

## Теплообменное оборудование

### Практическое занятие №3

Для вертикального сетевого подогревателя с «плавающей головкой» определить расход греющего пара  $D_{сп}$  и расход сетевой воды  $G_c$ , средний температурный напор в подогревателе  $\Delta t_{ср}$  и коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к трубкам поверхности нагрева  $\alpha_1$  по исходным данным, приведенным по-вариантно в таблице.

В таблице приняты обозначения:  $P_{сп}$  и  $t_{сп}$  – давление и температура греющего пара,  $Q_{сп}$  – тепловая нагрузка сетевого подогревателя,  $t_{c1}$  – температура сетевой воды на входе в сетевой подогреватель. Недогрев сетевой воды до температуры насыщения греющего пара принять равным  $v=5^\circ\text{C}$ .

Тепловые потери в окружающую среду учитывать коэффициентом  $\eta_n=0,98$ . Поправку для коэффициента теплоотдачи на шероховатость и на загрязнение трубок принять равной  $E_r=1,0$  (трубки из латуни или нержавеющей стали). Поправку на волновой характер стекания пленки конденсата по поверхности вертикальных трубок принять равной  $E_v=1,3$ . Поправку на зависимость физических свойств конденсата от температуры принять равной  $E_t=0,99$ . Расстояние по вертикали между соседними горизонтальными перегородками для отвода конденсата и направления потока пара принять равным  $l=1,0$  м.

Энтальпию нагреваемой воды разрешается приближенно определять по формуле

$$h_i^e \approx 4,19 \cdot t_i .$$

Таблица исходных данных по вариантам

Номера вариантов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_{сн}$ МПа	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,23
$t_{сн}$ °С	130					150				
$Q_{сн}$ МВт	10									
	15									
	20									
$T_{с1}$ °С	59,5	61	62,2	63	63,3	63,6	64	65,2	66,5	70
$W_B$ м/с	1,55		1,6		1,65		1,7		1,75	

### Теплообменное оборудование

#### Практическое задание №4

##### Задание

Для условий практического занятия №3 определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к нагреваемой сетевой воды, коэффициент теплопередачи и поверхность нагрева, а также основные геометрические размеры вертикального сетевого подогревателя, длину трубок  $H$  и диаметр корпуса  $d_{корп}$ , согласовав принятую скорость движения воды в трубках с числом ходов подогревателя и с проходным сечением для воды.

Для поверхности нагрева используются латунные трубки диаметром  $d_H = 19$  мм и с толщиной стенки 1 мм. Трубки размещаются в трубной доске коридорно с шагом  $S_1 = S_2 = 1.4 d_H$ .

Коэффициент заполнения трубной доски отверстиями под трубки принять равным  $\eta_{тд} = 0,85$ .

Давление сетевой воды  $p_{св} = 0,5$  МПа. Подогреватель имеет 4 хода по сетевой воде. В соответствии с технико-экономическими рекомендациями скорость воды в трубках принять по-вариантно (см. таблицу исходных данных к заданию №3).

# Расчет сетевого подогревателя с "плавающей головкой"

Дано: Вариант №8  
 $P_{сп} = 0.19$  МПа давление греющего пара  
 $t_{сп} = 150$  С температура греющего пар  
 $Q_{сп} = 10$  МВт тепловая нагрузка сетевого подогревателя  
 $t_{с1} = 65.2$  С температура сетевой воды на входе в подогреватель  
 $\omega_b = 1.7$   $\frac{м}{с}$  скорость воды в трубах  
 Принимаем недогрев сетевой воды до температуры насыщения:  
 $u = 5$  С  
 $\eta_{п} = 0.98$  КПД подогревателя  
 $\epsilon_r = 1$  поправка на загрязнение  
 $\epsilon_v = 1.3$  поправка на волновой характер стекания пленки  
 $\epsilon_t = 0.99$  поправка на зависимость физических свойств конденсата от температуры

Расстояние по вертикали между соседними горизонтальными перегородками  $l = 1м$ , для поверхностей нагрева используются латунные трубки  $d_{н1} = 0.019м$  и толщиной  $\delta = 0.001м$ , трубы размещаются в трубной доске коридорно с шагом  $S_1 = 1.4 \cdot d_{н1}$  и  $S_2 = S_1$ , коэффициент затопления трубной доски  $\eta_{тр} = 0.85$ . Давление сетевой воды  $P_{св} = 0.5$  МПа, подогреватель имеет  $z = 4$  хода по сетевой воде. Учесть сопротивление входного и выходного патрубков сетевой воды. Диаметр патрубков выбрать, приняв предварительно скорость воды в них  $3$  м/с и уточнить ее после окончательного выбора трубок по ГОСТу, длину патрубка принять равной  $l_{п} = 0.3м$ . При определении абсолютной шероховатости  $\Delta = 0.1мм$ .

Решение:  
 По  $P_{сп} = 0.19$  МПа и  $t_{сп} = 150$  С определим энтальпию  $h_{сп} = 2769.9$  кДж/кг, температура насыщения при  $P_{сп} = 0.19$  МПа  $t_s = 118.6$  С и  $h_{сп} = 497.82$  кДж/кг  
 Расход греющего пара

$$Q_{сп} = 10$$

$$D_{сп} = \frac{Q_{сп} \cdot 10^3}{(h_{сп} - h_{с1}) \cdot \eta_{п}} \quad h_{сп} = 2769.9 \quad h_{с1} = 497.82 \quad D_{сп} = 4.491 \quad \text{кг/с}$$

$$\eta_{п} = 0.98$$

Температура на выходе из подогревателя:

$$t_{с2} = t_s - u \quad t_s = 118.6 \quad t_{с2} = 113.6 \quad \text{С}$$

$$u = 5$$

Энтальпия воды на входе и выходе из сетевого подогревателя:

$$h_{с1в} = 4.19 \cdot t_{с1} \quad t_{с1} = 65.2 \quad h_{с1в} = 273.188 \quad \text{кДж/кг}$$

$$h_{с2в} = 4.19 \cdot t_{с2} \quad t_{с2} = 113.6 \quad h_{с2в} = 475.984 \quad \text{кДж/кг}$$

Расход сетевой воды:

$$Q_{сп} = 10$$

$$G_{ст} = \frac{Q_{сп} \cdot 10^3}{(h_{с2в} - h_{с1в})} \quad h_{с2в} = 475.984 \quad h_{с1в} = 273.188 \quad G_{ст} = 49311 \quad \text{кг/с}$$

Среднегеометрический температурный напор:

$$\Delta t_G = t_s - t_{с1} \quad t_s = 118.6 \quad t_{с1} = 65.2 \quad \Delta t_G = 53.4 \quad \text{С}$$

$$\Delta t_M = t_s - t_{с2} \quad t_s = 118.6 \quad t_{с2} = 113.6 \quad \Delta t_M = 5 \quad \text{С}$$

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_G - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_G}{\Delta t_M}\right)} \quad \Delta t_G = 53.4 \quad \Delta t_M = 5 \quad \Delta t_{ср} = 20.436 \quad \text{С}$$

Средняя температура стенки:

$$t_{ст} = \frac{t_{с1} + t_{с2}}{2} \quad t_{с1} = 65.2 \quad t_{с2} = 113.6 \quad t_{ст} = 89.4 \quad \text{С}$$

Определим коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке:

$$\Delta t_{пст} = t_s - t_{ст} \quad t_s = 118.6 \quad t_{ст} = 89.4 \quad \Delta t_{пст} = 29.2 \quad \text{С}$$

Определяем комплекс А учитывающий физические параметры:

$$g = 9.81 \quad \text{м/с}^2$$

$$r = 2206.1 \quad \text{кДж/кг}$$

$$\nu = 0.00106 \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad \rho' = \frac{1}{\nu} \quad \rho' = 943.396 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\nu' = 0.9293 \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad \rho'' = \frac{1}{\nu'} \quad \rho'' = 1.076 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\lambda_b = 0.6834 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Динамическая вязкость:

$$\mu_b = 235 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad C_{рв} = 4.24 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Кинематическая вязкость:

$$\nu_b = \mu_b \cdot \rho' \quad \mu_b = 235 \cdot 10^{-6} \quad \rho' = 943.396 \quad \nu_b = 2.491 \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot \left( \lambda_b \cdot r \cdot 10^3 \cdot g \cdot (\rho' - \rho'') \right)}{\nu_b}} \quad \lambda_b = 0.683 \quad r = 2206.1 \quad \rho' = 943.396 \quad \rho'' = 1.076 \quad \nu_b = 2.491 \cdot 10^{-7} \quad A = 13983.543 \quad \frac{\text{Вт}^4}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^3}$$

Тогда:

$$\alpha_1 = 1.19 \cdot A \cdot \left( \frac{1}{1 \cdot \Delta t_{пст}} \right)^{0.25} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_v \cdot \epsilon_t \quad A = 13983.543 \quad \Delta t_{пст} = 29.2 \quad \epsilon_r = 1 \quad \epsilon_v = 1.3 \quad \epsilon_t = 0.99 \quad \alpha_1 = 9213 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Средняя температура сетевой воды:

$$t_b = 0.5 \cdot (t_{с1} + t_{с2}) \quad t_{с1} = 65.2 \quad t_{с2} = 113.6 \quad t_b = 89.4 \quad \text{С}$$

При  $P_{св} = 0.5$  МПа  $t_b = 89.4$  С

$$\mu_{св} = 3.167 \cdot 10^{-4} \quad \text{Па} \cdot \text{с} \quad \lambda_{св} = 0.673 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Удельный объем сетевой воды:

$$\nu_{св} = 0.00104 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Кинематическая вязкость воды:

$$\nu_{квс} = \mu_{св} \cdot \rho_{св} \quad \mu_{св} = 3.167 \cdot 10^{-4} \quad \rho_{св} = 3.294 \cdot 10^{-7} \quad \nu_{квс} = 3.294 \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Внутренний диаметр трубок:

$$d_{вн} = d_n - 2 \cdot \delta \quad d_n = 0.017 \quad \text{м} \quad \delta = 0.0019$$

Удельная теплоемкость воды:

$$C_{рсв} = 4.2 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{св} = \frac{\omega_b \cdot d_{вн}}{\nu_{квс}} \quad \omega_b = 1.7 \quad d_{вн} = 0.017 \quad \nu_{квс} = 3.294 \cdot 10^{-7} \quad Re_{св} = 87744$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к сетевой воде:

$$Pr_{св} = \frac{\mu_{св} \cdot C_{рсв} \cdot 10^3}{\lambda_{св}} \quad \mu_{св} = 3.167 \cdot 10^{-4} \quad C_{рсв} = 4.2 \quad \lambda_{св} = 0.673 \quad Pr_{св} = 1976$$

$$\alpha_2 = 0.023 \cdot \frac{\lambda_{св}}{d_{вн}} \cdot Re_{св}^{0.8} \cdot Pr_{св}^{0.4} \quad \lambda_{св} = 0.673 \quad d_{вн} = 0.017 \quad Re_{св} = 87743.8 \quad Pr_{св} = 1976 \quad \alpha_2 = 10770 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Теплопроводность латунных трубок:  $\lambda_{тр} = 93 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \alpha_1 = 9212.914 \quad \delta = 0.001 \quad \lambda_{тр} = 93 \quad \alpha_2 = 10770.108 \quad K = 4714 \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Необходимая площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q_{сп} \cdot 10^6}{K \cdot \Delta t_{ср}} \quad Q_{сп} = 10 \quad K = 4713.745 \quad \Delta t_{ср} = 20.436 \quad F = 10331 \quad \text{м}^2$$

Необходимое живое сечение трубок при заданной скорости воды:

$$F_{ж} = \frac{G_{ст} \cdot \nu_{св}}{\omega_b} \quad G_{ст} = 49311 \quad \nu_{св} = 0.00104 \quad \omega_b = 1.7 \quad F_{ж} = 0.03017 \quad \text{м}^2$$

Определим количество трубок в подогревателе с учетом количества ходов:

$$z = 4$$

$$z_{тр} = z \cdot \frac{4 \cdot F_{ж}}{\pi \cdot d_{вн}^2} \quad F_{ж} = 0.030167 \quad d_{вн} = 0.017 \quad z_{тр} = 532$$

Необходимая площадь теплообмена для одной трубки

$$f_{тр} = \frac{F}{z_{тр}} \quad F = 10331 \quad z_{тр} = 531.615 \quad f_{тр} = 0.195 \quad \text{м}^2$$

Определяем высоту одной трубки:

$$H_{тр} = \frac{f_{тр}}{\pi \cdot d_{н}} \quad f_{тр} = 0.195 \quad d_{н} = 0.019 \quad H_{тр} = 3.271 \quad \text{м}$$

Необходимая площадь трубной доски для размещения одной трубки:

$$f_{д} = 1.4^2 \cdot d_{н}^2 \quad d_{н} = 0.019 \quad f_{д} = 0.000708 \quad \text{м}^2$$

Общая площадь трубной доски с учетом коэффициента затопления:

$$F_{д} = \frac{z_{тр} \cdot f_{д}}{\eta_{тр}} \quad z_{тр} = 531.615 \quad f_{д} = 0.00071 \quad \eta_{тр} = 0.85 \quad F_{д} = 0.443 \quad \text{м}^2$$

Определяем диаметр корпуса:

$$d_{кор} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{д}}{\pi}} \quad F_{д} = 0.443 \quad d_{кор} = 0.751 \quad \text{м}$$

Определяем внутренний диаметр патрубков:

$$W_b = 3 \quad \text{м/с} \quad d_{внтп} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{ст} \cdot \nu_{св}}{\pi \cdot W_b}} \quad G_{ст} = 49311 \quad \nu_{св} = 0.00104 \quad W_b = 3 \quad d_{внтп} = 0.148 \quad \text{м}$$

Уточняем скорость воды в трубках

$$d_{шт} = 159 \quad \text{мм} \quad S = 5 \quad \text{мм}$$

$$d_{внтп} = (d_{шт} - 2 \cdot S) \cdot 10^{-3} \quad d_{шт} = 159 \quad S = 5 \quad d_{внтп} = 0.149 \quad \text{м}$$

$$W_{внтп} = \frac{4 \cdot G_{ст} \cdot \nu_{св}}{\pi \cdot d_{внтп}^2} \quad G_{ст} = 49311 \quad \nu_{св} = 0.001 \quad d_{внтп} = 0.149 \quad W_{внтп} = 2.941$$

Определяем число Рейнольдса для потока воды в патрубках:

$$Re_{п} = \frac{W_{внтп} \cdot d_{внтп}}{\nu_{квс}} \quad W_{внтп} = 2.941 \quad d_{внтп} = 0.149 \quad \nu_{квс} = 3.294 \cdot 10^{-7} \quad Re_{п} = 1330505$$

$$\left( 120 \cdot \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 10^{-3}} \right)^{1.125} = 810799 \quad d_{внтп} = 0.149 \quad \Delta = 0.1$$

Таким образом  $Re_{п} > \left( 120 \cdot \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 10^{-3}} \right)^{1.125}$  указанное условие выполняется

Коэффициент сопротивления трения

$$\lambda = \frac{1}{\left( 1.74 + 2 \cdot \log\left( \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \right) \right)^2} \quad d_{внтп} = 0.149 \quad \Delta = 0.1 \quad \lambda = 0.018$$

По формуле Дарси-Вейсбаха определяем коэффициент трения для патрубков:

$$\epsilon_{тр} = \lambda \cdot \frac{H_{тр}}{d_{внтп}} \quad \lambda = 0.018 \quad H_{тр} = 3.271 \quad d_{внтп} = 0.149 \quad \epsilon_{тр} = 0.036$$

Полный коэффициент сопротивления с учетом местных потерь

$$\epsilon_{\Sigma} = 1.5 \quad \epsilon_{тр} = 0.036 \quad \Sigma \epsilon_{мех} = 1.536$$

Найдем потерю давления на первом участке:

$$\Delta P_1 = \Sigma \epsilon_{мех} \cdot \frac{W_{внтп}^2}{2 \cdot \nu_{св}} \quad \Sigma \epsilon_{мех} = 1.536 \quad W_{внтп} = 2.941 \quad \nu_{св} = 0.00104 \quad \Delta P_1 = 6388 \quad \text{Па}$$

Второй участок включает в себя обогрев трубки (4 хода) и местные сопротивления на перепусках в верхней и нижней водяных камерах.

Проверяем соблюдение квадратичного закона:

$$Re_{п} = \frac{W_{внтп} \cdot d_{внтп}}{\nu_{квс}} \quad W_{внтп} = 2.941 \quad d_{внтп} = 0.017 \quad \nu_{квс} = 3.294 \cdot 10^{-7} \quad Re_{п} = 151803$$

$$\left( 120 \cdot \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 10^{-3}} \right)^{1.125} = 70524 \quad d_{внтп} = 0.017 \quad \Delta = 0.1$$

Таким образом  $Re_{п} > \left( 120 \cdot \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 10^{-3}} \right)^{1.125}$  указанное условие выполняется

Находим коэффициент сопротивления трением

$$\lambda = \frac{1}{\left( 1.74 + 2 \cdot \log\left( \frac{d_{внтп}}{\Delta \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \right) \right)^2} \quad d_{внтп} = 0.017 \quad \Delta = 0.1 \quad \lambda = 0.032$$

По формуле Дарси-Вейсбаха определяем коэффициент трения для труб:

$$\epsilon_{тр} = \lambda \cdot \frac{H_{тр}}{d_{внтп}} \quad \lambda = 0.032 \quad H_{тр} = 3.271 \quad d_{внтп} = 0.017 \quad \epsilon_{тр} = 24.556$$

Суммарный коэффициент местных сопротивлений:

$$\epsilon_{\Sigma} = 4 \cdot 0.5 \quad \epsilon_{\Sigma} = 2$$

Коэффициент потерь на выходе  $\epsilon_{вых} = 4 \cdot 1$

Коэффициент потерь при поворотах  $\epsilon_{пов} = 3 \cdot 2.5 \quad \epsilon_{пов} = 7.5$

Тогда:

$$\Sigma \epsilon_{тр} = \epsilon_{тр} + \epsilon_{\Sigma} + \epsilon_{вых} + \epsilon_{пов} \quad \epsilon_{тр} = 24.556 \quad \epsilon_{\Sigma} = 2 \quad \epsilon_{вых} = 4 \quad \epsilon_{пов} = 7.5 \quad \Sigma \epsilon_{тр} = 38.056$$

Потери давления на втором участке:

$$\Delta P_2 = \Sigma \epsilon_{тр} \cdot \frac{\omega_b^2}{2 \cdot \nu_{св}} \quad \Sigma \epsilon_{тр} = 38.056 \quad \omega_b = 1.7 \quad \nu_{св} = 0.001 \quad \Delta P_2 = 52876 \quad \text{Па}$$

Сопротивление третьего участка равно сопротивлению на первом участке

$$\Delta P_3 = \Delta P_1 \quad \Delta P_1 = 6387.564$$

Тогда сопротивление всего сетевого подогревателя:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad \Delta P_1 = 6387.564 \quad \Delta P_2 = 52875.335 \quad \Delta P_3 = 6387.564 \quad \Delta P_{ст} = 65651 \quad \text{Па}$$

вариант №14

давление сетевой воды  $p_{св} := 0.9\text{МПа}$

давление пара  $p_{п} := 0.35\text{МПа}$

диаметр корпуса  $d_{к\_вн} := 3540\text{мм}$

диаметр парового патрубка  $d_{п\_патр} := 1600\text{мм}$

### Решение

толщина стенки корпуса

Прибавка к толщине стенки корпуса  $C := 1\text{мм}$

Допускаемое напряжение  $\sigma := 119\text{МПа}$

$$\phi := 0.26 \quad p_{п} = 350000\text{Па}$$

$$S := \frac{p_{п} \cdot d_{к\_вн}}{2 \cdot \phi \cdot \sigma - p_{п}} + C \quad d_{к\_вн} = 3.54\text{м} \quad S = 21.137\text{мм}$$

$$\phi = 0.26$$

$$\sigma = 1.19 \times 10^8\text{Па}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

$$\phi := \frac{2}{\frac{d_{п\_патр}}{\sqrt{(d_{к\_вн} + S)(S - C)}} + 1.75} \quad d_{п\_патр} = 1.6\text{м} \quad \phi = 0.259$$

$$d_{к\_вн} = 3.54\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

примем толщину стенки  $S := 21\text{мм}$

минимальное расстояние между отверстиями

$$a := 2 \cdot \sqrt{(d_{к\_вн} + S) \cdot (S - C)} \quad d_{к\_вн} = 3.54\text{м} \quad a = 0.534\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

$$\text{шаг } t := d_{п\_патр} + a \quad d_{п\_патр} = 1.6\text{м} \quad t = 2133.742\text{мм}$$

$$a = 0.534\text{м}$$

$$\text{Коэффициент прочности } \phi_0 := \frac{p_{п} [d_{к\_вн} + (S - C)]}{2(S - C) \cdot \sigma} \quad p_{п} = 350000\text{Па} \quad \phi_0 = 0.262$$

$$d_{к\_вн} = 3.54\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

$$\sigma = 1.19 \times 10^8\text{Па}$$

$$d_{пред} := \left( \frac{2}{\phi_0} - 1.75 \right) \cdot \sqrt{(d_{к\_вн} + S) \cdot (S - C)} \quad \phi_0 = 0.262 \quad d_{пред} = 1571.989\text{мм}$$

$$d_{к\_вн} = 3.54\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

т.к.  $d_{пред} = 1572\text{м} < d_{п\_патр} = 1.6\text{м}$  укрепление нужно

$$\text{Укрепления } \Sigma f := (d_{п\_патр} - d_{пред}) \cdot S \quad d_{п\_патр} = 1.6\text{м} \quad \Sigma f = 0.00059\text{м}^2$$

$$d_{пред} = 1.572\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

Толщина накладки  $S_{накл} := 5\text{мм}$

$$b_{накл} := \frac{\Sigma f}{2 \cdot S_{накл}} \quad \Sigma f = 5.882 \times 10^{-4}\text{м}^2 \quad b_{накл} = 0.0588\text{м}$$

$$S_{накл} = 0.005\text{м}$$

$$\text{ширина накладки } b_{накл\_max} := \sqrt{(d_{к\_вн} + S) \cdot (S - C)} \quad d_{к\_вн} = 3.54\text{м} \quad b_{накл\_max} = 0.267\text{м}$$

$$S = 0.021\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

т.к.  $b_{накл} = 0.059\text{м} < b_{накл\_max} = 0.267\text{м}$  штуцер не нужен

расчет торосферического днища

коэффициент сферичности  $K := 1.55$

$\phi := 0.5$

$$\text{внутренний диаметр цилиндрической части водяной камеры} \quad d_{к\_вн} = 3.54\text{м} \quad d_{вн\_в.к.} = 3009\text{мм}$$

$$d_{вн\_в.к.} := 0.85 \cdot d_{к\_вн}$$

$$S := \frac{p_{св} \cdot d_{вн\_в.к.} \cdot K}{2 \cdot (\phi \cdot \sigma - p_{св} \cdot K)} + C \quad p_{св} = 900000\text{Па} \quad S = 18.846\text{мм}$$

$$d_{вн\_в.к.} = 3.009\text{м}$$

$$K = 1.55$$

$$\phi = 0.5$$

$$\sigma = 1.19 \times 10^8\text{Па}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

диаметр лаза

$$d_{л} := 530\text{мм} \quad d_{л} = 0.53\text{м}$$

$$\phi := \frac{2}{\frac{d_{л}}{\sqrt{(d_{вн\_в.к.} + S)(S - C)}} + 1.75} \quad d_{вн\_в.к.} = 3.009\text{м} \quad \phi = 0.496$$

$$S = 0.01885\text{м}$$

$$C = 0.001\text{м}$$

расчет толщины трубной доски

допускаемое напряжение анкерных связей

$\sigma_{ac} := 162\text{МПа}$

$K := 1$

внутренний диаметр трубной доски  $d_{т.д.} := d_{к\_вн} \quad d_{т.д.} = 3540\text{мм}$

трубки расположены по треугольнику

$C_1 := 0.935 \quad C_2 := 0.65$

$t/d := 1.4$

$$\phi := C_1 - C_2 \cdot \frac{1}{t/d} \quad \phi = 0.471$$

$$S_{т.д.} := 0.393K \cdot d_{т.д.} \cdot \sqrt{\frac{p_{св}}{\phi \cdot \sigma}} \quad K = 1 \quad S_{т.д.} = 176.346\text{мм}$$

$$d_{т.д.} = 3.54\text{м}$$

$$p_{св} = 900000\text{Па}$$

$$\phi = 0.471$$

$$\sigma = 1.19 \times 10^8\text{Па}$$

т.к. толщина трубной доски получилась больше 90мм, то необходимо установить анкерные связи

$$d_{ac} := 0.5 \cdot d_{к\_вн} \quad d_{к\_вн} = 3.54\text{м} \quad d_{ac} = 1770\text{мм}$$

число анкерных связей  $n_{ac} := 6$

найдем диаметр анкерных связей из условия, что  $S_{т.д.} := 90\text{мм}$

$$A := \left( \frac{S_{т.д.}}{0.393 \cdot K \cdot d_{т.д.}} \right)^2 \cdot \phi \cdot \sigma \quad S_{т.д.} = 0.09\text{м} \quad K = 1 \quad A = 234421.659\text{Па}$$

$$d_{т.д.} = 3.54\text{м}$$

$$\phi = 0.471$$

$$\sigma = 1.19 \times 10^8\text{Па}$$

$$n_{ac} \cdot f_{ac} := \frac{(p_{св} - A) \cdot (K \cdot d_{т.д.})^2}{3.82 \cdot \sigma_{ac} \cdot \left[ 1 - \frac{d_{ac}}{(K \cdot d_{т.д.})} \right]} \quad p_{св} = 900000\text{Па} \quad A = 234421.659\text{Па} \quad n_{ac} \cdot f_{ac} = 0.026956\text{м}^2$$

$$d_{т.д.} = 3.54\text{м}$$

$$\sigma_{ac} = 1.62 \times 10^8\text{Па}$$

$$d_{ac} = 1.77\text{м}$$

$$K = 1$$

$$f_{ac} := \frac{n_{ac} \cdot f_{ac}}{n_{ac}} \quad f_{ac} = 0.00449\text{м}^2$$

$$D_{ac} := \sqrt{\frac{4 \cdot n_{ac} \cdot f_{ac}}{\pi \cdot n_{ac}}} \quad D_{ac} = 75.632\text{мм}$$

примем диаметр анкерных связей

$D_{ac} := 76\text{мм}$