.2);

- состав контактного газа см. в таблице 5.2;
- температура контактного газа на входе в аппарат – $t_1 = 605^\circ\text{C}$ (см. раздел 7.1.1);
- температура контактного газа на выходе из аппарата - $t_2 = 150^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.2);
- температура парового конденсата - $t_k = 120^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.2);
- давление парового конденсата - $p_k = 2 \text{ кгс/см}^2$ (см. раздел 4.2);
- техническая характеристика подконтактного холодильника приведена в таблице 7.1.

Уравнение теплового баланса холодильника в общем виде [5, с. 184]:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_{\text{ном}}, \quad (7.2.1.1)$$

где Q_1 - тепловой поток контактного газа на входе в холодильник, кВт;

Q_2 - тепловой поток контактного газа на выходе из холодильника, кВт;

Q_3 - теплота, отводимая испаряющимся конденсатом, кВт;

$Q_{\text{ном}} \sim$ теплотери в окружающую среду, кВт.

Тепловой поток контактного газа на входе в холодильник Q_1 определен в тепловом расчете секции контактирования (см. таблицу 7.1.1.3):

$$Q_1 = 8198,5 \text{ кВт.}$$

Для определения значения Q_2 рассчитаем среднюю молярную теплоемкость контактного газа при температуре $T_2 = 150 + 273 = 423 \text{ К}$. Для этого воспользуемся данными, приведенными в [5, с. 264-267, таблицы 2 и 3]. Данные о составе контактного газа возьмем из таблицы 5.2. Результаты расчета средней молярной теплоемкости контактного газа представлены в таблице 7.2.1.1. В таблице 7.2.1.1 сумма значений $X_i c_i$ представляет собой искомую среднюю молярную теплоемкость контактного газа.

Таблица 7.2.1.1

Компонент	Молярная доля компонента	Средняя молярная теплоемкость компонента, Дж/(моль·К)	$X_i c_i$ Дж/(моль·К)
	X_i	c_i	
Метанол	0,174	54,226	9,435
Азот	0,352	29,686	10,449
Вода	0,183	34,715	6,353
Формальдегид	0,197	40,722	8,022
Оксид углерода (IV)	0,020	43,191	0,864
Оксид углерода (II)	0,002	29,887	0,060
Водород	0,072	28,938	2,084
Сумма	1	-	37,267

Находим тепловой поток контактного газа на выходе из холодильника:

$$Q_3 = \frac{q_2 \cdot c_2^* \cdot t_2}{3600}$$

где c' - средняя молярная теплоемкость контактного газа, Дж/(моль·К) (см. таблицу 7.2.1.1).

$$Q_3 = \frac{1030,969 \cdot 37,267 \cdot 150}{3600} = 1600,9 \text{ кВт}$$

Принимаем, что теплотери в окружающую среду в среднем составляют 3 % от общего прихода (расхода) теплоты. Тогда, в соответствии с формулой 7.2.1.1 получаем:

$$Q_{\text{ном}} = \frac{Q_1 \cdot 5\%}{100\%} = \frac{8198,5 \cdot 5\%}{100\%} = 409,9 \text{ кВт}$$

Теплоту, отводимую испаряющимся конденсатом Q_3 , находим из уравнения теплового баланса (см. формулу 7.2.1.1):

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 - Q_{\text{ном}},$$

$$Q_3 = 8198,5 - 1600,9 - 409,9 = 6187,7 \text{ кВт}$$

Находим расход конденсата:

$$G_2 = \frac{Q_3 \cdot 3600}{r},$$

где r – удельная теплота парообразования воды при температуре $t_k = 120^\circ\text{C}$ и давлении $p_k = 2 \text{ кгс/см}^2$, кДж/кг (см. [5, таблица 14]),

$$G_2 = \frac{6187,7 \cdot 3600}{2208} = 10088,64 \text{ кг/с}$$

Тепловой баланс подконтактного холодильника представлен в таблице 7.2.1.2.

Таблица 7.2.1.2 - Тепловой баланс подконтактного холодильника

Приход			Расход		
Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %	Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %
Тепловой поток контактного газа на входе	8198,5	100	Тепловой поток контактного газа на выходе	1600,9	20
			Теплота, отводимая испаряющимся конденсатом	6187,7	75
			Теплопотери в окружающую среду	409,9	5
Всего	8198,5	100	Всего	8198,5	100

7.2.2 Расчет поверхности теплопередачи

Выполним поверочный расчет площади поверхности теплопередачи. Целью этого расчета является определение запаса площади поверхности теплопередачи при новой производительности. Расчеты будем проводить

согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Исходные данные:

- расход контактного газа – $g_1=1030,969$ кмоль/ч, $G_1=26706,67$ кг/ч (см. раздел 2 таблица 2.2);
- состав контактного газа см. в таблице 2.2;
- температура контактного газа на входе в аппарат – $t_1=605^\circ\text{C}$ (см. раздел 1.1);
- температура контактного газа на выходе, из аппарата – $t_2=150^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.2);
- температура парового конденсата $t_k=120^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.2);
- давление парового конденсата $p_k=2$ кгс/см² (см. раздел 4.2);
- тепловая нагрузка $Q=6187700$ Вт (см. таблицу 7.2.1.2);
- техническая характеристика подконтактного холодильника приведена в таблице 6.1.

Необходимую площадь поверхности теплопередачи будем вычислять по формуле 62 [5]:

$$F' = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (7.2.2.1)$$

где F' - площадь поверхности теплопередачи, м²;

Q - тепловая нагрузка, Вт;

K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

Δt_{cp} - средняя разность температур (температурный напор), °C.

Температурная схема теплообмена:

$$\begin{array}{ccc} 605^\circ\text{C} & \xrightarrow{\text{КОНТАКТНЫЙ ГАЗ}} & 150^\circ\text{C} \\ 120^\circ\text{C} & \xrightarrow{\text{КОНДЕНСАТ}} & 120^\circ\text{C}. \end{array}$$

Определим среднюю разность температур [9, с. 90]:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_k) - (t_2 - t_k)}{\ln \left[\frac{(t_1 - t_k)}{(t_2 - t_k)} \right]}.$$
$$\Delta t = \frac{(605 - 120) - (150 - 120)}{\ln \left[\frac{(605 - 120)}{(150 - 120)} \right]} = 163,5^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи будем определять по формуле 63 [5]:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (7.2.2.2)$$

где α_1 - средний коэффициент теплоотдачи от контактного газа к стенке трубы, Вт/(м²·К);

Σr_{cm} - сумма термических сопротивлений стенки трубы, Вт/(м²·К);

α_2 - средний коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему конденсату, Вт/(м²·К).

Средний коэффициент теплоотдачи от контактного газа к стенке трубы будем определять по формуле 7.40 [10]:

$$\alpha_1 = A_{mp} \cdot W^{0.8} \cdot d^{-0.2}, \quad (7.2.2.3)$$

где A_{mp} - коэффициент, учитывающий физические свойства контактного газа при средней температуре;

W - массовая скорость контактного газа в трубном пространстве, кг/(м²·с);

d - внутренний диаметр трубы, м (см. таблицу 7.1).

Теплофизические параметры контактного газа будем находить при средней температуре:

$$t_{cp} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} = \frac{(605 + 150)}{2} = 377.5^\circ\text{C}.$$

Рассчитаем среднюю молярную теплоемкость контактного газа при температуре $T_1 = 605 + 273 = 878$ К. Для этого воспользуемся данными, приведенными в [5, с. 264-267, таблицы 2 и 3]. Данные о составе контактного газа возьмем из таблицы 2.2. Результаты расчета средней молярной теплоемкости контактного газа представлены в таблице 7.2.2.1. В таблице 7.2.2.1 сумма значений $X_i c_i$, представляет собой искомую среднюю молярную теплоемкость контактного газа при заданной температуре.

Таблица 7.2.2.1

Компонент	Молярная доля компонента	Средняя молярная теплоемкость компонента. Дж/(моль·К)	$X_i c_i$, Дж/(моль·К)
	X_i	c_i	
Метанол	0,174	83,717	14,567
Азот	0,352	31,629	11,133
Вода	0,183	39,446	7,219
Формальдегид	0,197	58,044	11,435
Оксид углерода (IV)	0,020	50,969	1,019
Оксид углерода (II)	0,002	31,950	0,064
Водород	0,072	30,207	2,175
Сумма	1	-	47,612

Рассчитаем среднее значение молярной теплоемкости контактного газа для интервала температур 150÷605°С:

$$c^* = \frac{(c_{150}^* + c_{605}^*)}{2},$$

где c_{150}^* - средняя молярная теплоемкость контактного газа при 150°C, Дж/(моль·К) (см. таблицу 7.2.1.1);

c_{605}^* - средняя молярная теплоемкость контактного газа при 605°C, Дж/(моль·К) (см. таблицу 7.2.2.1);

$$c^* = \frac{37.267 + 47.612}{2} = 42.44 \text{ Дж/(моль·К)}$$

Коэффициент динамической вязкости контактного газа определим по формуле 1 [5]:

$$\frac{M_{см}}{\mu_{см}} = \frac{X_1 \cdot M_1}{\mu_1} + \frac{X_2 \cdot M_2}{\mu_2} + \dots + \frac{X_i \cdot M_i}{\mu_i}, \quad (7.2.2.4)$$

где $M_{см}$, M_1 , M_2 , ..., M_i - относительные молекулярные массы смеси газов и ее компонентов, кг/кмоль;

$\mu_{см}$, μ_1 , μ_2 , ..., μ_i - коэффициенты динамической вязкости смеси газов и ее компонентов, Па·с;

X_1 , X_2 , ..., X_i - мольные доли компонентов в газовой смеси.

Результаты расчета коэффициента динамической вязкости контактного газа представлены в таблице 7.2.2.2 (значения коэффициентов динамической вязкости компонентов контактного газа μ_1 , принимаем согласно [5, с. 270, таблица 11]).

Таблица 7.2.2.2

Компонент	Мольная доля компонента	Молекулярная масса компонента, кг/кмоль	Коэффициент динамической вязкости компонента, Па·с	$\frac{X_i \cdot M_i}{\mu_i} \cdot 10^{-7}$, Па·с	$X_i \cdot M_i$, кг/кмоль
	X_i	M_i	$\mu_i \cdot 10^{-7}$		
Метанол	0,174	32	218	0,026	5,568
Азот	0,352	28	304	0,032	9,856
Вода	0,183	18	224	0,015	3,294
Формальдегид	0,197	30	203	0,029	5,910
Оксид углерода (IV)	0,020	44	291	0,003	0,880
Оксид углерода (II)	0,002	28	302	-	0,056
Водород	0,072	2	151	0,001	0,144
Сумма	1	-	-	0,106	25,708

Используя данные таблицы 7.2.2.2, по формуле 7.2.2.4 находим коэффициент динамической вязкости контактного газа:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см} \cdot \mu_i}{X_i \cdot M_i} = \frac{25.708}{0.106} \cdot 10^{-7} = 243 \cdot 10^{-7} \text{ Па·с.}$$

Находим удельную теплоемкость контактного газа:

$$C^* = \frac{c^* \cdot 1000}{M_{cm}},$$

$$C^* = \frac{42.44 \cdot 1000}{25.708} = 1651 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Принимаем согласно [5, с. 30], что критерий Прандтля для двухатомных газов $Pr_1 = 0.72$, тогда теплопроводность контактного газа:

$$\lambda_1 = \frac{C^* \cdot \mu_{cm}}{Pr_1},$$

$$\lambda_1 = \frac{1651 \cdot 243 \cdot 10^{-7}}{0.72} = 0.056 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}.$$

Определим массовую скорость контактного газа в трубном пространстве:

$$W = \frac{G}{3600 \cdot S_{mp}},$$

где S_{mp} - площадь сечения трубного пространства подконтактного холодильника, m^2 (см. таблицу 7.1).

$$W = \frac{26706.67}{3600 \cdot 1.1} = 6.744 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Коэффициент, учитывающий физические свойства контактного газа (см. формулу 7.2.2.3), определим по формуле 29 [10]:

$$A_{mp} = 17.2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\mu_{cm}^{0.8}} \right) \cdot \left(\frac{Pr_1}{0.73} \right)^{0.4},$$

$$A_{mp} = 17.2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0.056}{(243 \cdot 10^{-7})^{0.8}} \right) \cdot \left(\frac{0.72}{0.73} \right)^{0.4} = 4.706.$$

Средний коэффициент теплоотдачи от контактного газа к стенке трубы находим по формуле 7.2.2.3:

$$\alpha_1 = A_{mp} \cdot W^{0.8} \cdot d^{-0.2} = 4.706 \cdot 6.744^{0.8} \cdot 0.05^{-0.2} = 39.45 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему конденсату определим по формуле 64 [5]:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{l},$$

где Nu - критерий Нуссельта;

λ_2 - теплопроводность конденсата, $\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$;

l - определяющий параметр, м.

При 120°C $\lambda_2 = 0.685 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$, $l = 14.2 \cdot 10^{-6}$ (см. [5, с. 272, таблицы 16, 19]).

Для выбора формулы, по которой необходимо рассчитывать значение критерия Нуссельта, нужно знать режим движения конденсата в межтрубном

пространстве. О режиме движения судят по значению критерия Рейнольдса Re , который в данном случае следует определять по формуле 4.14 [11]:

$$Re = B \cdot \varphi, \quad (7.2.2.6)$$

где B – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства кипящего конденсата, $\text{м}^2/\text{Вт}$;

φ – поверхностная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

При 120°C $B = 22.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}$ (см. [5, с. 272, таблица 19]). При тепловой нагрузке $Q = 6187700 \text{ Вт}$ (см. таблицу 7.2.1.2) и площади поверхности теплообмена $F = 1070 \text{ м}^2$ (см. таблицу 7.1):

$$\varphi = \frac{Q}{F},$$

$$\varphi = \frac{6187700}{1070} = 5783 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Критерий Рейнольдса (по формуле 7.2.2.6):

$$Re = 22.8 \cdot 10^{-6} \cdot 5783 = 0.132.$$

Т. к. $Re > 10^{-2}$, то для определения критерия Нуссельта используем формулу 4.38 [11]:

$$Nu = 0.125 \cdot Re^{0.65} \cdot Pr_2^{0.33} \quad (7.2.2.7)$$

где Pr_2 – критерий Прандтля для конденсата при 120°C .

Согласно [5, с. 272, таблица 16] имеем $Pr_2 = 1.5$, тогда по формуле 7.2.2.7 получаем:

$$Nu = 0.125 \cdot 0.132^{0.65} \cdot 1.5^{0.33} = 0.038$$

По формуле 7.2.2.5 находим коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему конденсату:

$$\alpha_2 = \frac{0.038 \cdot 0.685}{14.2 \cdot 10^{-6}} = 1833 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

Сумма термических сопротивлений стенки трубы с учетом слоев загрязнений с обеих сторон [9, с. 83]:

$$\sum r_{cm} = r_1 + r_2 + \frac{s}{\lambda_{cm}}$$

где r_1 и r_2 – термические сопротивления слоев загрязнений с обеих сторон трубы, $(\text{м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}$ (см. [12, таблица 15]);

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности нержавеющей стали, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ (см. [13, таблица XXVIII]);

s – толщина стенки трубы, м (см. таблицу 6.1).

$$\sum r_{cm} = 0.00009 + 0.00018 + \frac{0.0035}{17.5} = 0.00047 \text{ (м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}.$$

По формуле 7.2.2.2 находим коэффициент теплопередачи:

$$K = \left(\frac{1}{39.45} + 0.00047 + \frac{1}{1833} \right)^{-1} = 37.9 \text{ Вт/ (м}^2 \cdot \text{К)}$$

По формуле 7.2.2.1 находим площадь поверхности теплопередачи:

$$F_1 = \frac{6187700}{37.9 \cdot 163.5} = 999 \text{ м}^2$$

Тогда, мы имеем запас площади поверхности теплопередачи:

$$\left(1 - \frac{F'}{F} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{999}{1070} \right) \cdot 100\% = 6.6\%$$

Таким образом, в результате расчета поверхности теплопередачи подконтактного холодильника установили, что последний сможет обеспечить новую производительность с запасом поверхности 6.6%.

7.3 Механические расчеты основного аппарата

7.3.1 Расчет толщины стенок аппарата

Расчет обечайки проводим в соответствии с ГОСТ 14249-89.

а) Расчет обечайки трубного пространства (верхняя)

Исходные данные:

- материал обечайки - сталь марки 12Х18Н10Т;
- диаметр обечайки - $D_K = 3 \text{ м}$;
- расчетная температура $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$;
- расчетное внутреннее давление $p_p = 0,16 \text{ МПа}$;
- допускаемое напряжение материала $Q_d = 104 \text{ МПа}$ [8, с. 406, рис. 14.2];
- прибавка на коррозию $C_k = 1 \text{ мм}$;
- коэффициент прочности сварных швов $\varphi_0 = 1$.

Определим отношение определяющих параметров σ_d и p_p с учетом коэффициента φ :

$$\frac{\sigma_D}{P_p} \varphi = \frac{133}{0.16} \cdot 1 = 831$$

$$R_g = \frac{D_k^2}{4h_g},$$

$$R_g = \frac{3^2}{4 \cdot 0.75} = 3 \text{ м}, \quad > 25 \quad (7.3.1.1)$$

$$P_D = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi \cdot (S'_{об.3} - C_k)}{D_k + (S'_{об.3} - C_k)}$$

$$m_{об} = H_{об} \pi s_{об} P_{сТ} (D_k + s_{об}),$$

Толщину обечайки с учетом запаса на коррозию и округления для данного соотношения определяем по формуле [2, с. 413]:

$$S_{об.2} = \frac{3 \cdot 0.2}{2 \cdot 133 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.00225 + 0.001 + C_{окр} = 0.003 \text{ м} \quad (7.3.1.2)$$

где p_p - расчетное давление в аппарате, МПа;

D_k - диаметр обечайки внутренний, мм;

σ_D - предельно допускаемое напряжение для материала изготовления, МПа;

φ - коэффициент прочности сварного шва, примем равным единице [2, с. 407, таблица 14.7];

$C_{окр}$ - прибавка округления толщины обечайки до номинального размера.

$$S_{об.1} = \frac{3 \cdot 0.16}{2 \cdot 104 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.0023 + 0.001 + C_{окр} = 0.004 \text{ м}.$$

Рассчитанное значение толщины обечайки для проектируемого аппарата слишком мало, поэтому, согласно рекомендациям [3, с. 211] принимаем действительную толщину стенки обечайки $S'_{об.1} = 0.012 \text{ м}$.

Проверим, выполняется ли условие:

$$\begin{aligned} (S'_{об.1} - C_k) / D_k &\leq 0.1 \\ (0.012 - 0.001) / 3 &= 0.0037 \leq 0.1. \end{aligned} \quad (7.3.1.3)$$

Условие выполняется.

Определим допускаемое избыточное давление в обечайке с принятой толщиной стенки:

$$P_D = \frac{2 \cdot 104 \cdot 1 \cdot (0.012 - 0.001)}{3 + (0.012 - 0.001)} = 0.76 \text{ МПа}$$

б) Расчет обечайки межтрубного пространства

Исходные данные:

- материал обечайки - сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки - $D_k = 3$ м;
- расчетная температура $t = 200$ °С;
- расчетное внутреннее давление $p_p = 0,2$ МПа;
- допускаемое напряжение материала $\sigma_d = 133$ МПа [8, с. 406, рис. 14.2];
- прибавка на коррозию $C_k = 1$ мм;
- коэффициент прочности сварных швов $\varphi_0 = 1$.

Определим отношение определяющих параметров σ_d и p_p с учетом коэффициента φ .

$$\frac{\sigma_d}{P_p} \varphi = \frac{133}{0.2} \cdot 1 = 665 > 25$$

Толщину обечайки с учетом запаса на коррозию и округления для данного соотношения определяем по формуле:

$$S_{д.н} = \frac{R_s \cdot p_p}{2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi} + C_k + C_{окр}$$

[2, с. 413]

$$S_{д.н} = \frac{3 \cdot 0.16}{2 \cdot 133 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.0018 + 0.001 + C_{окр} = 0.002 м$$

где p_p – расчетное давление в аппарате, МПа;

D_k – диаметр обечайки внутренний, мм;

σ_d – предельно допускаемое напряжение для материала изготовления, МПа;

φ – коэффициент прочности сварного шва, примем равным единице [2, с. 407, таблица 14.7];

$C_{окр}$ – прибавка округления толщины обечайки до номинального размера.

$$S_{об.2} = \frac{3 \cdot 0.2}{2 \cdot 133 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.00225 + 0.001 + C_{окр} = 0.003 м$$

Рассчитанное значение толщины обечайки для проектируемого аппарата слишком мало, поэтому, согласно рекомендациям [3, с. 211] принимаем действительную толщину стенки обечайки $S'_{об.2} = 0.012$ м.

Проверим, выполняется ли условие:

$$(S'_{об.2} - C_k) / D_k \leq 0.1$$

$$(0.012 - 0.001) / 3 = 0.0037 < 0.1.$$

Условие выполняется.

Определим допускаемое избыточное давление в обечайке с принятой толщиной стенки:

$$P_D = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi \cdot (S_2 - C_k)}{D_k + (S'_{об.2} - C_k)}$$

$$P_D = \frac{2 \cdot 133 \cdot 1 \cdot (0.012 - 0.001)}{3 + (0.012 - 0.001)} = 0.97 \text{ МПа}$$

в) Расчет обечайки трубного пространства (нижняя)

Исходные данные:

- материал обечайки - сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки - $D_K = 3 \text{ м}$;
- расчетная температура $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- расчетное внутреннее давление $p_p = 0,16 \text{ МПа}$;
- допускаемое напряжение материала $\sigma_D = 133 \text{ МПа}$ [8, с. 406, рисунок 14.2];
- прибавка на коррозию $C_K = 1 \text{ мм}$;

Коэффициент прочности сварных швов $\varphi_0 = 1$.

Определим отношение определяющих параметров σ_D и p_p с учетом коэффициента φ

$$\frac{\sigma_D}{P_p} \varphi = \frac{133}{0.16} \cdot 1 = 831 > 25$$

Толщину обечайки с учетом запаса на коррозию и округления для данного соотношения определяем по формуле:

$$S_{об.3} = \frac{D_k \cdot p_p}{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi} + C_K + C_{окр}, [2, \text{с. 413}]$$

где p_p - расчетное давление в аппарате, МПа;

D_K - диаметр обечайки внутренний, мм;

σ_D - предельно допускаемое напряжение для материала изготовления, МПа;

φ - коэффициент прочности сварного шва, примем равным единице [2, с. 407, таблица 14.7];

$C_{окр}$ - прибавка округления толщины обечайки до номинального размера;

$$S_{об.3} = \frac{3 \cdot 0.16}{2 \cdot 133 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.0018 + 0.001 + C_{окр} = 0.002 \text{ м}$$

Рассчитанное значение толщины обечайки для проектируемого аппарата слишком мало, поэтому, согласно рекомендациям [3, с. 211] принимаем действительную толщину стенки обечайки $S'_{об.3} = 0.012 \text{ м}$.

Проверим, выполняется ли условие:

$$(S'_{об.3} - C_k) / D_k \leq 0.1$$

$$(0.012 - 0.001) / 3 = 0.0037 < 0.1.$$

Условие выполняется.

Определим допускаемое избыточное давление в обечайке с принятой толщиной стенки:

$$P_D = \frac{2 \cdot \sigma_D \cdot \varphi \cdot (S'_{об.3} - C_k)}{D_k + (S'_{об.3} - C_k)}$$

$$P_D = \frac{2 \cdot 133 \cdot 1 \cdot (0.012 - 0.001)}{3 + (0.012 - 0.001)} = 0.97 \text{ МПа}$$

7.3.2 Расчет массы аппарата

Рассчитаем массу аппарата в рабочем состоянии и массу аппарата при гидроиспытаниях (в обоих случаях без учета массы опоры). Масса пустого аппарата m_{Π} :

$$m_n = m_{об} + 2m_D + m_{ТР} \quad (7.3.2.1)$$

где $m_{об}$ - масса обечайки, кг;

m_D - масса днища, кг, для выбранного днища $m_D = 970$ кг (ГОСТ 6533-70);

$m_{ТР}$ - масса труб, кг;

$n_{ТР}$ - число труб, $n_T = 3066$;

Масса обечайки $m_{об}$:

$$m_{об} = H_{об} \pi s_{об} \rho_{ст} (D_k + s_{об}), \quad (7.3.2.2)$$

где $H_{об}$ - высота обечайки, м, $H_{об} = 5$ м;

$\rho_{ст}$ - плотность нержавеющей стали, кг/м³, $\rho_{СТ} = 7850$ кг/м³ кг;

D_K - диаметр обечайки, м, $D_K = 3$ м.

$$m_{об} = 5 \cdot 3.14 \cdot 0.012 \cdot 7850 \cdot (3 + 0.012) = 4455 \text{ кг}.$$

Масса 1 м трубы с наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 2.5 мм равна 2.19 кг [1, таблица 2.33, с. 115].

$$m_{mp} = m \cdot H \cdot n_{mp} \quad (7.3.2.3)$$

$$m_{ТР} = 2.19 \cdot 3 \cdot 3066 = 20144 \text{ кг}$$

Масса пустого аппарата:

$$m_{\Pi} = 4455 + 2 \cdot 970 + 20144 = 26539 \text{ кг}.$$

Масса аппарата при гидроиспытаниях $m_{Г}$:

$$m_{Г} = m_{\Pi} + m_{вод} \quad (7.3.2.4)$$

где $m_{вод}$ - масса воды в аппарате при гидроиспытаниях, кг.

$$m_{вод} = \frac{\pi D_k^2 H_{об} \rho_B}{2}, \quad (7.3.2.5)$$

где ρ_B - плотность воды, кг/м³, $\rho_B = 1000$ кг/м³.

Получаем:

$$m_{\text{вод}} = \frac{3.14 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 1000}{4} = 35325 \text{ кг}$$
$$m_z = 26539 + 35325 = 61864 \text{ кг.}$$

7.3.3 Выбор опоры

Согласно найденной массе аппарата при гидроиспытаниях $m_T \sim 62$ т и ОСТ 26-467-78 выбираем опору 2-3000-63-50-2000 ОСТ 26-467-78.

7.3.4 Расчет обечайки на действие осевой сжимающей силы

В проектируемом аппарате осевая сжимающая сила создается за счет веса самого аппарата, веса насадки и веса удерживаемой в ней жидкости. В этом случае наиболее нагруженной является нижняя часть обечайки.

Проверим, будет ли обеспечена прочность обечайки в самой нижней ее части в рабочем состоянии при рассчитанной выше толщине ее стенки.

Вес аппарата в рабочем состоянии:

$$P_p = m_p \cdot g, \quad (7.3.4.1)$$
$$P_p = 61864 \cdot 9.8 = 606267 \text{ Н} = 0.6 \text{ МН.}$$

Для проектируемого аппарата $H_a / d > 1$, поэтому методика расчета по ГОСТ 14249-89 применима.

Допускаемую осевую сжимающую силу для условий работы находим по формуле:

$$P_d = \pi (d + s_{\text{об}} - c) (s_{\text{об}} - c) \sigma_d \min \{ \varphi_1; \varphi_2 \} \quad (7.3.4.2)$$

где c - сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки, м, $c = 0.001$ м;
 φ_1, φ_2 - коэффициенты.

Коэффициенты φ_1, φ_2 определяются как:

$$\varphi_1 = f [d / (s_{\text{об}} - c); \sigma_d / E], \quad (7.3.4.3)$$

$$\varphi_2 = f(\lambda_{\text{пр}}), \quad (7.3.4.4)$$

где E - модуль упругости для материала обечайки при 20 °С, МПа, для стали выбранной марки $E = 1.952 \cdot 10^5$ МПа [7, с. 14, таблица 1.5];

$\lambda_{\text{пр}}$ - гибкость.

Гибкость определяется по формуле:

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{2.83 l_{\text{пр}}}{d + s_{\text{об}} - c}, \quad (7.3.4.5)$$

где $l_{\text{пр}}$ - приведенная длина обечайки, м, для нашего случая, согласно ГОСТ 14249-89 имеем $l_{\text{пр}} = 2H_a = 2 \cdot 5.7 = 11.4$ м.

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{2.83 \cdot 11.4}{3 + 0.012 - 0.001} = 10.7$$

Согласно ГОСТ 14249-89 имеем: $\varphi_1 = 0.45$, $\varphi_2 = 1.00$. Выбираем φ_1 подставляем в формулу 5.2.3.2, получаем:

$$P_d = 3.14 \cdot (3 + 0.012 - 0.001) \cdot (0.012 - 0.001) \cdot 104 \cdot 0.45 = 4.88 \text{ МН.}$$

Так как $P_d > P_p$, следовательно прочность обечайки на действие осевой сжимающей силы при толщине стенки $s_{об} = 0.012$ м обеспечена.

7.3.5 Расчет на ветровую нагрузку

Расчет аппарата на ветровую нагрузку проводим согласно [6, с. 685]. Расчетom проверяется прочность и устойчивость аппарата, устанавливаемого на открытой площадке при действии на него ветра. Определяются размеры наиболее ответственного узла аппарата - опоры и фундаментных болтов.

Исходные данные:

- место установки аппарата - II географический район;
- материал аппарата - сталь марки 12X18H10T, модуль упругости материала обечайки при 20 °С $E_{об} = 1.952 \cdot 10^5$ МПа [6, с. 101, таблица 2.21];
- материал опоры - сталь 20, модуль упругости материала опоры при 20 °С $E_{оп} = 1.98 \cdot 10^5$ МПа [6, с. 101, таблица 2.21];
- диаметр аппарата (внутренний) - $d = 3$ м;
- общая высота аппарата (действительная) - $H = 9$ м;
- толщина стенки корпуса - $s_{об} = 12$ мм (0.012 м);
- прибавка на коррозию к толщинам стенок - $C_k = 1$ мм (0.001 м);
- внутренний диаметр цилиндрической опоры - $D = 2.85$ м в опоре имеется отверстие диаметром $d_1 = 0.5$ м;
- материал фундаментных болтов - сталь с допускаемым напряжением при растяжении $\sigma_d = 230$ МН/м².

Рассчитаем вес пустого аппарата:

$$P_{\Pi} = m_{\Pi} \cdot g,$$
$$P_{\Pi} = 26539 \cdot 9.8 = 260082 \text{ Н} \sim 0.26 \text{ МН.}$$

Вес аппарата при гидроиспытаниях:

$$P_{\Gamma} = 61864 \cdot 9.8 = 606267 \text{ Н} = 0.61 \text{ МН.}$$

Расчетная схема аппарата представлена на рисунке 5.5.1.

Отношение высоты аппарата к его диаметру $\frac{H}{d} = \frac{9}{3} = 3 < 15$, поэтому расчетная схема аппарата выбирается в виде упруго защемленного стержня [6, с. 685].

Определим период собственных колебаний аппарата. Расчет производим отдельно для максимального и минимального веса аппарата.

Средний диаметр корпуса аппарата:

$$d_{cp} = d + (s_{об} - C_K), \quad (7.3.5.1)$$

$$d_{cp} = 3 + (0.012 - 0.001) = 3.011 \text{ м.}$$

Момент инерции поперечного сечения аппарата:

$$J = \frac{\pi}{8} \cdot d_{cp}^3 \cdot (s_{об} - C_K), \quad (7.3.5.2) \quad [6. \text{ с. } 685]$$

$$J = \frac{\pi}{8} \cdot 3.011^3 \cdot (0.012 - 0.001) = 0.12 \text{ м}^4.$$

Период собственных колебаний аппарата определяем по формуле:

$$T = 1.79H \sqrt{\frac{P}{g} \left(\frac{H}{E_{об} \cdot J} + 4\varphi_0 \right)}, \quad (7.3.5.3) \quad [6. \text{ с. } 687]$$

где φ_0 – угол поворота опорного сечения, $1/(\text{МН} \cdot \text{м})$; определяется по формуле:

$$\varphi_0 = \frac{1}{C_\phi J_\phi}, \quad (7.3.5.4) \quad [6. \text{ с. } 688]$$

где C_ϕ - коэффициент неравномерного сжатия грунта, $\text{МН}/\text{м}^3$, для грунтов средней плотности принимаем, $C_\phi = 50 \text{ МН}/\text{м}^3$ [6, с. 688];

J_ϕ - момент инерции подошвы фундамента относительно центральной оси, м^4 .

В нашем случае размеры фундамента точно не известны, поэтому J_ϕ приближенно принимаем равным $1.3 \cdot J_K$, где J_K - момент инерции фундаментного кольца аппарата, м^4 . Внутренний диаметр фундаментного кольца аппарата - $D_K = 2.85 \text{ м}$, ширина фундаментного кольца $b_K = 0.255 \text{ м}$. Средний диаметр фундаментного кольца:

$$D_{K,cp} = D_K + b_K = 2.85 + 0.255 = 3.105 \text{ м.}$$

Момент инерции фундаментного кольца аппарата:

$$J_K = \frac{\pi}{8} \cdot D_{K,cp}^3 \cdot b_K, \quad (7.3.5.5) \quad [6. \text{ с. } 685]$$

$$J_K = \frac{\pi}{8} \cdot 3.105^3 \cdot 0.255 = 3 \text{ м}^4.$$

Момент инерции подошвы фундамента относительно центральной оси:

$$J_\phi = 1.3 \cdot J_K = 1.3 \cdot 3 = 3.9 \text{ м}^4.$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{50 \cdot 3.9} = 0.0051 \text{ } 1/(\text{МН} \cdot \text{м}).$$

Период собственных колебаний аппарата:

при максимальном весе аппарата:

$$T_{\max} = 1.79H \sqrt{\frac{P}{g} \left(\frac{H}{E_{об} \cdot J} + 4\varphi_0 \right)} = 1.79 \cdot 9.33 \cdot \sqrt{\frac{0.61}{9.8} \left(\frac{9}{1.952 \cdot 10^5 \cdot 0.12} + 4.0051 \right)} = 0.6 \text{ с};$$

при минимальном весе аппарата:

$$T_{\min} = 1.79H \sqrt{\frac{P}{g} \left(\frac{H}{E_{\text{ос}} \cdot J} + 4\varphi_0 \right)} = 1.79 \cdot 9.33 \cdot \sqrt{\frac{0.26}{9.8} \left(\frac{9}{1.952 \cdot 10^5 \cdot 0.12} + 4.0051 \right)} = 1.39 \text{ с.}$$

Нормативный скоростной напор для II-го географического пояса согласно [6, с. 686, таблица 29.14] равен $q = 0.035 \cdot 10^{-2}$ МН/м² (для всех участков).

Коэффициент динамичности определяем согласно [6, с. 687, рисунок 29.16]: $\varepsilon_{\max} = 1.6$, $\varepsilon_{\min} = 1.85$.

Коэффициент пульсации скоростного напора определяем согласно [6, с. 687, рисунок 29.17]; для участков 1-2-3 – $m_1 = m_2 = m_3 = 0.35$.

Коэффициент увеличения скоростного напора определяем по формуле:

$$\beta_i = 1 + \varepsilon \cdot m_i, \quad (7.3.5.6) \quad [6, \text{с. 686}]$$

При максимальном весе аппарата:

для участков 1-2-3:

$$\beta_{\max 1} = \beta_{\max 2} = \beta_{\max 3} = 1 + 1.6 \cdot 0.35 = 1.56.$$

При минимальном весе аппарата:

для участков 1-2-3:

$$\beta_{\min 1} = \beta_{\min 2} = \beta_{\min 3} = 1 + 1.85 \cdot 0.35 = 1.65.$$

Силу от ветровой нагрузки, действующую на каждый участок аппарата, определяем по формуле:

$$P_i = 0.6 \beta_i q_i d h_i, \quad (7.3.5.7) \quad [6, \text{с. 688}]$$

где h_i - высота i -го участка аппарата, м.

При максимальном весе аппарата:

$$P_{\max 1} = 0.6 \cdot 1.56 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 2.4 = 1.236 \cdot 10^{-2} \text{ МН};$$

$$P_{\max 2} = P_{\max 3} = 0.6 \cdot 1.56 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 3 = 1.295 \cdot 10^{-2} \text{ МН};$$

$$P_{\max 3} = 0.6 \cdot 1.56 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 3.6 = 1.354 \cdot 10^{-2} \text{ МН}.$$

При минимальном весе аппарата:

$$P_{\min 1} = 0.6 \cdot 1.65 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 2.4 = 0.25 \cdot 10^{-2} \text{ МН};$$

$$P_{\min 2} = P_{\min 3} = 0.6 \cdot 1.65 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 3 = 0.312 \cdot 10^{-2} \text{ МН};$$

$$P_{\min 3} = 0.6 \cdot 1.65 \cdot 0.035 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 3.6 = 0.374 \cdot 10^{-2} \text{ МН}.$$

Изгибающий момент от ветровой нагрузки на аппарат относительно основания его (без учета площадок) определяем по формуле:

$$M_B = \sum_{i=1}^{n-n_0} P_i (x_i - x_0), \quad (7.3.5.8) \quad [6, \text{с. 688}]$$

где x_i - расстояние i -го участка от основания аппарата, м;

n_0 - количество участков, расположенных ниже сечения x_0 .

При максимальном весе аппарата:

$$M_{\max, \text{с1}} = 1.236 \cdot 10^{-2} \cdot 7.8 = 0.096 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max.\epsilon 2} = 1.295 \cdot 10^{-2} \cdot 5.1 = 0.066 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max.\epsilon 3} = 1.354 \cdot 10^{-2} \cdot 1.8 = 0.024 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$\sum M_{\max.\epsilon} = 0.096 + 0.066 + 0.024 = 0.186 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

При минимальном весе аппарата:

$$M_{\min.\epsilon 1} = 0.25 \cdot 10^{-2} \cdot 7.8 = 0.02 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\min.\epsilon 2} = 3.12 \cdot 10^{-2} \cdot 5.1 = 0.016 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\min.\epsilon 3} = 0.374 \cdot 10^{-2} \cdot 1.8 = 0.005 \text{ МН} \cdot \text{м};$$

$$\sum M_{\min.\epsilon} = 0.02 + 0.016 + 0.005 = 0.041 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Общий изгибающий момент от ветровой нагрузки определяем по формуле:

$$M_{\epsilon.o} = \sum M_{\epsilon}, \quad (7.3.5.10) \text{ [6, с. 688]}$$

При максимальном весе аппарата:

$$M_{\max.\epsilon.o} = \sum M_{\max.\epsilon} = 0.186 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

При минимальном весе аппарата:

$$M_{\min.\epsilon.o} = \sum M_{\min.\epsilon} = 0.041 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Произведем расчет опоры аппарата.

Принимаем толщину цилиндрической стенки опоры аппарата $s_{\text{оп}} = 8 \text{ мм}$ (0.018 м), прибавку на коррозию к толщине стенки опоры принимаем $C_{\text{к.оп}} = 1 \text{ мм}$ (0.011 м). Напряжение сжатия в этой стенке с учетом наличия в ней отверстия диаметром $d_1 = 0.5 \text{ м}$ при максимальной нагрузке от силы тяжести аппарата определяем по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P_r}{[\pi(D + s_{\text{оп}}) - d_1](s_{\text{оп}} - C_{\text{к.оп}})}, \quad (7.3.5.11) \text{ [6, с. 420]}$$

$$\sigma_c = \frac{0.61}{[\pi(3 + 0.008) - 0.5](0.008 - 0.001)} = 9.74 \text{ МПа}.$$

Напряжение на изгиб в той же стенке при тех же условиях определяем по формуле:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{4M_{\text{в.о}}}{\pi(D + s_{\text{оп}})^2 (s_{\text{оп}} - C_{\text{к.оп}})}, \quad (7.3.5.12) \text{ [6, с. 420]}$$

в качестве $M_{\text{в.о}}$ принимаем большее из $M_{\max.\text{в.о}}$ и $M_{\min.\text{в.о}}$, в нашем случае $M_{\text{в.о}} = M_{\max.\text{в.о}} = 0.186 \text{ МН} \cdot \text{м}.$

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{4 \cdot 0.186}{\pi(3 + 0.008)^2 (0.008 - 0.001)} = 3.74 \text{ МПа}.$$

Отношение

$$\frac{D}{2(s_{\text{оп}} - C_{\text{к.оп}})} = \frac{3}{2(0.008 - 0.001)} = 214.$$

Для данного отношения определим коэффициенты k_c и $k_{и}$, согласно [6, с. 418, рисунок 15.8] $k_c = 0.147$, $k_{и} = 0.17$.

Коэффициент K_c определяем по формуле:

$$K_c = 875 \frac{\sigma_T}{E_{оп}} k_c, \quad (7.3.5.13) [6, \text{с. 418}]$$

где σ_T - предел текучести материала опоры при средней температуре 20°C МН/м², $\sigma_T = 350$ МН/м² [6, с. 95, таблица 2.18];

$$K_c = 875 \frac{350}{1.98 \cdot 10^5} 0.147 = 0.227.$$

Коэффициент $K_{и}$ определяем по формуле:

$$K_{и} = 875 \frac{\sigma_T}{E_{оп}} k_{и}, \quad (7.3.5.14) [6, \text{с. 419}]$$

$$K_{и} = 875 \frac{350}{1.98 \cdot 10^5} 0.17 = 0.263.$$

Допускаемое напряжение на сжатие в обечайке опоры определяем по формуле:

$$\sigma_{сд} = K_c E_{оп} \frac{s_{оп} - C_{к.оп}}{d},$$

$$\sigma_{сд} = 0.227 \cdot 1.98 \cdot 10^5 \cdot \frac{0.008 - 0.001}{3} = 104.9 \text{ МПа}.$$

Допускаемое напряжение на изгиб в обечайке опоры определяем по формуле:

$$\sigma_{ид} = K_{и} E_{оп} \frac{s_{оп} - C_{к.оп}}{d}, \quad (7.3.5.16) [6, \text{с. 419}]$$

$$\sigma_{ид} = 0.263 \cdot 1.98 \cdot 10^5 \cdot \frac{0.008 - 0.001}{3} = 121.5 \text{ МПа}.$$

Условие устойчивости цилиндрической опоры (при расчетном наружном давлении $p_n=0$) проверяем по формуле:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{сд}} + \frac{\sigma_{и}}{\sigma_{ид}} = \frac{9.74}{104.9} + \frac{3.74}{121.5} = 0.093 + 0.031 = 0.124 < 1, \quad (7.3.5.17) [6, \text{с. 419}]$$

т. е. устойчивость обеспечена.

Максимальные напряжения на сжатие в сварном шве, соединяющем цилиндрическую опору с корпусом аппарата, при коэффициенте сварного шва $\varphi_{ш} = 0.7$ [6, с. 692] определяем по формуле:

$$\sigma_{max} = \frac{P_r}{\varphi_{ш} [\pi(D + s_{оп})] (s_{оп} - C_{к.оп})} + \frac{4M_{в.о}}{\varphi_{ш} \pi(D + s_{оп})^2 (s_{оп} - C_{к.оп})}, \quad (7.3.5.18) [6, \text{с. 689}]$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.61}{0.7 [\pi(3 + 0.008)] (0.008 - 0.001)} + \frac{4 \cdot 0.186}{\varphi_{ш} \pi(3 + 0.008)^2 (0.008 - 0.001)} = 18.52 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_{max} = 18.52 \text{ МПа} < \sigma_{сд} = 104.9 \text{ МПа}.$$

т. е. условие прочности выполнено.

Внутренний диаметр опорного кольца:

$$D_{\text{в.к}} = D - 0.2, \quad (7.3.5.19) \text{ [6, с. 689]}$$

$$D_{\text{в.к}} = 3 - 0.2 = 2.8 \text{ м.}$$

Наружный диаметр опорного кольца:

$$D_{\text{н.к}} = D + 2s_{\text{оп}} + 2l, \quad (7.3.5.19) \text{ [6, с. 689]}$$

принимая $l=0.17$ м,

$$D_{\text{н.к}} = 3 + 2 \cdot 0.008 + 0.34 = 3.356 \text{ м.}$$

Определяем опорную площадь кольца:

$$F = \frac{\pi}{4} (D_{\text{н.к}}^2 - D_{\text{в.к}}^2), \quad (7.3.5.20) \text{ [6, с. 689]}$$

$$F = \frac{\pi}{4} (3.356^2 - 2.8^2) = 2.69 \text{ м}^2.$$

Момент сопротивления опорной площади кольца определяем по формуле:

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_{\text{н.к}}^4 - D_{\text{в.к}}^4}{D_{\text{н.к}}}, \quad (7.3.5.21) \text{ [6, с. 689]}$$

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{3.356^4 - 2.8^4}{3.356} = 1.913 \text{ м}^3.$$

Максимальное напряжение сжатия на опорной поверхности кольца:

$$\sigma_{\text{max.к}} = \frac{P_{\Gamma}}{F} + \frac{M_{\text{в.о.}}}{W}, \quad (7.3.5.22) \text{ [6, с. 689]}$$

$$\sigma_{\text{max.к}} = \frac{0.61}{2.69} + \frac{0.186}{1.913} = 0.32 \text{ МПа} < 14 \text{ МПа},$$

где 14 МПа - допускаемая удельная нагрузка на фундамент (бетон) [6, с. 672, таблица 29.1].

Номинальная расчетная толщина опорного кольца при $l = 0.17$ м:

$$s_{\text{к}} = 1.73l \sqrt{\frac{\sigma_{\text{max.к}}}{\sigma_{\text{ид.к}}}}, \quad (7.3.5.23) \text{ [6, с. 689]}$$

где $\sigma_{\text{ид.к.}}$ - допускаемое напряжение на изгиб для материала кольца, для стали 20 $\sigma_{\text{ид.к.}} = 160$ МПа [6, с. 406];

$$s_{\text{к}} = 1.73 \cdot 0.17 \sqrt{\frac{0.32}{160}} = 0.013 \text{ м.}$$

С учетом прибавки на коррозию принимаем $s_{\text{к}} = 0.015$ м (15 мм).

Наименьшие напряжения на опорной поверхности кольца:

при максимальном весе аппарата:

$$\sigma_{\text{max.о.п}} = \frac{P_{\Gamma}}{F} - \frac{M_{\text{в.о.}}}{W}, \quad (7.3.5.24) \text{ [6, с. 689]}$$

$$\sigma_{\text{max.к}} = \frac{0.61}{2.69} - \frac{0.186}{1.913} = 0.13 \text{ МПа};$$

при минимальном весе аппарата:

$$\sigma_{\min.o.n.} = \frac{P_c}{F} - \frac{M_{\min.b.o.}}{W}, \quad (7.3.5.25) \text{ [6, с. 689]}$$

$$\sigma_{\min.k} = \frac{0.26}{2.69} - \frac{0.041}{1.913} = 0.075 \text{ МПа.}$$

Расчетным является большее по абсолютной величине значение $\sigma_{o.n.}$ - при максимальном весе аппарата.

Общую условную расчетную нагрузку на фундаментные болты определяем по формуле:

$$P'_o = 0.785(D_{н.к.}^2 - D_{в.к.}^2)\sigma_{\max.o.n.}, \quad (7.3.5.26) \text{ [6, с. 689]}$$

$$P'_o = 0.785 \cdot (3.356^2 - 2.8^2) \cdot 0.13 = 0.35 \text{ МН.}$$

Принимаем количество фундаментных болтов $z = 6$. Нагрузку на один болт определяем по формуле:

$$P'_{o1} = \frac{P'_o}{z} \quad (7.3.5.27)$$

$$P'_{o1} = \frac{0.35}{6} = 0.06 \text{ МН}$$

Расчетный внутренний диаметр резьбы болтов определяем по формуле:

$$d'_1 = \sqrt{\frac{4P'_{o1}}{\pi\sigma_d}} \quad (7.3.5.28) \text{ [6, с. 689]}$$

$$d'_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.06}{\pi \cdot 230}} = 0.018$$

Принимаем болты М20.

Диаметр болтовой окружности:

$$D_6 = D + 2s_{on} + 0.2 \quad (7.3.5.29) \text{ [6, с. 689]}$$

$$D_6 = 3 + 2 \cdot 0.008 + 0.2 = 3.216 \text{ м.}$$

7.3.6 Выбор монтажных штуцеров

Согласно найденной массе пустого аппарата $m_{\Pi} \sim 26$ т выбираем монтажный штуцер 08 ГОСТ 14115-78.

7.3.7 Расчет трубной решетки

Расчет толщины трубной решетки будем проводить согласно ОСТ 26-1185-81. Исходные данные для расчета:

- расчетная температура стенки кожуха - $t_k = 200$ °С;
- расчетная температура стенки трубы - $t_T = 350$ °С;
- температура сборки аппарата - $t_0 = 20$ °С;

- диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь – $D_B = 50$ мм;
- расчетное давление в трубном пространстве – $P_T = 0.16$ МПа;
- расчетное давление в межтрубном пространстве – $P_M = 0.2$ МПа;
- запас на коррозию – $C_K \sim 2$ мм;
- допускаемое напряжение для материала решетки при рабочей температуре в аппарате (сталь 12X18H10T) – $[\sigma]_P = 105$ МПа [4, с. 406, рисунок 14.2];
внутренний радиус кожуха – $a = 1500$ мм;
- толщина стенки кожуха – $s_K = 12$ мм;
- расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы – $a_1 = 1441$ мм;
- количество труб – $i = 3066$;
- толщина стенки трубы – $s_T = 2.5$ мм; наружный диаметр трубы – $d_T = 38$ мм; половина длины трубы – $l = 1500$ мм;
- диаметр отверстий в решетке – $d_0 = 38.6$ мм;
- шаг расположения отверстий в решетке – $t_p = 48$ мм;
- модуль продольной упругости материала трубы (сталь 12X18H10T) при расчетной температуре трубы – $E_T = 1970$ МПа [4, с. 101, таблица 2.21];
- модуль продольной упругости материала кожуха (сталь 12X18H10T) при расчетной температуре кожуха – $E_T = 1970$ МПа [4, с. 101, таблица 2.21];
- коэффициент линейного расширения материала кожуха (сталь 12X18H10T) при средней температуре – $\alpha_K = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5, с. 238, таблица 10.8];
- коэффициент линейного расширения материала труб (сталь 12X18H10T) при средней температуре – $\alpha_T = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5, с. 238, таблица 10.8];
- внутренний диаметр компенсатора – $d_K = 3020$ мм;
- наружный диаметр компенсатора – $D_K = 3170$ мм.

Находим минимальную расчетную толщину трубной решетки:

$$s_p \geq 0.5 D_B \sqrt{\frac{|P_T - P_M|}{[\sigma]_P}} + C_K, \quad (7.3.7.1)$$

$$s_p = 0.5 \cdot 50 \cdot \sqrt{\frac{|0.16 - 0.2|}{105}} + 2 = 2.49 \text{ мм.}$$

Минимальная расчетная толщина трубной решетки слишком мала, для того чтобы обеспечить возможность крепления в ней труб, поэтому, по конструктивным соображениям выбираем толщину трубной решетки $s_p = 70$ мм (больше наружного диаметра трубы).

Произведем упрощенный проверочный расчет трубной решетки выбранной толщины.

Проверим, выполняется ли условие:

$$\frac{a - a_1}{s_p} \leq 3. \quad (7.3.7.2)$$

$$\frac{1500 - 1441}{70} = 0.84 \leq 3.$$

Условие выполняется.

Рассчитаем вспомогательные величины.

Коэффициенты влияния давления на трубную решетку η_M, η_T :

$$\eta_M = 1 - \frac{i \cdot d_T^2}{4a_1^2}, \quad (7.3.7.3)$$

$$\eta_M = 1 - \frac{3066 \cdot 38^2}{4 \cdot 1441^2} = 0.47;$$

$$\eta_T = 1 - \frac{i \cdot (d_T - 2s_T)^2}{4a_1^2}, \quad (7.3.7.4)$$

$$\eta_T = 1 - \frac{3066 \cdot (38 - 2 \cdot 2.5)^2}{4 \cdot 1441^2} = 0.60,$$

Модуль упругости системы труб:

$$K_Y = \frac{E_T \cdot (\eta_T - \eta_M)}{l}, \quad (7.3.7.5)$$

$$K_Y = \frac{1970 \cdot (0.60 - 0.47)}{1500} = 0.171 \text{ Н/мм}^3.$$

Относительная характеристика беструбного края:

$$m_N = \frac{a}{a_1}, \quad (7.3.7.6)$$

$$m_N = \frac{1500}{1441} = 1.04.$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:

$$\rho' = \frac{K_Y \cdot a_1 \cdot l}{E_K \cdot s_K}, \quad (7.3.7.7)$$

$$\rho' = \frac{0.171 \cdot 1441 \cdot 1500}{1970 \cdot 12} = 15.64.$$

Коэффициент m_{cp} :

$$m_{cp} = 0.15 \cdot \frac{i \cdot (d_T - 2s_T)^2}{a_1^2}, \quad (7.3.7.8)$$

$$m_{cp} = 0.15 \cdot \frac{3066 \cdot (38 - 2.5)^2}{1441^2} = 0.28.$$

Находим приведенное давление P_0 :

$$P_0 = [\alpha_K \cdot (t_K - t_0) - \alpha_T \cdot (t_T - t_0) \cdot K_Y \cdot l + \\ + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_N \cdot (m_N + 0.5 \cdot \beta_p \cdot K_{p1})] \cdot P_T - \\ - [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_N \cdot (m_N + 0.3 \cdot \rho' \cdot K_{p2})] \cdot P_M] \quad (7.3.7.9)$$

Для аппаратов без расширителя $\beta_p = 1$. Для аппаратов с компенсатором:

$$K_{p1} = 1 + \frac{\pi \cdot a \cdot E_K \cdot s_K}{l \cdot K_K}, \quad (7.3.7.10)$$

$$K_{p1} = 1 - \frac{\pi \cdot (D_K^2 - d_K^2) \cdot E_K \cdot s_K}{4.8 \cdot l \cdot a \cdot K_K},$$

где K_K – коэффициент жесткости компенсатора.

Согласно ОСТ 26-1 185-81 $K_K \approx 2000$ Н/мм.

$$K_{p2} = 1 - \frac{\pi \cdot (3170^2 - 3020^2) \cdot 1970 \cdot 12}{4.8 \cdot 1500 \cdot 1500 \cdot K_K} = .$$

$$P_0 = [1.7 \cdot 10^{-7} \cdot (200 - 20) - 1.7 \cdot 10^{-7} \cdot (200 - 20) \cdot 0.171 \cdot 1500 + \\ + [0.6 - 1 + 0.28 + 1.04 \cdot (1.04 + 0.5 \cdot 1 \cdot 1)] \cdot 0.16 - \\ - [0.47 - 1 + 0.28 + 1.04 \cdot (1.04 + 0.3 \cdot 15.64 \cdot 1)] \cdot 0.2] = |-0.654 + 0.16 - 1.614| = 1.59 \text{ МПа.}$$

Коэффициент ослабления трубной решетки:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{l_p}, \quad (7.3.7.10)$$

$$\varphi_p = 1 - \frac{38.6}{48} = 0.196.$$

Коэффициент жесткости перфорированной $\psi_0 = 0.3$ (при $\eta_T = 0.60$).

Находим значение коэффициента A' :

$$A' = \frac{P_0}{2 \cdot [\sigma_A] \cdot K_{p1} \cdot \varphi_p}, \quad (7.3.7.11)$$

где $[\sigma_A]$ – амплитуда условных упругих напряжений, МПа; согласно чертежу 14 ОСТ 26-1185-81 принимаем $[\sigma_A] = 530$ МПа;

$$A' = \frac{1.591}{2 \cdot 530 \cdot 1 \cdot 0.235} = 0.0064.$$

Находим значение коэффициента B' :

$$B' = \frac{\psi_0 \cdot l}{s_k}, \quad (7.3.7.12)$$

$$B' = \frac{0.35 \cdot 2000}{4} = 175$$

По найденным значениям A' и B' по чертежу 10 ОСТ 26-1185-81 находим значение $f_1=0.3$.

Находим минимальную толщину трубной решетки:

$$s_p \geq \frac{1f_1 \cdot s_k}{\eta_T - \eta_M} + C_k, \quad (7.3.7.13)$$

$$s_p = \frac{0.3 \cdot 4}{0.63 - 0.48} + 1 = 9$$

Таким образом, выбранная нами трубная решетка подходит с большим запасом прочности.

7.3.8 Расчет фланцевого соединения

Расчет фланцевого соединения будем проводить согласно ОСТ 26-373-78. Исходные данные для расчета:

тип фланцев - плоские приварные;

- тип уплотнения - «шип - паз»;
- материал фланцев - сталь 12X18H10T;
- материал прокладки - асбестовый картон ГОСТ 2850-75;
- материал шпилек - сталь 12ХНЗА;
- внутренний диаметр фланцевого соединения — D - 3000 мм;
- толщина стенки аппарата - $s=12$ мм;
- толщина прокладки — $s_{II} = 3$ мм;
- расчетное давление в аппарате (межтрубное пространство) - $p = 0.2$ МПа;
- расчетная температура фланца - 480 °С.
- модуль продольной упругости материала фланца при расчетной температуре фланца - $E_f = 1970$ МПа [Лаш., с. 101, таблица 2.21];
- модуль продольной упругости материала прокладки при расчетной температуре фланца- $E_n = 2000$ МПа (таблица 13.28 ОСТ 26-373-78);
- модуль продольной упругости материала шпильки при расчетной температуре фланца - $E_B = 2000$ МПа [Лаш., с. 101, таблица 2.21].

Выбираем ширину прокладки $B_{II} = 25$ мм (таблица 13.25 ОСТ 26-373-78).

Выбираем диаметр шпилек $d_B = 30$ мм (таблица 13.26 ОСТ 26-373-78).

Диаметр болтовой окружности:

$$D_B = D + 2(2s + d_B + 0.006), \quad (7.3.8.1)$$
$$D_B = 3000 + 2(2 \cdot 12 + 30 + 6) = 3120 \text{ мм.}$$

Наружный диаметр фланца:

$$D_\phi \geq D_B + a, \quad (7.3.8.2)$$

где для шпилек М30 и шестигранной гайки $a = 58$ мм (таблица 13.27 ОСТ 26373-78). Округляем до $D_\phi = 3180$ мм.

Наружный диаметр прокладки:

$$D_\Pi = D_B - e, \quad (7.3.8.3)$$
$$D_\phi = 3120 + 58 = 3178 \text{ мм.}$$

где для шпилек М30 и плоской прокладки $e = 41$ мм (таблица 13.27 ОСТ 26-373-78);

$$D_\Pi = 3120 - 41 = 3079 \text{ мм.}$$

Средний диаметр прокладки:

$$D_{\text{н.ср}} = D_\Pi - b_\Pi, \quad (7.3.8.4)$$
$$D_{\text{н.ср}} = 3079 - 25 = 3054 \text{ мм.}$$

Эффективная ширина плоской прокладки (м):

$$b_E = 0.6\sqrt{b_\Pi}, \quad (7.3.8.5)$$
$$b_E = 0.6\sqrt{0.025} = 0.095 \text{ м.}$$

Для плоской прокладки из асбестового картона по таблице 13.28 ОСТ 26-373-78 находим $m = 2.5$, $q = 20$ МПа.

Выбираем шаг шпилек $t_B = 126$ мм (таблица 13.29 ОСТ 26-373-78).

Ориентировочное число шпилек:

$$z_B = \frac{\pi D_B}{t_B}, \quad (7.3.8.6)$$
$$z_B = \frac{\pi \cdot 3120}{126} = 77.8.$$

Принимаем $z_B = 80$ шт.

Определяем вспомогательные величины.

Для плоских приварных фланцев $\beta = 1$.

Эквивалентная толщина втулки фланца для плоского приварного фланца

$$s_E = s = 12 \text{ мм.}$$

Коэффициент $x = 1$ (рис. 13.13 ОСТ 26-373-78).

Ориентировочная толщина фланца:

$$h = \lambda \sqrt{D \cdot s_E}, \quad (7.3.8.7)$$

где λ - коэффициент, для плоского приварного фланца при расчетном давлении в аппарате (трубное пространство) $p = 0.2$ МПа $\lambda = 0.38$ (рис. 13.14 ОСТ 26-373-78);

$$h = 0.38 \cdot \sqrt{3000 \cdot 12} = 72.1 \text{ мм.}$$

Округляем $h = 72$ мм.

Безразмерный параметр ω :

$$\omega = \left[1 + 0.9\lambda(1 + \phi_1 f^2) \right]^{-1}, \quad (7.3.8.8)$$

где:

$$f = h/s_E \quad (7.3.8.9)$$

$$\phi_1 = 1.28 \lg K; \quad (7.3.8.10)$$

$$K = D_\phi / D. \quad (7.3.8.11)$$

Получаем:

$$f = 72/12 = 6;$$

$$K = 3180 / 3000 = 1.06;$$

$$\phi_1 = 1.28 \lg 1.06 = 0.032;$$

$$\omega = \left[1 + 0.9 \cdot 0.38 \cdot (1 + 0.032 \cdot 6^2) \right]^{-1} = 0.576.$$

Безразмерные параметры:

- $T = 1.89$ (рис. 13.16 ОСТ 26-373-78):

- $\phi_2 = 35$ (рис. 13.17 ОСТ 26-373-78);

- $\phi_3 = 1$ (рис. 13.18 ОСТ 26-373-78).

Угловая податливость фланца:

$$y_\phi = \frac{[1 - \omega(1 + 0.9\lambda)] \phi_2}{h^3 E_\phi}, \quad (7.3.8.12)$$

$$y_\phi = \frac{[1 - 0.576 \cdot (1 + 0.9 \cdot 0.38)] \cdot 35}{0.072^3 \cdot 1970} = 10.81 (1/\text{МН} \cdot \text{м}).$$

Линейная податливость прокладки:

$$y_n = \frac{s_n}{\pi D_{н.ср} b_n E_n}, \quad (7.3.8.13)$$

$$y_n = \frac{0.003}{\pi \cdot 3.054 \cdot 0.025 \cdot 2000} = 6.25 \times 10^{-6} \text{ м/МН.}$$

Расчетная длина шпильки с двумя гайками:

$$l_b = l_{b0} + 0.56d_b, \quad (7.3.8.14)$$

где l_{b0} - длина шпильки между опорными поверхностями гаек, мм; принимаем $l_{b0} = 160$ мм;

$$l_b = 160 + 0.56 \cdot 30 = 176.8 \text{ мм.}$$

Округляем полученное значение до ближайшего большего $l_b = 190$ мм.

Линейная податливость шпилек:

$$y_B = \frac{l_B}{z_B f_B E_B}, \quad (7.3.8.15)$$

где f_B - расчетная площадь поперечного сечения шпильки по внутреннему диаметру резьбы, м^2 ; для шпилек М30 $f_B = 5.4 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, (таблица 13.27 ОСТ 26-373-78);

$$y_B = \frac{0.19}{80 \cdot 5.4 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} = 0.0022 \text{ м/Н}.$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения:

$$a = A \left[y_B + 0.25(B_1 + B_2)(D_B - D_{\text{п.ср}}) \right]; \quad (7.3.8.16)$$

$$A = \left[y_{\text{п}} + y_B + 0.25(y_{\phi 1} + y_{\phi 2})(D_B - D_{\text{п.ср}})^2 \right]^{-1}; \quad (7.3.8.17)$$

$$A = \left[6.25 \cdot 10^{-6} + 0.0022 + 0.25(10.81 + 10.81)(3.120 - 3.054)^2 \right]^{-1} = 38.9;$$

$$B_1 = y_{\phi} (D_B - D - s_E); \quad (7.3.8.18)$$

$$B_1 = 10.81(3.120 - 3 - 0.012) = 1.167$$

При стыковке одинаковых фланцев:

$$y_{\phi 1} = y_{\phi 2}, B_1 = B_2. \quad (7.3.8.19)$$

$$a = 38.9 \left[0.0022 + 0.25(1.167 + 1.167)(3.120 - 3.054) \right] = 1.58$$

Безразмерный коэффициент γ .

$$\gamma = Ay_B; \quad (7.3.8.20)$$

$$\gamma = 38.9 \cdot 0.0022 = 0.085.$$

Нагрузка, действующая на фланцевое соединение от внутреннего избыточного давления:

$$Q_g = 0.785 D_{\text{п.ср}}^2 p_R, \quad (7.3.8.21)$$

$$Q_g = 0.785 \cdot 3.054^2 \cdot 0.2 = 1.46 \text{ МН}.$$

Реакция прокладки в рабочих условиях:

$$R_{\text{п}} = 2\pi D_{\text{п.ср}} b_E m p_R, \quad (7.3.8.22)$$

$$R_{\text{п}} = 2 \cdot 3.14 \cdot 3.054 \cdot 0.095 \cdot 2.5 \cdot 0.2 = 0.911.$$

Усилие, возникающее от температурных деформаций:

$$Q_t = \gamma z_B f_B E_B (a_{\phi} t_{\phi} - a_B t_B), \quad (7.3.8.23)$$

где a_{ϕ} - коэффициенты температурного линейного расширения фланца $a_{\phi} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ (таблица 10.8, стр.240) при $t_{\phi} = 0.96t = 480^\circ \text{С}$ (таблица 13.21);

a_B - коэффициенты температурного линейного расширения шпильки (сталь 12ХН3А) $a_B = 1.4 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ (таблица 10.8, стр.239) при $t_\phi = 0.95t = 475^\circ C$ (таблица 13.21).

$$Q_t = 0.085 \cdot 80 \cdot 5.4 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 \cdot (2 \cdot 10^{-5} \cdot 480 - 1.4 \cdot 10^{-5} \cdot 475) = 2000.$$

Болтовая нагрузка в условиях монтажа (до подачи внутреннего давления):

$$P_{B1} = \max \left\{ aQ_g + R_n; \pi D_{н.сп} b_E q; 0.4 [\sigma_B]^{20} z_B f_B \right\}, \quad (7.3.8.24)$$

где $[\sigma_B]^{20}$ - допускаемое напряжение для шпилек, равное 230 МПа (таблица 13.22, ОСТ 26-373-73-78).

$$aQ_g + R_n = 1.58 + 1.46 + 0.911 = 3.22;$$

$$\pi D_{н.сп} b_E q = 3.14 \cdot 3.054 \cdot 0.095 \cdot 20 = 5.3$$

$$0.4 [\sigma_B]^{20} z_B f_B = 0.4 \cdot (230 \cdot 80 \cdot 5.4 \cdot 10^{-4}) = 3.97.$$

По условию выражения, выбираем максимальное значение – $P_{B1} = 5.3$.

Болтовая нагрузка в рабочих условиях:

$$P_{B2} = P_{B1} + (1-a)Q_g, \quad (7.3.8.25)$$

$$P_{B2} = 5.3 + (1-1.58) \cdot 1.46 = 4.45.$$

Изгибающие моменты в диаметральной сечении фланца:

$$M_{01} = 0.5 P_{B1} (D_B - D_{н.сп}), \quad (7.3.8.27)$$

$$M_{01} = 0.5 \cdot 5.3 \cdot (3.120 - 3.054) = 0.17.$$

$$M_{02} = 0.5 [P_{B2} (D_B - D_{н.сп}) + Q_g (D_B - D - s_E)] \frac{[\sigma_B]^{20}}{[\sigma_B]}, \quad (7.3.8.28)$$

где: $[\sigma_B]$ - допускаемое напряжение для шпилек при $t = 475^\circ C$ равное 127 МПа (таблица 13.22, ОСТ 26-373-73-78);

$$M_{02} = 0.5 [4.45 \cdot (3.120 - 3.054) + 1.46 \cdot (3.054 - 3 - 0.012)] \frac{230}{127} = 0.3 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

За расчетное значение M_0 принимаем большее из значений M_{01} и M_{02} . т.е. $M_0 = 0.25$.

Проверим условие прочности шпилек:

$$\frac{P_{B1}}{z_B f_B} \leq [\sigma_B]^{20}, \quad (7.3.8.29)$$

$$\frac{5.3}{80 \cdot 5.4 \cdot 10^{-4}} = 123 \leq 230.$$

Условие выполняется.

$$\frac{P_{Б2}}{z_{Б} f_{Б}} \leq [\sigma_{Б}]', \quad (7.3.8.30)$$

$$\frac{4.45}{80 \cdot 5.4 \cdot 10^{-4}} = 103 \leq 127.$$

Условие выполняется.

Крутящий момент на ключе при затяжке шпилек $M_{кр} = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ МН} \cdot \text{м}$ (рисунок 13.19).

Проверим условие прочности прокладки:

$$\frac{P_{Б1}}{\pi D_{п.ср} b_{п}} \leq [q], \quad (7.3.8.31)$$

где: $[q] = 130 \text{ МПа}$ (таблица 13.28 ОСТ 26-373-78).

$$\frac{5.3}{3.14 \cdot 3.054 \cdot 0.025} = 22 \leq 130.$$

Условие выполняется.

Максимальное напряжение в сечении s_1 фланца (бурта) наблюдается в месте соединения втулки с плоскостью фланца (бурта):

$$\sigma_1 = \frac{TM_0 \omega}{D(s_1 - c_1)^2}, \quad (7.3.8.32)$$

где c_1 -прибавка для компенсации коррозии, $c_1 = 0.001 \text{ м}$.

$$\sigma_1 = \frac{1.89 \cdot 0.3 \cdot 0.576}{3(0.012 - 0.001)^2} = 900.$$

Максимальное напряжение в сечении s_0 фланца (бурта) наблюдается в месте соединения втулки с обечайкой или днищем:

$$\sigma_0 = \phi_3 \sigma_1, \quad (7.3.8.33)$$

$$\sigma_0 = 1 \cdot 900 = 900.$$

Напряжение в кольце фланца от действия M_0 :

$$\sigma_{\kappa} = \frac{M_0 [1 - \omega(1 + 0.9\lambda)] \phi_2}{Dh^2 \phi_R}, \quad (7.3.8.34)$$

где: ϕ_R - коэффициент прочности сварного шва, равный 1.

$$\sigma_{\kappa} = \frac{0.3 [1 - 0.576(1 + 0.9 \cdot 0.38)] 35}{3 \cdot 0.072^2 \cdot 1} = 128.$$

Напряжение во втулке фланца от внутреннего давления:

$$\sigma_x = \frac{PD}{2(s_0 - c)}, \quad (7.3.8.35)$$

$$\sigma_x = \frac{0.2 \cdot 3}{2(0.012 - 0.001)} = 27.1;$$

$$\sigma_y = \frac{PD}{4(s_0 - c)}, \quad (7.3.8.36)$$

$$\sigma_y = \frac{0.2 \cdot 3}{4(0.012 - 0.001)} = 13.6.$$

Таблица 7.3.10.1 – Размеры плоского приварного фланца, мм.

D_Φ	D_B	D_1	D_2	D_3	h	a	a_1	s	d	z
3150	3105	3056	3070	3053	70	22	18	12	27	92

7.3.9 Расчет укрепления отверстий

Расчет укрепления отверстий проводим в соответствии с ГОСТ 24755-89.

1) Расчет укреплений отверстий в днище эллиптическом верхнем

Исходные данные:

- материал днища - сталь марки 12X18H10T;
- диаметр днища - $D = 3000$ мм;
- толщина стенки днища - 12 мм;
- толщина стенки штуцера - $s_1 = 10$ мм;
- расчетная температура - $t = 500$ °С;
- расчетное внутреннее давление - $p_p = 0,16$ МПа;
- допускаемое напряжение материала - $[\sigma] = 104$ МПа [8, с. 406, рисунок 14.2];
- коэффициент прочности сварных швов - $\varphi_0 = 1$.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр стандартного эллиптического днища при $H = 0.25D$:

$$D_p^a = 2D \sqrt{1 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^2}, \quad (7.3.9.1)$$

где x - расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, $x = 0$ мм.

$$D_p^a = 2 \cdot 3000 \sqrt{1 - 3 \left(\frac{0}{3000} \right)^2} = 6000 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр отверстия в стенке днища при наличии штуцера с круглым поперечным сечением, ось которого совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия, определяем по формуле:

$$d_p = d + 2c_s, \quad (7.3.9.2)$$

где d - внутренний диаметр штуцера, $d=610$ мм.

c_s - сумма прибавок к расчетной толщине стенки, $c_s = 1$ мм.

$$d_p = 610 + 2 \cdot 1 = 612 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул для расчета укрепления отверстий.

Отношение диаметров:

$$\frac{d - 2c_s}{D} \leq 0.6, \quad (7.3.9.3)$$
$$\frac{612 - 2 \cdot 1}{6000} - 0.102 \leq 0.6.$$

Условие выполняется.

Отношение толщины стенки днища к диаметру:

$$\frac{s - c}{D} \leq 0.1, \quad (7.3.9.4)$$
$$\frac{12 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.003 \leq 0.1,$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для эллиптических днищ, работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле:

$$s_p = \frac{pD_p}{4\varphi[\sigma] - p}, \quad (7.3.9.5)$$

где p - расчетное внутреннее давление, МПа;

φ - коэффициент прочности сварных швов;

$[\sigma]$ - допускаемое напряжение днища при расчетной температуре 500 °С.

$$s_p = \frac{0.16 \cdot 6000}{4 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 2.3 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле:

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{4\varphi_1[\sigma] - p}, \quad (7.3.9.6)$$

где φ_1 - коэффициент прочности сварных швов принимаем равным 1.

$$s_{1p} = \frac{0.16 \cdot (610 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 0.5 \text{ мм.}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле:

$$l_{1p} = 1.25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}, \quad (7.3.9.7)$$

где s_1 – исполнительная толщина стенки штуцера, мм.

$$l_{1p} = 1.25\sqrt{(612 + 2 \cdot 1)(10 - 1)} = 93 \text{ мм.}$$

$$l_{3p} = 0.5\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s - c_{s1})}, \quad (7.3.9.8)$$

$$l_{3p} = 0.5\sqrt{(612 + 2 \cdot 1)(10 - 2 \cdot 1)} = 35 \text{ мм.}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле:

$$L_0 = \sqrt{D_p(s - c)}, \quad (7.3.9.9)$$

$$L_0 = \sqrt{6000 \cdot (12 - 1)} = 257 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле:

$$l_{2p} = \sqrt{D_p(s_2 + s - c)}, \quad (7.3.9.10)$$

$$l_{2p} = \sqrt{6000 \cdot (12 + 10 - 1)} = 355 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле:

$$l_{0p} = 0.4\sqrt{D_p(s - c)}, \quad (7.3.9.11)$$

$$l_{0p} = 0.4\sqrt{6000 \cdot (12 - 1)} = 103 \text{ мм.}$$

Проверим учет взаимного влияния отверстий в аппарате:

$$b \geq \sqrt{D'_p(s - c)} + \sqrt{D''_p(s - c)}, \quad (7.3.9.12)$$

где b – минимальное расстояние между наружными поверхностями двух соседних штуцеров, 900 мм;

D' - расчетный диаметр укрепляемого отверстия, мм;

D'' - расчетный диаметр влияющего отверстия, мм.

$$D''_p = 2 \cdot 3000 \sqrt{1 - \left(\frac{900}{3000}\right)^2} = 5126 \text{ мм.}$$

$$396.5 \geq \sqrt{6000(12 - 1)} + \sqrt{5126(12 - 1)} = 494.$$

Так как условие не выполняется, то отверстие является не одиночным.

Проведем расчет для влияющего отверстия.

Расчетный диаметр отверстия для смещенного штуцера на эллиптическом днище определяем по формуле:

$$d''_p = \frac{d'' + c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D''_p}\right)^2}}, \quad (7.3.9.13)$$

где d'' – внутренний диаметр влияющего отверстия, $d'' = 359$ мм.

$$d_p'' = \frac{359 + 2 \cdot 1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot 900}{5126}\right)^2}} = 381 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{381 - 2 \cdot 1}{6000} = 0.06 \leq 0.6.$$

Условие выполняется.

Отношение толщины стенки днища к диаметру:

$$\frac{12 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.003 \leq 0.1.$$

Условие выполняется.

д) Расчет толщины стенок

Расчет толщины стенки по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.16 \cdot 5126}{4 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 1.97 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.16 \cdot (359 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 0.3 \text{ мм.}$$

е) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, определяем формулам 1.7, 1.8:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(359 + 2 \cdot 1)(9 - 1)} = 67 \text{ мм.}$$

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(359 + 2 \cdot 1)(9 - 2 \cdot 1)} = 25 \text{ мм.}$$

ж) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{5126 \cdot (12 - 1)} = 237 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$l_{2p} = \sqrt{5126 \cdot (12 + 9 - 1)} = 320 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{5126 \cdot (12 - 1)} = 95 \text{ мм.}$$

Определим отношение допускаемых напряжений:

- для внешней части штуцера

$$x_1 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\}; \quad (7.3.9.14)$$

$$x_1 = \min \left\{ 1; \frac{104}{104} \right\} = 1;$$

- для внутренней части штуцера и накладного кольца:

$$x_3 = x_2 = x_1 = 1.$$

Проверим достаточность укрепления перемычки между отверстиями. Для этого определим допускаемое давление для перемычки по формуле:

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{0.5(D_p' + D_p'') + (s-c)V} \cdot V, \quad (7.3.9.15)$$

где $K_1=2$ – коэффициент для выпуклых днищ.

$$V = \min\{1;$$

$$1 + \frac{l_{1p}'(s_1' + c_s')\chi_1' + l_{2p}'s_2'\chi_2' + l_{3p}'(s_3' - c_s' - c_{s1}')\chi_3' + l_{1p}''(s_1'' + c_s'')\chi_1'' + l_{2p}''s_2''\chi_2'' + l_{3p}''(s_3'' - c_s'' - c_{s1}'')\chi_3''}{b(s-c)} \cdot \left. \right\}$$

$$K_3 \left(0.8 + \frac{d_p' + d_p''}{2b} \right) + K_1 \left(\frac{d' + 2c_s'}{D_p'} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi_1'} \cdot \frac{l_{1p}'}{b} + \frac{d'' + 2c_s''}{D_p''} \cdot \frac{\varphi''}{\varphi_1''} \cdot \frac{l_{1p}''}{b} \right)$$

где $K_3=1$.

$$V = \frac{1 + \frac{93 \cdot (10-1) \cdot 1 + 355 \cdot 12 \cdot 1 + 35 \cdot (10-1-1) \cdot 1 + 67 \cdot (9-1) \cdot 1 + 320 \cdot 12 \cdot 1 + 25 \cdot (9-1-1) \cdot 1}{b(s-c)}}{1 \cdot \left(0.8 + \frac{612+381}{2 \cdot 494} \right) + 2 \cdot \left(\frac{610+2 \cdot 1}{6000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{93}{494} + \frac{359+2 \cdot 1}{5126} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{94}{494} \right)} = 2.62.$$

Выбираем минимальное значение $V=1$.

$$[p] = \frac{2 \cdot 2(12-1) \cdot 1 \cdot 104}{0.5(6000 + 5126) + (12-1) \cdot 1} \cdot 1 = 0.8 \text{ МПа}.$$

2) Расчет укреплений отверстий в обечайке

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12Х18Н10Т;
- диаметр обечайки – $D=3000$ мм;
- внутренний диаметр штуцера – 207 мм;
- толщина стенки обечайки – $s=12$ мм;
- толщина стенки штуцера – $s_1=6$ мм;
- расчетная температура – $t=200^\circ\text{C}$;
- расчетное внутреннее давление – $p_p=0,2$ МПа;
- допускаемое напряжение материала – $[\sigma]=133$ МПа [Л, с. 406, рисунок 14.2];
- коэффициент прочности сварных швов – $\varphi_0=1$;
- сумма прибавок к расчетной толщине стенки – $c_s=1$ мм.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки:

$$D_p = D = 3000 \text{ мм}. \quad (7.3.9.16)$$

Расчетный диаметр отверстия штуцера, ось которого совпадает с осью аппарата, определяем по формуле 1.2:

$$d_p = 207 + 2 - 1 = 209 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул 7.3.9.3 и 7.3.9.4 для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{209 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.07 \leq 0.6.$$

Условие выполняется.

$$\frac{12 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.003 \leq 0.1.$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для цилиндрических обечаек работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.2 \cdot 3000}{4 \cdot 1 \cdot 133 - 0.2} = 1.13 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.2 \cdot (207 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 133 - 0.2} = 0.16 \text{ мм.}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле 7.3.9.7 и 7.3.9.8:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(207 + 2 \cdot 1)(6 - 1)} = 40 \text{ мм.}$$

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(207 + 2 \cdot 1)(6 - 2 \cdot 1)} = 14.5 \text{ мм.}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в обечайке определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 182 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$l_{2p} = \sqrt{3000 \cdot (8 + 12 - 1)} = 239 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле 7.3.9.11:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 73 \text{ мм.}$$

Проверим условие 1.12:

$$b \geq \sqrt{D_p^+ (s - c)} + \sqrt{D_p^- (s - c)},$$

$$2099 \geq 364.$$

Если условие выполняется, то отверстие считается одиночным.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки аппарат вычисляем по формуле:

$$d_0 = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0.8 \right) \sqrt{D_p (s-c)}, \quad (7.3.11.17)$$

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{12-1}{1.13} - 0.8 \right) \sqrt{3000 \cdot (12-1)} = 3252 \text{ мм.}$$

Проверим выполнение условия 1.13:

$$209 \leq 3252.$$

Если условие выполнено, то дальнейших расчетов укрепления отверстия не требуется.

3) Расчет укрепления отверстия в обечайке (выход газов)

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки – $D=3000$ мм; внутренний диаметр штуцера – 802 мм;
- толщина стенки обечайки – $s = 12$ мм;
- толщина стенки штуцера – $s_1 = 9$ мм;
- расчетная температура – $t=200$ °C;
- расчетное внутреннее давление – $p_p=0,16$ МПа;
- допускаемое напряжение материала – $[\sigma] = 133$ МПа [Л, с. 406, рис. 14.2];
- коэффициент прочности сварных швов – $\varphi_0 = 1$;
- сумма прибавок к расчетной толщине стенки – $c_s = 1$ мм.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки: $D_p=D = 3000$ мм.

Расчетный диаметр отверстия штуцера, ось которого совпадает с осью аппарата, определяем по формуле 1.2:

$$D_p=802 + 2 \cdot 1 = 804 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул 1.3 и 1.4 для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{804 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.27 \leq 0.6.$$

Условие выполняется.

$$\frac{12 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.003 \leq 0.1$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.16 \cdot 3000}{4 \cdot 1 \cdot 133 - 0.16} = 0.9 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.16 \cdot (802 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 133 - 0.16} = 0.5 \text{ мм.}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле 7.3.9.7 и 7.3.9.8:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(802 + 2 \cdot 1)(9 - 1)} = 100 \text{ мм.}$$

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(802 + 2 \cdot 1)(9 - 2 \cdot 1)} = 38 \text{ мм.}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 182 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$l_{2p} = \sqrt{3000 \cdot (8 + 12 - 1)} = 239 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле 7.3.9.11:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 73 \text{ мм.}$$

Проверим условие 1.12:

$$b \geq \sqrt{D_p' (s - c)} + \sqrt{D_p'' (s - c)},$$

$$526 \geq 364.$$

Условие выполняется, следовательно, отверстие считается одиночным.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки аппарат вычисляем по формуле 7.3.9.17:

$$d_0 = 2 \left(\frac{12 - 1}{0.9} - 0.8 \right) \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 4150 \text{ мм.}$$

Проверим выполнение условия 7.3.9.13:

$$804 \leq 4150$$

Если условие выполнено, то дальнейших расчетов укрепления отверстия не требуется.

4) Расчет укрепления отверстия в обечайке (люк)

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки – $D = 3000$ мм;
- внутренний диаметр штуцера – 498 мм;

- толщина стенки обечайки – $s = 12$ мм;
- толщина стенки штуцера – $s_1 = 16$ мм;
- расчетная температура – $t = 500$ °С;
- расчетное внутреннее давление – $p_p = 0,16$ МПа;
- допускаемое напряжение материала – $[\sigma] = 104$ МПа [Л, с. 406, рис. 14.2];
- коэффициент прочности сварных швов – $\varphi_0 = 1$;
- сумма прибавок к расчетной толщине стенки – $c_s = 1$ мм.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки: $D_p = D = 3000$ мм.

Расчетный диаметр отверстия штуцера, ось которого совпадает с осью аппарата, определяем по формуле 1.2:

$$d_p = 498 + 2 \cdot 1 = 500 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул 7.3 и 7.4 для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{500 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.17 \leq 0.6$$

Условие выполняется.

$$\frac{12 - 2 \cdot 1}{3000} = 0.003 \leq 0.1$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.16 \cdot 3000}{4 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 1.15 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.16 \cdot (498 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 104 - 0.16} = 0.14 \text{ мм.}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле 7.3.9.7 и 7.3.9.8:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(498 + 2 \cdot 1)(16 - 1)} = 108 \text{ мм.}$$

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(498 + 2 \cdot 1)(16 - 2 \cdot 1)} = 42 \text{ мм.}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 182 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$l_{2p} = \sqrt{3000 \cdot (8 + 12 - 1)} = 239 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле 7.3.9.11:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 73 \text{ мм.}$$

Проверим условие 1.12:

$$b \geq \sqrt{D_p' (s - c)} + \sqrt{D_p'' (s - c)},$$
$$731 \geq 364$$

Условие выполняется, следовательно, отверстие считается одиночным.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления, при наличии избыточного отверстия, не требующего дополнительного укрепления. При наличии избыточной толщины стенки аппарат вычисляем по формуле 7.3.9.17:

$$d_0 = 2 \left(\frac{12 - 1}{1.15} - 0.8 \right) \sqrt{3000 \cdot (12 - 1)} = 3191 \text{ мм.}$$

Проверим выполнение условия 7.3.9.13:

$$500 \leq 3191$$

Если условие выполнено, то дальнейших расчетов укрепления отверстия не требуется.

7.3.10 Расчет линзового компенсатора

Расчет линзового компенсатора будем проводить согласно ОСТ 26-01-1512-76.

Исходные данные для расчета:

- Расчетная температура на входе в трубное пространство – $t_T^1 = 500^\circ\text{C}$;
- Расчетная температура на выходе из трубного пространства – $t_T^2 = 200^\circ\text{C}$
- Расчетная температура на входе в межтрубное пространство – $t_M^1 = 90^\circ\text{C}$
- Расчетная температура на выходе из межтрубного пространства – $t_M^2 = 200^\circ\text{C}$
- Температура сборки аппарата – $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Расчетное давление в трубном пространстве – $P_T = 0.16 \text{ МПа}$
- Расчетное давление в межтрубном пространстве – $P_T = 0.2 \text{ МПа}$
- Допускаемое напряжение для материала решетки при рабочей температуре в аппарате (сталь 12X18H10T) – $[\sigma]_p = 105 \text{ МПа}$ [4, с. 406, рис. 14.2];
- Внутренний диаметр кожуха – $D = 3000 \text{ мм}$
- Толщина стенки кожуха – $s_k = 12 \text{ мм}$
- Длина труб – $l = 3 \text{ м}$

- Модуль продольной упругости материала трубы (сталь 12X18H10T) при расчетной температуре трубы – $E_T = 1970$ МПа [4, с. 101, табл. 2.21]
- модуль продольной упругости материала кожуха (сталь 12X18H10T) при расчетной температуре кожуха – $E_K = 1970$ МПа [4, с. 101, табл. 2.21];
- коэффициент линейного расширения материала кожуха (сталь 12X18H10T) при средней температуре – $\alpha_K = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5, с. 238, табл. 10.8];
- коэффициент линейного расширения материала труб (сталь 12X18H10T) при средней температуре – $\alpha_T = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5, с. 238, табл. 10.8].

Согласно ОСТ 26-01-1505-76 для расчетного давления в межтрубном пространстве 0.2 МПа выбираем стандартный линзовый компенсатор «Линза 3000-0.25-12X18H10T ОСТ26-01-1505-76» со следующими характеристиками:

- наружный диаметр $D_H = 3020$ мм;
- наружный диаметр линзы $D_L = 3270$ мм;
- толщина стенки линзы $s_L = 3$ мм;
- внутренний радиус линзы $R = 22$ мм;
- ширина одной линзы $L_K = 104$ мм.

Находим параметр однолинзового компенсатора:

$$P_K = 0.06 \alpha_L (1 - \beta_K) \cdot \frac{D^2}{\pi s_L^3}, \quad (7.3.10.1)$$

где $\beta_K = \frac{D}{D_K} = \frac{3}{3.27} = 0.917$;

α_L – коэффициент, $\alpha_L = 0.05$ (рисунок 17.13 ОСТ 26-01-1512-76);

$$P_K = 0.06 \cdot 0.05 \cdot (1 - 0.917) \cdot \frac{3^2}{\pi \cdot 0.003^3} = 26420.$$

Средняя разность температур труб и кожуха:

$$\Delta t = 0.5 [|t_T^1 + t_T^2| - |t_M^1 + t_M^2|], \quad (7.3.10.2)$$

$$\Delta t = 0.5 [|500 + 200| - |90 + 200|] = 205^\circ \text{C}.$$

8. Расчеты вспомогательного оборудования

Все расчеты вспомогательного оборудования, согласно техническому заданию, являются проверочными, т.е. проводятся с целью проверки обеспечения уже действующими аппаратами новой производительности. Следовательно, в расчетах мы будем использовать данные об аппаратах, приводимые в [7].

Все расчеты будем проводить для случая получения продукционного формалина с массовой долей формальдегида 37% в «мягком» режиме (см. раздел 4.2).

8.1 Расчет спиртоиспарителя

Целью расчета спиртоиспарителя является определение расхода греющего пара и проверочный расчет требуемой площади поверхности теплообмена.

Описание конструкции спиртоиспарителя, а также принцип его работы приведены в разделе 4.1. Материальный баланс стадии образования метанола-воздушной смеси приводится в разделе 2 в таблице 2.1. Техническая характеристика спиртоиспарителя (выносной греющей камеры) согласно [7], приведена в таблице 8.1.1.

Таблица 8.1.1 – Техническая характеристика спиртоиспарителя (выносной греющей камеры)

Наименование показателя	Буквенное обозначение	Численное значение
1. Внутренний диаметр межтрубного пространства	-	1.4м
2. Площадь поверхности теплообмена	F	372 м ²
3. Длина трубки	L	4 м
4. Трубки	-	57×3.5
5. Количество трубок	n	520

8.1.1 Тепловые расчеты

Целью тепловых расчетов спиртоиспарителя является определение расхода греющего пара. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Исходные данные:

- расход сухого метанола – $g_{\text{возд}} = 407.408$ кмоль/ч, $G_{\text{CH}_3\text{OH}} = 13037.05$ кг/ч (см. раздел 5 таблица 5.1);
- расход сухого воздуха – $g_{\text{возд}} = 462.99$ кмоль/ч (см. раздел 5, таблица 5.1);
- количество паров воды в воздухе – $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{возд}} = 9,16$ кмоль/ч (см. раздел 5, таблица 5.1);
- расход метанола-воздушной смеси $g_{\text{см}} = 887.476$ кмоль/ч (см. раздел 5, таблица 5.1);
- температура метанола на входе в аппарат – $t_{\text{CH}_3\text{OH}} = 40^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.1);
- температура метанола-воздушной смеси на выходе из аппарата = $t_{\text{см}} = 84^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.1);
- температура воздуха – $t_{\text{возд}} = 50^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.1);
- температура пара – $t_{\text{п}} = 120^\circ\text{C}$ (см. раздел 4.1);
- давление парового конденсата – $p_{\text{п}} = 2$ кгс/см² (см. раздел 4.1);
- техническая характеристика спиртоиспарителя приведена в таблице 8.1.1.

Уравнение теплового баланса спиртоиспарителя в общем виде:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_{\text{пот}}, \quad (8.1.1.1)$$

где Q_1 – тепловой поток жидкого технического метанола, кВт;

Q_2 – тепловой поток воздуха, кВт;

Q_3 – тепловой поток греющего пара, кВт;

Q_4 – тепловой поток метанола-воздушной смеси, кВт;

Q_5 – теплота, расходуемая на испарение метанола и воды, кВт;

$Q_{\text{пот}}$ – теплопотери в окружающую среду, кВт.

Для упрощения расчетов пренебрежением тем количеством формальдегида, которое входит в состав поступающего технического метанола.

Находим тепловой поток жидкого технического метанола Q_1 :

$$Q_1 = \left(\frac{g_{\text{CH}_3\text{OH}} \cdot c_{\text{CH}_3\text{OH}}}{3600} + \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{M}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}{3600} \right) \cdot t_{\text{CH}_3\text{OH}}, \quad [5, \text{с. 179}]$$

где $c_{\text{CH}_3\text{OH}}$ – молярная теплоемкость жидкого метанола, Дж/(моль·К) (см. [5, с. 265, таблица 3]);

$C_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К) (см. [13, табл. XXXIX]).

$$Q_1 = \left(\frac{407.408 \cdot 81.6}{3600} + \frac{128.15 \cdot 4.187}{3600} \right) \cdot 40 = 375.3 \text{ кВт}$$

Находим тепловой поток воздуха Q_2 [5, с. 179]:

$$Q_2 = \left(\frac{g_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}}}{3600} + \frac{g_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^n}{3600} \right) \cdot t_{\text{возд}},$$

где $c_{\text{возд}}$ – средняя молярная теплоемкость сухого воздуха при $t_{\text{возд}} = 50^\circ\text{C}$, Дж/(моль·К) (см. [13, таблица XXVII]);

$C_{\text{H}_2\text{O}}^n$ – молярная теплоемкость водяного пара при $t_{\text{возд}} = 50^\circ\text{C}$, Дж/(моль·К) (см. [13, табл. XXVII]);

$$Q_2 = \left(\frac{462.99 \cdot 29.325}{3600} + \frac{9.16 \cdot 32.12}{3600} \right) \cdot 50 = 192.7$$

Для расчета средней молярной теплоемкости метанола-воздушной смеси при температуре $T_{\text{см}} = 85 + 273 = 358 \text{ K}$, воспользуемся данными, приведенными в [5, с 264-267, табл. 2,3]. Данные о составе метанола-воздушной смеси возьмем из таблицы 2.1.

Таблица 8.1.1.1 – Средняя молярная теплоемкость метанола-воздушной смеси

Компонент	Молярная доля компонента	Средняя молярная теплоемкость компонента, Дж/(моль·К)	$X_i c_i$ Дж/(моль ·К)
	X_i	c_i	
Метанол	0.459	48.963	22.474
Азот	0.412	29.409	12.117
Вода	0.018	34.092	0.614
Кислород	0.111	29.732	3.300
Сумма	1	-	38.505

В таблице 8.1.1.1 сумма значений $X_i c_i$ представляет собой искомую среднюю молярную теплоемкость метанола-воздушной смеси при заданной температуре.

Находим тепловой поток метанола-воздушной смеси по формуле 42 [5]:

$$Q_4 = \frac{g_{\text{см}} \cdot c_{\text{см}}^* \cdot t_{\text{см}}}{3600},$$

где $c_{\text{см}}^*$ – средняя молярная теплоемкость метанола-воздушной смеси, Дж/(моль·К) (см. табл. 7.1.1.1).

$$Q_4 = \frac{887.476 \cdot 38.505 \cdot 85}{3600} = 806.8 \text{ кВт}.$$

Находим расход теплоты на испарение метанола и воды [5, с. 179]:

$$Q_5 = \frac{G_{CH_3OH} \cdot r_{CH_3OH} + G_{H_2O}^M \cdot r_{H_2O}}{3600},$$

где r_{CH_3OH} – удельная теплота парообразования метанола, кДж/кг (см. [5, с. 270, таблица 12]);

r_{H_2O} – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг (см. [5, с. 271, таблица 14]).

Получаем:

$$Q_5 = \frac{13037.05 \cdot 1050.1 + 128.15 \cdot 2297.0}{3600} = 3884.6 \text{ кВт.}$$

Принимаем, что теплопотери в окружающую среду составляют 1 % от общего прихода (расхода) теплоты, тогда, в соответствии с формулой 7.1.1.1 получаем:

$$Q_{nom} = \frac{(Q_4 + Q_5) \cdot 1\%}{100\% - 1\%} = \frac{(806.8 + 3884.6) \cdot 1\%}{99\%} = 47.4 \text{ кВт.}$$

Из уравнения теплового баланса (формула 8.1.1.1) находим тепловой поток греющего пара:

$$Q_{nom} = Q_4 + Q_5 + Q_{nom} - Q_1 - Q_2 = 806.8 + 3884.6 + 47.4 - 375.3 - 192.7 = 4170.8 \text{ кВт.}$$

Определяем расход греющего пара;

$$G_n = \frac{Q_3 \cdot 3600}{r'_{H_2O}},$$

где r'_{H_2O} – удельная теплота парообразования воды при $p_n = 2 \text{ кгс/см}^2$, кДж/кг (см. 15, с. 271, таблица 14)).

$$G_n = \frac{4170.8 \cdot 3600}{2208} = 6800.2 \text{ кг/ч.}$$

Тепловой баланс спиртоиспарителя представлен в таблице 8.1.1.2.

8.1.2 Технологические расчеты

Выполним поверочный расчет площади поверхности теплопередачи. Целью этого расчета является определение запаса площади поверхности теплопередачи при новой производительности. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Необходимую площадь поверхности теплопередачи будем вычислять по формуле:

$$F' = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}},$$

где F – площадь поверхности теплопередачи, м^2 ;

Q – тепловая нагрузка, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К);

Δt_{cp} – средняя разность температур (температурный напор), °С.

Таблица 8.1.1.2 – Тепловой баланс спиртоиспарителя

Приход			Расход		
Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %	Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %
Тепловой поток метанола	375.3	8	Тепловой поток метанола-воздушной смеси	806.8	17
Тепловой поток воздуха	192.7	4	Теплопотери на испарение	3884.6	82
Тепловой поток греющего пара	4170.8	88	Теплопотери в окружающую среду	47.4	1
Всего	38.8	100	Всего	4738.8	100

Расчет будем проводить по зонам нагрева метанола от 40 °С до 85 °С и испарения его при 85 °С.

Тепловая нагрузка аппарата по зоне нагрева [5, с. 180]:

$$Q_H = \frac{Q_1 \cdot (t_{cm} - t_{CH_3OH}) \cdot 1000}{t_{CH_3OH}},$$

$$Q_H = \frac{373.5 \cdot (85 - 40) \cdot 1000}{40} = 420187.5 \text{ Вт.}$$

Тепловая нагрузка аппарата по зоне испарения:

$$Q_H = Q_5 \cdot 1000 = 3884600 \text{ Вт.}$$

Температурная схема теплообмена:

$$120^\circ \text{C} \xleftarrow{\text{ВОДЯНОЙ ПАР}} 120^\circ \text{C}$$

$$40^\circ \text{C} \xrightarrow{\text{МЕТАНОЛ}} 85^\circ \text{C} \rightarrow 85^\circ \text{C}$$

Зона нагрева Зона испарения

Средняя разность температур в зоне нагрева [9, формула VII,90]:

$$\Delta t_{cp}^H = \frac{(t_n - t_{CH_3OH}) - (t_n - t_{cm})}{\ln \left[\frac{(t_n - t_{CH_3OH})}{(t_n - t_{cm})} \right]}, \quad (8.1.2.2)$$

$$\Delta t_{cp}^H = \frac{(120 - 40) - (120 - 85)}{\ln \left[\frac{(120 - 40)}{(120 - 85)} \right]} = 54.4^\circ \text{C}.$$

Средняя разность температур в зоне испарения [9, формула VII,90]:

$$\Delta t_{cp}^H = t_n - t_{cm},$$

$$\Delta t_{cp}^H = 120 - 85 = 35^\circ\text{C}.$$

Коэффициенты теплопередачи будем определять по формуле VII,90 [9]:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (8.1.2.3)$$

где α_1 – средний коэффициент теплоотдачи от греющего пара к стенке трубы, Вт/(м²·К);

$\sum r_{cm}$ – сумма термических сопротивлений стенки трубы, Вт/(м²·К);

α_2 – средний коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему метанолу, Вт/(м²·К).

Найдем среднюю температуру для метанола:

$$t_{CH_3OH}^* = \frac{t_{CH_3OH} + t_{cm}}{2} = \frac{40 + 85}{2} = 62.5^\circ\text{C}.$$

Данные о теплофизических параметрах воды, водяного пара и метанола при соответствующих температурах находим по справочнику [5, с. 270-272, таблицы 12, 16].

Для метанола при $t_{CH_3OH} = 40^\circ\text{C}$:

- плотность – $\rho_{CH_3OH}^{40} = 774 \text{ кг/м}^3$.

Для метанола при $t_{CH_3OH} = 85^\circ\text{C}$:

- плотность – $\rho_{CH_3OH}^{85} = 730.5 \text{ кг/м}^3$,

- плотность газообразного – $\rho_{CH_3OH(g)}^{85} = 2.47 \text{ кг/м}^3$,

- удельная теплота парообразования – $r_{CH_3OH} = 1072 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$,

- поверхностное натяжение – $\sigma_{CH_3OH} = 17.13 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$,

- коэффициент динамической вязкости – $\mu_{CH_3OH}^{85} = 277.5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$,

- коэффициент теплопроводности – $\lambda_{CH_3OH}^{85} = 0.187 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Для метанола при $t_{CH_3OH}^* = 62.5^\circ\text{C}$:

- плотность – $\rho_{CH_3OH}^{62.5} = 754 \text{ кг/м}^3$,

- коэффициент динамической вязкости – $\mu_{CH_3OH}^{62.5} = 367 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$,

- коэффициент теплопроводности – $\lambda_{CH_3OH}^{62.5} = 0.205 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$,

- удельная теплоемкость – $C_{CH_3OH}^{62.5} = 2840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$,

- критерий Прандтля – $Pr = 5.08$.

Для воды при $t_n = 120^\circ\text{C}$:

- плотность – $\rho_{H_2O} = 942.7 \text{ кг/м}^3$,

- коэффициент динамической вязкости – $\mu_{H_2O} = 235 \cdot 10^{-6}$ Па · с,
- коэффициент теплопроводности – $\lambda_{H_2O} = 0.685$ Вт/(м · К),
- удельная теплота парообразования – $r_{H_2O} = 2208 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара к стенке трубы высотой H будем находить по формуле 4.55 [13]:

$$\alpha_1 = 1.21 \cdot \lambda_{H_2O} \cdot \left(\frac{p_{H_2O}^2 \cdot r_{H_2O} \cdot g}{\mu_{H_2O} \cdot H} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varphi^{\frac{1}{3}}, \quad (8.1.2.4)$$

где $g = 9.81$ – ускорение силы тяжести, м/с²;

φ – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м².

Согласно формуле 8.1.4 имеем:

$$\alpha_1 = 1.21 \cdot 0.685 \cdot \left(\frac{942.7^2 \cdot 2208 \cdot 10^3 \cdot 9.81}{235 \cdot 10^{-6} \cdot 4} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varphi^{\frac{1}{3}} = 2.268 \cdot 10^5 \cdot \varphi^{\frac{1}{3}}$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к потоку метанола (в зоне нагрева) определим по формуле 64 [5]:

$$\alpha_2^H = \frac{Nu \cdot \lambda_{CH_3OH}^{62.5}}{d}, \quad (8.1.2.5)$$

где Nu - критерий Нуссельта;

d - внутренний диаметр трубки, м (см. таблицу 8.1.1).

Примем скорость движения метанола в трубном пространстве $\omega_{CH_3OH} = 0.05$ м/с, тогда критерий Рейнольдса равен [5, формула 48]:

$$Re = \frac{\omega_{CH_3OH} \cdot d \cdot p_{CH_3OH}^{62.5}}{\mu_{CH_3OH}^{62.5}},$$

$$Re = \frac{0.05 \cdot 0.05 \cdot 754}{367 \cdot 10^{-6}} = 5136.$$

Режим движения – переходный, следовательно, критерий Нуссельта будем находить по формуле 11 [12]:

$$Nu = 0.008 \cdot Re^{0.9} \cdot Pr^{0.43},$$

$$Nu = 0.008 \cdot 5136^{0.9} \cdot 5.08^{0.43} = 35.2.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к потоку метанола (в зоне нагрева) определим по формуле 8.1.2.5:

$$\alpha_2^H = \frac{35.2 \cdot 0.205}{0.05} = 144.3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему метанолу (в зоне испарения) будем определять по формуле 4.60 [13]:

$$\alpha_2^H = b \cdot \left(\frac{(\lambda_{CH_3OH}^{85})^2 \cdot P_{CH_3OH}^{85}}{\mu_{CH_3OH}^{85} \cdot \sigma_{CH_3OH} \cdot T_{кин}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varphi^{\frac{2}{3}}, \quad (8.1.2.6)$$

где b – безразмерный коэффициент;

$T_{кин}$ – температура кипения, К:

$$T_{кин} = t_{см} + 273 = 85 + 273 = 358 \text{ К}.$$

Так как эта формула справедлива лишь при умеренной плотности теплового потока (менее $0.4\varphi_{кр}$), то рассчитываем критическую поверхностную плотность теплового потока по формуле 4.60 [13]:

$$\begin{aligned} \varphi_{кр} &= 0.14 \cdot r_{CH_3OH} \cdot \sqrt{P_{CH_3OH(\varepsilon)}^{85}} \cdot \sqrt[4]{\sigma_{CH_3OH} \cdot g \cdot P_{CH_3OH}^{85}}, \\ \varphi_{кр} &= 0.14 \cdot 1072 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{247} \cdot \sqrt[4]{17.13 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81 \cdot 730.5} = 785114 \text{ Вт/м}^2, \\ 0.4 \cdot \varphi_{кр} &= 0.4 \cdot 785114 = 314046 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

Поверхностная плотность теплового потока для имеющегося спиртоиспарителя:

$$\varphi' = \frac{Q_H}{F}, \quad (8.1.2.7)$$

$$\varphi' = \frac{3884600}{372} = 10442.5 \text{ Вт/м}^2.$$

Так как $\varphi' \leq 0.4 \cdot \varphi_{кр}$, то, следовательно, принятая для расчета α_2^H формула применима.

Коэффициент b определим по формуле 4.62 [13]:

$$\begin{aligned} b &= 0.075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{P_{CH_3OH}^{85}}{P_{CH_3OH(\varepsilon)}^{85} - 1} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \\ b &= 0.075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{730.5}{2.47 - 1} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 0.0919. \end{aligned}$$

Тогда, согласно формуле 8.1.2.6 имеем:

$$\alpha_2^H = 0.0919 \cdot \left(\frac{(0.187)^2 \cdot 730.5}{277.5 \cdot 10^{-6} \cdot 17.13 \cdot 10^{-3} \cdot 358} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varphi^{\frac{2}{3}} = 2.16 \cdot \varphi^{\frac{2}{3}}.$$

Сумма термических сопротивлений стенки трубы с учетом слоев загрязнений с обеих сторон [9, формула VII, 83]:

$$\sum r_{cm} = r_1 + r_2 + \frac{s}{\lambda_{cm}},$$

где r_1 и r_2 - термические сопротивления слоев загрязнений с обеих сторон трубы, $(\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}$; (см. [12, с. 318]);

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности нержавеющей стали, Вт/(м·К) (см. [13, таблица XXVIII]);

s - толщина стенки трубы, м (см. таблицу 8.1.1).

$$\sum r_{cm} = 0.00018 + 0.00035 + \frac{0.0035}{17.5} = 0.00074 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт.}$$

Из основного уравнения теплопередачи (см. формулы 8.1.2.2 и 8.1.2.7) и уравнения аддитивности термических сопротивлений (см. формулу 8.1.2.3) следует:

$$\frac{1}{K} = \frac{\Delta t_{cp}}{\varphi} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2},$$

$$\frac{1}{K} = \frac{\Delta t_{cp}}{\varphi} = \frac{1}{2.268 \cdot 10^5 \cdot \varphi^{\frac{1}{3}}} + 0.00074 + \frac{1}{2.16 \cdot \varphi^{\frac{2}{3}}}, \quad (8.1.2.8)$$

где $\alpha_2 = \alpha_2''$.

Подставим в формулу 7.1.2.8 значение $\Delta t_{cp}'' = 35^\circ \text{C}$ и запишем ее в следующем виде:

$$y = 4.41 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^{1.33} + 0.00074 \cdot \varphi + 0.463 \cdot \varphi^{0.33} - 35 = 0.$$

Принимаем $\varphi_1 = 20000 \text{ Вт/м}^2$, тогда:

$$y_1 = 4.41 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^{1.33} + 0.00074 \cdot 20000 + 0.463 \cdot 20000^{0.33} - 35 = -5.72.$$

Принимаем $\varphi_2 = 40000 \text{ Вт/м}^2$, тогда:

$$y_2 = 4.41 \cdot 10^{-6} \cdot 40000^{1.33} + 0.00074 \cdot 40000 + 0.463 \cdot 40000^{0.33} - 35 = 15.7.$$

Истинное значение поверхностной плотности теплового потока при $y=0$:

$$\varphi = \varphi_2 - y_2 \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{y_2 - y_1} = 40000 - 15.7 \cdot \frac{40000 - 20000}{15.7 - (-5.72)} = 25341 \text{ Вт/м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара к стенке трубы (см. формулу 7.1.2.4):

$$\alpha_1 = 2.268 \cdot 10^5 \cdot \varphi^{\frac{1}{3}} = 2.268 \cdot 10^5 \cdot 25341^{\frac{1}{3}} = 7721.5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к кипящему метанолу (по зоне испарения) (см. формулу 8.1.2.6):

$$\alpha_2'' = 2.16 \cdot \varphi^{\frac{2}{3}} = 2.16 \cdot 25341^{\frac{2}{3}} = 1863.5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

Коэффициент теплопередачи по зоне нагрева (см. формулу 8.1.2.3):

$$K_1 = \left(\frac{1}{7721.5} + 0.00074 + \frac{1}{1863.5} \right)^{-1} = 128.2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплопередачи по зоне нагрева (см. формулу 8.1.2.3):

$$K_2 = \left(\frac{1}{7721.5} + 0.00074 + \frac{1}{1863.5} \right)^{-1} = 711.2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Площадь поверхности теплообмена (см. формулу 7.1.2.2):

$$F' = F'_1 + F'_2 = \frac{Q_H}{K_1 \cdot \Delta t_{cp}^H} + \frac{Q_{II}}{K_2 \cdot \Delta t_{cp}^{II}} = \frac{420187.5}{128.2 \cdot 54.5} + \frac{3884600}{711.2 \cdot 35} = 216.3 \text{ м}^2.$$

Тогда, имеем запас площади поверхности теплопередачи:

$$\left(1 - \frac{F'}{F} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{216.3}{372} \right) \cdot 100\% = 41.9\%.$$

Таким образом, в результате расчета поверхности теплопередачи спиртоиспарителя установили, что последний сможет обеспечить новую производительность с запасом поверхности 41.%. Следует заметить, что при прежней производительности этот запас еще больше.

Выбор такого большого запаса площади поверхности теплопередачи объясняется тем, что при расчете процесса теплопередачи для случая кипения жидкости отклонения экспериментальных данных от рассчитанных по формуле 8.1.2.6 лежат в пределах $\pm 35\%$ [13, формула 4.60], кроме этого, возможно попадание воздуха в кипящий метанол, что резко снижает коэффициент теплопередачи.

8.2 Расчет перегревателя

Целью расчета перегревателя является определение расхода греющего пара и поверочный расчет требуемой площади поверхности теплообмена.

Перегреватель представляет собой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник, предназначенный для нагрева метанола-воздушной смеси от 85°C до 145°C . В трубном пространстве перегревателя движется метанола-воздушная смесь, а в межтрубном происходит конденсация греющего пара.

Техническая характеристика перегревателя, согласно [8], приведена в таблице 8.2.1.

Таблица 8.2.1 - Техническая характеристика перегревателя

Наименование показателя	Буквенное обозначение	Численное значение
1. Внутренний диаметр	$Dв$	1 м
2. Площадь поверхности теплообмена	F	525 м^2
3. Длина трубки	L	525 м^2
4. Трубки	-	25x2 мм
5. Количество трубок	n	717

8.2.1 Тепловые расчеты

Целью тепловых расчетов перегревателя является определение расхода греющего пара. Расчеты будем проводить согласно методике, предложенной в [5], где рассматривается аналогичный случай.

Исходные данные:

- расход метанола-воздушной смеси – $g_1 = 887.476$ кмоль/ч, $G_1 = 2670.67$ кг/ч (см. раздел 2 таблица 2.1),
- температура метанола-воздушной смеси на входе в аппарат – $t_1 = 85$ °С (см. раздел 4.1),
- температура метанола-воздушной смеси на выходе из аппарата – $t_2 = 145$ °С (см. раздел 4.1),
- температура греющего пара – $t_n = 160$ °С (см. раздел 4.1),
- давление парового конденсата – $p_n = 6$ кгс/см² (см. раздел 4.1),

Техническая характеристика перегревателя приведена в таблице 8.2.1.

Уравнение теплового баланса перегревателя в общем виде:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_{\text{ном}}, \quad (8.2.1.1)$$

где Q_1 – тепловой поток поступающей спиртовоздушной смеси, кВт;

Q_2 – теплота, выделяющаяся при конденсации греющего пара, кВт

Q_3 – тепловой поток выходящей метанола-воздушной смеси, кВт;

$Q_{\text{ном}}$ – теплотери в окружающую среду, кВт.

Значения Q_1 и Q_3 были определены ранее (см. разделы 7.1.1 и 7. 1.1):

$$Q_1 = 806.8 \text{ кВт},$$

$$Q_3 = 1464.6 \text{ кВт}.$$

Принимаем, что теплотери в окружающую среду в среднем составляют 1 % от общего прихода (расхода) теплоты. Тогда, в соответствии с формулой 6.2.1.1 получаем:

$$Q_{\text{ном}} = \frac{Q_3 \cdot 1\%}{100\% - 1\%} = \frac{1464.63 \cdot 1}{100 - 1} = 14.8 \text{ кВт}.$$

Согласно формуле 7.2.1.1, находим Q_2 :

$$Q_2 = Q_3 + Q_{\text{ном}} - Q_1 = 1464.6 + 14.8 - 806.8 = 672.6 \text{ кВт}$$

Определяем расход греющего пара [5, формула 51]:

$$G_n = \frac{Q_2 \cdot 3600}{r'_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где $r'_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельная теплота парообразования воды при $p_n = 6$ кгс/см², кДж/кг (см. [5, с. 271, таблица 14]).

$$G_n = \frac{Q_2 \cdot 3600}{2095} = 1155.78 \text{ кг/ч}.$$

Тепловой баланс перегревателя представлен в таблице 8.2.1.1.

8.2.2 Технологические расчеты

Выполним поверочный расчет площади поверхности теплопередачи. Целью этого расчета является определение запаса площади поверхности теплопередачи при не вой производительности.

Таблица 8.2.1.1 – Тепловой баланс перегревателя

Приход			Расход		
Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %	Тепловой поток	Значение, кВт	Доля, %
Тепловой поток метанола-воздушной смеси на входе	806.8	55	Тепловой поток метанола-воздушной смеси на выходе	1464.6	99
Теплота, выделяющаяся при конденсации греющего пара	672.6	45	Теплопотери в окружающую среду	14.8	1
Всего	1479.4	100	Всего	1479.4	100

Необходимую площадь поверхности теплопередачи будем вычислять по формуле 62 [5]:

$$F' = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (8.2.2.1)$$

где F' – площадь поверхности теплопередачи, м²;

Q – тепловая нагрузка, Вт (см. раздел 7.2.1);

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К);

Δt_{cp} – средняя разность температур (температурный напор), °С.

Температурная схема теплообмена:

$$\begin{array}{c} 160^{\circ} \text{C} \xleftarrow{\text{ВОДЯНОЙ ПАР}} 160^{\circ} \text{C} \\ 85^{\circ} \text{C} \xrightarrow{\text{МЕТАНОЛО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ}} 145^{\circ} \text{C} \end{array}$$

Средняя разность температур [9, формула VII, 90]:

$$\Delta t = \frac{(t_n - t_1) - (t_n - t_2)}{\ln \left[\frac{(t_n - t_1)}{(t_n - t_2)} \right]}$$

$$\Delta t = \frac{(160 - 85) - (160 - 145)}{\ln \left[\frac{(160 - 85)}{(160 - 145)} \right]} = 37,3^{\circ} \text{C}.$$

Найдем среднюю температуру метанола-воздушной смеси:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{85 + 145}{2} = 115^\circ \text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи будем определять по формуле 63 [5]:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \quad (8.2.2.2)$$

где α_1 – средний коэффициент теплоотдачи от греющего пара к стенке трубы, Вт/(м² · К);

$\sum r_{cm}$ – сумма термических сопротивлений стенки трубы, Вт/(м² · К);

α_2 – средний коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой метанола-воздушной смеси, Вт/(м² · К).

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара к стенке трубы высотой H будем находить по формуле [14, с. 139]:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha'}{\sqrt[4]{H \cdot (t_n - t_{cm})}}, \quad (8.2.2.3)$$

где α' – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства конденсата,
 t_{cm} – температура стенки, °С.

Для пара при 160 °С $\alpha' = 14525$ (см. [14, с. 139]). Примем $t_{cm} = 120$ С. Тогда, имеем:

$$\alpha_1 = \frac{14525}{\sqrt[4]{4 \cdot (160 - 120)}} = 4084 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Критерий Рейнольдса для метанола-воздушной смеси определим по формуле:

$$\text{Re} = \frac{\omega_{cm} \cdot d \cdot \rho}{\mu_{cm}},$$

где ω_{cm} – скорость движения метанола-воздушной смеси в трубном пространстве, м/с;

d – внутренний диаметр трубки, м (см. таблицу 8.2.1);

ρ – плотность метанола-воздушной смеси при средней температуре, кг/м³;

μ_{cm} – коэффициент динамической вязкости метанола-воздушной смеси при средней температуре, Па · с.

Для упрощения расчетов пренебрежем тем количеством формальдегида, которое входит в состав метанола-воздушной смеси.

Определим плотность метанола-воздушной смеси при средней температуре [13, формула 12]:

$$\rho_{cm} = \sum p_i X_i, \quad (8.2.2.5)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента, кг/м³ (см. [5, с. 270, таблица 12; 13, таблицы V и LVI]);

X_i – мольная доля i -го компонента (см. таблицу 5.1).

По формуле 7.2.2.5 получаем:

$$\begin{aligned} p_{см} &= \sum p_i X_i = p_{CH_3OH} \cdot X_{CH_3OH} + p_{H_2O} \cdot X_{H_2O} + p_{N_2} \cdot X_{N_2} + p_{O_2} \cdot X_{O_2} = \\ &= 5.06 \cdot 0.459 + 0.964 \cdot 0.018 + 0.634 \cdot 0.412 + 0.875 \cdot 0.11 = 2.698 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Определим скорость движения метанола-воздушной смеси в трубном пространстве:

$$\omega = \frac{G_1}{p_{см} \cdot S_{тр} \cdot 3600},$$

где $S_{тр}$ – площадь сечения трубного пространства, м² (см. таблицу 8.2.1);

$$\omega = \frac{2670.67}{2.698 \cdot 0.259 \cdot 3600} = 1.06 \text{ м/с.}$$

Коэффициент динамической вязкости метанола-воздушной смеси при средней температуре определим по формуле [5, формула 12]:

$$\frac{M_{см}}{\mu_{см}} = \frac{X_1 \cdot M_1}{\mu_1} + \frac{X_2 \cdot M_2}{\mu_2} + \dots + \frac{X_i \cdot M_i}{\mu_i}, \quad (8.2.2.6)$$

где $M_{см}$, M_1 , M_2 , ..., M_i – относительные молекулярные массы смеси газов и ее компонентов, кг/кмоль;

$\mu_{см}$, μ_1 , μ_2 , ..., μ_i – коэффициенты динамической вязкости смеси газов и ее компонентов при средней температуре, Па · с;

X_1 , X_2 , ..., X_i – мольные доли компонентов в газовой смеси.

Результаты расчета коэффициента динамической вязкости метанола-воздушной смеси представлены в таблице 7.2.2.2 (значения коэффициентов динамической вязкости компонентов метанола-воздушной смеси при средней температуре μ_i принимаем согласно [5, с. 270, таблица 11]).

Используя данные таблицы 8.2.2.1, по формуле 8.2.2.6 находим коэффициент динамической вязкости метанола-воздушной смеси при 115 С:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см} \cdot \mu_i}{X_i \cdot M_i} = \frac{30.068}{0.186} \cdot 10^{-7} = 162 \cdot 10^{-7}$$

По формуле 8.2.2.4 находим критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{1.06 \cdot 0.021 \cdot 3.065}{162 \cdot 10^{-7}} = 4212$$

Таблица 8.2.2.

Компонент	Мольная доля компо- нента	Молекуляр- ная масса компонента, кг/кмоль	Коэффициент динамической вязкости компонента, Па·с	$\frac{X_i \cdot M}{\mu_i} \cdot 10^7$, Па·с	$X_i \cdot M_i$, кг/кмоль
	X_i	M_i	$\mu_i \cdot 10^7$		
Метанол	0.459	32	128	0.115	14.688
Азот	0.412	28	214	0.054	11.536
Вода	0.018	18	129	0.003	0.324
Кислород	0.111	32	251	0.014	3.520
Сумма	1	-	-	0.186	30.068

Режим движения переходный, следовательно, критерий Нуссельта метано-воздушной смеси будем определять по формуле [14, формула VI.27]:

$$Nu = 0.008 \cdot Re^{0.9} \cdot Pr^{0.43} \quad (8.2.2.7)$$

Определим значение средней молярной теплоемкости метано-воздушной смеси при 115 С:

$$c_{см} = \frac{c_{см}^{85} + c_{см}^{145}}{2},$$

где $c_{см}^{85}$ – средняя молярная теплоемкость метано-воздушной смеси при 85 С, Дж/(моль·К) (см. таблицу 8.1.1.1);

$c_{см}^{145}$ – средняя молярная теплоемкость метано-воздушной смеси при 145 С, Дж/(моль·К) (см. таблицу 8.1.1.1). Имеем:

$$c_{см} = \frac{38.505 + 40.973}{2} = 39.739 \text{ Дж/(моль·К)}$$

Таблица 8.2.2.2 – Физико-химические свойства компонентов метано-воздушной смеси

Компонент	Плотность, кг/м ³	Удельная изохорная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Показатель адиабаты	Коэффициент динамической вязкости, Па·с
	ρ_i	$C_{v,i} \cdot 10^{-3}$	$k_i = C_{p,i} / C_{v,i}$	$\mu_i \cdot 10^7$
Метанол	5.06	1.13	1.35	0.0128
Азот	0.634	0.85	1.40	0.0214
Вода	0.964	0.91	1.28	0.0129
Кислород	0.875	0.85	1.40	0.0251

Так как для нахождения коэффициента теплопроводности газовой смеси правило аддитивности неприменимо, то воспользуемся методикой, приводимой в [13].

Занесем значения физико-химических свойств компонентов метано-воздушной смеси при средней температуре в таблицу 8.2.2.2.

Находим массовый состав метано-воздушной смеси, при этом, учитывая, что мольная доля компонента в газовой смеси равна его объемной доле (см. таблицу 8.2.2.1). Результаты заносим в таблицу 8.2.2.3.

Таблица 8.2.2.3 Массовый состав метано-воздушной смеси

Компонент	Объемная доля	Масса, кг	Массовая доля
	$\varpi_i^{об}$	$\varpi_i^{об} \cdot p_i$	$\varpi_i^{mac} = \frac{\varpi_i^{об} \cdot p_i}{\sum (\varpi_i^{об} \cdot p_i)}$
Метанол	0.459	2.323	0.861
Азот	0.412	0.261	0.097
Вода	0.018	0.017	0.006
Кислород	0.111	0.096	0.036
Сумма:	1	2.697	1

Вычисляем удельную изохорную теплоемкость для метано-воздушной смеси при средней температуре [13, с. 174]:

$$C_{V,CM} = \sum (C_{v,i} \cdot \varpi_i^{mac})$$

$$C_{V,CM} = 0.861 \cdot 1130 + 0.097 \cdot 850 + 0.006 \cdot 910 + 0.036 \cdot 850 = 1091 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Коэффициент теплопроводности метано-воздушной смеси будем находить по формуле 4.10 [13]:

$$\lambda_{cm} = B \cdot C_{V,CM} \cdot \mu_{cm}, \quad (8.2.2.8)$$

где $B = 0.25 \cdot (9\kappa - 5)$, κ - средний показатель адиабаты для газовой смеси.

Найдем средний показатель адиабаты для смеси κ_{cm} :

$$\kappa_{cm} = \frac{1.35 + 1.4 + 1.28 + 1.4}{4} = 1.36$$

Тогда, в соответствии с формулой 8.2.2.8 получаем:

$$\lambda_{cm} = 0.2 \cdot (9 \cdot 1.36 - 5) \cdot 1091 \cdot 162 \cdot 10^{-7} = 0.032 \text{ Вт/(м·К)}$$

Вычисляем удельную изобарную теплоемкость для метано-воздушной смеси при средней температуре:

$$C_{p,cm} = C_{v,cm} \cdot \kappa_{cm}$$

$$C_{p,cm} = 1091 \cdot 1.36 = 1484 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Определим критерий Прандтля для метано-воздушной смеси:

$$\text{Pr} = \frac{C_{p,cm} \cdot \mu_{cm}}{\lambda_{cm}},$$

$$\text{Pr} = \frac{1484 \cdot 162 \cdot 10^{-7}}{0,032} = 0.75$$

Определим критерий Нуссельта для метанола-воздушной смеси (см. формулу 8.2.2.7):

$$\text{Nu} = 0.008 \cdot 4212^{0.9} \cdot 0.75^{0.43} = 12.92$$

Определим коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой смеси газов [5, формула 64]:

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{cm}}{d},$$

где d – внутренний диаметр трубки, м (см. таблицу 8.2.1).

$$\alpha_2 = \frac{12.92 \cdot 0.032}{0.021} = 29.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Сумма термических сопротивлений стенки трубы с учетом слоев загрязнений с обеих сторон [9, Формула VII,83]:

$$\Sigma r_{cm} = r_1 + r_2 + \frac{s}{\lambda_{cm}}$$

где r_1 и r_2 – термические сопротивления слоев загрязнений с обеих сторон трубы, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; (см. [12, таблица 15]);

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности нержавеющей стали, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (см. [13, таблица XXVIII]);

s – толщина стенки трубы, м (см. таблицу 7.2.1).

$$\Sigma r_{cm} = 0.00009 + 0.00018 + \frac{0.002}{17.5} = 0.000384 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

По формуле 8.2.2.2 находим коэффициент теплопередачи:

$$K = \left(\frac{1}{4048} + 0.000384 + \frac{1}{29.7} \right)^{-1} = 37.43$$

По формуле 8.2.2.1 находим площадь поверхности теплопередачи:

$$F' = \frac{672600}{37.43 \cdot 37.3} = 489.3 \text{ м}^2$$

Тогда, мы имеем запас площади поверхности теплопередачи:

$$\left(1 - \frac{F'}{F} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{489.3}{525} \right) \cdot 100\% = 6.2\%$$

Таким образом, в результате расчета поверхности теплопередачи перегревателя установили, что последний сможет обеспечить новую производительность с запасом поверхности 6.2 %.

8.3 Расчет турбовоздуходувки

Турбовоздуходувка предназначена для подачи в процесс воздуха. Техническая характеристика воздуходувки приведена в таблице 8.3.1.

Таблица 8.3.1 - Техническая характеристика воздуходувки

Наименование показателя	Буквенное обозначение	Численное значение
1. Тип		ТВ-80-1,8
2. Мощность электродвигателя	N'	200 кВт
3. Частота вращения вала электродвигателя		2960 об/мин

Зададимся целью рассчитать требуемую мощность электродвигателя воздуходувки, необходимую для обеспечения новой производительности.

Определим объемный расход воздуха по уравнению Клапейрона-Менделеева:

$$V = \frac{g \cdot R \cdot T \cdot 1000}{p \cdot 3600},$$

где g – мольный расход воздуха, кмоль/ч (см. раздел 5);

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура, К (см. раздел 4.1);

p – давление, Па (см. раздел 4.1).

$$V = \frac{472.15 \cdot 8.314 \cdot 313 \cdot 1000}{80000 \cdot 3600} = 4.266 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Мощность, развиваемую электродвигателем при установившемся режиме, определим по формуле [5, формула 70]:

$$N = \frac{V \cdot \Delta p}{\eta}, \quad (8.3.1)$$

где Δp – разность давлений до и после воздуходувки, Па (см. 4.1);

η – коэффициент полезного действия воздуходувки.

Примем согласно [3] $\Delta p = 0.1 - 0.08 = 0.02$ МПа, $\eta = 0.9$ (см. [5, таблица 4]). Имеем:

$$N = \frac{4.266 \cdot 20000}{0.9} = 94800 \text{ Вт}$$

Таким образом, требуемая мощность оказалась меньше мощности выбранного типа электродвигателя, следовательно электродвигатель этого типа сможет обеспечить необходимую производительность.

8.4 Расчет промежуточных емкостей

Целью расчета промежуточных емкостей поставим определение времени, в течение которого они смогут обеспечить работу установки при внезапном прекращении подачи.

8.4.1 Расчет смесителя

Объем смесителя – $V = 26 \text{ м}^3$ [7]. Расход выходящей из него метано-водной смеси – $G = 13037.05 \text{ кг/ч}$ (см. раздел 5). Плотность метано-водного раствора при среднем содержании в нем метанола 90% и средней температуре 40 С (см. раздел 4.1) – $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ (см. [13, таблица IV]). Тогда, при среднем уровне заполнения емкости 60 % имеем:

$$\tau = \frac{60\% \cdot V \cdot \rho}{100\% \cdot G} = \frac{60\% \cdot 26 \cdot 800}{100\% \cdot 13037.05} \approx 1 \text{ ч.}$$

8.4.2 Технологический расчет паросборника и конденсатосборника

В подконтактном холодильнике образуется водяного пара – $G_1 = 10088.6 \text{ кг/ч}$ (см. раздел 7.2.1), конденсируется в спиртоиспарителе – $G_2 = 6800.2 \text{ кг/ч}$ (см. раздел 8.1.1). Найдем количество водяного пара отводимого из паросборника:

$$G_3 = G_1 - G_2 = 10088.6 - 6800.2 = 3288.4 \text{ кг/ч.}$$

Так как этот излишний пар специальным образом не отводится из паросборника, то в конденсатосборнике этот пар конденсируется, нагревая поступающую сюда "свежую" деминерализованную воду. При прекращении подачи "свежей" деминерализованной воды давление в паросборнике начнет расти и по достижении $P_{\text{откр.}} = 2.3 \text{ кгс/см}^2$ сработает предохранительный клапан. Объем паросборника – $V_1 = 16 \text{ м}^3$ [7], конденсатосборника – $V_2 = 10 \text{ м}^3$ [7]. Положим, что средний уровень заполнения паросборника составляет 40 %, а конденсатосборника - 60 %. Тогда в них находится конденсата:

$$V = V_1 \cdot \frac{40\%}{100\%} + V_2 \cdot \frac{60\%}{100\%} = 16 \cdot \frac{40\%}{100\%} + 10 \cdot \frac{60\%}{100\%} = 12.4 \text{ м}^3$$

Следовательно, этот конденсат закончится через:

$$\tau = \frac{V \cdot \rho}{G_3} = \frac{12.4 \cdot 942.7}{3288.4} \approx 3.5 \text{ ч,}$$

где $\rho = 942.7 \text{ кг/м}^3$.

8.4.3 Механический расчет паросборника

Расчет проводим аналогично представленным методикам в разделе 7.3, за исключением расчета седловых опор.

1) Расчет обечайки

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки – $D_K = 2,2$ м;
- расчетная температура $t=170$ °С;
- расчетное внутреннее давление $p_p=0,5$ МПа;
- допускаемое напряжение материала $\sigma_d=133$ МПа [8, с. 406, рис. 14.2];
- прибавка на коррозию $C_k=1$ мм;
- коэффициент прочности сварных швов $\phi_o = 1$.

Определим отношение определяющих параметров σ_d и p_p с учетом коэффициента ϕ :

$$\frac{\sigma_d}{p_p} \phi = \frac{133}{0.5} \cdot 1 = 266 > 25$$

Толщину обечайки с учетом запаса на коррозию и округления для данного соотношения определяем по формуле 7.3.1.2:

$$s = \frac{2.2 \cdot 0.5}{2 \cdot 133 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.0018 + 0.001 + C_{окр} = 0.005 \text{ м,}$$

где $C_{окр}$ – прибавка округления толщины обечайки до номинального размера.

Рассчитанное значение толщины обечайки для проектируемого аппарата слишком мало, поэтому, согласно рекомендациям [3, с. 211] принимаем действительную толщину стенки обечайки $S'_{об.} = 0.008$ м.

Проверим, выполняется ли условие:

$$(S'_{об.} - C_k) / D_K \leq 0.1$$
$$(0.008 - 0.001) / 2.2 = 0.0032 \leq 0.1$$

Условие выполняется.

Определим допускаемое избыточное давление в обечайке с принятой толщиной стенки по формуле (8.3.1.4):

$$p = \frac{2 \cdot 133 \cdot 1(0.008 - 0.001)}{2.2 + (0.008 - 0.001)} = 0.84 \text{ МПа.}$$

2) Расчет толщины стенки днища

Расчет толщины стенки днища проводим в соответствии с ГОСТ 14249-89.

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12X18H10T;
- диаметр обечайки – $D_K = 2,2$ м; расчетная температура $t=170$ °С;
- расчетное внутреннее давление $p_p=0,5$ МПа;
- допускаемое напряжение материала $\sigma_d=104$ МПа [8, с. 406, рис. 14.2];

- прибавка на коррозию $C_k = 1$ мм;
- коэффициент прочности сварных швов $\varphi_0 = 1$.

Определим соотношение определяющих параметров σ_d и p_p с учетом коэффициента φ :

$$\frac{\sigma_d}{p_p} \varphi = \frac{104}{0.5} \cdot 1 = 208 > 25$$

Толщину стенки днища с учетом запаса на коррозию и округления для данного соотношения определяем по формулам 7.3.2.1 и 7.3.2.2:

$$s = \frac{2.2 \cdot 0.5}{2 \cdot 104 \cdot 1} + 0.001 + C_{окр} = 0.0018 + 0.001 + C_{окр} = 0.0065 \text{ м.}$$

Рассчитанное значение толщины днища для проектируемого аппарата слишком мало, поэтому, принимаем действительную толщину стенки днища равной толщине стенки обечайки $S'_{об.} = 0.008$ м.

Проверим, выполняется ли условие:

$$\begin{aligned} (S'_{об.} - C_k) / D_k &\leq 0.1 \\ (0.008 - 0.001) / 2.2 &= 0.0032 \leq 0.1 \end{aligned}$$

Условие выполняется.

Определим допускаемое избыточное давление в обечайке с принятой толщиной стенки по формуле (8.3.1.4):

$$p = \frac{2 \cdot 104 \cdot 1(0.008 - 0.001)}{2.2 + (0.008 - 0.001)} = 0.66 \text{ МПа.}$$

Толщину стенки крышки принимаем равной толщине стенки днища.

2) Расчет укрепления отверстий

Расчет укрепления отверстий проводим в соответствии с ГОСТ 24755-89. Исходные данные:

- материал днища – сталь марки 12X18H10T;
- диаметр днища – $D = 2200$ мм;
- толщина стенки днища – 8 мм;
- толщина стенки штуцера – $s_1 = 10$ мм;
- расчетная температура – $t = 170$ °С;
- расчетное внутреннее давление – $p_p = 0,5$ МПа;
- допускаемое напряжение материала – $[\sigma] = 104$ МПа [8, с. 406, рис. 142];
- коэффициент прочности сварных швов – $\varphi_0 = 1$.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр стандартного эллиптического днища при $H = 0.25D$ формула 8.3.11.1:

$$D = 2 \cdot 2200 \sqrt{1 - 3 \left(\frac{0}{2200} \right)^2} = 4400 \text{ мм}$$

Расчетный диаметр отверстия в стенке днища при наличии штуцера с круглым поперечным сечением, ось которого совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия, определяем по формуле 7.3.9.2:

$$d_p = 400 + 2 \cdot 1 = 402 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул для расчета укрепления отверстий: Отношение диаметров, формуле 7.3.9.3:

$$\frac{d_p - 2c_s}{D} = \frac{402 - 2 \cdot 1}{4400} = 0.09 \leq 0.6.$$

Условие выполняется.

Отношение толщины стенки днища к диаметру по формуле 7.3.9.4:

$$\frac{s - \tilde{n}}{D} = \frac{8 - 2 \cdot 1}{2200} = 0.003 \leq 0.1$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для эллиптических днищ, работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.5 \cdot 4400}{4 \cdot 1 \cdot 104 - 0.5} = 5.3 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.5(400 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 104 - 0.5} = 0.97 \text{ мм.}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле 7.3.9.7:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(400 + 2 \cdot 1)(10 - 1)} = 75 \text{ мм}$$

По формуле 7.3.9.8:

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(402 + 2 \cdot 1)(10 - 2 \cdot 1)} = 28 \text{ мм}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{4400(8 - 1)} = 175 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$L_{2p} = \sqrt{4400 \cdot (8 + 10 - 1)} = 273 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле 7.3.9.11:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{4400 \cdot (8 - 1)} = 70 \text{ мм.}$$

Проверим учет взаимного влияния отверстий в аппарате по формуле 7.3.9.12:

$$b \geq \sqrt{D_p'(s-c)} + \sqrt{D_p''(s-c)}$$

$$D_p'' = 2 \cdot 2200 \sqrt{1 - 3 \left(\frac{400}{2200} \right)^2} = 4176$$

$$396.5 \geq \sqrt{6000(12-1)} + \sqrt{5126(12-1)} = 346$$

Так как условие выполняется, то отверстие является одиночным.

3) Расчет укрепления отверстия в обечайке (выход газов)

Исходные данные:

- материал обечайки – сталь марки 12Х18Н10Т;
- диаметр обечайки – $D = 2200$ мм;
- внутренний диаметр штуцера – 400 мм;
- толщина стенки обечайки – $s = 8$ мм;
- толщина стенки штуцера – $s_1 = 10$ мм;
- расчетная температура – $t = 170$ °С;
- расчетное внутреннее давление – $p_p = 0,5$ МПа;
- допускаемое напряжение материала – $[\sigma] = 133$ МПа [8, с. 406, рис. 14.2];
- коэффициент прочности сварных швов – $\varphi_0 = 1$;
- сумма прибавок к расчетной толщине стенки – $c_s = 1$ мм.

а) Расчет диаметров

Расчетный диаметр цилиндрической обечайки: $D_p = D = 2200$ мм.

Расчетный диаметр отверстия штуцера, ось которого совпадает с осью аппарата, определяем по формуле 1.2:

$$d_p = 400 + 2 \cdot 1 = 402 \text{ мм.}$$

Проверим условия применения формул 7.3 и 7.4 для расчета укрепления отверстий:

$$\frac{402 - 2 \cdot 1}{2200} = 0.18 \leq 0.6$$

Условие выполняется.

$$\frac{8 - 2 \cdot 1}{2200} = 0.003 \leq 0.1$$

Условие выполняется.

б) Расчет толщины стенок

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяем в соответствии с ГОСТ 14249.

Для цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением, расчетную толщину стенки s_p определяем по формуле 7.3.9.5:

$$s_p = \frac{0.5 \cdot 2200}{4 \cdot 1 \cdot 133 - 0.5} = 2.1 \text{ мм}$$

Расчетную толщину стенки штуцера определяем по формуле 7.3.9.6:

$$s_{1p} = \frac{0.16(802 + 2 \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot 133 - 0.16} = 0.8 \text{ мм}$$

в) Расчет длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, определяем по формуле 7.3.9.7 и 7.3.9.8:

$$l_{1p} = 1.25 \sqrt{(802 + 2 \cdot 1)(9 - 1)} = 75 \text{ мм}$$

$$l_{3p} = 0.5 \sqrt{(802 + 2 \cdot 1)(9 - 2 \cdot 1)} = 28 \text{ мм}$$

г) Расчет ширины зоны укрепления

Ширину зоны укрепления в днище определяем по формуле 7.3.9.9:

$$L_0 = \sqrt{2200(8 - 1)} = 124 \text{ мм.}$$

Расчетную ширину накладного кольца определяем по формуле 7.3.9.10:

$$L_{2p} = \sqrt{2200 \cdot (8 + 10 - 1)} = 193 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр определяем по формуле 7.3.9.11:

$$d_{0p} = 0.4 \sqrt{2200 \cdot (8 - 1)} = 50 \text{ мм.}$$

Проверим условие 1.12:

$$b \geq \sqrt{D_p'(s - c)} + \sqrt{D_p''(s - c)}$$

$$396.5 \geq 375.$$

Условие выполняется, следовательно, отверстие считается одиночным.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки аппарата вычисляем по формуле 7.3.9.17:

$$d_0 = 2 \left(\frac{8 - 1}{0.9} - 0.8 \right) \sqrt{2200 \cdot (8 - 1)} = 1732 \text{ мм.}$$

Проверим выполнение условия 7.3.9.13:

$$402 \leq 1732$$

Если условие выполнено, то дальнейших расчетов укрепления отверстия не требуется.

3) Расчет седловых опор

Реакция опоры для аппарата, установленного на двух опорах:

$$Q = 0.5G, \quad (8.4.3.1)$$

где G – сила тяжести аппарата в рабочем состоянии, МН.

$$G = m_p \cdot g, \quad (8.4.3.2)$$

$$G = 16000 \cdot 9.8 = 156800 \text{ Н} = 0.16 \text{ МН.}$$

$$Q = 0.5 \cdot 0.16 = 0.078.$$

Определим расчетный изгибающий момент:

$$M_u = 0.215GL_{\text{пр}}, \quad (8.4.3.3)$$

где $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина аппарата, м.

$$L_{\text{пр}} = L_k + 2L_d, \quad (8.4.3.4)$$

где: L_k – длина цилиндрической части корпуса, $L_k = 4$ м;

L_d – длина днища.

$$L_k = \frac{G_d + V_d g p_c}{0.785 \left[p (D_H^2 - D_B^2) + p_c D_B^2 \right]}, \quad (8.4.3.5)$$

где: G_d – сила тяжести днища, $G_d = 0.035$ МН;

V_d – емкость днища, $V_d = 1.584$ м³;

D_H, D_B – соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндрической обечайки корпуса, м;

p, p_c – соответственно плотность материала корпуса и среды в аппарате, кг/м³.

$$L_k = \frac{0.035 + 1.584 \cdot 9.8 \cdot 1000}{0.785 \cdot 9.8 \left[7850 \cdot (2.216^2 - 2.2^2) + 1000 \cdot 2.2^2 \right]} = 0.37 \text{ м.}$$

$$L_{\text{пр}} = 4 + 2 \cdot 0.37 = 4.74 \text{ м.}$$

Расстояние между опорами при $l_1 = 0.145L_{\text{пр}}$:

$$l = 0.5(L_{\text{пр}} - 2l_1);$$

$$l = 0.5(4.74 - 2 \cdot 0.145 \cdot 4.74) = 1.68 \text{ м.}$$

$$M_u = 0.0215 \cdot 0.16 \cdot 4.74 = 0.016 \text{ МН} \cdot \text{м.}$$

Напряжение на изгиб в корпусе от силы тяжести определяем по формуле:

$$\sigma_u = \frac{M_u}{0.8 \cdot D_B^2 (s - C_B)}, \quad (8.4.3.6)$$

$$\sigma_u = \frac{0.016}{0.8 \cdot 2.2^2 (0.008 - 0.001)} = 0.59 \text{ МН/м}^3.$$

Так как напряжение небольшое на устойчивость корпус не проверяем.

Выбираем ширину опоры:

$$b = 0.2 \cdot D_B = 0.2 \cdot 2.2 = 0.44 \text{ м.}$$

Момент сопротивления расчетного сечения стенки корпуса над опорой определяем по формуле:

$$W = \frac{\left[b + 8(s - C_K) \right] (s - C_K)^2}{6}, \quad (8.4.3.7)$$

$$W = \frac{[0.44 + 8(0.008 - 0.001)](0.008 - 0.001)^2}{6} = 4.05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Напряжение на изгиб в стенке аппарата от действия реакции опоры определяем по формуле:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{0.02 Q D_{\text{н}}}{W} \leq \sigma_{\text{ид}}, \quad (8.4.3.8)$$

где Q – реакция опоры, МН.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{0.02 \cdot 0.078 \cdot 2.216}{4.05 \cdot 10^{-6}} = 854 \text{ МН/м}^2.$$

$\sigma_{\text{и}} > \sigma_{\text{ид}} = 146 \text{ МН/м}^2$, следовательно, требуется усилить стенку над опорой накладкой.

Требуемый момент сопротивления усиленного сечения элемента определяем по формуле:

$$W = \frac{0.02 Q D_{\text{н}}}{\sigma_{\text{ид}}}, \quad (8.4.3.9)$$

$$W = \frac{0.02 \cdot 0.078 \cdot 2.216}{146} = 2.37 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Поскольку $4 \cdot \sigma_{\text{ид}} = 4 \cdot 146 = 584 \text{ МН/м}^2 < \sigma_{\text{и}} = 854 \text{ МН/м}^2$, принимаем толщину накладки $s_{\text{н}} = 1.6s = 1.6 \cdot 8 = 12.8 \text{ мм}$.

Определим расчетную площадь поперечного сечения стенки корпуса:

$$F'_c = [b + 8(s - C_{\text{к}})](s - C_{\text{к}}), \quad (8.4.3.10)$$

$$F'_c = [0.44 + 8(0.008 - 0.001)](0.008 - 0.001) = 0.0035.$$

Расчетную площадь поперечного сечения накладки определяем по формуле:

$$F'_n = (b + 4s_{\text{н}})s_{\text{н}}, \quad (8.4.3.11)$$

$$F'_n = (0.44 + 4 \cdot 0.013) \cdot 0.012 = 0.0064.$$

Момент инерции площади F'_c определяем по формуле:

$$J_c = \frac{F'_c (s - C_{\text{к}})^2}{12}, \quad (8.4.3.12)$$

$$J_c = \frac{0.0035(0.008 - 0.001)^2}{12} = 1.43 \cdot 10^{-8}$$

Момент инерции площади F'_n определяем по формуле:

$$J_n = \frac{F'_n s_{\text{н}}^2}{12}, \quad (8.4.3.13)$$

$$J_n = \frac{0.0064 \cdot 0.013^2}{12} = 9 \cdot 10^{-8}$$

Расстояние от нижней поверхности накладки до центра тяжести площади $F'_c + F'_н$ определяем по формуле:

$$y = \frac{F'_c [s_n + 0.5(s - C_k)] + 0.5F'_н s_n}{F'_c + F'_н}, \quad (8.4.3.14)$$

$$y = \frac{0.0035 \cdot [0.013 + 0.5(0.008 - 0.001)] + 0.5 \cdot 0.0064 \cdot 0.013}{0.0035 + 0.0064} = 0.01 \text{ м.}$$

Расчетный момент сопротивления усиленного накладкой сечения корпуса определяем по формуле:

$$W' = \frac{J_c + J_n + F'_c [s_n + 0.5(s - C_k) - y]^2 + F'_н (y - 0.5s_n)^2}{y}, \quad (8.4.3.15)$$

$$W' = \frac{1.43 \cdot 10^{-8} + 9 \cdot 10^{-8} + 0.0035 [0.013 + 0.5(0.008 - 0.001) - 0.01]^2 + 0.0064 \cdot (0.01 - 0.5 \cdot 0.013)^2}{0.01} =$$

$$= 33.1 \cdot 10^{-6}$$

Так как $W' > 23.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, то прочность обеспечена.

9. Автоматизация производства

9.1 Аналитический контроль

Аналитический контроль приводится только для стадии получения метанола-воздушной смеси и стадии синтеза формальдегида, и представлен в таблице 9.1.1.

Таблица 9.1.1 – Аналитический контроль стадии получения метанола-воздушной смеси и стадии синтеза формальдегида

Объект контроля	Контролируемый параметр	Частота контроля	Нормы и технологические показатели
Метанол, поступающий из заводских сетей	Массовая доля метанола	По требованию	Не менее 99.0%
Деминерализованная вода, поступающая из заводских сетей	Содержание железа, жесткость, pH	Один раз в неделю	Не более 0.05 мг/дм ³ не более 0.005 ммоль/дм ³ 6.5 – 8.5
Метанол или разбавленный метанол в испарителе поз. E7a	Массовая доля: - метанола, - формальдегида.	Три раза в смену	20.0-99.0% не более 15.0%

9.1.1 Методы определения метанола

Основным методом определения метанола является газо-жидкостная хроматография.

Химические методы определения метанола сложны и недостаточно селективны. Большинство методов связано с полным окислением всех органических компонентов хромовой кислотой [1]. Если содержанием кислоты и других примесей можно пренебречь, концентрация метанола находится вычитанием из суммы окисленных продуктов количества формальдегида, которое предварительно определяется одним из приводимых ниже методов. Погрешность определения метанола можно уменьшить алкалометрическим титрованием муравьиной кислоты. В отсутствие формальдегида метанол окисляют и находят количество образовавшегося формальдегида.

Формальдегид можно связать избытком аммиака с получением уротропина, затем раствор дважды подвергают перегонке с последующим денсиметрическим определением метанола в погоне.

На предварительном связывании формальдегида в уротропин основан также фото калориметрический метод, подходящий для определения небольших количеств метанола в формалине. Он базируется на образовании окрашенного соединения метанола с церийнитратом аммония $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$.

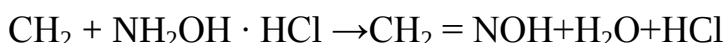
Рефрактоденсиметрический метод используется в некоторых случаях для приближенного определения метанола и формальдегида в растворах типа технического формалина. Показатель преломления n_D^{20} определяется при $20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ с использованием рефрактометра типа Аббе (например, ИРФ-22) или Пульриха (например, ИРФ-23). Плотность раствора находят с помощью набора денсиметров (ареометров). Содержание метанола и формальдегида находят с помощью градуировочного графика. Расхождение в содержании метанола не превышает 0.5 %.

9.1.2 Методы определения формальдегида

Основной метод анализа формальдегида – газо-жидкостная хроматография, однако, для определения содержания свободного формальдегида по-прежнему пользуются химическими методами, а из них чаще всего гидроксиламиновым или сульфитным.

Гидроксиламиновый метод.

Сущность метода заключается во взаимодействии формальдегида с гидрохлоридом гидроксилamina с образованием формальдоксима и свободной соляной кислоты.



Приборно-методическое оформление анализа зависит от способа определения выделяющейся соляной кислоты или оксима и связано, в основном, с наличием тех примесей, влияющих на погрешность. В наиболее простой модификации метод заключается в прямом алкалиметрическом определении соляной кислоты.

Сульфитный метод.

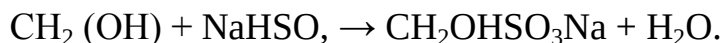
В основе метода лежит реакция формальдегида с сульфитом натрия, в результате которой образуется как бы продукт присоединения гидросульфита натрия к формальдегиду и свободная щелочь:



Гидросульфитное соединение имеет приведенную структуру гидроксисульфоновой кислоты, а не строение гидроксиметилсульфита $\text{HOCH}_2-\text{O}-\text{SO}_2\text{Na}$, приписывавшееся этому соединению ранее. Взаимодействие сульфитов с формальдегидом является примером метоксилирования неорганического соединения – реакции, часто

встречающейся в органических синетзах с участием формальдегида.

Как модификацию сульфитного метода можно рассматривать взаимодействие формальдегида с гидросульфитом натрия. В отличие от реакции сульфитом в последнем случае свободная щелочь не выделяется. Избыток гидросульфита находят йодометрически:

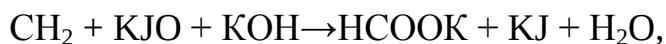


Йодометрический метод

Применяется для нахождения небольших количеств формальдегида в водных растворах, не содержащих примесей других органических веществ. Формальдегид окисляется солями йодноватистой кислоты, в таких условиях окислению могут подвергаться многие другие соединения. Определение состоит из следующих стадий: образование гипоиодата калия



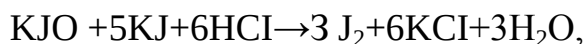
окисление формальдегида до формиата в щелочной среде



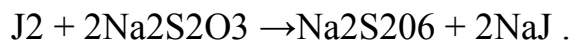
превращение KJO в смесь иодата калия и иодида



выделение йода при подкислении раствора смеси солей



титрование свободного йода раствором тиосульфата натрия



9.1.3 Определение железа

Титриметрический метод определения железа основан на титровании Fe(II) различными окислителями [KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, соли Ce(IV) и др.]; восстановление Fe(III) до Fe(II) можно провести с использованием в качестве восстановителей SnCl_2 , SO_2 , H_2S , Zn.

9.1.4 Определение жесткости воды.

Жесткость воды чаще всего определяется титрованием раствором двунатриевой соли этилендиаминететрауксусной кислоты (комплексен III, трибол Б, версен, ЭДТА) в щелочной среде. Проводя это титрование со специальным индикатором (хромоген черный специальный ЕТ-ОС, эриохром черный Т), находят общую жесткость воды; пользуясь другим специальным индикатором (мурексид), определяют кальциевую жесткость воды; магниевую жесткость воды рассчитывают по разности между этими двумя определениями.

9.2 Технологический контроль

9.2.1 Получение метанола-воздушной смеси

Турбовоздуходувка поз. М5/1-3:

- Включение, отключение турбовоздуходувки поз. М5/1-3 и управление электрозадвижками турбовоздуходувки поз. Н-5/1-3 осуществляется по месту и с ЦПУ. Открытие и закрытие электрозадвижек, работа воздуходувки сопровождаются световой сигнализацией, а отключение – звуковой и световой сигнализацией на ЦПУ.

- Температура масла в подшипниковой камере контролируется с помощью прибора поз. TJRA-23 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией на щите ЦПУ при температуре более 80 °С.

Давление на трубопроводе подачи воздуха в процессе контролируется с помощью прибора поз. PIA-43 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией давления менее 0.4 кгс/см² на ЦПУ.

- Расход воздуха, подаваемого в процесс, контролируется системой приборов поз. FIRCA-26 и регулируется сбросом части воздуха с трубопровода нагнетания "на свечу" и сопровождается световой и звуковой сигнализацией при расходе воздуха менее 3000 м³/ч на ЦПУ.

- Сила тока электродвигателя воздуходувки поз. М5/1-3 контролируется с помощью прибора поз. EIS-20 на щите ЦПУ и по месту и сопровождается отключением турбовоздуходувки при силе тока 360 А. Смеситель поз. XII:

- Расход метанола, подаваемого в процесс, контролируется с помощью прибора поз. FIRA-39 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией при расходе менее 2 м³/ч на щите ЦПУ.

- Расход деминерализованной (надсмольной) воды контролируется и регулируется с помощью прибора поз. FIRC-40 и клапана поз. HS-40/2 по месту и со щита ЦПУ.

- Расход деминерализованной воды контролируется с помощью прибора . FIR-40/1 и регулируется клапаном поз. HS-42/1 по месту и со щита ЦПУ.

- Расход надсмольной воды контролируется с помощью прибора поз. FU.-40/2 и регулируется клапаном поз. HS-42/2 по месту и со щита ЦПУ.

- Плотность подаваемого метанола-водяного раствора контролируется плотномером поз. DIR-41 на щите ЦПУ.

Спиртоиспаритель поз. E7a, E7б, T7:

- Температура воздуха, поступающего в выносную греющую камеру T7, контролируется с помощью прибора поз. TJR-75/1 на щите ЦПУ.

- Температура метанола или метанола-водного раствора, поступающего в

отстойник поз. E7б, контролируется прибором поз. TIR-35 на щите ЦПУ.

- Температура в верхней части испарителя поз. E7а спиртоиспарителя контролируется с помощью прибора поз. TJR-56, в нижней части – с помощью прибора поз. TJR-75/2 на щите ЦПУ.

- Давление в верхней части испарителя поз. E7а контролируется с помощью прибора поз. PIR-30 на щите ЦПУ.

- Уровень в испарителе поз. E7а регулируется подачей метанола или метанола-водного раствора в отстойник поз. E7б с помощью прибора поз. LIRCSA-27, максимальное (70 %) и минимальное (30 %) значения уровня сопровождаются световой и звуковой сигнализацией. При уровне в испарителе поз. E7а 20 % происходит автоматическое отключение воздухоподводки поз. M5/1-3.

Для предотвращения распространения пламени в системе предусмотрена дистанционная подача азота отсечным клапаном поз. НА-36 в трубопровод между испарителем поз. E7а и перегревателем поз. Т8 со щита ЦПУ и по месту. Для предохранения спиртоиспарителя от превышения давления и взрыва на испарителе поз. E7а предусмотрен предохранительный клапан, $P_{откр.} = 1.1 \text{ кгс/см}^2$. Перегреватель поз. Т8:

- Температура метанола-воздушной смеси после перегревателя поз. Т8 контролируется с помощью прибора поз. TIR-46 на щите ЦПУ.

- Давление метанола-воздушной смеси после перегревателя поз. Т8 контролируется с помощью манометра поз. PI-8, установленного по месту.

Огнепреградитель поз. Х9:

- Температура метанола-воздушной смеси после огнепреградителя контролируется с помощью прибора поз. TIA-48 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией при температуре более 200 °С на щите ЦПУ.

- Давление метанола-воздушной смеси после огнепреградителя измеряется с помощью манометра поз. PI-9, установленного по месту.

9.2.2 Синтез формальдегида

Контактный аппарат поз. P10:

- Перепад давления на входе и выходе из контактного аппарата контролируется с помощью прибора поз. PDIR-50 на щите ЦПУ.

- Давление на выходе из контактного аппарата контролируется с помощью прибора поз. PIR-51 на щите ЦПУ.

- Температура в слое катализатора контролируется с помощью приборов поз. TJRCSA-49 с ЦПУ и регулируется клапаном, установленным на подаче пара в греющую камеру поз. Т7 спиртоиспарителя. При достижении температуры

в слое катализатора 620 °С ("мягкий режим") и 720 °С ("жесткий режим") предусмотрена предупредительная световая и звуковая сигнализация, а при 650 °С и 750 °С воздухоудвка поз. М5/1-3 отключается.

- Температура контактных газов на выходе из подконтактного холодильника контактного аппарата поз. Р10 контролируется с помощью прибора поз. ТІR-31 на щите ЦПУ.

Для предотвращения превышения давления в контактном аппарате, разрушений аппарата и коммуникаций контактный аппарат поз. Р10 снабжен разрывной мембраной с выбросом в безопасную зону $P_{взр.} = 2.5 \text{ кгс/см}^2$.

Трубопроводы на входе метанола-воздушной смеси в контактный аппарат поз. Р10, на выходе из него контактных газов, а также обводной трубопровод снабжены электрозадвижками поз. Н-10/1-3, открытие и закрытие которых осуществляется с ЦПУ и по месту и сопровождается световой сигнализацией на щите ЦПУ.

Паросборник поз. Е12:

- Давление в паросборнике поз. Е12 контролируется и регулируется подачей пара с теплопункта с помощью прибора поз. PIRC-53 на щите ЦПУ.

- Уровень 30÷70% контролируется с помощью приборов поз. LIRCA-52 и регулируется подачей конденсата в конденсатосборник поз. Е13 от насоса поз. Н14/1,2 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией максимального (80%) и минимального (20%) значений уровня на щите ЦПУ.

От превышения давления паросборник поз. Е12 снабжен двумя предохранительными клапанами $P_{откр} = 2.3 \text{ кгс/см}^2$.

Конденсатосборник поз. Е13:

- Уровень 30-70 % контролируется прибором поз. LIRCA-302 с ЦПУ и регулируется автоматически: при минимальном уровне (20%) подачей деминерализованной воды, а при максимальном уровне (80%) отбором конденсата в теплопункт, и сопровождается световой и звуковой сигнализацией на щите ЦПУ.

- Давление в конденсатосборнике поз. Е13 контролируется с помощью манометра поз. PI-303 по месту.

Насос поз. Н14/1,2:

- Давление на трубопроводе нагнетания контролируется с помощью прибора поз. PISA-306 и сопровождается световой и звуковой сигнализацией давления менее 2.5 кгс/см^2 на щите ЦПУ и остановкой насоса.

- Работа, включение и отключение насоса сопровождается световой и звуковой сигнализацией на щите ЦПУ.

10. Монтаж реактора

Монтаж оборудования подразумевает комплекс работ, связанных с приведением его в рабочее состояние. Для этого монтируемое оборудование должно быть полностью собрано, установлено в проектное положение.

Монтаж технологического оборудования производится при строительстве новых или реконструкции действующих промышленных предприятий, а так же при замене вышедшего из строя оборудования.

При установке оборудования должна быть учтена монтажная характеристика оборудования, т.е. возможность проведения работ по монтажу без больших затрат и в течение непродолжительного времени [18].

Для конкретного случая монтажа выбираются грузоподъемные средства с учетом исходных данных. При этом соблюдаются условия технической возможности их использования.

В данной работе необходимо установить контактный аппарат (реактор).

Исходные данные:

- диаметр реактора 3 м;
- высота аппарата 9 м; масса аппарата 26 тонн;
- высота фундамента 2,5 м;
- толщина стенки штуцера – $S = 6$ мм;
- установка на открытой площадке.

Монтаж осуществляется с помощью гусеничного крана.

Подсчитываем усилие, действующее на подвижный блок полиспаста:

$$P_{II} = 10 \cdot G_0 = 10 \cdot 260 \text{ кН} . \quad (10.1)$$

Находим усилие, действующее на неподвижный блок полиспаста:

$$P_H = 1,1 \cdot P_{II} = 1,1 \cdot 260 = 286 \text{ кН} . \quad (10.2)$$

Подбираем оба блока по наибольшему усилию P_H со следующими характеристиками [19]:

БМ-30; грузоподъемность – 40 т; количество роликов – 3 шт.; диаметр роликов – 700 мм; масса – 407 кг. Таким образом, в полиспасте, состоящем из двух блоков, количество роликов $n = 3 \cdot 2 = 6$ шт., масса $G_6 = 407 \cdot 2 = 814$ кг.

Выбирая блоки с роликами на подшипниках качения и принимая один отводной блок, установленный на сбегающей ветви, находим КПД полиспаста $\eta = 0,866$ для общего количества роликов 7 штук (6 полиспастных и 1 отводной) и рассчитываем усилие в сбегающей ветви:

$$S_n = P_{II} / (n \cdot \eta) = 260 / (6 \cdot 0,866) = 50 \text{ кН}, \quad (10.3)$$

где n – количество полиспастных роликов,

η – КПД полиспаста для общего количества роликов.

Находим разрывное усилие в сбегающей ветви полиспаста:

$$R_k = S_n K_3 = 50 \cdot 4 = 200 \text{ кН}, \quad (10.4)$$

где K_3 – коэффициент запаса прочности.

При грузоподъемности от 16 т и более и при $d_p/d > 16$, $K_3 = 4$, d_p – диаметр ролика ($d_p = 700$ мм) (Приложение I); d – диаметр каната максимальный ($d = 24$ мм) (Приложение II).

По таблице ГОСТа (Приложение IV) подбираем для оснастки полиспаста канат типа ЛК-РО конструкции 6х36 (1 + 7 + 7/7 + 14) + 1 о.с. (ГОСТ 7668-80) с характеристиками:

- временное сопротивление разрыву, МПа – 1372;
- разрывное усилие, кН – 207,5;
- диаметр каната, мм – 22;
- масса 1000 м каната, кг – 1830.

Подсчитываем длину каната, задаваясь длиной сбегающей ветви $L_1 = 30$ м и считая длину полиспаста в растянутом виде равной высоте подъема аппарата ($h = 14$ м):

$$L = n \cdot (h + 3,14 \cdot d_p) + L_1 + L_2 = 6 \cdot (14 + 3,14 \cdot 0,7) + 30 + 10 = 137 \text{ м}, \quad (10.5)$$

где h – длина полиспаста в полностью растянутом виде, м;

d_p – диаметр роликов в блоках, м (приложение I);

L_1 – длина сбегающей ветви от ролика до барабана лебедки, м;

L_2 – расчетный запас каната, $L_2 = 10$ м.

Находим суммарную массу полиспаста:

$$G_0 = G_{\bar{o}} + L \cdot g_k / 1000 = 814 + 137 \cdot 1830 / 1000 = 1,064 \text{ т}, \quad (10.6)$$

где g_k – масса 1000 м каната (приложение IV), кг.

Определяем усилие на канат, закрепляющий неподвижный блок полиспаста:

$$P_{\bar{o}} = 10 \cdot G_0 + 10 \cdot G + S = 10 \cdot 1,064 + 10 \cdot 26 + 50 = 320 \text{ кН}. \quad (10.7)$$

Приняв канат для крепления верхнего блока из 8 ветвей и определив по приложению III коэффициент запаса прочности $K_3 = 6$, как для стропы, посчитаем разрывное усилие в каждой ветви крепящего каната:

$$R_k = R_o \cdot K_3 / 8 = 320 \cdot 6 / 8 = 240 \text{ кН}. \quad (10.8)$$

По таблице ГОСТа (приложение IV) отбираем канат типа ЛК-РО конструкции 6х36(1+ 7 + 7/7 + 14) + 1 о.с. (ГОСТ 7668-80), закрепляющий верхний неподвижный блок полиспаста, с характеристиками:

- временное сопротивление разрыву, МПа – 1372;
- разрывное усилие, кН – 242,5;
- диаметр каната, мм – 23,5;
- масса 1000 м каната, кг – 2130.

По усилию S_n в сбегающей ветви полиспаста (приложение V) подбираем электролебедку типа ЛМ-5М с тяговым усилием 50 кН и канатоемкостью 250 м.

Рассчитываем траверсу, работающую на сжатие, длиной $L = 3,2$ м для подъема вертикального цилиндрического аппарата массой $G_0 = 26$ т.

Находим натяжение в каждой канатной подвеске, соединяющей траверсу с краном грузоподъемного механизма, задавшись углом $\alpha = 45^\circ$:

$$N = 10 \cdot G_0 / (2 \cdot \cos \alpha) = 10 \cdot 26 / (2 \cdot 0,707) = 183 \text{ кН}. \quad (10.9)$$

Подсчитываем разрывное усилие, взяв канатную подвеску в две нити и определив по приложению III коэффициент запаса прочности, как для грузового канта с легким режимом работы $K_3 = 5$:

$$R_k = N \cdot K_3 / 2 = 183 \cdot 5 / 2 = 457,5 \text{ кН}. \quad (10.10)$$

По найденному разрывному усилию, пользуясь таблицей ГОСТа (приложение IV), подбираем стальной канат типа ЛК-РО конструкции 6х36 (1 + 7 + 7/7 + 14) + 1 о.с. (ГОСТ 7668-80), для подвесок с характеристиками:

- временное сопротивление разрыву, МПа – 1372;
- разрывное усилие, кН – 473;
- диаметр каната, мм – 33;
- масса 1000м каната, кг – 4155.

Определим сжимающее усилие в траверсе:

$$N_1 = 10 \cdot G_0 \cdot K_{II} \cdot K_d \cdot a / 2 = 10 \cdot 26 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1 / 2 = 157,3 \text{ кН}. \quad (10.11)$$

Для изготовления траверсы принимаем стальную трубу.

Находим требуемую площадь поперечного сечения трубы для траверсы, задаваясь коэффициентом продольного изгиба $\varphi_0 = 0,4$:

$$F_{mp} = N_1 / (\varphi_0 \cdot 0,1 \cdot T \cdot R) = 157,3 / (0,4 \cdot 0,1 \cdot 0,85 \cdot 210) = 22 \text{ см}^2, \quad (10.12)$$

где T - коэффициент условий работы (для траверсы $T = 0,85$);

R - расчетное сопротивление прокатной стали (выбирается из приложения VI).

По таблице ГОСТа (приложение VII) подбираем стальную трубу сечением 127/6 см с площадью сечения $F_T = 22,8 \text{ см}^2$ и радиусом инерции $r_T = 4,28 \text{ см}$.

Находим расчетную длину траверсы, считая, что концы траверсы закреплены шарнирно, тогда коэффициент приведения длины $\mu = 1$:

$$l_p = \mu \cdot l = 1 \cdot 320 = 320 \text{ см} \quad (10.13)$$

Определяем гибкость траверсы:

$$\lambda = L_p / r^T = 320 / 4,28 = 74 < [\lambda] = 180 \quad (10.14)$$

По приложению IX находим коэффициент продольного изгиба $\varphi = 0,744$.

Полученное сечение траверсы проверяем на устойчивость:

$$N_T / (F^T \cdot \varphi) \leq mR \quad (10.15)$$

$$157,3 / (22,8 \cdot 0,744) = 8,9 \text{ кН/см}^2 = 89 \text{ МПа} < 0,85 \cdot 210 = 175 \text{ МПа}$$

Соблюдение данного неравенства свидетельствует об устойчивости расчетного сечения.

При расчете монтажного штуцера находим усилие от стропы, действующее на каждый монтажный штуцер (кН):

$$N = 10Q_0K_nK_oK_n / 2 = 10 \cdot 26 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,2 / 2 = 188 \text{ кН}. \quad (10.16)$$

Определяем величину момента, действующего на штуцер, принимая $l = 10 \text{ см}$:

$$M = N \cdot L = 188 \cdot 10 = 1880 \text{ кН} \cdot \text{см}. \quad (10.17)$$

Подсчитываем минимальный момент сопротивления поперечного сечения стального патрубка для штуцера:

$$W = M / (m \cdot 0,1 \cdot R) = 1880 / (0,85 \cdot 0,1 \cdot 210) = 105 \text{ см}^3 \quad (10.18)$$

По таблице ГОСТа (приложение IV) определяем с запасом сечения патрубка для монтажного штуцера размером 140/18 мм, с моментом сопротивления:

$$W_T = 187 \tilde{m}^3 > W_{i \text{ и } r} = 105 \tilde{m}^3$$

Проверяем на прочность сварной кольцевой шов крепления штуцера к корпусу аппарата:

$$M / (\beta h_M \pi r^2) \leq mR_y^{cg} \quad (10.19)$$

$$1880 / (0,7 \cdot 1,4 \cdot 3,14 \cdot 7^2) = 1880 / 150,78 = 12,4 \text{ кН/см}^2 = 124 \text{ МПа} < (0,85 \cdot 210) = 178,5 \text{ МПа}. \text{ Условие прочности выполняется.}$$

Выбираем гусеничный кран МКГ-40 с техническими характеристиками, представленными в табл. 10.1.

Таблица 10.1 – Технические характеристики гусеничного крана МКГ-40

Общие данные по машине	
Грузоподъемность, т	30
Грузовой момент, кН·м	2000
Высота подъема груза, м	3 – 36
Вылет крюка, м	5 – 25
Длина стрелы, м	15,8 – 35,8
Длина гуська, м	6
Скорость подъема груза, м/мин	0,243 – 7,5
Колея, м	3,5
База, м	4,41
Масса, т	62,3

11. Социальная ответственность

В данной работе производится расчет основного оборудования производства формальдегида.

Формальдегид - бесцветный газ с резким раздражающим запахом, хорошо растворим в воде. Это весьма активное химическое соединение, легко вступающее в реакцию с другими веществами.

Формальдегид вырабатывается в очень больших масштабах и широко используется в различных областях органического синтеза, а также в качестве дезинфицирующего и дезинсекционного средства. В больших количествах формальдегид применяется для производства фенола-карбамида и меламиноформальдегидных полимеров, в качестве полупродукта в синтезах изопрена, пентаэритрита, уротропина.

Формальдегид может быть получен окислением метана и его гомологов или из метанола. Основная его масса производится из метанола. Реакция образования селективно ускоряется катализаторами на основе меди и серебра.

Окисление метанола в формальдегид проводится с использованием серебряного катализатора при температуре 650 °С и атмосферном давлении. Это хорошо освоенный технологический процесс, и 80 % формальдегида получается именно по этому методу.

Производство формальдегида относится к отрасли промышленности, которая представляет потенциальную опасность профессиональных заболеваний и отравлений работающих. Число отравлений и профессиональных заболеваний.

11.1 Производственная безопасность

Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения представлены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Опасные и вредные факторы при производстве формальдегида по ГОСТ 12.0.003-74

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1.Насосное отделение; 2.Паро – котельная; 3. тепловой пункт; 4. Парк ёмкостей; 5.Реакторное отделение; 6.Отделение абсорбции; 7.Отделение ректификации; 8.Факельная установка; 9.Ремонтные мастерские; 10.Воздуходувная.	1. Наличие шума в рабочих помещениях. 2.Токсичность метанола, формальдегида; 3. Недостаточность освещения.	1.Опасность поражения электрическим током; 2.Опасность термических ожогов; 3.Опасность взрыва и пожара; 4.Получение механических травм;	1.Параметры шума в рабочих помещениях устанавливаются СН 2.2.4/2.1.8.562–96. 2.Токсичность метанола и формалина регулируется ГН 2.2.5.1313-03. 3. Опасность взрыва и пожара регулируется ВНТП 3-85, ПБ 08-624-03 «Общие Правила противопожарного режима. 4.Опасность поражения электрическим током регулируется ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. 5. Опасность термических ожогов и механических травм устанавливаются по ГОСТ 12.2.033-78.

11.2 Токсическое воздействие

По степени воздействия на организм человека формальдегид относится к высокоопасным веществам (2-й класс опасности по ГОСТ 12.1.005). Предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны - 0,5 мг/м. [20]

По степени воздействия на организм человека метанол относится к умеренно опасным веществам (3-й класс опасности по ГОСТ 12.1.005). Предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны – 5 мг/м. [20]

Таблица 11.2 – Токсические свойства, ПДК, класс опасности сырья, полупродуктов, готовой продукции и отходов производства ГН 2.2.4.586 – 98

Наименование сырья, полупродуктов, готовой продукции, отходов производства	Класс опасности ГОСТ 12.1.007 - 76	Характеристика токсичности (воздействие на человека)	ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений ГОСТ 12.1.005-88
Метанол	3	Яд нервного и сосудистого действия с резко выраженным коммулятивным действием	5мг/м ³
Формалин	2	Токсичен. Раздражает слизистые оболочки, вызывает дерматит.	0,5 мг/м ³
Едкий натр	2	При попадании на кожу вызывает ожоги	0,5 мг/м ³ аэрозоль
Азотная кислота	3	При попадании на кожу вызывает химические ожоги	5мг/м ³
Окислы азота	3	Раздражают дыхательные пути, вызывают удушье, конъюнктивиты и поражают роговицы глаз.	5мг/м ³
Выхлопные газы (абгазы)	3	Токсичность определяется содержанием формальдегида и метанола	29мг/м ³

11.2.1 Предлагаемые средства защиты

В связи с применением вредных и ядовитых веществ на производстве формалина, средства индивидуальной и коллективной защиты приняты в соответствии с действующими отраслевыми нормами согласно ГН 2.2.5.686 – 99.

Для индивидуальной защиты органов дыхания используют противогазы марки А, БКФ, респираторы марки РПГ – 67.

Для защиты глаз использовать очки типа ЭП1-80, ЭП2-80, С-26Ц.

Для защиты рук от агрессивных химических веществ применяют резиновые перчатки.

Для коллективной защиты от воздействия вредных веществ, производственные помещения снабжены системой приточной и вытяжной вентиляции. На открытых установках производства предусмотрены сигнализация предельных концентраций. Все виды ремонтных и обслуживающих работ производятся в спецодежде и каске [21].

11.3 Повышенный уровень шума на производстве

Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий по ГОСТ 12.1.003-88 определены допустимые уровни параметров шума и вибрации. Норма составляет 80 дБ [22].

Наиболее шумным из помещений, где расположено оборудование производства формалина, является помещение воздуходувной, где уровень звукового давления во всех частотах превышает допустимые уровни для производственных помещений с постоянным пребыванием людей. Для воздуходувного отделения, где нет постоянного рабочего места и пребывание человека в смену не превышает один час, применяются индивидуальные средства защиты антифоны, беруши или наушники [23].

11.4 Недостаточное производственное освещение

Нормы естественного освещения промышленных зданий, сведенные к нормированию коэффициента естественной освещенности (КЕО) представлены в СНиП 23 – 05 – 95 [24].

Таблица 11.3 – Значения коэффициента естественной освещенности для производственных освещений (СНиП 23 – 05 – 95)

Разряд работы	Характеристика зрительной работы		Значения КЕО	
	Вид работы по степени точности	Наименьший размер объекта различения, мм	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
V	Малой точности	Свыше 1 до 5	3	1
VIII	Общее наблюдение за ходом производственного процесса	-	3	1

Таблица 11.4 – 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

11.5 Опасность поражения электрическим током

Источником возникновения поражения в соответствии с ГОСТ Р 12.1.019-2009 могут являться такие факторы, как: оголенные токоведущие части, появление напряжения на конструктивных металлических частях электрооборудования.

Поражение электрическим током у человека может вызывать:

- Судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- Судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимися дыханием и работой сердца;
- Потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (или того и другого);
- Состояние клинической смерти.

От воздействия на организм человека электрического напряжения используются следующие меры предосторожности:

- Недоступность токоведущих частей;
- Изолировать оголенные токоведущие части;
- Заземление или зануление корпусов электрооборудования и элементов электроустановок, могущих оказаться под напряжением;
- Оснастить надежным и быстродействующим автоматическим защитным отключением [25].

11.6 Термическая опасность. Повышенные температуры поверхностей

Источником термической опасности в соответствии с ГОСТ Р 54431-2011 могут являться:

- 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) [26].

Для защиты рабочих от термической опасности в соответствии с ГОСТ Р 53010-2008, изолируют трубные обвязки, установленные рядом с рабочим местом оператора.

11.7 Пожаро- и взрывоопасность

Источником возникновения пожара и взрывоопасной ситуации на химическом предприятии могут быть:

- Взрывы резервуаров с горючими веществами и аварийно химически опасными веществами;
- Замыкание электрических сетей;
- Утечка газа.

При данных источниках опасности происходит потеря видимости вследствие задымления, снижается концентрация кислорода [27].

Средствами защиты в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91, на резервуарах устанавливают АПК (автоматические предохранительные клапана), УЗО (устройство защитного отключения, изолируют оголенные токоведущие части, на транспортные средства устанавливают искрогасители.

11.8 Механическая опасность

Источниками механической опасности могут быть:

- Разрушение конструкции;
- Острые кромки;
- Несоблюдение технологического процесса, правил приемки ;
- Отсутствие своевременного ремонта.

Воздействие механических опасностей на организм человека:

- Порезы, защемления, раздавливания;
- Попадание под удар, затягивание;
- Падения с высоты [28].

Средствами защиты в соответствии с ГОСТ Р 54124-2010 является обеспечение недоступности к опасно действующим частям, применение приспособлений защищающих человека от опасного фактора, проведение текущего и временного ремонта.

11.9 Экологическая безопасность

11.9.1 Защита селитебных зон

Для промышленных объектов и производств, сооружений, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека устанавливаются следующие ориентировочные размеры санитарно-защитных зон [29]:

- промышленный объект II класса - 1000 м.

Предельно допустимая максимальная разовая концентрация формальдегида в воздухе населенных мест $0,035 \text{ мг/м}^3$, а в воде $0,01 \text{ мг/м}^3$ [20].

Анализ воздействия объекта на атмосферу

Возможными источниками загрязнения атмосферы являются:

- абсорбционная колонна;
- вакуум-насосы процесса ректификации;
- воздушки от аппаратов;
- факельная установка,
- дымовая труба установки термического обезвреживания (УТО);
- парк емкостей формалина и наливная эстакада;

Таблица 11. 5 – Выбросы в атмосферу [30]

Аппарат	Кол-во источников выбросов	Суммарный объем отходящих газов, $\text{м}^3/\text{ч}$	Периодичность, ч/сутки	Состав выброса, г/м^3	Кол-во нормируемых компонентов, кг/ч
Колонна абсорбционная	3	6660	6 ч/год	Формальдегид -4; Метанол-7; Оксид углерода-50;	0,012 0,0082 0,0145
Факельная установка	1	20000	24	Оксид углерода-0,561 Оксид азота – 0,084; Метан – 0,014.	

11.9.2 Воздействия объекта на гидросферу

Сточные воды от производства формалина, образующиеся при опорожнении и промывке насосов, перед ремонтом собираются в подземную

емкость и по мере заполнения перекачиваются азотом в стандартизатор и далее в процесс.

Сточные воды от смыва полов через приемок у II технологической нитки направляются в химзагрязненную канализацию.

Ливневые стоки с отметок наружной установки через приемки технологических ниток направляются в ливневую канализацию.

Стоки от катализаторного отделения после предварительной нейтрализации растворенной азотной кислоты направляются в химзагрязненную канализацию.

Стоки от продувки водогрейных котлов, содержащие соли жесткости (Na_2CO_3 , CaCO_3 , MgCO_3) направляются в ливневую канализацию.

Таблица 11.6 – Предполагаемые ежегодные нормы образования отходов производства [31]

Наименование стока	Куда сбрасывается	Количество стоков, м ³ /сутки	Периодичность стоков	Состав сбросов, мг/м	Допустимое количество сбрасываемых вредных веществ, кг/сутки
1.Сточные воды от промывки насосов	В емкость	0,5	Периодически 1 раз в 3 дня	Формальдегид-2000 метанол - 2000	ДВП, мг/л формальдегид 1,0, метанол-12,5
2.Сточные воды от смыва полов и ливневые стоки	В химзагрязненную канализацию	не более 20 м ³ , на операцию	Периодически 2 раза в сутки	Формальдегид-1860 метанол-1550	Формальдегид-1,0, метанол-12,5

11.9.3 Воздействия объекта на литосферу

Тяжелые металлы и их соли (Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Fe, Mn, Ag, Cr, Co, Ni, As, Al) — широко распространенные промышленные загрязнители.

Проблема взаимодействия тяжелых металлов и микроорганизмов. Токсическое действие металлов на микроорганизм проявляется в ингибировании их метаболизма, в изменениях кинетики роста и морфологии. В качестве механизмов, обеспечивающих устойчивость микроорганизмов к

воздействию тяжелых металлов, отмечают биологическую трансформацию и частичную детоксикацию некоторых из них [32].

Твердые отходы представлены в таблице 11.7.

Таблица 11.7 – Твердые отходы

Наименование отхода	Куда складироваться	Количество отходов кг/сутки	Периодичность образования	Характеристика отхода	
				Химический состав	Физические показатели
1.Отработанный катализатор «серебро на пемзе»	Сдается на завод регенерации драгоценных металлов	7,40	При перегрузках катализатора в реакторах 3 раза в год	Металлическое серебро, нанесенное на гранулы пемзы, загрязненное сажей (массовая доля до 40%)	
2.Пемза размером зерен менее 2 мм	Сдается как строительные отходы на полигон	0,192	При просеивании гранулированной пемзы перед процессом наработки катализатора	SiO ₂ до 74%, AlO+FeO+TiO до 24%, Mg н/б 3%, CaO н/б 5%	Твердое вещество пемза кусковая или гранулированная

11.10 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В связи с тем, что в производстве формалина используются взрывопожароопасные метанол и формальдегид, возможны аварийные ситуации, которые могут привести к разрушению зданий, сооружений, технологического оборудования и несчастным случаям с технологическим персоналом [33].

Возможные неполадки, аварийные ситуации и способы их ликвидации в таблице 11.8.

Таблица 11.8

Возможные аварийные ситуации	Причины возникновения производственных инцидентов, аварийных ситуаций	Действия персонала по предупреждению и устранению производственных инцидентов, аварийных ситуаций
1. Повышение давления в емкости.	1. Много подается пара в пароподогреватель.	1. Контролировать работу оборудования, показания КИП и А; 2. Уменьшить расход продукта в пароподогреватель; 3. Открыть сброс сдувок на абсорбцию;
2. Превышение уровня в емкости.	2. Неисправны измерительные приборы.	1. Контролировать работу оборудования, показания КИП и А; 2. Проверить, исправность приборов и мерных стекол емкости; 3. Перевести прием продукта в другую емкость;
3. Остановка насоса	1. Низкое давление в емкости	1. Контролировать работу оборудования, показания КИП и А. 2. Поднять давление в емкости до регламентной нормы;
	2. Падение давления на нагнетании насоса ниже 20 кгс/см ² , срабатывает блокировка.	1. Контролировать работу оборудования, показания КИП и А. 2. Поднять давление на насосах прикрыв задвижки на нагнетании, обратном расширении.
4. Прекращение подачи метанола	Неполадки в работе насосов;	1. Сгрузить нагрузку по воздуху до 4000-5000 м ³ /ч; 2. Откачать метанол из емкости в испаритель;

11.11 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Газоопасность, взрыво- и пожароопасность, опасность термических и химических ожогов, токсичность в производстве формалина определяется в нем наличием формальдегида и метанола [20].

Для работников, занятых на работах с вредными или опасными условиями труда, законодатель установил сокращенную продолжительность рабочего времени - не более 36 часов в неделю (ст. 92 ТК РФ, п. 1 Постановления Правительства РФ от 20.11.2008 N 870 (далее - Постановление N 870)). При этом максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать (ст. 94 ТК РФ):

- при 36-часовой рабочей неделе - 8 часов;
- при 30-часовой рабочей неделе и менее - 6 часов.

Коллективным договором может быть предусмотрено увеличение смены при условии соблюдения предельной еженедельной продолжительности рабочего времени и гигиенических нормативов условий труда.

Также сотрудникам, занятым на работах с вредными или опасными условиями труда, положено предоставлять ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск продолжительностью не менее 7 календарных дней (ст. 117 ТК РФ, п. 1 Постановления N 870) [34].

12. Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

12.1 Расчёт производственной мощности оборудования цеха

Для расчёта производственной мощности предварительно устанавливаем [35]:

а) режим работы отделения характеризуется непрерывной рабочей неделей, цех работает в 2 смены, продолжительность смены 12 часов;

б) эффективный фонд времени оборудования $T_{\text{кал}}$ равен 360 дням или 8 640 часам.

Номинальный фонд времени работы оборудования $T_{\text{ном}}$ при работе по непрерывной неделе составляет:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}},$$

где $T_{\text{вых}} = 104$ дн. — количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 12$ дн. - количество праздничных дней в году;

В нашем случае оборудование работает и в выходные и праздничные дни, соответственно, при расчете номинального фонда рабочего времени их в учет не принимаем, т.е.

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{кал}} = 360 \text{ дней} = 8\,640 \text{ часов.}$$

Эффективный фонд рабочего времени оборудования равен номинальному времени за вычетом остановок на ремонты $T_{\text{рем}}$, производимые в рабочее время в соответствии с установленной системой планово-предупредительного ремонта (ППР) и определяется по формуле:

$$T_{\text{эф}} = T_{\text{ном}} - T_{\text{рем}}.$$

Продолжительность простоя оборудования в ремонтах $T_{\text{рем}}$ определяем по формуле:

$$T_{\text{рем}} = 2\% \cdot T_{\text{ном}};$$

$$T_{\text{рем}} = 0,02 \cdot 8\,640 = 172,8 \text{ часов.}$$

Эффективный фонд времени оборудования составляет по формуле:

$$T_{\text{эф}} = 8\,640 - 172,8 = 8467,2 \text{ часов.}$$

На основе расчетов составляем баланс времени работы оборудования

Таблица 12.1 – Баланс рабочего времени оборудования

Показатели	Количество дней (часов)
Календарный фонд времени	360 (8 640)
Номинальный фонд рабочего времени	360 (8 640)
Простой оборудования в ремонтах	7.2 (172,8)
Эффективное время работы оборудования за год	352,8 (8467,2)

Текущая мощность составляет: $M = 160\,000 \text{ т / год}$.

Для анализа использования оборудования рассчитаем экстенсивный и интенсивный коэффициенты.

Коэффициент экстенсивного использования оборудования равен

$$K_{\text{экс}} = T_{\text{эф}} / T_{\text{ном}};$$

$$K_{\text{экс}} = 8\,467,2 / 8\,640 = 0,98.$$

Коэффициент интенсивного использования оборудования равен:

$$K_{\text{инт}} = Q_{\text{пп}} / Q_{\text{мах}};$$

где $Q_{\text{пп}}$ – производительность единицы оборудования в ед. времени;

$Q_{\text{мах}}$ – максимальная производительность в ед. времени.

$$K_{\text{инт}} = 14\,761 / 16\,530 = 0,893.$$

Интегральный коэффициент использования мощности:

$$K_{\text{им}} = K_{\text{экс}} \cdot K_{\text{инт}};$$

$$K_{\text{им}} = 0,98 \cdot 0,893 = 0,875.$$

Для определения фактического выпуска продукции рассчитывается производственная программа ($N_{\text{год}}$):

$$N_{\text{год}} = K_{\text{им}} \cdot M = 0,875 \cdot 160\,000 = 140\,000 \text{ т/год}.$$

Вывод: максимально возможный годовой выпуск – 160 000 т/год;
действительный выпуск продукции – 140 000 т/год. Установка работает на неполную мощность, степень загрузки равна 87,5%.

12.2 Расчет себестоимости готовой продукции по действующему производству

12.2.1 Расчет годового фонда заработной платы цехового персонала

Таблица 12.2 – Расчет численности персонала

Наименование должности	Категория	Тарифный разряд	Число штатных единиц	Количество смен в сутках
Главный технолог	ИТР	Высшее	1	1
Механик установки	ИТР	Высшее	1	1
Энергетик установки	ИТР	Высшее	1	1
Инженер КИП и АСУ	ИТР	Высшее	1	1
Итого:			4	
Старший оператор	Производственный рабочий	6 разр.	4	2
Оператор установки	Производственный рабочий	5 разр.	9	2
Помощник оператора	Вспомогательный персонал	4 разр.	4	2
Итого:			17	
Дежурный слесарь по ремонту оборудования	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь-электрик	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Дежурный слесарь КИП	Ремонтный персонал	4 разр.	4	2
Итого:			12	
Итого:			33	

12.2.2 Расчет баланса эффективного годового времени одного среднесписочного рабочего

Для определения численности рабочих, необходимо установить годовой фонд работы одного среднесписочного рабочего [35]. Он зависит от принятого режима работы цеха и продолжительности рабочего дня.

Примерный баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего приведен в таблице 12.3.

Таблица 12.3 – Примерный баланс рабочего времени одного среднесписочного рабочего.

Наименование затрат рабочего времени	Дни	Часы
Календарное время	360	
Номинальный фонд рабочего времени	360	
Планируемые невыходы на работу:		
- очередные и дополнительные отпуска	36	
- невыходы по болезни	3	
- декретные отпуска	-	
- отпуск в связи с учебой без отрыва от производства	-	
- выполнение гос. обязанности	3	
Годовой фонд рабочего времени	318	
Годовой фонд рабочего времени		7632

12.2.3 Количество выходных дней в году, ночных смен определяется из графика сменности (пример графика сменности представлен в табл. 13.4)

Таблица 12.4 – 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	0 - 12	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В	В	В	В	Г	Г	Г	Г
2	12 - 24	В	В	В	Г	Г	Г	Г	А	А	А	А	Б	Б	Б	Б	В
Отдых		БГ	БГ	БГ	БВ	АВ	АВ	АВ	ВГ	БГ	БГ	БГ	АГ	АВ	АВ	АВ	АБ

12.2.4 Расчет годового фонда заработной платы основного производственного персонала и ИТР

Расчет годового фонда зарплаты ИТР, служащих и МОП производится на основании их окладов согласно штатному расписанию.

Фонд заработной платы рассчитываем исходя из действующих тарифных условий, запроектированной численности основных и вспомогательных рабочих и их фонда рабочего времени.

Общий фонд заработной платы рабочих за год:

$$З_{\text{год}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}},$$

где $З_{\text{осн}}$ – основной фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.;

$З_{\text{доп}}$ – дополнительный фонд заработной платы рабочих, тыс. руб.

Основной фонд заработной платы для рабочих повременников:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{тар}} + \text{Пр} + Д_{\text{н.вр}} + Д_{\text{пр.дни}} + Д_{\text{бриг}},$$

где $З_{\text{тар}}$ – тарифный фонд заработной платы, тыс. руб.;

Пр – оплата премий, тыс. руб.;

$Д_{\text{н.вр}}$ – доплата за работу в ночное время, тыс. руб.;

$Д_{\text{пр.дни}}$ – доплата за работу в праздничные дни, тыс. руб.;

$Д_{\text{бриг}}$ – доплата не освобожденным бригадирам, тыс. руб.

Тарифный фонд заработной платы:

$$З_{\text{тар}} = \sum Ч_{\text{сп}} \cdot T_{\text{ст}} \cdot T_{\text{эф.раб}},$$

где $Ч_{\text{сп}}$ — списочная численность рабочих данного разряда, человек;

$T_{\text{сп}}$ - дневная тарифная ставка данного разряда, руб.

Размер премий принимаем равным 10 % от тарифного фонда заработной платы.

Дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{доп}} = (Д_{\text{н}} \cdot З_{\text{осн}}) / T_{\text{эфф}}.$$

Фонд дополнительной заработной платы принимаем равным 10 % от фонда основной заработной платы. Здесь также учитываем доплату по районному коэффициенту $K = 1,3$.

По отношению к тарифному фонду заработной платы доплата за ночные составит 40%.

Таблица 12.6 – Сводная таблица заработной платы основного персонала

Наименование профессий	Списочная численность	Тарифный разряд	Тарифная ставка за день, руб.	Номин. фонд рабочего времени всех рабочих в год, ч	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-та, тыс.руб.
					Тарифн. фонд	Премия	Доплата за ночное время	Доплата за работу в праздники	Итого			
	$Ч_{сп}$		$T_{ст}$	$H_{ф}=360 \cdot Ч_{сп}$	$З_{тар} = Ч_{сп} \cdot T_{ст} \cdot T_{эф}$	$Пр = З_{тар} * 10\%$	$Д_{н.вр.} = З_{тар} * 40\%$	$Дпр.дн. = З_{тар} * 0,3$	$З_{осн} = З_{тар} + Пр + Д_{нвр.} + Д_{прдн.}$	$З_{доп} = З_{осн} * 10\%$	$З_{общ.} = З_{доп} + З_{осн}$	$З_{общ} * K; K = 1,3$
ИТР	4	6	3123	1440	3972,4	397,24	1588,96	1191,72	7150,32	715,032	7865,352	10224,96
Старший оператор	4	5	2578	1440	3279,2	327,92	1311,68	983,76	5902,56	590,256	6492,816	8440,661
Оператор установки	9	4	1987	3240	5686,8	568,68	2274,72	1706,04	10236,24	1023,624	11259,86	14637,82
Вспомогательный персонал	4	4	1547	1440	1967,7	196,77	787,08	590,31	3541,86	354,186	3896,046	5064,86
Ремонтный персонал	12	4	1269	4320	4842,5	484,25	1937	1452,75	8716,5	871,65	9588,15	12464,6
Итого:	33	-	-	-	19748,6	7899,44	5924,58	1974,86	35547,48	3554,748	39102,23	50832,9

12.3 Расчет затрат на производство продукции

12.3.1 Расчет годовой потребности в сырье и материалах

Определение затрат на сырье и материалы производим исходя из принятого объема производства, удельных норм расхода сырья и материалов и планово-заготовительных цен [35].

Таблица 12.7 – Расчет годовой потребности в 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
Метанол	т	40	0,507	70980	20,28	2839200

12.3.2 Расчет амортизационных отчислений

Таблица 12.8 – Расчет амортизационных отчислений

Наименование основных средств	Стоимость, тыс. руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортизационные отчисления, тыс. руб.
1.Здания			
1.1.Цех по производству	5000	5	250
1.2.Операторная	6000	5	300
Итого:			550
2. Оборудование			
2.1. Реактор	200000	10	20000
2.2. Теплообменник	70000	10	7000
2.3. Турбовоздуходувка	20000	10	2000
2.4. Испаритель	1000	10	100
2.5. Насос	200	10	20
Итого:	206450		29120
Итого общее:	211700		29670

12.3.3 Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства (140000 т/год)

Таблица 12.9 – Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства Q=140000 т

Наименование статьи расходов	Единицы измерения	Затраты тыс.руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс.руб.	20,28	2839200
2. Энергия на технологические нужды	тыс.руб.	48,5	6790000
3. З/П основных произв. рабочих	Тыс.руб.	0,1648	23078,48
4. Отчисления на СН (30%)	Тыс.руб.	0,04945	6923,54
Итого условно-переменных издержек	тыс.руб.	68,78	9629200
5. Общепроизводственные накладные расходы	тыс.руб.		
5.1. РСЭО:	тыс.руб.		
- Амортизация оборудования	тыс.руб.	0,208	29120
- Ремонт оборудования	тыс.руб.	0,052	7280
- Заработная плата ремонтного персонала	тыс.руб.	0,089	12464,6
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0267	3739,38
5.2. Заработная плата ИТР	тыс.руб.	0,073	10224,96
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс.руб.	0,0219	3067,488
5.3. Заработная плата вспомогательного персонала	тыс.руб.	0,0362	5064,86
- Отчисление на соц. нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0108	1519,46
Итого условно-постоянных издержек	тыс.руб.	0,5177	72480,75
Цеховая (производственная) себестоимость (1+2+3+4+5)	тыс.руб.	69,5120	9731682,77
6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)	тыс.руб.	3,4756	486584,14
Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)	тыс.руб.	72,9876	10218266,91
7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)	тыс.руб.	0,7299	102182,67
Полная себестоимость (заводская себестоимость +стр.7)	тыс.руб.	73,7175	10320449,58
Условно-переменные издержки	тыс.руб.	68,78	9629200
Условно-постоянные издержки	тыс.руб.	4,9375	691249,58

12.4 Определение цены готовой продукции

Цена готовой продукции определяется по формуле:

$$Ц_{пр.} = C_{с\text{еб}} \cdot (1 + P/100), \text{руб.}$$

где $C_{с\text{еб}}$ – себестоимость 1 тонны продукции;

P – рентабельность продукции (25 %).

Итак, цена 1 тонны формалина при $Q=140$ тыс. т/год:

$$Ц = 73,7175 \cdot 1,25 = 92,15 \text{ тыс. руб./т.}$$

12.4.1 Анализ безубыточности по действующему производству

Цель анализа – определение точки безубыточности, т.е. минимального объема продаж, начиная с которого предприятие не несет убытков.

Определение точки безубыточности аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{Изд_{пост}}{Ц_{1\text{зн}} - Изд_{пер}}$$

$$Q_{кр} = 691249,58 / (92,1469 - 68,78) = 29582,4 \text{ т.}$$

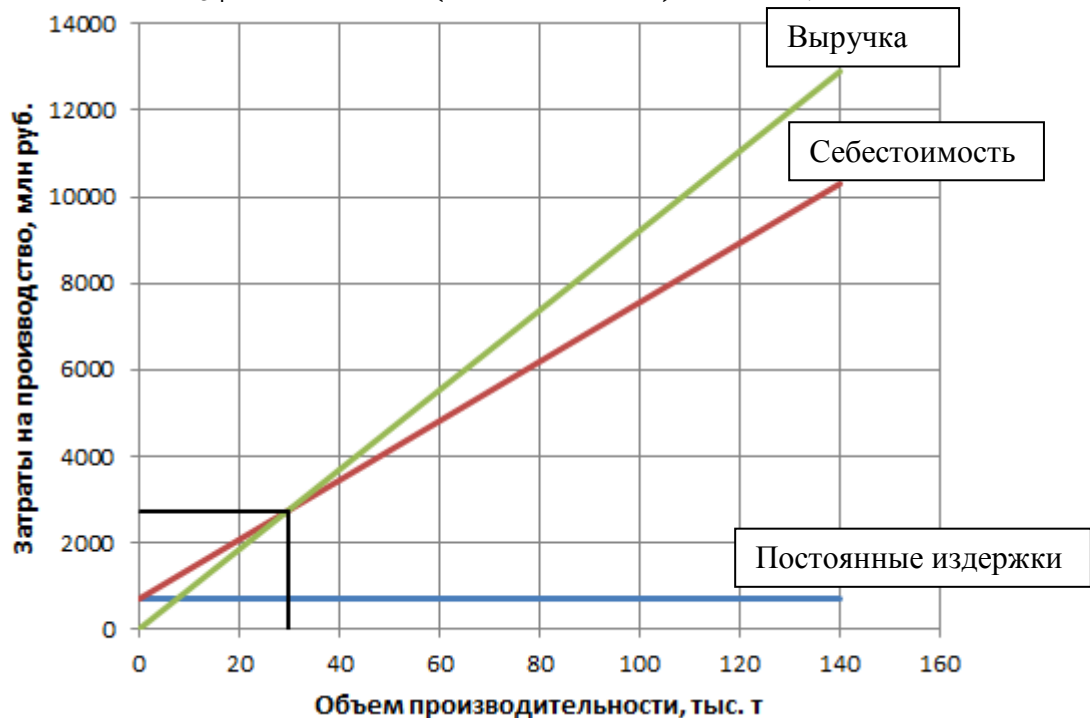


Рисунок 12.1 – График безубыточности

12.5 Расчет производственной мощности на плановый период при увеличении объема производства на 10%

Поскольку установка работает лишь на 87,5% от максимальной нагрузки, произведем расчет при увеличении годового производства на 10%.

Таблица 12.10 – 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
Метанол	т	40	0,507	78078	20,28	3123120

12.5.1 Расчет себестоимости готового продукта в проектном году

Таблица 12.11 – Калькуляция себестоимости на производство и реализацию продукции при заданном объеме производства $Q=154000$ т

Наименование статьи расходов	Единицы измерения	Затраты тыс.руб.	
		На 1 т.	На N год
1. Сырье	тыс.руб.	20,28	3123120
2. Энергия на технологические нужды	тыс.руб.	48,5	7469000
3. З/П основных произв. рабочих	тыс.руб.	0,1499	23078,48
4. Отчисления на СН (30%)	тыс.руб.	0,04496	6923,54
Итого условно-переменных издержек	тыс.руб.	68,78	10592120
5. Общепроизводственные накладные расходы	тыс.руб.		
5.1. РСЭО:	тыс.руб.		
- Амортизация оборудования	тыс.руб.	0,189	29120
- Ремонт оборудования	тыс.руб.	0,047	7280
- Заработная плата ремонтного персонала	тыс.руб.	0,081	12464,6
- Отчисление на соц. нужды ремонтного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0243	3739,38
5.2. Заработная плата ИТР	тыс.руб.	0,066	10224,96
- Отчисление на соц. нужды ИТР (30%)	тыс.руб.	0,0199	3067,488
5.3. Заработная плата вспомогательного персонала	тыс.руб.	0,0329	5064,86
- Отчисление на соц.нужды вспомогательного персонала (30%)	тыс.руб.	0,0099	1519,46
Итого условно-постоянных издержек	тыс.руб.	0,4707	72480,75
Цеховая (производственная)	тыс.руб.	69,445	10694603

себестоимость (1+2+3+4+5)			
6. Управленческие расходы (5% от цеховой себестоимости)	тыс.руб.	3,1596	486584,1
Заводская себестоимость (цеховая себестоимость + стр.6)	тыс.руб.	72,6051	11181187
7. Коммерческие расходы (1% от заводской себестоимости)	тыс.руб.	0,6635	102182,7
Полная себестоимость (заводская себестоимость +стр.7)	тыс.руб.	73,2686	11283369,57
Условно-переменные издержки	тыс.руб.	68,78	10592120
Условно-постоянные издержки	тыс.руб.	4,4886	691249,58

12.5.2 Определение цены готовой продукции

Цену продукта определяем по формуле:

$$Ц = C \cdot (1 + P/100);$$

$$Ц = 73,2686 \cdot 1,25 = 91,5858,$$

где С – полная себестоимость единицы готовой продукции;

Р – рентабельность продукции (25%).

Поскольку цена за 1 тонну продукции уменьшилась незначительно, примем ее равной 92,15 тыс. руб./т. – цена при текущем годовом производстве.

12.5.3 Анализ безубыточности при увеличении производительности на 10%

Определение точки безубыточности аналитическим способом:

$$Q_{кр} = \frac{Изд_{пост}}{Ц_{1гн} - Изд_{пер}}$$

$$Q_{кр} = 691249,58 / (92,15 - 68,78) = 29582,4 \text{ т.}$$

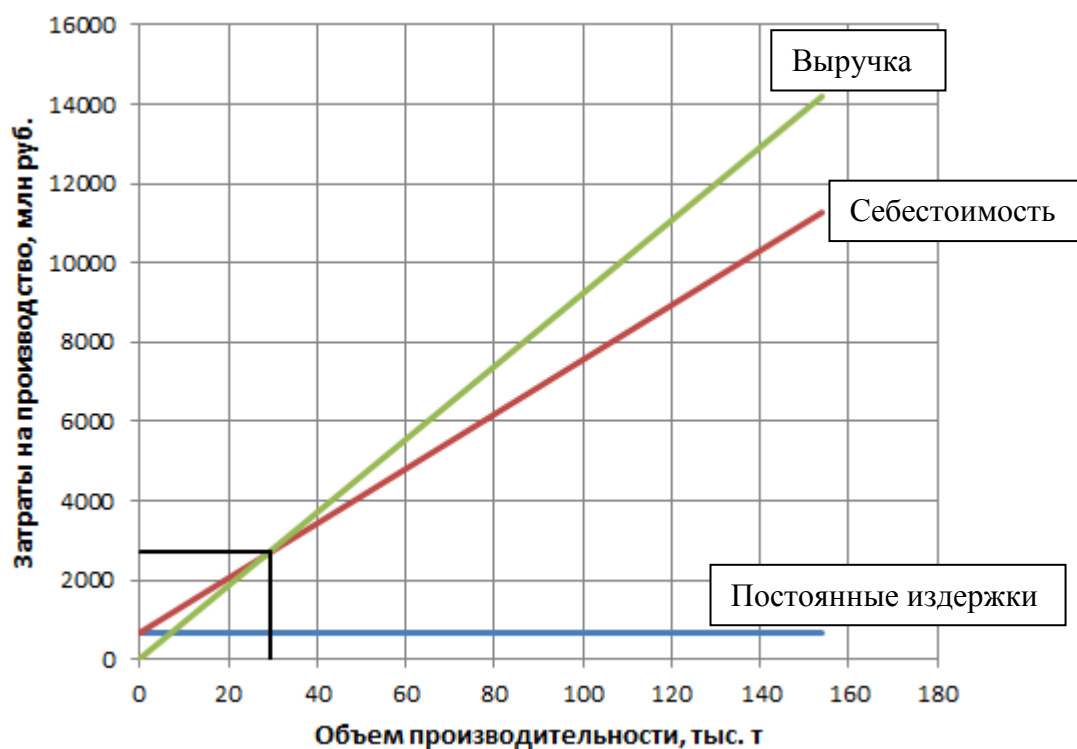


Рисунок 12.2 – График безубыточности производства при повышении загрузки на 10%

Таблица 12.12 – Техничко-экономические показатели

Наименование показателя	Ед.изм.	Отчетный год	Плановый год
1. Объем производства	т	140000	154000
2. Объем продаж	т	140000	154000
3. Цена 1 тонны	тыс.руб.	92,15	92,15
4. Выручка от продажи (2*3)	тыс.руб.	12900566	14190622,6
5. Суммарные издержки	тыс.руб.	10320449,58	11283369,57
5.1. Издержки переменные	тыс.руб.	9629200	10592120
5.2. Издержки постоянные	тыс.руб.	691249,6	691249,6
6. Операционная прибыль (4-5)	тыс.руб.	2580116,425	2907253,032
7. Налог на прибыль (6*20%)	тыс.руб.	516023,28	581450,61
8. Чистая прибыль (6-7)	тыс.руб.	2064093,14	2325802,43
9. Себестоимость 1 тонны	тыс.руб.	73,72	73,27
10. Стоимость основных средств	тыс.руб.	211700	211700
11. Численность основных рабочих	чел.	33	33
12. Фондовооруженность (10/11)	тыс.руб./чел	6415,15	6415,15
13. Фондоотдача (4/10)	руб./руб.	60,94	67,03
14. Фондоёмкость (10/4)	руб./руб.	0,01641	0,01492
15. Производительность труда (4/11)	тыс.руб./чел	390926,24	430018,87
16. Рентабельность производства (8*100%/5)	%	20	21
17. Рентабельность продаж (8*100%/4)	%	16	17
18. Критический объем продаж(Qкр)	тыс.т.	29,582	29,582
19. Критический объем продаж(Qкр)	тыс.руб.	2725889,6	2725889,6

Вывод:

В результате увеличения загрузки производственной мощности на 10% и, соответственно, использования «эффект масштаба», мы получили следующий экономический эффект:

1. Снижение себестоимости на 1 тонну с 73,72 тыс. руб. по 73,27 тыс. руб. (на 0,61%);
2. Увеличение выручки от продажи с 12900566 тыс. руб. по 14190622,6 тыс. руб. (на 10%);
3. Увеличение чистой прибыли с 2064093,14 тыс. руб. по 2325802,43 тыс. руб. (на 12,7%);
4. Увеличение выплат по налогам с 516023,28 тыс. руб. по 581450,61 тыс. руб. (на 12,7%);
5. Увеличение показателя фондоотдачи с 60,94 руб./руб. по 67,03 руб./руб. (на 10%);
6. Увеличение производительности труда с 390926,24 тыс. руб./чел. по 430018,87 тыс. руб./чел. (на 10%);
7. Увеличение рентабельности производства с 20% по 21%;
8. Увеличение рентабельности продаж с 16% по 17%;
9. Точка безубыточности осталась на прежнем уровне 29582 тонн.

Заключение

Главной целью настоящего проекта явилось определение возможности расширения производства формалина на примере установки синтеза формальдегида.

В работе проведено технико-экономическое обоснование такого расширения, доказана его целесообразность.

В результате было показано, что такое расширение возможно. С этой целью проведены соответствующие расчеты (материальные, тепловые и технологические) основного и вспомогательного оборудования установки синтеза формальдегида. Расчеты показали, что новая производительность может быть обеспечена без замены технологического оборудования: все используемые в процессе теплообменные аппараты имеют необходимый запас поверхности теплопередачи, производительность воздуходувок оказалась выше требуемой. Однако, повышение производительности влечет за собой увеличение тепловой нагрузки на теплообменные аппараты и, как следствие, увеличение расхода теплоносителей (хладоагентов). Также, для обеспечения требуемой степени превращения метанола в формальдегид необходимо увеличение количества катализатора, загружаемого в контактный аппарат.

Наряду с этим, в проекте, были рассмотрены вопросы аналитического и технологического контроля процесса, обеспечения безопасных условий производства и охраны окружающей среды.

Список использованных источников

1. Кисляк Г. А. Проект цеха производства формалина: Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе. - Томск: Томский политехнический университет, 2000. - 304 с.
2. Иванов Г. Н. Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза: Учебное пособие по дипломному проектированию — Томск: Издательство Томского политехнического университета, 1991. - 112 с.
3. Постоянный технологический регламент производства формалина "Завода формалина и карбосмол" Томского нефтехимического комбината.
4. Огородников К. С. Формальдегид. - Л.: Химия, 1984. - 328 с.
5. Гутник С. П., Сосонко В. Е., Гутман В. Д. Расчеты по технологии органического синтеза: Учеб. пособие. - М: Химия, 1988. - 272 с.
6. Лебедев Н. Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб и доп. - М.: Химия, 1988. - 592 с.
7. Спецификация технологического оборудования производства формалина "Завода формалина и карбосмол" Томского нефтехимического комбината.
8. Лашинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. -Л.: Машиностроение, 1970. - 752 с.
9. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1971.-784 с.
10. Справочник азотчика / Под. Ред. Мельникова Е. Я. В 2-х т. - М.: Химия, 1987. – 464 с.
11. Краснощекое Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. - М.: Энергия, 1969. – 264 с.
12. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1968. - 848 с.
13. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - Л.: Химия, 1981. - 560 с.
14. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. - М.: Химия, 1971. - 448 с.
15. Уокер Дж. Ф. Формальдегид. – М.: Госхимиздат, 1957. - 610 с.
16. Борисов Г. С, Брыков Ю. И., Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. - М.: Химия, 1991. - 496 с.
17. Физические величины: Справочник./ Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З.

Мешихова. -М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

18. Фарамазов С.А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов. – М.: Химия, 1988. – 304 с.

19. Матвеев В.В., Крупин Н.Ф. Примеры расчета такелажной оснастки. – Л.: Стройиздат., 1987. – 320 с.

20. ГОСТ 1625-89. Формалин технический. Технические условия.

21. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.

22. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

23. СП 51.13330.2011. Защита от шума.

24. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

25. ГОСТ ИЕС 61140-2012. Защита от поражения электрическим током.

26. ГОСТ Р 54431-2011. Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности.

27. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

28. ГОСТ Р 53010-2008. «Прессы гидравлические. Требования общие».

29. СНиП 2.07.01-89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.

30. ГН 2.2.5.2308-07. Ориентировочно безопасный уровень воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

31. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.

32. Ветошкин А.Г. Защита литосферы от отходов. Учебное пособие – Пенза: Изд-во Пенз. Гос. Ун-та, 2005 г.

33. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

34. ТК РФ. Трудовой кодекс РФ.

35. Экономика и управление производством. Расчет экономической части дипломного проекта: метод. указ. для студентов хим. спец. ИДО / сост. Т.Г. Рыжакина. – Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 22 с.