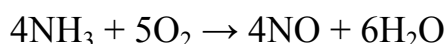




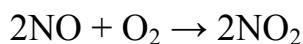
# 1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

В 1960-х годах разработан агрегат по производству азотной кислоты мощностью 120 тыс. т год под давлением 0,716 МПа с использованием высокотемпературной каталитической очистки выхлопных газов, выпускающий продукцию в виде 53-58%-ной  $\text{HNO}_3$  [2]. Процесс производства разбавленной азотной кислоты складывается из трех стадий:

1) конверсии аммиака с целью получения оксида азота



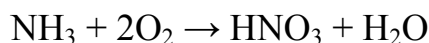
2) окисления оксида азота до диоксида азота



3) абсорбции оксидов азота водой



Суммарная реакция образования азотной кислоты выражается



Технологическая схема этого производства представлена на рисунке 1.1

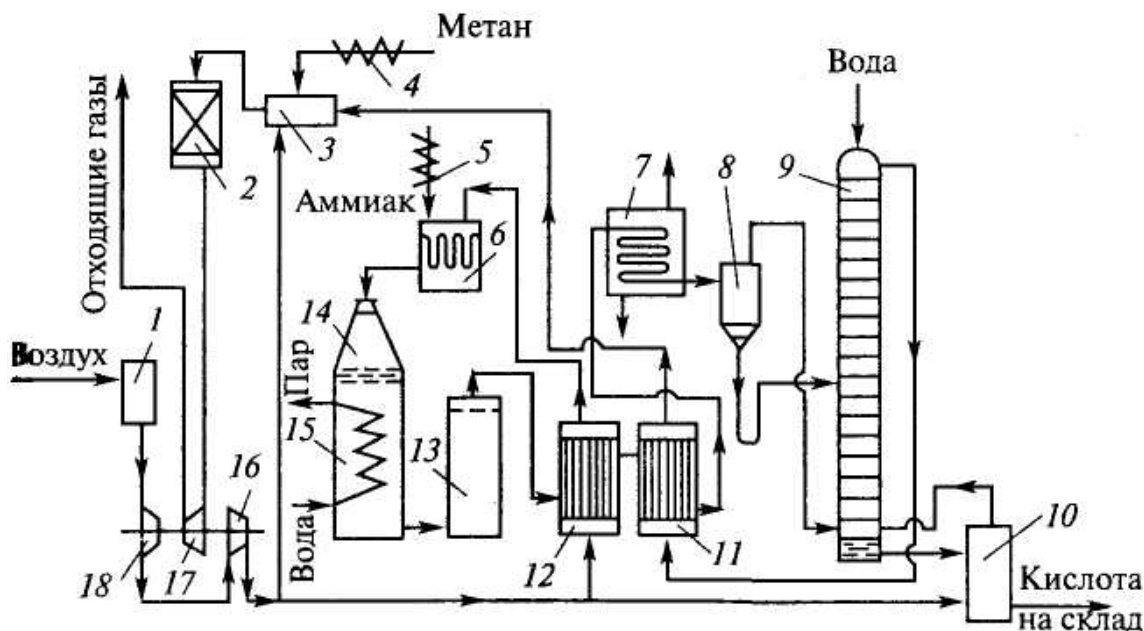


Рисунок 1.1 – Схема производства азотной кислоты под давлением 0,716 МПа

1 – фильтр воздуха; 2 – реактор каталитической очистки; 3 – топочное устройство; 4 – подогреватель метана; 5 – подогреватель аммиака; 6 – смеситель аммиака и воздуха; 7 – холодильник-конденсатор; 8 – сепаратор; 9 – абсорбционная колонна; 10 – продувочная колонна; 11 – подогреватель отходящих газов; 12 – подогреватель воздуха; 13 – сосуд для окисления нитрозных газов; 14 – контактный аппарат; 15 – котел-утилизатор; 16, 18 – двухступенчатый турбокомпрессор; 17 – газовая турбина

для дальнейшего охлаждения в теплообменник 11, где происходит снижение их температуры до 150 °С и нагрев выхлопных (хвостовых) газов до 110–125 °С. Затем нитрозные газы направляют в холодильник-конденсатор 7, охлаждаемый оборотной водой. При этом конденсируются водяные пары и образуется слабая азотная кислота. Нитрозные газы отделяют от сконденсировавшейся азотной кислоты в сепараторе 8, из которого азотную кислоту направляют в абсорбционную колонну 9 на 6–7-ю тарелку, а нитрозные газы – под нижнюю тарелку абсорбционной колонны. Сверху в колонну подают охлажденный паровой конденсат. Образующаяся в верхней части колонны азотная кислота низкой концентрации перетекает на нижележащие тарелки. За счет поглощения оксидов азота концентрация кислоты постепенно увеличивается и на выходе достигает 55–58%, причем содержание растворенных в ней оксидов азота достигает ~1%. Поэтому кислота направляется в продувочную колонну 10, где подогретым воздухом из нее отдувают оксиды азота, и отбеленная азотная кислота поступает на склад. Воздух после продувочной колонны подается в нижнюю часть абсорбционной колонны 9.

Степень абсорбции оксидов азота достигает 99%. Выходящие из колонны хвостовые газы с содержанием оксидов азота до 0,11% при температуре 35 °С проходят подогреватель 11, где нагреваются до 110–145 °С и поступают в топочное устройство (камера сжигания) 3 установки каталитической очистки. Здесь газы нагреваются до температуры 390–450 °С за счет горения природного газа, подогретого предварительно в подогревателе 4, и направляются в реактор с двухслойным катализатором 2, где первым слоем служит оксид алюминия, с нанесенным на него палладием, вторым слоем – оксид алюминия. Очистку осуществляют при 760 °С. Очищенные газы поступают в газовую турбину 17 при температуре 690–700 °С. Энергия, вырабатываемая турбиной за счет теплоты хвостовых газов, используется для привода турбокомпрессора 18. Затем газы направляют в котел-утилизатор и экономайзер (на схеме не показаны) и выбрасывают в атмосферу. Содержание оксидов азота в очищенных выхлопных газах составляет 0,005–0,008%, содержание CO<sub>2</sub> – 0,23%.

		N				10

двигаются противотоком друг к другу. Для того чтобы жидкость перемещалась по абсорберам самотеком, каждый последующий по ходу жидкости аппарат располагают несколько ниже предыдущего. Для отвода тепла, выделяющегося при абсорбции, в аппаратах устанавливают змеевики, охлаждаемые водой или другим охлаждающим агентом, либо помещают абсорберы в сосуды с проточной водой.

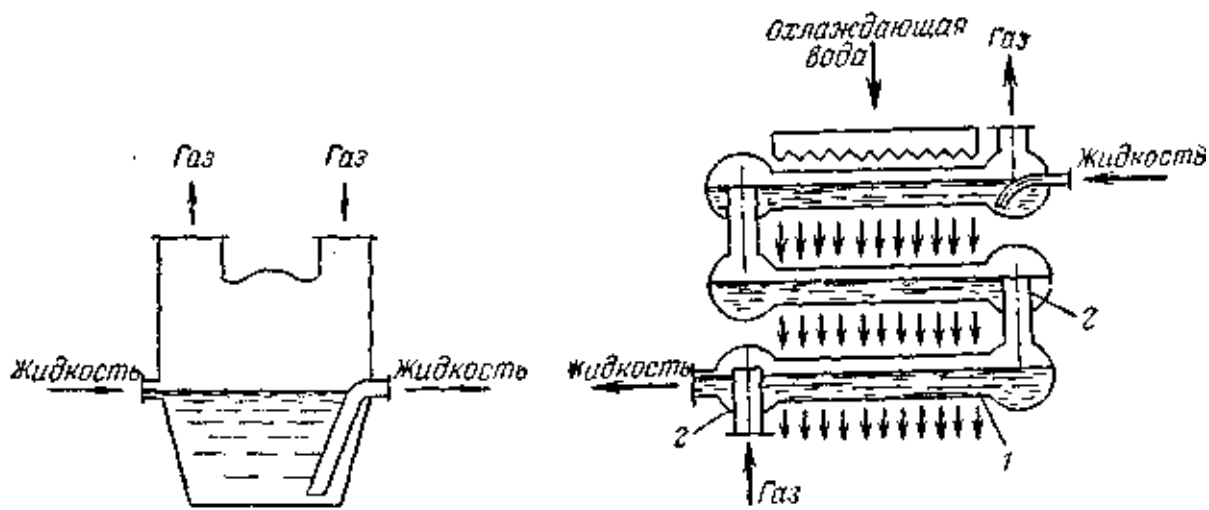


Рисунок 2.1 – Поверхностный абсорбер

Пластинчатый абсорбер состоит из двух систем каналов: по каналам 1 большого сечения движутся противотоком газ и абсорбент, по каналам 2 меньшего сечения – охлаждающий агент (как правило, вода). Пластинчатые абсорберы обычно изготавливаются из графита, так как он является химически стойким материалом.

Поверхностные абсорберы имеют ограниченное применение вследствие их малой эффективности и громоздкости.

Пленочные абсорберы. Эти аппараты более эффективны и компактны, чем поверхностные абсорберы. В пленочных абсорберах поверхностью контакта фаз является поверхность текущей пленки жидкости. Различают следующие разновидности аппаратов данного типа: 1) трубчатые абсорберы; 2) абсорберы с плоско-параллельной или листовой насадкой; 3) абсорберы с восходящим движением пленки жидкости.





### 3.2 Расчет плотности сырья

Выполним перерасчет объемного расхода в мольный

$$G_{\Gamma} := \frac{V_{\Gamma} P_{\Gamma} T_{\text{н.у.}}}{V_0 P_{\text{н.у.}} T_{\Gamma}}$$

где  $V_0 = 22.4$  л/моль – молярный объем идеального газа при н.у.;

$T_{\text{н.у.}} = 273$  К – температура н.у.;

$P_{\text{н.у.}} = 0,1013$  МПа – давление н.у.

$T_{\Gamma} = t_{\Gamma} + 273 = 303$  К – температура газовой смеси

$$G_{\Gamma} = \frac{2,2}{22.4} \frac{0.63 \times 273}{0.1013 \times 303} = 516 \text{ моль/с} = 1858 \text{ кмоль/ч}$$

Расход каждого компонента

$$VG_{\text{H}} := G_{\Gamma} \cdot Y_{V\text{H}} = 1858 \times \begin{pmatrix} 0.0766 \\ 0.064 \\ 0.0635 \\ 0.8220 \\ 0.0315 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 142 \\ 12 \\ 118 \\ 1527 \\ 59 \end{pmatrix} \text{ кмоль/ч}$$

Массовый расход

$$G_{\text{M}} = VG_{\text{H}} M$$

где  $M$  – мольная масса вещества.

$$M(\text{NO}_2) = 14 + 16 \times 2 = 46 \text{ кг/кмоль}$$

$$M(\text{NO}) = 14 + 16 = 30 \text{ кг/кмоль}$$

$$M(\text{O}_2) = 16 \times 2 = 32 \text{ кг/кмоль}$$

$$M(\text{N}_2) = 14 \times 2 = 28 \text{ кг/кмоль}$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \times 2 + 16 = 18 \text{ кг/кмоль}$$

Тогда

$$G_{\text{M}}(\text{NO}_2) = 142 \times 46 = 6547 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{M}}(\text{NO}) = 12 \times 30 = 357 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{M}}(\text{O}_2) = 118 \times 32 = 3776 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{M}}(\text{N}_2) = 1527 \times 28 = 42765 \text{ кг/ч}$$

$$G_{\text{M}}(\text{H}_2\text{O}) = 59 \times 18 = 1054 \text{ кг/ч}$$

		N	.	.	.	18

Проверка материального баланса реакции

$$G(\text{NO}_2) + G(\text{H}_2\text{O}) + G(\text{O}_2) = G(\text{HNO}_3)$$

$$6023 + 1179 + 1048 = 8250$$

$$8250 = 8250$$

Материальный баланс выполняется.

### 3.3.2 Определение расхода воды

Расход воды на реакцию

$$G_{\text{вр}} = G(\text{H}_2\text{O}) = 1179 \text{ кг/ч}$$

Расход 100% азотной кислоты

$$G_{\text{к}} = G(\text{HNO}_3) = 8250 \text{ кг/ч}$$

Расход воды на разбавление

$$G_{\text{вз}} := G_{\text{к}} \cdot \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) = 8250 \times \left( \frac{1}{0.58} - 1 \right) = 5974 \text{ кг/ч}$$

Мольный расход воды на разбавление

$$G_{\text{Мвз}} = G_{\text{вз}} / M(\text{H}_2\text{O}) = 5974 / 18 = 332 \text{ кмоль/ч}$$

Полный расход воды

$$G_{\text{в}} := G_{\text{вз}} + G_{\text{вр}} = 1179 + 5974 = 7153 \text{ кг/ч}$$

Мольный расход

$$G_{\text{Мв}} = G_{\text{в}} / M(\text{H}_2\text{O}) = 7153 / 18 = 397 \text{ кмоль/ч}$$

Мольный расход оксида азота (IV) в газе, покидающем адсорбер

$$n_{\text{NO}_2\text{вых}} = n_{\text{NO}_2\text{вх}} - n_{\text{NO}_2\text{р}} = 142 - 131 = 11 \text{ кмоль/ч}$$

Мольный расход кислорода в газе, покидающем адсорбер

$$n_{\text{O}_2\text{вых}} = n_{\text{O}_2\text{вх}} - n_{\text{O}_2\text{р}} = 118 - 33 = 85 \text{ кмоль/ч}$$

Расход газа, выходящего из абсорбера

$$G_{\text{вых}} = n_{\text{NO}_2\text{вых}} + n_{\text{NO}_\text{вх}} + n_{\text{O}_2\text{вых}} + n_{\text{N}_2\text{вх}} + n_{\text{H}_2\text{O}_\text{вх}} =$$

$$11 + 12 + 85 + 1527 + 59 = 1694 \text{ кмоль/ч}$$

		N				20









## 5 РАСЧЕТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

### 5.1 Выбор материала

Выбираем сталь 12Х18Н10Т [5, стр. 328]. Для выбранного материала при 30 °С [5, стр. 97]

$$\sigma_B = 532 \text{ МПа}, \sigma_{B20} = 540 \text{ МПа},$$

$$\sigma_T = 292 \text{ МПа}, \sigma_{T20} = 300 \text{ МПа}$$

Определим номинальное допускаемое напряжение. Согласно [5, табл. 14.5] расчет для легированной стали при рабочей температуре менее 525 °С необходимо вести по формулам

$$\sigma^* = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_T}{n_T} \right\}$$

где  $n_B$  – запас прочности по пределу прочности, для стального проката из легированной стали  $n_B = 2,6$  [5, табл. 14.6];

$n_T$  – запас прочности по пределу текучести, для стального проката из легированной стали при давлении в аппарате не более 0,63 МПа  $n_T = 1,65$  [5, табл. 14.6].

Соответственно нормативное допускаемое напряжение при расчетной температуре и при 20 °С:

$$\sigma^* = \min \left\{ \frac{532}{2,6}; \frac{292}{1,65} \right\} = \min \{205; 177\} = 177 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{20}^* = \min \left\{ \frac{540}{2,6}; \frac{300}{1,65} \right\} = \min \{208; 182\} = 182 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение при статических однократных нагрузках для рабочего состояния выбранного материала составляют

$$[\sigma] = \eta \sigma^*, [\sigma]_{20} = \eta \sigma_{20}^*$$

где  $\eta$  – поправочный коэффициент, учитывающий вид заготовки, для листового проката  $\eta = 1,0$  [6, с. 10]. Подставляя числовые значения, получим

$$[\sigma] = 1,0 \cdot 177 = 177 \text{ МПа}, [\sigma]_{20} = 1,0 \cdot 182 = 182 \text{ МПа}.$$

Допускаемое напряжение при гидроиспытаниях

		N				28

$s_p$  – расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки, мм;

$c$  – прибавка к расчетной толщине, мм;

$c_0$  – прибавка на округление размера до стандартного значения, мм.

Расчетное давление в аппарате

$$p_p = 0,63 + 0 = 0,63 \text{ МПа}$$

Давление при испытаниях

$$p_{и} = \max \left( \frac{1,25 p_T [\sigma]_{20} / [\sigma]}{p_T + 0,3} \right) =$$
$$= \max \left( \frac{1,25 \times 0,63 \times 182 / 177}{0,63 + 0,3} \right) = \max \left( \frac{0,81}{0,93} \right) = 0,93 \text{ МПа}$$

Для колонных аппаратов гидроиспытания проводятся в лежачем положении, поэтому гидростатическим давлением столба жидкости можно пренебречь. Соответствующая расчетная толщина стенки

$$s_p = \max \left( \frac{0,63 \cdot 2200}{2 \cdot 0,95 \cdot 177 - 0,63}, \frac{0,93 \cdot 2200}{2 \cdot 0,95 \cdot 273 - 0,93} \right) = \max \left( \frac{5,90}{5,11} \right) = 6,90 \text{ мм}$$

Прибавка к расчетной толщине обечайки определяется по формуле

$$c = c_1 + c_2 + c_3$$

где  $c_1 = Pt + c_3$  – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

$P$  – скорость коррозии, для выбранного материала  $P = 0,05$  мм/год;

$c_3$  – прибавка для компенсации эрозии,  $c_3 = 0$  мм.

$c_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

$c_3$  – технологическая прибавка, мм.

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии

$$c_1 = 0,05 \cdot 15 + 0 = 0,75 \text{ мм.}$$

При листовом прокате и сварной обечайке  $c_2 = 0$  мм и  $c_3 = 0$  мм [6, с. 16]. Поэтому

$$c = 0,75 + 0 + 0 = 0,75 \text{ мм.}$$

Прибавку  $c_0$  примем равной 0,35 мм. Соответственно исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки составит

		N				30



$$n_{\text{б}} \geq \frac{\pi D_{\text{б}}}{t_{\text{ш}}}$$

где  $t_{\text{ш}}$  – рекомендуемый шаг расположения болтов, для  $p = 0,90$  МПа  $t_{\text{ш}} \approx 4d_{\text{б}} = 4 \cdot 20 = 80$  мм [6, т. 1.43]. Соответственно

$$n_{\text{б}} \geq \frac{3,14 \cdot 2290}{80} = 59,95$$

Принимаем значение, кратное четырем  $n_{\text{б}} = 60$  шт. Ориентировочная высота фланца

$$h_{\text{ф}} = \lambda_{\text{ф}} \sqrt{D s_{\text{эк}}}$$

где  $\lambda_{\text{ф}}$  – коэффициент,  $\lambda_{\text{ф}} = 0,43$  [4, рис. 1.40];  $s_{\text{эк}}$  – эквивалентная толщина втулки, мм. Значение  $s_{\text{эк}}$  определяется так

$$s_{\text{эк}} = s_0 \left( 1 + \frac{h_{\text{в}} (\beta_1 - 1)}{h_{\text{в}} + 0,25 (\beta_1 + 1) \sqrt{D s_0}} \right)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от отношения  $D/s$ , в данном случае  $D/s = 2200/10 = 320$ , тогда  $\beta_1 = 1,5$  [6, рис. 1.39]. Соответственно

$$s_{\text{эк}} = 10 \times \left( 1 + \frac{90 \times (1,5 - 1)}{90 + 0,25 \times (1,5 + 1) \sqrt{2200 \cdot 10}} \right) = 12,0 \text{ мм}$$

Тогда

$$h_{\text{ф}} = 0,45 \sqrt{2200 \cdot 12,0} = 69,97 \text{ мм}$$

Принимаем  $h_{\text{ф}} = 70$  мм.

		N			34

$V$  – объём аппарата с учётом цилиндрической обечайки, 2-х эллиптических днищ, входного патрубка и опоры аппарата вычисляется по эмпирической формуле:

$$V = \frac{H \cdot \pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D^3}{12} + \frac{H_{\text{оп}} \cdot \pi \cdot D^2}{4}$$

где  $H = 20,9$  м – высота обечайки;

$H_{\text{оп}} = 2$  м – высота опоры.

$$V = \frac{20,9 \cdot 3,14 \cdot 2,2^2}{4} + \frac{3,14 \cdot 2,2^3}{12} + \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,2^2}{4} = 89,8 \text{ м}^3.$$

Определим массу аппарата по формуле (76):

$$G_0 = 7860 \cdot \left[ 4 \cdot 89,8 \cdot \left( 0,017 + \frac{0,001}{2,2} \right) + 1,43 \cdot 2,2^2 \cdot (0,017 \cdot 2,2 + 0,001) \right] = 51 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

Предварительно принимаем для транспортирования аппарата - пневмоколёсный прицеп-тяжеловоз ЧМЗАП-5530, при транспортировании по сухой грунтовой дороге с максимальным подъёмом 3% и скоростью  $v=2,6$  км/ч; для буксировки прицепа с аппаратом – трактор марки ДЭТ-250 мощностью двигателя  $N = 184$  кВт и скоростью  $v=2 \dots 20,5$  км/ч.

Суммарное сопротивление движению всего транспорта определяется по формуле:

$$F = 10 \cdot G_T \cdot f_T + 10 \cdot (G_{\text{п}} + G_0) \cdot f_{\text{п}} \mp 10 \cdot (G_T + G_{\text{п}} + G_0) \cdot f_y$$

где  $G_T = 25 \cdot 10^3$  кг – масса тягача;  $\cdot 10^3$  кг

$f_T = 0,075$  – удельное сопротивление движению тягача; [7, Таблица 30]

$G_{\text{п}} = 47 \cdot 10^3$  кг – масса выбранного для транспортирования оборудования прицепа, т; [7, Таблица 31]

$G_0 = 51 \cdot 10^3$  кг – масса транспортируемого оборудования;

$f_{\text{п}} 0,05$  – удельное сопротивление движению прицепа; [7, Таблица 32]

$f_y = 0,03$  – сопротивление движению от уклона дороги, равное показателю уклона, соответствующему 0,01 на каждый процент уклона (с плюсом при подъёме дороги, с минусом – при спуске).

		N			36



ния методом скольжения с отрывом от земли краны подбирают так, чтобы их грузоподъемность была меньше массы оборудования, а высота подъема крюков независимо от места строповки обеспечивала подъем основания оборудования выше фундамента.

#### 6.4 Выбор кранов и расчёт такелажной оснастки

Существует несколько схем подъема оборудования скольжением самоходными стрелковыми кранами со строповкой за вершину: подъем одним краном; подъем двумя кранами без их передвижения; подъем спаренными кранами с их передвижением. [7]

Выбираю предварительно схему подъема одним краном.

##### 6.4.1 Выбор кранов

Требуемая грузоподъемность монтажного крана определяется по формуле:

$$G_{к.тр} \geq \frac{G_0}{n_k}$$

где  $G_0 = 51 \cdot 10^3 \text{ кг}$  – масса аппарата;

$n_k = 1$  – количество кранов, участвующих в подъеме оборудования.

$$G_{к.тр} \geq \frac{51}{1} = 51 \cdot 10^3 \text{ кг} .$$

Необходимая высота подъема крюка крана для установки аппарата на фундамент вычисляется по формуле:

$$h_k = h_\phi + h_3 + h_0 + h_c$$

где  $h_\phi = 0,5 \text{ м}$  – рекомендуемая высота фундамента;

$h_3 = 0,5 \text{ м}$  – рекомендуемый запас высоты оборудования над фундаментом;

$h_0 = 21,5 \text{ м}$  – высота оборудования от основания до места строповки, назначается по чертежу аппарата;

$h_c = 3 \text{ м}$  – высота стропы, назначается по конструктивным соображениям.

$$h_k = 0,5 + 0,5 + 21,5 + 3 = 25,5 \text{ м}.$$

		N				38

- диаметр каната, мм..... 16,5;
- масса 1000 кг каната, кг..... 1245.

По усилию  $F_T$  выбираю электротяг типа ЛР-10 с тяговым усилием 100 кН. [7, Приложение XVIII]

### 6.4.3 Расчёт монтажных штуцеров

Монтажные штуцера представляют собой стальные патрубки различного сечения, привариваемые к корпусу аппарата, предназначенные для строповки аппарата при его подъёме и установке на фундамент. Для предотвращения скользящего соскальзывания к внешнему торцу штуцера приваривают ограничительный фланец.

Схема к расчёту монтажных штуцеров приведена на рисунке 6.1.

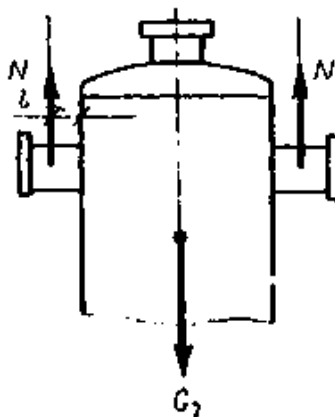


Рисунок 6.1 – Схема к расчёту монтажных штуцеров

Усилие от стропа, действующее на каждый монтажный штуцер определяется по формуле:

$$N = \frac{10 \cdot G_0 \cdot k_n \cdot k_d \cdot k_n}{2}$$

где  $k_n = 1,2$  – коэффициент неравномерности нагрузки на такелажные элементы при отсутствии балансирных устройств;



Натяжение в одном витке стропа определяется по формуле:

$$S = \frac{P}{m \cdot n \cdot \cos \alpha}$$

где  $P = 305$  кН – усилие, приложенное к стропу;

$m = 2$  – количество ветвей витого стропа;

$n = 7$  – число канатных витков в сечении одной ветви;

$\alpha = 15^\circ$  – угол между ветвью стропа и направлением усилия  $P$  (рекомендуется  $\leq 30^\circ$ ).

$$S = \frac{305}{2 \cdot 7 \cdot 0,97} = 23 \text{ кН.}$$

Разрывное усилие в одном канатном витке определяется с учётом коэффициента запаса по формуле:

$$R_n = S \cdot k_3$$

где  $k_3 = 5$  – коэффициент запаса прочности. [7, Приложение XI]

$$R_n = 23 \cdot 5 = 115 \text{ кН.}$$

Выбираю для канатного витого стропа стальной канат типа ЛК-РО по ГОСТ 7668-80 конструкции  $6 \times 36 (1 + 7 + \frac{7}{7} + 14) + 1$  о.с. со следующими характеристиками: [7, Приложение I]

- временной сопротивлении разрыву, МПа.....1960;
- разрывное усилие, МПа..... 233,5;
- диаметр каната, мм..... 16,5;
- масса 1000 кг каната, кг..... 1520.

Расчётный диаметр поперечного сечения ветви стропа определяется по формуле:

$$d_c = 3 \cdot d$$

где  $d = 0,0165$  м – диаметр каната для витков стропа.

$$d_c = 3 \cdot 0,0165 = 0,05 \text{ м.}$$

Минимальный диаметр захватного устройства определяется по формуле:

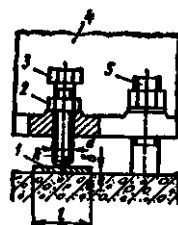


Рисунок 6.4 – Схема выверки отжимными регулировочными винтами

1 – опорная пластина; 2 – стопорная гайка; 3 – регулировочный винт; 4 – опорная часть оборудования; 5 – фундаментный болт

Опорные пластины размещают с расположением отжимных регулировочных винтов в опорной части оборудования. Места расположения пластин выравнивают с отклонением не более 10 мм на 1 м.

Положение оборудования по высоте и горизонтали (вертикали) регулируют поочередно всеми отжимными винтами, не допуская в процессе выверки отклонения оборудования от горизонтали (вертикали) более чем на 3 мм на 1 м. После завершения выверки плотности прилегания регулировочных винтов к опорным пластинам проверяют щупом толщиной 0,1 мм, а положение фиксируют контргайками.

Перед окончательной затяжкой фундаментных болтов регулировочные винты должны быть вывернуты на два-три оборота. При повторном использовании винты вывёртывают полностью. Оставшиеся отверстия во избежание попадания масла и других веществ, разъедающих бетон, заглушают резьбовыми пробками или цементным раствором, поверхность которого покрывают маслостойкой краской.

Гидравлическому испытанию подлежат все сосуды после их изготовления и монтажа.

Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если не обнаружено течи, трещин, потения в сварных швах и на оси металла, течи в разъёмных соединениях, видимых остаточных деформаций, а также падения давления по манометру.

