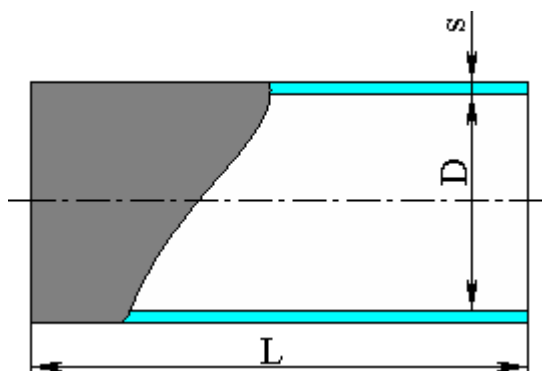


# 1. Обечайка цилиндрическая №1



## 1.1. Исходные данные

Материал:	09Г2С
Внутр. диаметр, D:	800 мм
Толщина стенки, s:	6 мм
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c <sub>1</sub> :	2 мм
Прибавка для компенсации минусового допуска, c <sub>2</sub> :	0 мм
Прибавка технологическая, c <sub>3</sub> :	0 мм
Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c:	2 мм
Длина обечайки, L:	1000 мм

Коэффициенты прочности сварных швов:

Продольный шов:

Тип шва	Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, автоматический
Контроль 100%	Да
φ <sub>р</sub>	1

Окружной шов:

Тип шва	Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, автоматический
Контроль 100%	Да
φ <sub>т</sub>	1

## Расч "т в рабочих условиях

### 1.1.1. Условия нагружения:

Расчётная температура, T:	200 °С
Расчётное внутреннее избыточное давление, p:	0.07 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	3503 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	905.4 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	8688 Н

### 1.1.2. Результаты расчёта:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 200 °С (рабочие условия):

$$[\sigma] = 165 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 200 °С:

$$E = 1.81 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## 1.2. Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89

*Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 2.3.1.).*

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = \frac{(0.07 \cdot 800)}{2 \cdot 165 \cdot 1 - 0.07} + 2 = 2.1697 \text{ мм}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 165 \cdot 1 \cdot (6 - 2)}{800 + 6 - 2} = 1.642 \text{ МПа}$$

$$1.642 \text{ МПа} \geq 0.07 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((6-2)/0.1697 - 0.8) \cdot (800 \cdot (6-2))^{1/2} = 2576 \text{ мм}$$

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} = 2 \cdot (800 \cdot (6-2))^{1/2} = 113.1 \text{ мм}$$

### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4.).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.142 \cdot (800 + 6 - 2) \cdot (6 - 2) \cdot 165 = 1.667 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.81 \cdot 10^5 \cdot 800^2 / (2.4) \cdot (100 \cdot (6-2) / 800)^{2.5} = 2.645 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 7409 \text{ мм}$$



Приведённая длина:  $l_{\text{пр}} = 1.482 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 1.482 \cdot 10^4 / (800 + 6 - 2) = 51.9$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.142 \cdot (800 + 6 - 2) \cdot (6 - 2) \cdot 1.81 \cdot 10^5 / (2.4) \cdot (3.142 / 51.9)^2 = 2.792 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 2.645 \cdot 10^6, 2.792 \cdot 10^6 \} = 2.645 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = \frac{1.667 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (1.667 \cdot 10^6 / 2.645 \cdot 10^6)^2}} = 1.41 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$1.41 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 8688 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 2.3.5.).

#### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 2.3.3.).

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = [F]_{\text{пр}} \cdot \varphi_t = 1.667 \cdot 10^6 \cdot 1 = 1.667 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 800 / 4 \cdot 1.667 \cdot 10^6 = 0.3334 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\text{пр}} = 800 / 4 \cdot 1.667 \cdot 10^6 = 0.3334 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 800 / 3.5 \cdot 2.645 \cdot 10^6 = 0.6046 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\text{пр}}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = \frac{0.3334 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (0.3334 \cdot 10^6 / 0.6046 \cdot 10^6)^2}} = 2.92 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\text{пр}}, M_{\text{уст}} \} = \min \{ 0.3334 \cdot 10^6, 2.92 \cdot 10^5 \} = 2.92 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

$$2.92 \cdot 10^5 \text{ Н м} \geq 3503 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 2.3.6).

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2) \cdot 165 = 0.4147 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7409 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1.81 \cdot 10^5 \cdot (6 - 2)^2 / 2.4 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 800 \cdot (6 - 2) / 7409^2)}{7409^2} = 0.5218 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = \frac{0.4147 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (0.4147 \cdot 10^6 / 0.5218 \cdot 10^6)^2}} = 0.3247 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$0.3247 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 905.4 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 2.3.7).

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

$$\text{Проверка условия устойчивости: } \left( \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1 \right)$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 8688 / 1.41 \cdot 10^6 + 3503 / 2.92 \cdot 10^5 + (905.4 / 0.3247 \cdot 10^6)^2 = 0.01817 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.

$$\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} \leq 1.0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} = (0 + 0.07 \cdot 3.142 \cdot 800^2 / 4) / 1.667 \cdot 10^6 + 3503 / 0.3334 \cdot 10^6 = 0.03161 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

## 1.3. Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0.07 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6 - 2)) - 8688 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2)) + 4 \cdot 3503 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6 - 2))}{1} = 4.404 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0.07 \cdot (800 + 6) / (2 \cdot (6 - 2)) = 7.053 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв1}} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = \sqrt{4.404^2 - 4.404 \cdot 7.053 + 7.053^2} = 6.17 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

$$\begin{aligned} \max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв1}}\} &\leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi \\ \max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв1}}\} &= \max\{4.404; 6.17\} = 6.17 \text{ МПа} \\ [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi &= 165 \cdot 1 = 165 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$= \frac{0.07 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6 - 2)) - 8688 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2)) - 4 \cdot 3503 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6 - 2))}{1} = 0.9196 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (0.9196^2 - 0.9196 * 7.053 + 7.053^2)^{1/2} = 6.641 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} = \max\{0.9196; 6.641\} = 6.641 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \varphi = 165 * 1 = 165 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления:

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1.0$$

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 8688 / 1.41 \cdot 10^6 + 3503 / 2.92 \cdot 10^5 = 0.01816$$

Условие устойчивости выполнено

## Расчѣт в условиях монтажа

### 1.3.1. Условия нагружения при монтаже:

Расчѣтная температура, T:	20	°C
Расчѣтное внутреннее избыточное давление, p:	0	МПа
Расчѣтный изгибающий момент, M:	3463	Н м
Расчѣтное поперечное усилие, Q:	898.6	Н
Расчѣтное осевое сжимающее усилие, F:	5188	Н

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 20 °C (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_c^{20} / 1.1 = 1 * 300 / 1.1 = 272.7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### 1.4. Расчѣт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 * 272.7 * 1 * (6 - 2) / (800 + 6 - 2) = 2.714 \text{ МПа}$$

2.714 МПа >= 0 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

#### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4.).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.142 * (800 + 6 - 2) * (6 - 2) * 272.7 = 2.755 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = 310 * 10^{-6} * 1.99 \cdot 10^5 * 800^2 / (1.8) * (100 * (6 - 2) / 800)^{2.5} = 0.3877 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Расчѣтная длина для расчѣта от действия осевой силы:

$$l_{\text{р}} = 7409 \text{ мм}$$



Приведѣнная длина:  $l_{\text{пр}} = 1.482 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.83 * 1.482 \cdot 10^4 / (800 + 6 - 2) = 51.9$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.142 * (800 + 6 - 2) * (6 - 2) * 1.99 \cdot 10^5 / (1.8) * (3.142 / 51.9)^2 = 0.4092 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{Е}} = \min\{[F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}}\} = \min\{0.3877 \cdot 10^7, 0.4092 \cdot 10^7\} = 0.3877 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{е}}}\right)^2}} = \frac{2.755 \cdot 10^6}{(1 + (2.755 \cdot 10^6 / 0.3877 \cdot 10^7)^2)^{1/2}} = 2.246 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2.246 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 5188 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 2.3.5).

#### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 2.3.3.).

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = [F]_{\text{п}} \cdot \varphi_t = 2.755 \cdot 10^6 \cdot 1 = 2.755 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 800 / 4 \cdot 2.755 \cdot 10^6 = 0.5511 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\text{п}} = 800 / 4 \cdot 2.755 \cdot 10^6 = 0.5511 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{е1}} = 800 / 3.5 \cdot 0.3877 \cdot 10^7 = 0.8863 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{е}}}\right)^2}} = \frac{0.5511 \cdot 10^6}{(1 + (0.5511 \cdot 10^6 / 0.8863 \cdot 10^6)^2)^{1/2}} = 0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min\{M_{\text{пр}}, M_{\text{уст}}\} = \min\{0.5511 \cdot 10^6, 0.468 \cdot 10^6\} = 0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 3463 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 2.3.6.).

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\text{п}} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2) \cdot 272.7 = 0.6854 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7409 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{е}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{l^2}\right] = \frac{2.4 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot (6 - 2)^2 / 1.8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 800 \cdot (6 - 2) / 7409^2)}{H} = 0.765 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{п}}}{[Q]_{\text{е}}}\right)^2}} = \frac{0.6854 \cdot 10^6}{(1 + (0.6854 \cdot 10^6 / 0.765 \cdot 10^6)^2)^{1/2}} = 0.5105 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$0.5105 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 898.6 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 2.3.7.).

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

$$\text{Проверка условия устойчивости: } \left( \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1 \right)$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 5188 / 2.246 \cdot 10^6 + 3463 / 0.468 \cdot 10^6 + (898.6 / 0.5105 \cdot 10^6)^2 = 0.009713 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

## 1.5. Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6-2)) - 5188 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6-2)) + 4 \cdot 3463 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6-2))}{4 \cdot (6-2)} = 1.206 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0 \cdot (800 + 6) / (2 \cdot (6-2)) = 0 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв}1} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (1.206^2 - 1.206 \cdot 0 + 0^2)^{1/2} = 1.206 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв}1}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв}1}\} = \max\{1.206; 1.206\} = 1.206 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 272.7 \cdot 1 = 272.7 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6-2)) - 5188 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6-2)) - 4 \cdot 3463 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6-2))}{4 \cdot (6-2)} = (-2.239) \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = ((-2.239)^2 - (-2.239) \cdot 0 + 0^2)^{1/2} = 2.239 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} \leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} = \max\{|-2.239|; 2.239\} = 2.239 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi = 272.7 \cdot 1 = 272.7 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления:

$$\frac{F}{F} + \frac{M}{M} \leq 1.0$$

$$\frac{F}{F} + \frac{M}{M} = 5188 / 2.246 \cdot 10^6 + 3463 / 0.468 \cdot 10^6 = 0.00971$$

Условие устойчивости выполнено

### Расч "т в условиях испытаний (Гидроиспытания)

#### 1.5.1. Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T:	20 °C
Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p:	0.1746 МПа
Расчётный изгибающий момент, M:	2132 Н м
Расчётное поперечное усилие, Q:	565.7 Н
Расчётное осевое сжимающее усилие, F:	1.927 · 10 <sup>4</sup> Н

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С при температуре 20 °C :

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_c^{20} / 1.1 = 1 \cdot 300 / 1.1 = 272.7 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости при температуре 20 °C:

$$E^{20} = 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

## 1.6. Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ 14249-89

Гладкая обечайка, нагруженная внутренним избыточным давлением (п. 2.3.1.).

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0.1746 \cdot 800) / (2 \cdot 272.7 \cdot 1 - 0.1746) + 2 = 2.2561 \text{ мм}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 272.7 \cdot 1 \cdot (6 - 2) / (800 + 6 - 2) = 2.714 \text{ МПа}$$

2.714 МПа >= 0.1746 МПа

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления:

$$d_0 = 2 \cdot \left( \frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s-c)} = 2 \cdot ((6-2)/0.2561 - 0.8) \cdot (800 \cdot (6-2))^{1/2} = 1676 \text{ мм}$$

Минимальное расстояние между “одиночными” штуцерами:

$$b_0 = 2 \cdot \sqrt{D \cdot (s-c)} = 2 \cdot (800 \cdot (6-2))^{1/2} = 113.1 \text{ мм}$$

### Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 2.3.4.).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{\text{пр}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 3.142 \cdot (800 + 6 - 2) \cdot (6 - 2) \cdot 272.7 = 2.755 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости:

$$[F]_{\text{Е1}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2.5} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot 800^2 / (1.8) \cdot (100 \cdot (6-2) / 800)^{2.5} = 0.3877 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия осевой силы:

$$l_F = 7409 \text{ мм}$$



Приведённая длина:  $l_{\text{пр}} = 1.482 \cdot 10^4 \text{ мм}$

Гибкость:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.83 \cdot 1.482 \cdot 10^4 / (800 + 6 - 2) = 51.9$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости:

$$[F]_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 3.142 \cdot (800 + 6 - 2) \cdot (6 - 2) \cdot 1.99 \cdot 10^5 / (1.8) \cdot (3.142 / 51.9)^2 = 0.4092 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости:

$$[F]_{\text{Е}} = \min \{ [F]_{\text{Е1}}, [F]_{\text{Е2}} \} = \min \{ 0.3877 \cdot 10^7, 0.4092 \cdot 10^7 \} = 0.3877 \cdot 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\text{пр}}}{[F]_{\text{Е}}} \right)^2}} = \frac{2.755 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (2.755 \cdot 10^6 / 0.3877 \cdot 10^7)^2}} = 2.246 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$2.246 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 1.927 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная изгибающим моментом (п. 2.3.5.).

#### Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 2.3.3.).

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F] = [F]_{\text{пр}} \cdot \varphi_t = 2.755 \cdot 10^6 \cdot 1 = 2.755 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны растяжения:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F] = 800 / 4 \cdot 2.755 \cdot 10^6 = 0.5511 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности со стороны сжатия:

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D}{4} \cdot [F]_{\text{пр}} = 800 / 4 \cdot 2.755 \cdot 10^6 = 0.5511 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{\text{Е1}} = 800 / 3.5 \cdot 0.3877 \cdot 10^7 = 0.8863 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости:

$$[M]_{\text{уст}} = \frac{[M]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_{\text{пр}}}{[M]_{\text{Е}}} \right)^2}} = \frac{0.5511 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (0.5511 \cdot 10^6 / 0.8863 \cdot 10^6)^2}} = 0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\text{пр}}, M_{\text{уст}} \} = \min \{ 0.5511 \cdot 10^6, 0.468 \cdot 10^6 \} = 0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м}$$

$$0.468 \cdot 10^6 \text{ Н м} \geq 2132 \text{ Н м}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, нагруженная поперечным усилием (п. 2.3.6.).

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{\pi} = 0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 0.25 \cdot 3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2) \cdot 272.7 = 0.6854 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Расчётная длина для расчёта от действия поперечной силы:

$$l_Q = 7409 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости:

$$[Q]_{\text{E}} = \frac{2.4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[ 0.18 + 3.3 \frac{D(s - c)}{l^2} \right] = \frac{2.4 \cdot 1.99 \cdot 10^5 \cdot (6 - 2)^2 / 1.8 \cdot (0.18 + 3.3 \cdot 800 \cdot (6 - 2) / 7409^2)}{1} = 0.765 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = \frac{0.6854 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (0.6854 \cdot 10^6 / 0.765 \cdot 10^6)^2}} = 0.5105 \cdot 10^6 \text{ Н}$$

$$0.5105 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 565.7 \text{ Н}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

### Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 2.3.7.).

Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

$$\text{Проверка условия устойчивости: } \left( \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1 \right)$$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 1.927 \cdot 10^4 / 2.246 \cdot 10^6 + 2132 / 0.468 \cdot 10^6 + (565.7 / 0.5105 \cdot 10^6)^2 = 0.01314 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.

$$\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} \leq 1.0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} = (0 + 0.1746 \cdot 3.142 \cdot 800^2 / 4) / 2.755 \cdot 10^6 + 2132 / 0.5511 \cdot 10^6 = 0.03571 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

## 1.7. Дополнительный расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 51274-99

Продольные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p \cdot (D + s)}{4 \cdot (s - c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} = \frac{0.1746 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6 - 2)) - 1.927 \cdot 10^4 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2))}{+ 4 \cdot 2132 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6 - 2))} = 7.938 \text{ МПа}$$

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D + s)}{2 \cdot (s - c)} = 0.1746 \cdot (800 + 6) / (2 \cdot (6 - 2)) = 17.59 \text{ МПа}$$

Эквивалентные напряжения на наветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв1}} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = \sqrt{(7.938^2 - 7.938 \cdot 17.59 + 17.59^2)^{1/2}} = 15.26 \text{ МПа}$$

Условие прочности на наветренной стороне

$$\begin{aligned} \max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв1}}\} &\leq [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi \\ \max\{\sigma_{x1}; \sigma_{\text{экв1}}\} &= \max\{7.938; 15.26\} = 15.26 \text{ МПа} \\ [\sigma]_{\text{к}} \cdot \varphi &= 272.7 \cdot 1 = 272.7 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Условие прочности выполнено

Продольные напряжения на подветренной стороне:

$$= \frac{0.1746 \cdot (800 + 6) / (4 \cdot (6 - 2)) - 1.927 \cdot 10^4 / (3.142 \cdot 800 \cdot (6 - 2))}{- 4 \cdot 2132 / (3.142 \cdot 800^2 \cdot (6 - 2))} = 5.817 \text{ МПа}$$



$$\sigma_{x2} = \frac{p \cdot (D+s)}{4 \cdot (s-c)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (s-c)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (s-c)}$$

Эквивалентные напряжения на подветренной стороне:

$$\sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y + \sigma_y^2} = (5.817^2 - 5.817 \cdot 17.59 + 17.59^2)^{1/2} = 15.52 \text{ МПа}$$

Условие прочности на подветренной стороне

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} \leq [\sigma]_k \cdot \varphi$$

$$\max\{\sigma_{x2}; \sigma_{\text{экв}2}\} = \max\{5.817; 15.52\} = 15.52 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_k \cdot \varphi = 272.7 \cdot 1 = 272.7 \text{ МПа}$$

Условие прочности выполнено

Условие устойчивости для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления:

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1.0$$

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 1.927 \cdot 10^4 / 2.246 \cdot 10^6 + 2132 / 0.468 \cdot 10^6 = 0.01314$$

Условие устойчивости выполнено