

## I. Расчет азотной ванны предварительного охлаждения

### 1. Определение исходных параметров

Как было сказано выше, азотная ванна предварительного охлаждения применяется на большинстве режиме, поэтому целесообразно проводить расчет на наиболее нагруженном режиме, а для остальных выполнить поверочные расчеты для определения недорекуперации.

В рамках курсового проекта расчет будет проведен для наиболее нагруженного режима – предпускового, а поверочный расчет выполнен для пускового режима.

#### **Техническое задание.**

Произвести расчет ванны предварительного азотного охлаждения для сателлитного рефрижератора КГУ-1600/4.5К в предпусковом режиме, выполнить поверочный расчет в пусковом режиме.

Поток газообразного гелия с массовым расходом  $G_{He} = 180 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$  сжимается в винтовом компрессоре «Каскад-110/30» от давления  $p_0$  до давления  $p$ . Сжатый гелий, охлажденный до температуры окружающей среды проходит предварительный теплообменный аппарат II, где охлаждается до состояния 3 и затем проходит ванну с жидким азотом III, кипящем при давлении  $p_{N_2} = 0.125$  МПа, охлаждаясь до состояния 4, захлаживает криостаты с магнитами до температуры  $T_m = 90^\circ\text{K}$ . По мере понижения температуры обратного потока из магнитов включается прямой поток гелия, установка переходит на пусковой режим с подачей дополнительного расхода жидкого гелия из центрального ожижителя ОГ-1000.

Температура гелия на входе в азотную ванну:  $T_{He_{вх}} = 177.9 \text{ K}$ ;

Температура жидкого азота при давлении 0.125 МПа:  $T_{N_2} = 79.2 \text{ K}$  ;

Недорекуперация на холодном конце (по рекомендации [1, стр. 108]):  $\Delta T_2 = 5.18 \text{ K}$ ;

Максимальный температурный напор:  $T_1 = 98.72 \text{ K}$ ;

Расход гелия:  $G_{He} = 180 \text{ кг/ч}$ ;

Расход жидкого азота:  $G_{N_2} = 500 \text{ кг/ч}$ , с учетом рекуперации холода паров.

*Давление.* Давление сжатого гелия на входе в криогенный блок принимается равным  $p_2 = 2$  МПа. Давление на входе в азотную ванну считаем равным  $p_2$ , т.к. практически величина потеря давления невелика.

*Температуры и разность температур.* Температура кипения жидкого азота  $T_{0N_2} = 79.18^\circ\text{K}$ . Разность температур на теплом конце предварительного теплообменника между потоком сжатого гелия и обратным потоком сжатого гелия, и обратным потоком низкого давления  $\Delta T^{II} = 15^\circ\text{K}$ . Разность температур между кипящим азотом и гелием, выходящим

из азотной ванны,  $\Delta T_{79^\circ K} = 4^\circ K$ . Температура азота на выходе из ванны предварительного охлаждения  $T_{1N_2} = 81^\circ K$ .

*Теплопритоки из окружающей среды.* Принимаем следующие значения теплопритоков по данным [1, табл. 1.6]: для цикла жидкого азота – 20%.

*Теплоемкая масса.* Теплоемкая масса сателлитного рефрижератора и магнитов Нуклотрона – 80 тонн. Расчетное время захолаживания – 80-100 часов (предпусковой и пусковой режимы).

*Расходы потоков.* Расход сжимаемого гелия  $G_{He} = 180 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ , расход жидкого азота в ванне предварительного охлаждения  $G_{N_2} = 500 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$  (в режиме реконденсации). Расход жидкого азота, идущего на предварительное охлаждение, расходуется на компенсацию тепловой нагрузки, которая складывается из тепла, отнимаемого от сжатого гелия при предварительном охлаждении, холодопроизводительностью, вводимой в цикл в интервале изменения температуры от  $T_3$  до  $T_{0N_2}$ , а также теплопритоков извне к азотному экрану, азотной ванне и к части работающей на этом уровне сателлитному рефрижератору.

- Теплоприток из окружающей среды к части рефрижератора, расположенной в зоне температур  $T_3$  до  $T_{0N_2}$ :

$$q_3^{T>79^\circ K} = 0.2 \cdot (h_3 - h_4) = 0.2 \cdot (-969.4 + 1123) = 0.2 \cdot 148.6 \approx 29.72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{He}}$$

- Расход жидкого азота на увеличение холодопроизводительности:

$$G_{xN_2} = \frac{G_{N_2}}{G_{He}} + \frac{q_3^{T>79^\circ K}}{h_{1N_2} - h_{0N_2}} = \frac{500}{180} + \frac{29.72}{-224 + 422.2} \approx 2.78 + 0.15 \approx 2.93 \frac{\text{кг}_{LN_2}}{\text{кг}_{He}}$$

Пересчитанный расход жидкого азота:

$$G_{N_2} = G_{xN_2} \cdot G_{He} = 2.93 \cdot 180 = 527.4 \text{ кг}_{LN_2}$$

Таблица 1.1. Сводные данные материальных и тепловых потоков азотной ванны.

| Аппарат/Х-ка                          | Поток                   | Расход,<br>кг/ч | Температура, °К |       | Тепловая нагрузка |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------|
|                                       |                         |                 | Вход            | Выход |                   |
| Азотная ванна<br>(предпусковой режим) | Гелий высокого давления | 180             | 177.9           | 84.36 | 25.61 кВт         |
|                                       | Азот                    | 527.4           | 79.2            | 79.2  |                   |
| Аппарат/Х-ка                          | Поток                   | Расход,<br>кг/ч | Температура, °К |       | Тепловая нагрузка |
|                                       |                         |                 | Вход            | Выход |                   |
| Азотная ванна<br>(пусковой режим)     | Гелий высокого давления | 180             | 109.3           | 84.2  | 6.89 кВт          |
|                                       | Азот                    | 527.4           | 79.2            | 79.2  |                   |

## 2. Расчет аппарата в предпусковом режиме

Охлаждение гелия высокого давления в азотной ванне осуществляется за счет кипения жидкого азота при  $p_{N_2} = 0.125$  МПа. Для подобного аппарата характерно наличие высокого значения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего азота  $\alpha_{\text{кип}} = (1750 \div 2300) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  и более низкого  $\alpha$  от потока газа к стенке, который и является определяющим при расчете коэффициента теплопередачи.

*Среднелогарифмическая разность температур:*

$$\tau_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{98.7 - 5.18}{\ln\left(\frac{98.7}{5.18}\right)} = 31.74 \text{ K}$$

$\Delta T_1$  – разность температур между входящим в азотную ванну потоком гелия высокого давления и кипящим азотом на входе,  $\Delta T_1 = T_3 - T_{0N_2} = 177.9 - 79.2 = 98.7 \text{ K}$ ,  $\Delta T_2$  – разность температур между потоком гелия высокого давления, выходящим из азотной ванны и азотом на выходе,  $\Delta T_2 = T_4 - T_{1N_2} = 84.18 - 79.18 = 5.18^\circ \text{ K}$ .

1. Основные параметры гелия высокого давления:

*Средняя температура*

$$T_{\text{срHe}} = \frac{T_3 + T_4}{2} = \frac{177.9 + 84.18}{2} = 131.1 \text{ K}$$

*Среднее значение теплоемкости*

$$C_{P\text{He}} = 5.21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$$

*Среднее значение теплопроводности*

$$\lambda_{\text{He}} = 0.0903 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$$

*Среднее значение вязкости*

$$\mu_{\text{He}} = 1.16 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

*Удельный объем*

$$\nu_{\text{He}} = 0.139 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

2. Параметры трубок:

$$d_{\text{вн}} = 16 \text{ мм}; \quad \delta = 1 \text{ мм}; \quad D_{\text{зм}} = 480 \text{ мм}$$

$$d_{\text{н}} = d_{\text{вн}} + 2 \cdot \delta = 16 + 2 = 18 \text{ мм}$$

Определим критический удельный тепловой поток, для обоснования принимаемых в дальнейшем формул ([1, стр. 109]):

$$q_{кр} = 1.7 \cdot 10^4 \cdot \frac{0.138^{0.5} \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)^{\frac{13}{24}} \cdot (\gamma_2 \cdot 48 \cdot 80.1)^{\frac{1}{3}} \cdot (1.12 \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{24}}}{\gamma_1^{\frac{5}{12}} \cdot 0.48^{\frac{1}{6}}} = 178974.9 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

Где,  $\gamma_1 = \frac{1}{0.001192}$ ;  $\gamma_2 = \frac{1}{1.3}$ ;  $q_{кр} = 208008.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

3. Заходность змеевика:  $n_3 = 5$

4. Скорость потока в трубках:

$$w = \frac{4 \cdot G_{He} \cdot \nu_{He}}{n_3 \cdot \pi \cdot d_{BH}^2} = \frac{4 \cdot 180 \cdot 0.139}{5 \cdot 3.14 \cdot 0.016^2} = 6.92 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

5. Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d_{BH}}{\mu_{He} \cdot \nu_{He}} = \frac{6.92 \cdot 0.016}{1.16 \cdot 10^{-5} \cdot 0.139} = 68351.3$$

тогда, течение – турбулентное.

6. Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_{He} \cdot C_{P_{He}}}{\lambda_{He}} = \frac{1.16 \cdot 10^{-5} \cdot 5.21}{0.0903} = 0.672$$

7. Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.023 \cdot 68351.3^{0.8} \cdot 0.672^{0.4} = 114.68$$

8. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{He} = \frac{Nu \cdot \lambda_{He}}{d_{BH}} = \frac{114.68 \cdot 0.0903}{0.016} = 816.2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Величину удельной тепловой нагрузки определим графически. При этом исходим из того, что удельные тепловые потоки со стороны гелия и азота равны между собой. Для удобства относим удельный тепловой поток к единице внешней поверхности трубки ([1, стр. 108]).

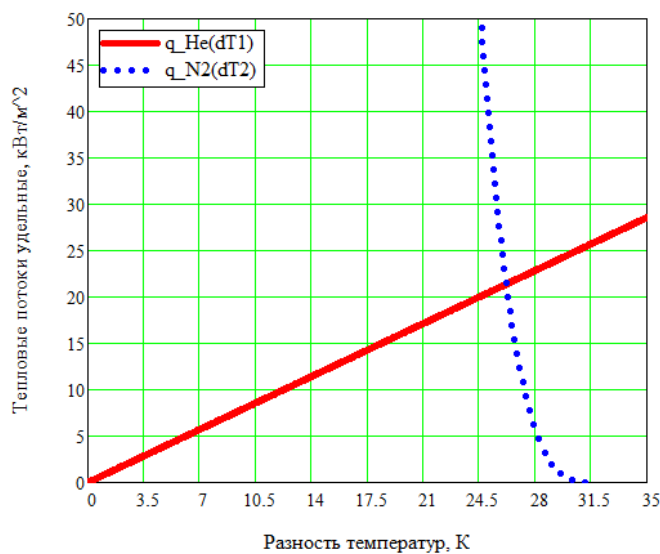


Рис. 1.1. Графическое определение  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $q$

9. Из графического решения:

$$q = 21389.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad \Delta T_{1\text{cp}} = 26.2 \text{ K}; \quad \Delta T_{2\text{cp}} = 5.53 \text{ K}$$

10. Коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему азоту:

$$\alpha_{N_2} = A_1 \cdot q^{0.7} = 3.6 \cdot 21389.1^{0.7} = 3867.3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$$

Где,  $A_1$  [1, стр. 107], с учетом пересчета на Вт от ккал:

$$A_1 = 7.22 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\gamma_2 \cdot 48}{\gamma_1 \cdot \gamma_2} \right)^{\frac{1}{30}} \cdot \left( \frac{\gamma_1}{1.12 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{0.138^{0.75}}{(2.25 \cdot 10^{-5})^{0.45} \cdot 0.48^{\frac{7}{60}} \cdot 80.1^{0.37}}$$

11. Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{He}} + \frac{1}{\alpha_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{1}{816.2} + \frac{1}{3867.3}} = 673.98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$$

12. Площадь теплообменной поверхности одной трубки:

$$F = \frac{Q}{n_3 \cdot k \cdot \tau_m} = \frac{25610}{5 \cdot 673.98 \cdot 31.74} = 0.239 \text{ м}^2$$

13. Длина одной трубки:

$$l_1 = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{вн}}} = \frac{0.239}{3.14 \cdot 0.016} = 4.76 \text{ м}$$

14. С учетом запаса 50% [1, стр. 109]:

$$L = 1.5 \cdot l_1 = 1.5 \cdot 4.76 = 7.14 \text{ м, принимаем } L = 7.15 \text{ м}$$

15. Число витков одной трубки:

16.

$$n_{\text{в}} = \frac{L}{\pi \cdot D_{\text{зм}}} = \frac{7.15}{3.14 \cdot 0.48} = 4.74, \text{ принимаем } n_{\text{в}} = 4.8$$

17. Принимаем пятизаходный двухслойный змеевик, тогда высота навивки и диаметры навивок – из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} L_{\text{H}} + L_{\text{B}} = L; \quad H_{\text{H}} = H_{\text{B}} \\ H_{\text{H}} = \frac{L_{\text{H}}}{\pi \cdot D_{\text{зм}}} \cdot d_{\text{H}} \cdot n_{\text{зм}} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{L_{\text{H}}}{\pi \cdot D_{\text{зм}}} \cdot n_{\text{зм}} \\ H_{\text{B}} = \frac{L_{\text{B}}}{\pi \cdot D_{\text{внзм}}} \cdot d_{\text{H}} \cdot n_{\text{зм}} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{L_{\text{B}}}{\pi \cdot D_{\text{внзм}}} \cdot n_{\text{зм}} \end{cases}$$

$$H = 0.31 \text{ м}; D_{3\text{м}} = 480 \text{ мм}; D_{\text{вн3м}} = 400 \text{ мм}$$

18. Падение напора при прохождении змеевика:

a. Коэффициент Дарси [1, стр. 110]:

$$\zeta = \frac{1}{(1.82 \cdot \lg(Re) - 1.64)^2} = \frac{1}{(1.82 \cdot \lg(68351.3) - 1.64)^2} = 0.0195$$

b. Падение давления:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{w^2}{2 \cdot \nu_{He}} \cdot \frac{L}{d_{\text{вн}}} = 0.0195 \cdot \frac{6.92^2}{2 \cdot 0.139} \cdot \frac{7.15}{0.018} = 1.47 \text{ кПа}$$

### 3. Расчет аппарата в пусковом режиме

Выполним поверочный расчет азотной ванны на предпусковом режиме, данные для расчета: тепловая нагрузка  $Q = 6.89 \text{ кВт}$ ;

Удельный тепловой поток:

$$q = \frac{Q}{n_3 \cdot \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot L} = \frac{6890}{5 \cdot 3.15 \cdot 0.018 \cdot 7.15} = 3410 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

1. Основные параметры гелия высокого давления:

*Средняя температура*

$$T_{\text{срHe}} = \frac{T_3 + T_4}{2} = \frac{109.3 + 84.18}{2} = 96.83 \text{ К}$$

*Среднее значение теплоемкости*

$$C_{P_{\text{He}}} = 5.22 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

*Среднее значение теплопроводности*

$$\lambda_{\text{He}} = 0.0742 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

*Среднее значение вязкости*

$$\mu_{\text{He}} = 9.83 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

*Удельный объем*

$$\nu_{\text{He}} = 0.1034 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

2. Скорость потока в трубках:

$$w = \frac{4 \cdot G_{\text{He}} \cdot \nu_{\text{He}}}{n_3 \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 180 \cdot 0.1034}{5 \cdot 3.14 \cdot 0.016^2} = 5.14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3. Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{вн}}}{\mu_{\text{He}} \cdot \nu_{\text{He}}} = \frac{5.14 \cdot 0.016}{9.83 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1034} = 80994.7$$

тогда, течение – турбулентное.

4. Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_{\text{He}} \cdot C_{p\text{He}}}{\lambda_{\text{He}}} = \frac{9.83 \cdot 10^{-6} \cdot 5.22}{0.0742} = 0.692$$

5. Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.023 \cdot 80994.7^{0.8} \cdot 0.692^{0.4} = 167.7$$

6. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{He}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{He}}}{d_{\text{вн}}} = \frac{167.7 \cdot 0.0742}{0.016} = 777.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Величину удельной тепловой нагрузки определим графически. При этом исходим из того, что удельные тепловые потоки со стороны гелия и азота равны между собой. Для удобства относим удельный тепловой поток к единице внешней поверхности трубки ([1, стр. 108]).

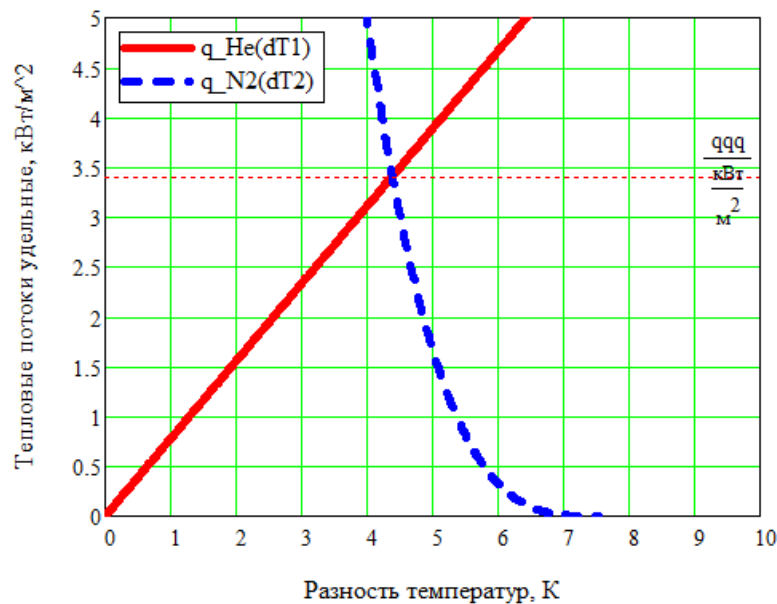


Рис. 1.2. Графическое определение  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $q$

7. Из графического решения:

$$q = 3412.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad \Delta T_{1\text{ср}} = 4.39 \text{ K}; \quad \Delta T_{2\text{ср}} = 7.58 \text{ K}$$

8. Коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему азоту:

$$\alpha_{N_2} = A_1 \cdot q^{0.7} = 3.6 \cdot 3412.5^{0.7} = 1070.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}}$$

9. Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{He}} + \frac{1}{\alpha_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{1}{777.7} + \frac{1}{1070.1}} = 450.4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$$

10. Недорекуперация на холодном конце из уравнения:

$$\tau_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{30.12 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{30.12}{\Delta T_2}\right)} = \frac{Q}{n_3 \cdot k \cdot F} = \frac{6890}{5 \cdot 450.4 \cdot 0.239}$$

$$\Delta T_2 = 3.86 \text{ К}$$

11. Температура гелия на выходе из ванны:

$$T_{He_{\text{вых}}} = T_{N_2} + \Delta T_2 = 79.2 + 3.86 = 83.06 \text{ К}$$

Поверочный расчет показал, что азотная ванна также может быть применена на пусковом режиме.



## II. Прочностные расчет

### 1. Расчет толщины стенок цилиндрической обечайки сосуда

В общем случае нагруженное состояние можно представить так, как на рисунке 4.1.

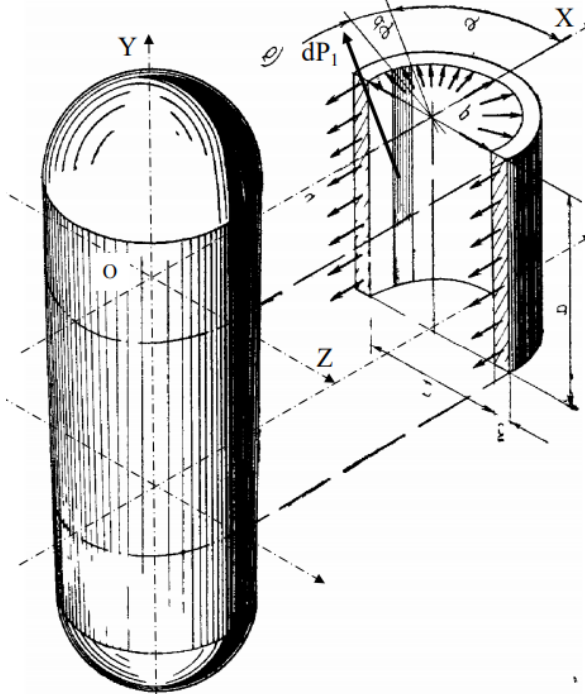


Рис. 2.1. Окружные напряжения в стенках сосуда

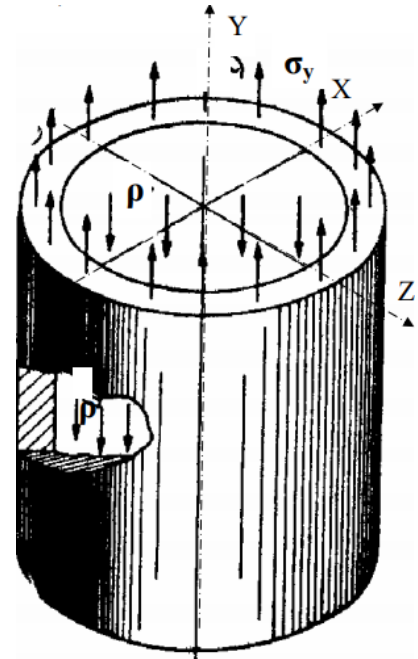


Рис. 2.2. Меридиональные напряжения в стенках сосуда

Двумя горизонтальными поперечными сечениями (в плоскости XOZ), расстояние между которыми  $h$ , и одним продольным (вертикальным), проходящими через ось сосуда (в плоскости YOZ), выделим его часть и рассмотрим условие ее равновесия. Для этого выделим элементарную полоску, ограниченную углом  $d\varphi$  и высотой  $h$ . На эту полоску действует внешняя сила  $dP_1$  приложенная в центре тяжести элементарной полоски от давления  $p$  внутри сосуда:

$$dP_1 = p \left( \frac{D}{2} \cdot d\varphi \right) \cdot h$$

где  $\frac{D}{2} \cdot d\varphi$  – длина дуги  $l$  с углом  $d\varphi$ . Проекция силы на ось X равна:

$$dP_{1x} = dP_1 \cdot \cos(\varphi) = p \left( \frac{D}{2} \cdot d\varphi \right) \cdot h \cdot \cos(\varphi)$$

Чтобы найти равнодействующую всех сил давления по элементарным полоскам проинтегрируем выражение  $dP_{1x}$  от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ , результат интегрирования:

$$P_{1x} = p \cdot D \cdot h$$

В вертикальном сечении в материале стенок возникают только нормальные напряжения  $\sigma_x$  (окружные или кольцевые), которые в тонкостенном сосуде можно считать распределяются равномерно по толщине стенок. Сила, действующая на каждой из площадок вертикального сечения, равна:

$$P_{2x} = \sigma_x \cdot A = \sigma_x \cdot \delta_{об} \cdot h$$

Тогда уравнение равновесия системы (выделенной части) будет иметь вид:

$$2 \cdot P_{2x} - P_{1x} = 0$$

Или:

$$2 \cdot \sigma_x \cdot \delta_{об} \cdot h = p \cdot D \cdot h$$

Откуда:

$$\sigma_x = \sigma_0 = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \delta_{об}}$$

Рассекаем сосуд одним поперечным сечением (плоскость XOZ), перпендикулярным к его продольной оси и рассмотрим условие равновесия оставленной части (рисунок 4.2).

В поперечном сечении в материале стенок обечайки действуют только нормальные напряжения  $\sigma_y$  - меридиональные, равномерно распределенные по кольцевой площади сечения. Суммарная сила, действующая по кольцевому сечению равна:

$$P_{1y} = \sigma_y \cdot \pi \cdot D \cdot \delta_{об}$$

Результирующая сила от давления газа на днище сосуда равна:

$$P_{2y} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Из условия равновесия определим  $\sigma_y$  нормальные напряжения в кольцевом сечении параллельном оси Y (меридиональные):

$$P_{1y} - P_{2y} = 0$$

Или:

$$\sigma_y \cdot \pi \cdot D \cdot \delta_{об} - p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0$$

Окончательно получим:

$$\sigma_y = \sigma_m = \frac{p \cdot D}{4 \cdot \delta_{об}}$$

Анализ зависимостей показывает, что  $\sigma_0$  вдвое больше  $\sigma_m$ . Поэтому разрушение цилиндрических резервуаров, труб имеет характер продольных трещин.

В каждой точке стенки обечайки сосуда действуют два нормальных напряжения  $\sigma_0$  - окружное и  $\sigma_m$  - меридиональное, т.е. материал испытывает сложное напряженное состояние – в данном случае – плоское напряженное состояние или двухосное растяжение.

Учитывая соотношение между величинами  $\sigma_0 = \sigma_m$ , получаем значение главных напряжений:

$$\sigma_1 = \sigma_0; \quad \sigma_2 = \sigma_m; \quad \sigma_3 = 0$$

Эквивалентное напряжение:

$$\sigma_{э\kappa\theta} = \sqrt{0.5 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$$

При  $\sigma_3 = 0$ :

$$\sigma_{э\kappa\theta} = \sqrt{0.5 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_m^2 - \sigma_0 \cdot \sigma_m}$$

Подставим  $\sigma_0$ :

$$\sigma_{э\kappa\theta} = \sqrt{3} \frac{p \cdot D}{4 \cdot \delta_{об}} \leq [\sigma]$$

$$[\sigma] = \sigma_T / [n], \text{ где } [n] = 2.5 \dots 3.0$$

Обечайка изготавливается путем сварки из стального листа, сварной шов стыковой, принимаем дополнительный коэффициент  $\varphi = 0.8$  – шов односторонний ручной с подкладкой.

Дополнительные добавки для компенсации коррозии, минусов допусков материала и технологическая добавка:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

$C_1$  - прибавка для компенсации коррозии (эрозии), которая зависит от срока службы сосуда и агрессивности среды. При двустороннем контакте с корродирующей средой (внутри сосуда рабочая среда, а снаружи обогреваемая рубашка) прибавку определяют как сумму величин двусторонней коррозии;

$C_2$  - прибавка для компенсации минусового допуска материала;

$C_3$  - технологическая прибавка, предусматривающая компенсацию утонения стенки сосуда при гибке, штамповке и т.д. Прибавки  $C_2$  и  $C_3$  по рекомендации ГОСТ 14249-81 учитывают в тех случаях, когда их суммарная значение превышает 5% номинальной толщины листа. Поэтому при расчете сосудов на прочность в учебных целях прибавки  $C_2$  и  $C_3$  можно не учитывать.

Принимаем добавку на компенсацию коррозии -  $C_1 = 3$  мм (с учетом срока службы 20 лет). Окончательно получим:

$$\delta_{об} \geq \frac{\sqrt{3} \cdot p \cdot D}{4 \cdot [\sigma] \cdot \varphi} + C_1 \text{ с условием } \frac{\delta - C}{D} \leq 0.1$$

Материал обечайки - 03X13AG19, предел текучести -  $[\sigma] = 160$  МПа, диаметр обечайки -  $D = 620$  мм.

Принимаем  $\delta_{об} = 4$  мм. Коэффициент запаса:

## 2. Расчет эллиптических днищ обечайки сосуда

Для диаметра сосуда  $D_{\text{вн}} = 620$  мм принимаем днища по ГОСТ 6533-78 (действ.).

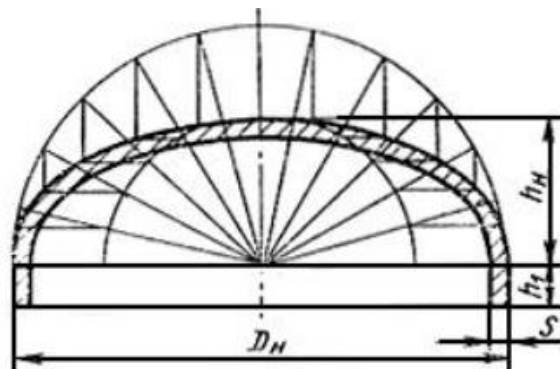


Рис. 2.3. Определение параметров эллиптических днищ

### Параметры принятого днища:

Давление с учетом высоты столба жидкости:

$$p_s = p + \rho \cdot g \cdot h = 0.125 + 808 \cdot 9.81 \cdot 0.6 \cdot 10^{-6} = 0.13 \text{ МПа}$$

Поверочный расчет днища. Радиус кривизны в вершине днища:

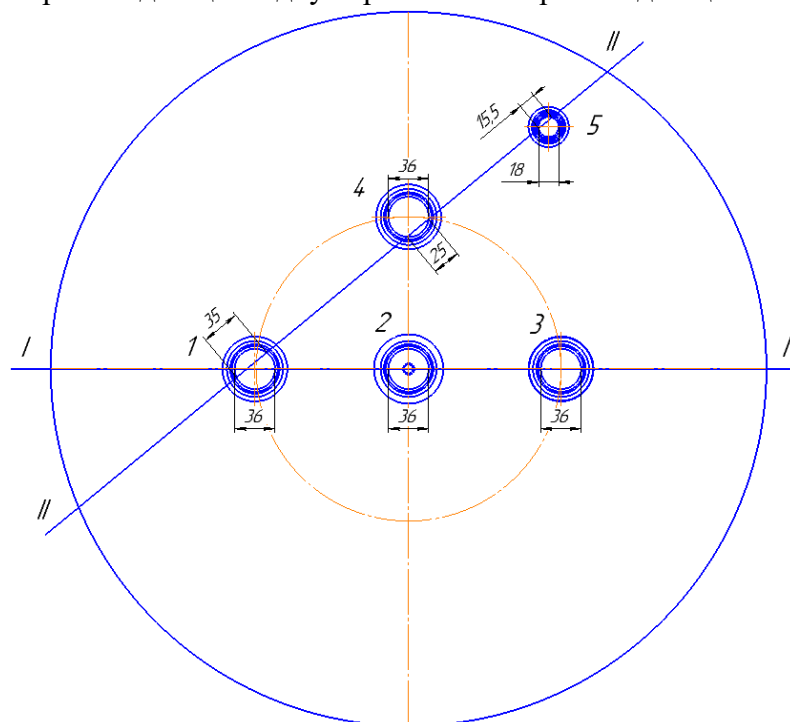


Рис. 2.4. Схема верхнего днища – крышки

$$R = \frac{D d_i^2}{4 \cdot h_n} = \frac{630^2}{4 \cdot 157} = 632 \text{ мм}$$

Коэффициент ослабления  $K_0$  по ГОСТ 14249-89, для схемы верхнего днища:

$$d_i = \max[(d_1 + d_2 + d_3); (b_1 + b_4 + b_5)] = \max[108; 78] = 108 \text{ мм}$$

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_i}{D}\right)^3}{1 - \frac{d_i}{D}}} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{108}{630}\right)^3}{1 - \frac{108}{630}}} = 1.096$$

Минимальная толщина стенки днища:

$$s_{min} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0.5 \cdot p} = \frac{0.13 \cdot 632}{2 \cdot 0.8 \cdot 160 - 0.5 \cdot 0.125} = 0.32 \text{ мм}$$

С учетом добавки на коррозию:  $s_{min} = 3.31 \text{ мм}$

Допустимое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot s_{min} \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{(R + 0.5 \cdot s_{min}) \cdot K_0} = \frac{2 \cdot 3.31 \cdot 0.8 \cdot 160}{(632 + 0.5 \cdot 3.31) \cdot 1.096} = \frac{847.36}{633.66} = 1.22 \text{ МПа}$$

Коэффициент запаса:

$$k = \frac{[p]}{p} = \frac{1.34}{0.13} = 9.4$$

Принятое днище удовлетворяет условиям прочности.

### 3. Расчет трубок прямого потока гелия

Наиболее нагруженные по давлению трубки змеевика, помещенные в азотную ванну, проведем расчет коэффициента запаса для принятых трубок.

Давление в трубках:  $p = 2 \text{ МПа}$ ;

Параметры трубок:  $d_n = 18 \text{ мм}$ ;  $d_{вн} = 16 \text{ мм}$ ;  $\delta = 1 \text{ мм}$

Материал: Труба ДКРМ 18.0x1.0 М1р ГОСТ 32598-2013

Предел текучести:  $[\sigma] = 180 \text{ МПа}$ ;

Минусовой допуск по толщине:  $C_{11} = 0.15 \text{ мм}$

Расчетная толщина стенки трубы:

$$s_R = \frac{p \cdot d_n}{2 \cdot [\sigma] + p} = \frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 180 + 2} = 0.1 \text{ мм}$$

Толщина с учетом отрицательных допусков:

$$S = s_R + C_{11} = 0.25 \text{ мм}$$

Допустимое рабочее давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (\delta - S)}{d_n - (\delta - S)} = \frac{2 \cdot 180 \cdot (1 - 0.25)}{18 - (1 - 0.25)} = \frac{360 \cdot 0.75}{18 - 0.75} = 15.65 \text{ МПа}$$

Коэффициент запаса по давлению:

$$k = \frac{[p]}{p} = \frac{15.65}{2} = 7.825$$

Коэффициент запаса по толщине:

$$k_\delta = \frac{\delta}{S} = \frac{1}{0.25} = 4$$

Коэффициенты запаса выше нормы, однако принять трубки меньшей толщины невозможно, ввиду сложности навивки и необходимости обеспечения жесткости навивки.

#### 4. Расчет транспортировочных проушин

Схема нагружения проушины:

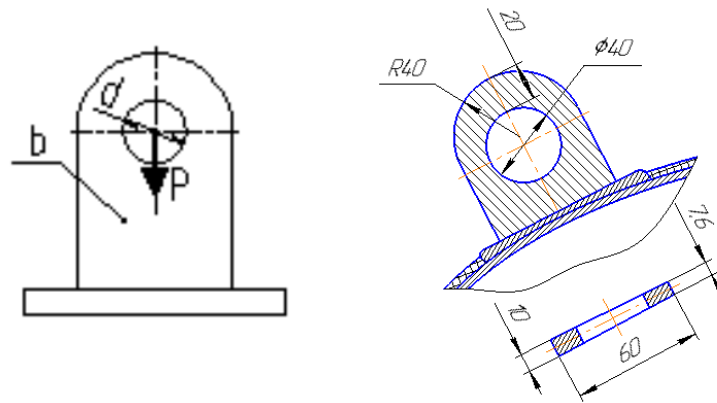


Рис. 2.5. Схема нагружения транспортировочных проушин и их габариты

Усилие, действующее на проушину:  $P = 1100 \text{ Н}$ ;

Толщина проушины (в узком месте):  $b = 7,6 \text{ мм}$ ;

Диаметр отверстие в проушине:  $d = 40 \text{ мм}$ ;

Ширина проушины:  $l = 60 \text{ мм}$ ;

Расстояние от кромки до отверстия:  $h = 20 \text{ мм}$ ;

Допускаемое напряжение растяжения:  $[\sigma_p] = 0.55 \cdot [\sigma_T] = 0.5 \cdot 210 = 105 \text{ МПа}$ ;

Допускаемое напряжение среза  $[\tau_{cp}] = 0.25 \cdot [\sigma_T] = 0.2 \cdot 210 = 42 \text{ МПа}$ ;

Допускаемые напряжение на смятие  $[\sigma_{cm}] = 0.75 \cdot [\sigma_T] = 0.7 \cdot 210 = 147 \text{ МПа}$ ;

Расчет на растяжение:

Площадь сечения проушины:

$$F_p = (l - d) \cdot b = (60 - 40) \cdot 7.6 = 76 \text{ мм}^2$$

Расчетное напряжение растяжения:

$$\sigma_p = \frac{P}{F_p} = \frac{1100}{76} = 14.48 \text{ МПа}$$

Запас по прочности на растяжение:

$$n_p = \frac{[\sigma_p]}{\sigma_p} = \frac{14.48}{105} = 7.25$$

Расчет на срез:

Площадь среза:

$$F_{cp} = h \cdot b = 20 \cdot 7.6 = 152 \text{ мм}^2$$

Расчетное напряжение среза:

$$\tau_{cp} = \frac{P}{F_{cp}} = \frac{1100}{152} = 7.24 \text{ МПа}$$

Запас прочности на срез:

$$n_{cp} = \frac{[\tau_{cp}]}{\tau_{cp}} = \frac{42}{7.24} = 5.8$$

Расчет на смятие:

Площадь смятия:

$$F_{cm} = d \cdot b = 40 \cdot 7.6 = 304 \text{ мм}^2$$

Расчетное напряжение смятия:

$$\sigma_{cm} = \frac{P}{F_{cm}} = \frac{1100}{304} = 3.62 \text{ МПа}$$

Запас прочности на смятие:

$$n_{cm} = \frac{[\sigma_{cm}]}{\sigma_{cm}} = \frac{147}{3.62} = 40.6$$

Принятые проушины подходят по критерию прочности. Дополнительно был проведен расчет модели на статические нагрузки с учетом температуры 80 К в программе SolidWorks Simulation. Наиболее нагруженным оказался участок цилиндрического отверстия. Результаты исследования представлены на рисунке 4.6.

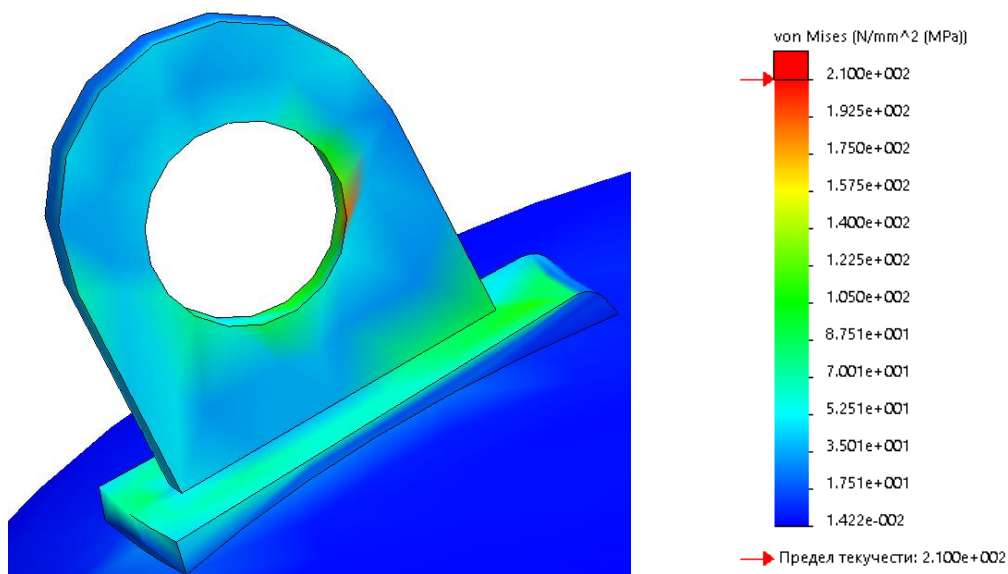


Рис. 2.6. Результат статического исследования SolidWorks

## 5. Расчет стыкового сварного соединения днища и обечайки

Расчет сварного шва проведем по СП 16.13330.2017 СНиП П-23-81.

Исходные данные:

Осевая сила, проходящая через центр тяжести соединения:  $P = 1100 \text{ Н}$ ;

Коэффициент условий работы:  $\varphi = 0.8$ ;

Рабочая длина шва:  $l_{\text{ш}} = \pi \cdot D = 3.141 \cdot 0.62 = 1.948 \text{ м}$ ;

Наименьшая из толщин соединяемых элементов:  $t = 3.35 \text{ мм}$ ;

Расчетное сопротивление стали 03Х13АГ19:  $R_y = 210 \text{ МПа}$ ;

Сварной шов выполнен с подкладным кольцом.

Расчет:

Расчетное сопротивление стыковых сварных швов:

$$R_{wy} = 0.85 \cdot R_y = 0.85 \cdot 210 = 178.5 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности шва:

$$\frac{P}{t \cdot l_{\text{ш}}} \leq R_{wy} \cdot \varphi$$
$$\frac{1100}{3.35 \cdot 1.948} = 0.168 \text{ МПа} \leq 168 \text{ МПа}$$

Сварной шов удовлетворяет условию прочности. Принимаем минимальный катет сварного шва для наименьшей из толщин соединяемых элементов.