

Третий Конвертер SO₂

R 104/3

16017-43/6-K03.001PP

Расчеты

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Взам. ине. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | 24 | | |

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Общие положения | 3 |
| 2. | Штуцер В1 | 4 |
| 3. | Днище коническое поз. 12 | 9 |
| 4. | Опора поз. 70 | 18 |
| 5. | Цилиндрический участок опоры | 21 |
| 6. | Переходный участок опоры | 22 |
| 7. | Опорный узел элемента 'Опора поз. 70' | 24 |
| 8. | Нагрузки на фундамент | 27 |
| 9. | Обечайка поз. 5 | 28 |
| 10. | Обечайка поз. 6 | 32 |
| 11. | Днище коническое поз. 10,11 | 37 |
| 12. | Штуцер А1 | 44 |
| 13. | Список литературы | 50 |
| 14. | Лист регистрации изменений | 51 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--|--|--|--|--|---|------|---------|-----------|----------|------|------|-------------|---------|------|--|---------|------------|-----------|----------|--|----------|------------|-----------|----------|--|-----------|----------|-----------|----------|--|----------|---------|-----------|----------|------|------|--------|---|---|----|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 26.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 16017-43/6-K03.001PP | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Третий Конвертер SO ₂ R 104/3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Расчеты | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 5%;">1</td> <td style="width: 10%;">Зам.</td> <td style="width: 15%;">1211-16</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">[Подпись]</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">16.10.16</td> </tr> <tr> <td>Изм.</td> <td>Лист</td> <td>№ документа</td> <td>Подпись</td> <td>Дата</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Разраб.</td> <td>Пушкинский</td> <td style="text-align: center;">[Подпись]</td> <td style="text-align: center;">16.10.16</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Проверил</td> <td>Мартьянова</td> <td style="text-align: center;">[Подпись]</td> <td style="text-align: center;">16.10.16</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Н. контр.</td> <td>Груздева</td> <td style="text-align: center;">[Подпись]</td> <td style="text-align: center;">16.10.16</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Утвердил</td> <td>Ильичев</td> <td style="text-align: center;">[Подпись]</td> <td style="text-align: center;">16.10.16</td> </tr> </table> </div> <div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">Лит.</td> <td style="width: 10%;">Лист</td> <td style="width: 10%;">Листов</td> </tr> <tr> <td>T</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">51</td> </tr> </table> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 5px;"> Гипрогазоочистка <small>Инженеринговая компания</small> </div> | | | | | 1 | Зам. | 1211-16 | [Подпись] | 16.10.16 | Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | | Разраб. | Пушкинский | [Подпись] | 16.10.16 | | Проверил | Мартьянова | [Подпись] | 16.10.16 | | Н. контр. | Груздева | [Подпись] | 16.10.16 | | Утвердил | Ильичев | [Подпись] | 16.10.16 | Лит. | Лист | Листов | T | 2 | 51 |
| 1 | Зам. | 1211-16 | [Подпись] | 16.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Разраб. | Пушкинский | [Подпись] | 16.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Проверил | Мартьянова | [Подпись] | 16.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Н. контр. | Груздева | [Подпись] | 16.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Утвердил | Ильичев | [Подпись] | 16.10.16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Лит. | Лист | Листов | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | 2 | 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1. Общие положения

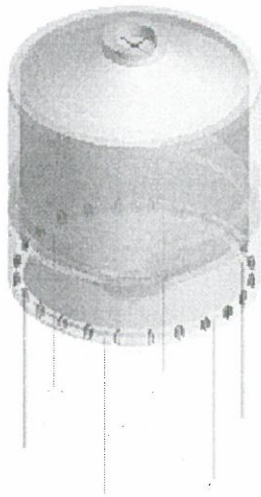
Расчет на прочность выполнен на ЭВМ по программе «Пассат 2.10», разработанной ООО НТП «Трубопровод».

Данный расчет рассматривать совместно с чертежом 16017-43/6-K03.001BO.

Исходные данные для расчета

| | |
|--------------------|-----------------|
| Вид испытаний | Пневмоиспытания |
| Давление испытаний | 0,06 МПа |

Общий вид аппарата

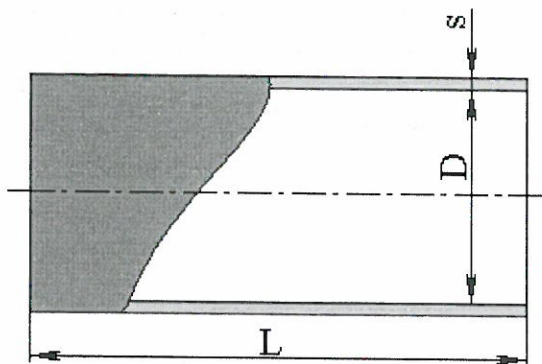


| | | | | |
|-------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Ив. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | |

| | | | | |
|------|------|-------------|----------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

| | | | | |
|----------------------|--|--|--|------|
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | Лист |
| | | | | 3 |

2. Штуцер В1



Исходные данные

| | |
|---|---------------------|
| Материал: | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Внутр. диаметр, D: | 1000 мм |
| Толщина стенки, s: | 10 мм |
| Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ : | 2 мм |
| Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ : | 0,8 мм |
| Прибавка технологическая, c ₃ : | 0 мм |
| Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: | 2,8 мм |
| Длина обечайки, L: | 150 мм |

Расчёт в рабочих условиях при внутреннем давлении

Условия нагружения:

| | |
|--|--------------|
| Расчётная температура, T: | 450 °C |
| Расчётное внутреннее избыточное давление, p: | 0,02000 МПа |
| Расчётный изгибающий момент, M: | 0,03700 тс м |
| Расчётное поперечное усилие, Q: | 0,06000 тс |
| Расчётное осевое растягивающее усилие, F: | 2,25 тс |

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 71$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

E = $1,4 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,02000 \cdot 1000) / (2 \cdot 71 \cdot 1 - 0,02000) + 2,8 = 2,941 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 71 \cdot 1 \cdot (10 - 2,8) / (1000 + 10 - 2,8) = 1,015 \text{ МПа}$$

1,015 МПа \geq 0,02000 МПа

Заключение: Условие прочности выполнено

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1000 + 10 - 2,8) \cdot (10 - 2,8) \cdot 71 \cdot 1 = 161,8 \text{ тс}$$

| | |
|----------------|----------------|
| Инев. № подл. | Подпись и дата |
| Инев. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 28.10.16 |
| Инев. № подл. | 34 |

| | | | | |
|------|------|-------------|---------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | Подпись | 28.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

4

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\Sigma}}\right)^2}} = 40,44 / (1 + (40,44 / 227,3)^2)^{1/2} = 39,81 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1013 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\Sigma}}\right)^2}} = 40,15 / (1 + (40,15 / 147,4)^2)^{1/2} = 38,74 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 0,03700 / 39,81 + (0,06000 / 38,74)^2 = 0,9317 \cdot 10^{-3} \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

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

Проверка условия прочности: $\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (2,25 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 1000^2 / 4) / 161,8 + 0,03700 / 40,44 = 0,02454 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 450 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,01000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 0,03700 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 0,06000 тс

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 2,25 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 71 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

$$E = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1013 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}, \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 / 1 \cdot (0,01000 / (10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5)) \cdot (1013 / 1000)^{0,4}; 1,2 \cdot 0,01000 \cdot 1000 / (2 \cdot 71 - 0,01000) \} + 2,8 = 4,276 \text{ мм}$$

| | |
|----------------|----------------|
| Изм. № подл. | Подпись и дата |
| 34 | 30.06.10.16 |
| Взам. инв. № | Инд. № дубл. |
| 34 | |
| Подпись и дата | Подпись и дата |
| 34 | 30.06.10.16 |

| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 30.06.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

5

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости :

$$[p]_e = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1000 / (2,4 \cdot 1 \cdot 1013) \cdot (100 \cdot (10 - 2,8) / 1000)}{2,5} = 0,5266 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности :

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 71 \cdot (10 - 2,8) / (1000 + 10 - 2,8) = 1,015 \text{ МПа}$$

0,4675 МПа \geq 0,01000 МПа

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1000 + 10 - 2,8) \cdot (10 - 2,8) \cdot 71 \cdot 1 = 161,8 \text{ тс}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 40,44 / (1 + (40,44 / 227,3)^2)^{1/2} = 39,81 \text{ тс м}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 40,15 / (1 + (40,15 / 147,4)^2)^{1/2} = 38,74 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,01000 / 0,4675 + 0 / 0 + 0,03700 / 39,81 + (0,06000 / 38,74)^2 = 0,02232 \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

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

$$\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (2,25 + 0 \cdot 3,142 \cdot 1000^2 / 4) / 161,8 + 0,03700 / 40,44 = 0,01483 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

| | |
|---|------------------------------|
| Расчётная температура, T: | 20 °C |
| Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p: | 0,06000 МПа |
| Расчётный изгибающий момент, M: | 0 тс м |
| Расчётное поперечное усилие, Q: | 0,1062 · 10 ⁻⁶ тс |
| Расчётное осевое растягивающее усилие, F: | 0,03053 тс |

| | | | | | |
|----------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | Лист |
| 34 | 26.10.16 | | | | 6 |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | | |

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{c/20} / n_T = 1 * 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,06000 \cdot 1000) / (2 \cdot 233,3 \cdot 1 - 0,06000) + 2,8 = 2,929 \text{ mm}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot (10 - 2,8) / (1000 + 10 - 2,8) = 3,336 \text{ МПа}$$

$$3,336 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 * (1000 + 10 - 2,8) * (10 - 2,8) * 233,3 * 1 = 531,6 \text{ тс}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1013 \text{ mm}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 131,9 / (1 + (131,9 / 279,4)^2)^{1/2} = 119,3 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 0/0 + (0,1062 \cdot 10^{-6} / 119,3)^2 = 0,792 \cdot 10^{-18} \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

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

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


$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{wp}}} = (0,03053 + 0,06000 \cdot 3,142 \cdot 1000^2 / 4) / 531,6 + 0 / 0 = 0,008922 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 132,9 / (1 + (132,9 / 430,7)^2)^{1/2} = 127 \text{ тс м}$$

Расчёт в условиях монтажа

| | | | | |
|------|------|-------------|---|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 |  | 28.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

7

Условия нагружения при монтаже:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 0 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 0,1746·10⁻⁶ тс

Расчётное осевое растягивающее усилие, F: 0,05036 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (10 - 2,8) / (1000 + 10 - 2,8) = 3,639 \text{ МПа}$$

$$3,639 \text{ МПа} \geq 0 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1000 + 10 - 2,8) \cdot (10 - 2,8) \cdot 254,5 \cdot 1 = 579,9 \text{ тс}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 1013 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 143,9 / (1 + (143,9 / 279,4)^2)^{1/2} = 128 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 0/0 + 0/0 + (0,1746 \cdot 10^{-6} / 128)^2 = 0,1862 \cdot 10^{-17} \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 145 / (1 + (145 / 430,7)^2)^{1/2} = 137,4 \text{ тс м}$$

| | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|
| Инов. № подл. | Подпись и дата | Инов. № дубл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инов. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | | | |

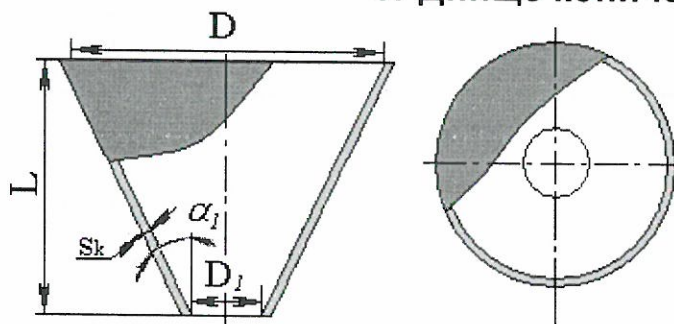
| | | | | |
|------|------|-------------|----------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

8

3. Днище коническое поз. 12

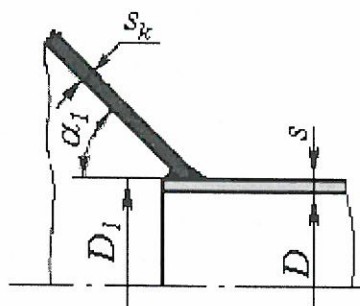


Исходные данные

| | |
|---|---------------------|
| Материал обечайки: | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Диаметр большего основания, D: | 6000 мм |
| Диаметр меньшего основания, D ₁ : | 1020 мм |
| Толщина стенки, s _k : | 14 мм |
| Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ : | 2 мм |
| Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ : | 0,8 мм |
| Прибавка технологическая, c ₃ : | 0 мм |
| Сумма прибавок, c: | 2,8 мм |
| Длина обечайки, L: | 2150 мм |
| Смещение левого основания по горизонтали, X ₀ : | 0 мм |
| Смещение левого основания по вертикали, Y ₀ : | 0 мм |

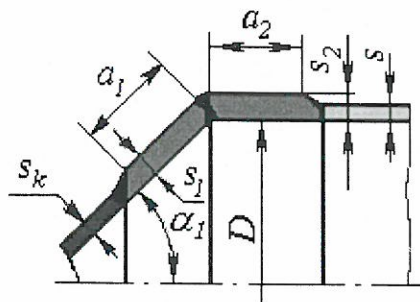
Левый (нижний) узел соединения:

Соединение конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра без укрепления



Правый (верхний) узел соединения:

Соединение конической и цилиндрической обечаек



Параметры узла соединения :

Материал элемента s₁: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

| | | | | | | | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| Инев. № подл. | Подпись и дата | Инев. № дубл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инев. № дубл. | Подпись и дата | Инев. № подл. |
| 94 | 26.10.16 | | | | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

9

Материал элемента s₂: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Толщина стенки вставки, s₁: 20 мм

Толщина стенки вставки, s₂: 20 мм

Длина участка вставки, a₁: 20 мм

Длина участка вставки, a₂: 200 мм

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 450 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,01000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 10,08 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 42,78 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

[σ] = 56,5 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

E = 1,4 · 10⁵ МПа

Допускаемое наружное давление из условия прочности :

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 56,5 \cdot (14 - 2,8) / (5705 / \cos(49,19) + 14 - 2,8) = 0,1448 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости :

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_E} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 9159 / (2,4 \cdot 1 \cdot 3290) \cdot (100 \cdot (14 - 2,8) / 9159)^{2,5}}{9159^{2,5}} = 0,01766 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_E} \right)^2}} = 0,1448 / (1 + (0,1448 / 0,01766)^2)^{1/2} = 0,01753 \text{ МПа}$$

0,01753 МПа ≥ 0,01000 МПа

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности :

$$[M]_{\pi} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = \frac{5972}{4} \cdot 3,142 \cdot 5972 \cdot (14 - 2,8) \cdot 56,5 \cdot 1 \cdot \cos(49,19) = 1158 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\pi} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = \frac{9176}{4} \cdot 9176 \cdot (14 - 2,8) \cdot 56,5 \cdot \cos(49,19) = 2735 \text{ тс м}$$

$$[M]_E = \frac{D_F}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = \frac{9176}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot (9176 \cdot \cos(49,19))^2 / 2,4 \cdot (100 \cdot (14 - 2,8) / 9176)^{2,5}}{9176^{2,5}} = 887,4 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \min \{ M_{\pi}, M_{уст} \} = \min \{ 1158, 844,1 \} = 844,1 \text{ тс м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 8.6.2)

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

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

| | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Подпись и дата | | | | |
| Инв. № дубл. | | | | |
| Взам. инв. № | | | | |
| Подпись и дата | 30.06.10.16 | | | |
| Инв. № подл. | 34 | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | 30.06.10.16 | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист
10

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0,01000 / 0,01753 + 42,78 / 325,6 + 10,08 / 844,1 = 0,7137 \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_k = 56,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала соседнего элемента:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_s = 71 \text{ МПа}$$

$$0,4 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

$$\text{Проверка условия прочности: } \left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |(-0,01000) / 0,4 + 2,281 / 39,19| + 0,03700 / 9,798 = 0,03698 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s₁ (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 71 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s₂:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 71 \text{ МПа}$$

$$0,09149 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

$$\text{Проверка условия прочности: } \left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |(-0,01000) / 0,09149 + 42,42 / 228,1| + 9,304 / 342,1 = 0,1039 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в рабочих условиях при внутреннем давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 450 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,02000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 3,691 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 52,03 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$$[\sigma] = 56,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

$$E = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

| | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------|--------------|----------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Инв. № дубл. | Инв. № | Взам. инв. № | Подпись и дата | Инв. № подл. |
| 34 | 26.10.16 | | | | | |

| | | | | | |
|------|------|-------------|----------|----------------------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 | 16017-43/6-K03.001PP | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | 11 |

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 * 56,5 * 1 * (14 - 2,8) / (5705 / \cos(49,19) + 14 - 2,8) = 0,1448 \text{ МПа}$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 5972 / 4 * 3,142 * 5972 * (14 - 2,8) * 56,5 * 1 * \cos(49,19) = 1158 \text{ тс}$$

$$[M]_{\text{г}} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 9176 / 4 * 9176 * (14 - 2,8) * 56,5 * \cos(49,19) = 2735 \text{ тс}$$

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_v} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 9176 / 3.5 \cdot 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot (9176 \cdot \cos(49,19))^2 / 2,4 \cdot (100 \cdot (14 - 2,8) / 9176)^{2.5} = 887,4 \text{ тс}$$

$$[M] = \min \{M_{\text{нп}}; M_{\text{гсг}}\} = \min \{1158, 844,1\} = 844,1 \text{ тс м}$$

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

Проверка условия устойчивости: $\left\{ \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right\}$

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0/0 + 52,03/325,6 + 3,691/844,1 = 0,1642 \leq 1$$

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

$$\text{Проверка условия прочности: } \left(\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} \leq 1 \right)$$

$$\frac{F+p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{np}}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 5972^2 / 4) / 775,9 + 3,691 / 1158 = 0,07539 \leq 1$$

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности: $\left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**
Обечайка, работающая под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.

Проверка условия прочности:
$$\left(\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} \leq 1 \right)$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 5972^2 / 4) / 775,9 + 3,691 / 1158 = 0,07539 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**
Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:
Свойства материала несущей обечайки:
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С (рабочие условия):
 $[\sigma]_k = 56,5$ МПа
Свойства материала соседнего элемента:
Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С (рабочие условия):
 $[\sigma]_s = 71$ МПа
0,4 МПа \geq 0,02000 МПа
Заклучение: **Условие прочности выполнено**
Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности:
$$\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

| | | | | |
|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Име. № инв. | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | | | | 30.06.10.16 |

| | | | | |
|------|------|-------------|---------|--------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | С.И.И. | С.И.И. |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист 12

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \right| = |0,02000 / 0,4 + 2,281 / 39,19| + 0,03700 / 9,798 = 0,112 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 71 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 71 \text{ МПа}$$

$$0,09149 \text{ МПа} \geq 0,02000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

$$\text{Проверка условия прочности: } \left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \right| \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \right| = |0,02000 / 0,09149 + 51,66 / 228,1| + 3,414 / 342,1 = 0,4551 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T : 20 $^\circ\text{C}$

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,06000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M : $0,2271 \cdot 10^{-6}$ тс м

Расчётное осевое растягивающее усилие, F : 2,336 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot (14 - 2,8) / (5705 / \cos(49,19) + 14 - 2,8) = 0,598 \text{ МПа}$$

$$0,598 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{т}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 5972 / 4 \cdot 3,142 \cdot 5972 \cdot (14 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot \cos(49,19) = 4784 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{н}} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 9176 / 4 \cdot 9176 \cdot (14 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot \cos(49,19) = 1,13 \cdot 10^4 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D_F}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 9176 / 3,5 \cdot 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (9176 \cdot \cos(49,19))^2 / 1,8 \cdot (100 \cdot (14 - 2,8) / 9176)^{2,5} = 1682 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ M_{\text{тп}} ; M_{\text{уст}} \} = \min \{ 4784, 1664 \} = 1664 \text{ тс м}$$

| | | | | | |
|----------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | Инв. № подл. |
| 34 | 28.06.10.16 | | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | | Лист |
| | | | | | 13 |

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

Проверка условия прочности:
$$\left(\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} \leq 1 \right)$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{гр}}} = (0 + 0,06000 \cdot 3,142 \cdot 5972^2 / 4) / 3204 + 1,782 / 4784 = 0,05282 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]_{\text{к}}^{20} = \eta \cdot R_{\text{e}20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала соседнего элемента:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]_{\text{с}}^{20} = \eta \cdot R_{\text{e}20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

$$1,45 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности:
$$\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,06000 / 1,45 + 0,05716 / 145,8| + 0 / 36,46 = 0,04176 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]_{\text{и}}^{20} = \eta \cdot R_{\text{e}20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]_{\text{2}}^{20} = \eta \cdot R_{\text{e}20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

$$0,3007 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности:
$$\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,06000 / 0,3007 + 9,348 / 749,5| + 1,645 / 1124 = 0,2135 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях монтажа

| | | | | |
|----------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. име. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 28.06.10.16 | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |
| | | | | |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | Лист |
| | | | | 15 |

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (14 - 2,8) / (5705 / \cos(49,19) + 14 - 2,8) = 0,6523 \text{ МПа}$$

$$0,6523 \text{ МПа} \geq 0 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности :

$$[M]_{\text{пр}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 5972 / 4 \cdot 3,142 \cdot 5972 \cdot (14 - 2,8) \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot \cos(49,19) = 5219 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 9176 / 4 \cdot 9176 \cdot (14 - 2,8) \cdot 254,5 \cdot \cos(49,19) = 1,232 \cdot 10^4 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D_F}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 9176 / 3,5 \cdot 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (9176 \cdot \cos(49,19))^2 / 1,8 \cdot (100 \cdot (14 - 2,8) / 9176)^{2,5} = 1682 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \min \{ M_{\text{пр}} ; M_{\text{уст}} \} = \min \{ 5219, 1666 \} = 1666 \text{ тс м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 8.6.2)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0 / 0 + 13,05 / 637 + 3,226 / 1666 = 0,02243 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия монтажа):

$$[\sigma]_{\text{k}}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала соседнего элемента:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия монтажа):

$$[\sigma]_{\text{s}}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия монтажа):

$$[\sigma]_{\text{i}}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия монтажа):

$$[\sigma]_{\text{2}}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

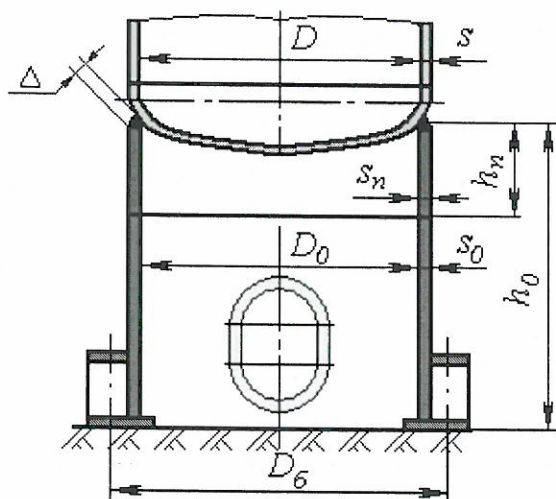
$$\text{Проверка условия прочности: } \left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0 / 0,328 + 12,68 / 817,7| + 2,975 / 1226 = 0,01794 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

| | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|---------|--------------|----------------------|--------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Име. № дубл. | Име. № | Взам. име. № | Подпись и дата | Име. № подл. |
| 34 | 26.10.16 | | | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | 16017-43/6-K03.001PP | Лист |
| | | | | | | 17 |

4. Опора поз. 70 Опорная обечайка



Исходные данные

Несущий элемент: Днище коническое поз. 12

Высота опоры, h_0 : 2000 мм

Диаметр верхнего основания, D_0 : 6000 мм

Опорный элемент

Группа патрубков

Цилиндрический участок:

Материал: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Толщина стенки, s_0 : 16 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, s_1 : 0 мм

Прибавка для компенсации минусового допуска, s_2 : 0,8 мм

Прибавка технологическая, s_3 : 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, s : 0,8 мм

Фундамент:

Бетон: В10 (М150)

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 450 °C

Расчётный изгибающий момент в верхнем сечении: 3,808 тс м

Расчётный изгибающий момент в нижнем сечении: 7,16 тс м

Расчётное поперечное усилие в верхнем сечении: 1,361 тс

Расчётное поперечное усилие в нижнем сечении: 1,988 тс

Расчётное осевое сжимающее усилие, F : 64,33 тс

Свойства материала опорной обечайки в месте сопряжения с корпусом:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_0 = 71$ МПа

Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450$ °C (рабочие условия):

$[\sigma]_K = 56,5$ МПа

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Ине. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | |

| | | | | |
|------|------|-------------|---------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | Подпись | Дата |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

18

| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| 34 | 26.10.16 | | | |



Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

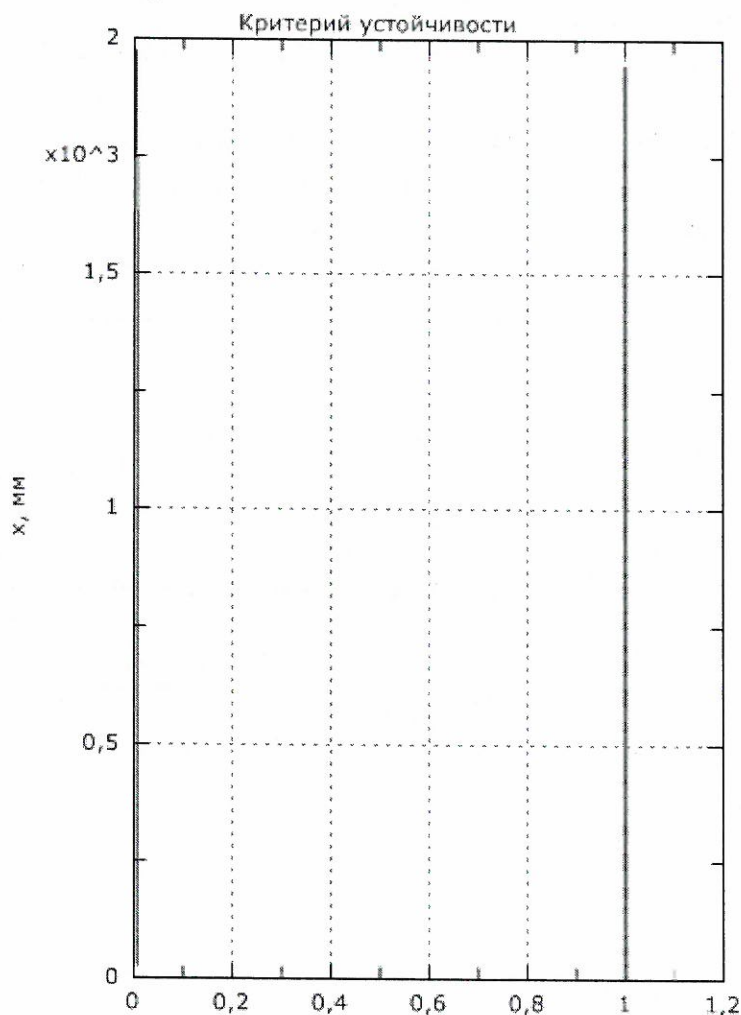
$$[\sigma]_{00}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала корпуса аппарата:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]_{00}^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Расчёт опорной обечайки по ГОСТ Р 51274-99



---- Критерий устойчивости

---- Предельное значение

Устойчивость опорной обечайки в опасном сечении :

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} = 19,68 / (1 \cdot 3426) + (3,573 + 19,68 \cdot 0 \cdot 6000) / (0,998 \cdot 5651) = 0,006377$$

$$\frac{F}{\psi_1 \cdot [F]} + \frac{M + F \cdot \psi_3 \cdot D_2}{\psi_2 \cdot [M]} \leq 1,0; \quad \text{Условие устойчивости выполнено}$$

$$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot \Delta} \cdot \left(\frac{4 \cdot M}{D_0} + F \right) \leq 0,8 \cdot \min \{ [\sigma]_0; [\sigma]_k \} \quad \text{Условие прочности выполнено}$$

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Инв. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 26.10.16 |
| Инв. № подл. | 34 |

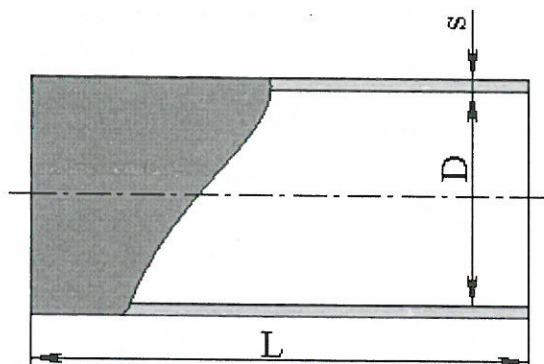
| | | | | |
|------|------|-------------|---------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | Подпись | Дата |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

20

5. Цилиндрический участок опоры



Исходные данные

Материал: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Внутр. диаметр, D: 6000 мм

Толщина стенки, s: 16 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c₁: 0 мм

Прибавка для компенсации минусового допуска, c₂: 0,8 мм

Прибавка технологическая, c₃: 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: 0,8 мм

Длина обечайки, L: 1725 мм

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С (рабочие условия):

[σ] = 56,5 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С :

E = 1,4 · 10⁵ МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{е}}}\right)^2}} = 1623 / (1 + (1623 / 2103)^2)^{1/2} = 1285 \text{ тс}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{е}}}\right)^2}} = 2434 / (1 + (2434 / 3605)^2)^{1/2} = 2017 \text{ тс м}$$

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (условия пневмоиспытаний):

[σ]²⁰ = η · R_{e20} / n_T = 1 · 280 / 1,2 = 233,3 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С :

E²⁰ = 1,99 · 10⁵ МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\text{п}}}{[F]_{\text{е}}}\right)^2}} = 6702 / (1 + (6702 / 3985)^2)^{1/2} = 3426 \text{ тс}$$

| | |
|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата |
| Име. № дубл. | Подпись и дата |
| Взам. име. № | Подпись и дата |
| Име. № подл. | Подпись и дата |
| Име. № дубл. | Подпись и дата |
| Взам. име. № | Подпись и дата |
| Име. № подл. | Подпись и дата |
| Име. № дубл. | Подпись и дата |
| Взам. име. № | Подпись и дата |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

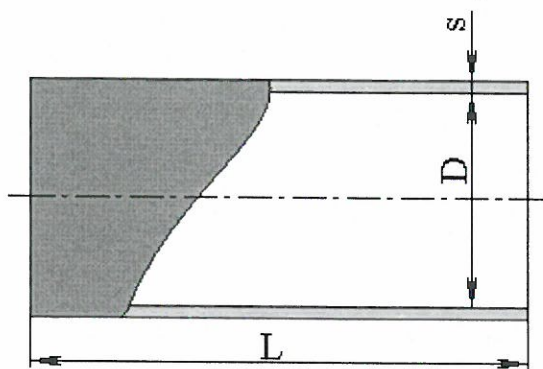
Лист

21

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,005 \cdot 10^4 / (1 + (1,005 \cdot 10^4 / 6832)^2)^{1/2} = 5651 \text{ тс м}$$

6. Переходный участок опоры



Исходные данные

Материал: 09Г2С Gr.ГОСТ 19281

Внутр. диаметр, D: 6000 мм

Толщина стенки, s: 20 мм

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c₁: 1 мм

Прибавка для компенсации минусового допуска, c₂: 0,8 мм

Прибавка технологическая, c₃: 0 мм

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: 1,8 мм

Длина обечайки, L: 250 мм

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С (рабочие условия):

[σ] = 71 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С :

E = 1,4 · 10⁵ МПа

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{\text{E}}}\right)^2}} = 2443 / (1 + (2443 / 3299)^2)^{1/2} = 1963 \text{ тс}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 3665 / (1 + (3665 / 5655)^2)^{1/2} = 3075 \text{ тс м}$$

Расчёт допускаемой температуры в месте стыка переходной и опорной обечаек по АТК 24.200.04-90

Рабочие условия

Свойства материала опорной обечайки

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 383,5 °С (рабочие условия):

[σ]_{2t} = 112 МПа

| | |
|--------------|----------------|
| Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| Взам. ине. № | Подпись и дата |
| Ине. № подл. | Подпись и дата |

| | | | | |
|------|------|-------------|---------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | Подпись | Дата |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

22

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 383,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_{2t} = 0,1352 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Свойства материала переходной обечайки

Коэффициент линейного расширения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 383,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha_{1t} = 0,1352 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 383,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{1t} = 1,58 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная допускаемая температура в зоне стыка переходной и опорной обечаек :

$$[t_c] = \frac{2 \cdot [\sigma]_{2t} \cdot \left(1 - \frac{F_1}{[F]} - \frac{M_1}{[M]}\right)}{(\alpha_{1t} - \alpha_{2t}) \cdot E_{1t}} = 2 \cdot 112 \cdot (1 - 64,33 / 1963 - 4,227 / 3075) / (0,1352 \cdot 10^{-4} - 0,1352 \cdot 10^{-4}) \cdot 1,58 \cdot 10^5 = +\text{INF } ^{\circ}\text{C}$$

Условие работоспособности: $t_c < [t_c]$

$395 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq +\text{INF } ^{\circ}\text{C}$. Условие выполнено

Обечайка, нагруженная осевым сжимающим усилием (п. 5.3.4)

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие :

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_{\text{E}}}\right)^2}} = 8029 / (1 + (8029 / 6252)^2)^{1/2} = 4933 \text{ тс}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,204 \cdot 10^4 / (1 + (1,204 \cdot 10^4 / 1,072 \cdot 10^4)^2)^{1/2} = 8007 \text{ тс м}$$

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.06.16 | | | |

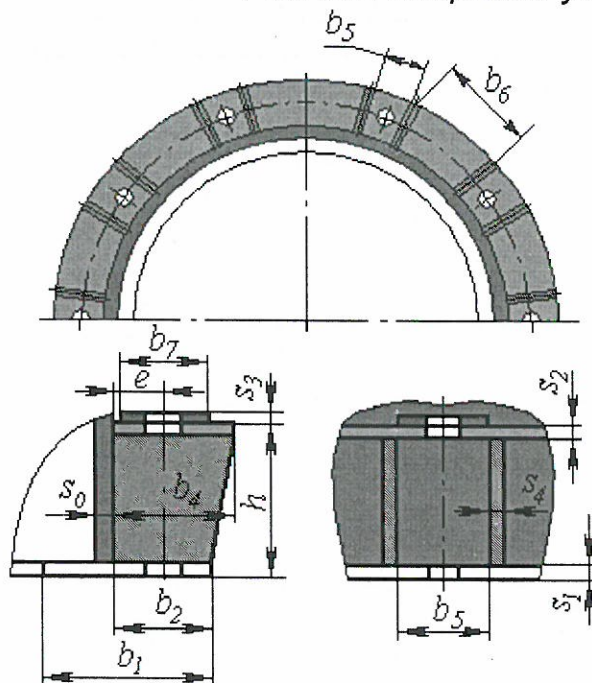
| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.06.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист 23

7. Опорный узел элемента 'Опора поз. 70'

Расчёт опорного узла по ГОСТ Р 51274-99



Несущий элемент:

Тип элемента:

Материал:

Исполнительная толщина нижнего опорного кольца, s_1 :

Ширина нижнего опорного кольца, b_1 :

Выступающая ширина нижнего опорного кольца, b_2 :

Наличие усиливающей пластины

Толщина усиливающей пластины, s_3 :

Ширина усиливающей пластины, b_7 :

Ширина верхнего опорного кольца, b_4 :

Минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, b_5 :

Исполнительная толщина верхнего опорного кольца, s_2 :

Исполнительная толщина ребра, s_4 :

Высота опорного узла, h :

Анкерные болты:

Материал:

Номинальный диаметр, d :

Количество, n

Диаметр болтовой окружности, D_6 :

Расчёт в рабочих условиях

Условия нагружения:

Расчётный изгибающий момент, M : 7,16 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F : 64,33 тс

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Опора поз. 70

4

09Г2С Gr.ГОСТ 19281

25 мм

280 мм

164 мм

Да

32 мм

100 мм

164 мм

160 мм

32 мм

12 мм

355 мм

42 мм

24

6220 мм

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Ине. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата |
| 34 | 36.06.10 | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 36.06.10 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

24

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

[σ] = 71 МПа

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

[σ]₀ = 56,5 МПа

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала Ст3 (МДС 31-4.2000) (рабочие условия):

σ_B = 145 МПа

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

[σ]_{бет} = 6 МПа

Прочность анкерных болтов (п. 9)

Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

$$\max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\} = \max \{ 0,9643 \cdot 164 \cdot ((4 \cdot 7,16 / 6220 + 64,33) / (6220 \cdot 280 \cdot 71))^{1/2} + 0,8; 1.5 \cdot 16 \} = 24 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_1 \geq \max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\}$$

25 мм ≥ 24 мм. Условие прочности выполнено

Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

$$\frac{4 \cdot M}{D_6} + F = (4 \cdot 7,16 / 6220 + 64,33) / (3,142 \cdot 6220 \cdot 6) = 5,88 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } b_1 \geq \frac{4 \cdot M}{D_6} + F$$

280 мм ≥ 5,88 мм. Условие прочности выполнено

Толщина верхнего опорного кольца с усиливающей пластиной (п.8.4)

$$(s_2 + \chi_3 \cdot s_3) = 32 + 0,6098 \cdot 32 = 51,51 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр резьбы анкерного болта:

$$d_6 = 36,48 \text{ мм}$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c} = 1,071 \cdot (0,001045 \cdot 145 / 71)^{1/2} + 0,8 = 50,29 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } (s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c}$$

51,51 мм ≥ 50,29 мм. Условие прочности выполнено

Толщина ребра (п. 8.5)

$$\max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0.4 \cdot s_1 \right\} = \max \{ 0,001045 \cdot 145 / (2 \cdot 164 \cdot 71) + 0,8; 0.4 \cdot 25 \} = 10 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0.4 \cdot s_1 \right\}$$

12 мм ≥ 10 мм. Условие прочности выполнено

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)

| | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Инь. № подл. | Подпись и дата | Инь. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | Инь. № подл. |
| 374 | 37.06.10.16 | | | | 374 |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 37.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

25

$$\frac{6 \cdot \chi_s \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_{\text{в}} \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0,07724 \cdot 0,001045 \cdot 145 \cdot 94 / ((16 - 0,8)^2 \cdot 355) = 80,49 \text{ МПа}$$

Условие работоспособности: $\frac{6 \cdot \chi_s \cdot A_{\sigma} \cdot [\sigma]_{\text{в}} \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_0$

80,49 МПа ≤ 84,75 МПа. Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения при монтаже:

Расчётный изгибающий момент, М: 6,422 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 23,15 тс

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20}_0 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала Ст3 (МДС 31-4.2000) (условия монтажа):

$$\sigma_{\text{в}} = 145 \text{ МПа}$$

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

$$[\sigma]_{\text{бет}} = 6 \text{ МПа}$$

Прочность анкерных болтов (п. 9)

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётный изгибающий момент, М: 3,596 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 19,68 тс

Результаты расчёта:

Свойства материала элемента опорного узла:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °С (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_0 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала анкерных болтов:

Допускаемые напряжения для материала Ст3 (МДС 31-4.2000) (условия пневмоиспытаний):

$$\sigma_{\text{в}} = 145 \text{ МПа}$$

Свойства материала бетона:

Допускаемые напряжения для бетона класса В10 (М150):

$$[\sigma]_{\text{бет}} = 6 \text{ МПа}$$

Прочность анкерных болтов (п. 9)

Толщина нижнего опорного кольца (п. 8.2)

$$\max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_{\text{с}}} + F}{D_{\text{с}} \cdot b_1 \cdot [\sigma]_{\text{А}}}} + c; 1,5 \cdot s_0 \right\} = \max \{ 0,9643 \cdot 164 \cdot ((4 \cdot 3,596 / 6220 + 19,68) / (6220 \cdot 280 \cdot 233,3))^{1/2} + 0,8; 1,5 \cdot 16 \} = 24 \text{ мм}$$

| | |
|----------------|----------------|
| Инов. № подл. | Подпись и дата |
| Инов. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 26.10.16 |
| Инов. № подл. | 34 |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

26

$$\text{Условие работоспособности: } s_1 \geq \max \left\{ \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 \cdot [\sigma]_A}} + c; 1.5 \cdot s_0 \right\}$$

25 мм ≥ 24 мм. Условие прочности выполнено

Ширина нижнего опорного кольца (п. 8.3)

$$\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_{\text{бет}}} = (4 \cdot 3,596 / 6220 + 19,68) / (3,142 \cdot 6220 \cdot 6) = 1,876 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } b_1 \geq \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_6}$$

280 мм ≥ 1,876 мм. Условие прочности выполнено

Толщина верхнего опорного кольца с усиливающей пластиной (п. 8.4)

$$(s_2 + \chi_3 \cdot s_3) = 32 + 0,6098 \cdot 32 = 51,51 \text{ мм}$$

$$\chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c = \{1,071 \cdot (0,001045 \cdot 145 / 233,3)^{1/2} + 0,8\} = 28,1 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } (s_2 + \chi_3 \cdot s_3) \geq \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$$

51,51 мм ≥ 28,1 мм. Условие прочности выполнено

Толщина ребра (п. 8.5)

$$\max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\} = \max \{0,001045 \cdot 145 / (2 \cdot 164 \cdot 233,3) + 0,8; 0,4 \cdot 25\} = 10 \text{ мм}$$

$$\text{Условие работоспособности: } s_4 \geq \max \left\{ \frac{A_\sigma \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + c; 0,4 \cdot s_1 \right\}$$

12 мм ≥ 10 мм. Условие прочности выполнено

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца (п. 8.6)

$$\frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} = 6 \cdot 0,07724 \cdot 0,001045 \cdot 145 \cdot 94 / ((16 - 0,8)^2 \cdot 355) = 80,49 \text{ МПа}$$

$$\text{Условие работоспособности: } \frac{\delta \cdot \chi_5 \cdot A_\sigma \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(s_0 - c)^2 \cdot h} \leq 1,5 \cdot [\sigma]_0$$

80,49 МПа ≤ 350 МПа. Условие прочности выполнено

8. Нагрузки на фундамент

| Состояние | Осевая сила, тс | Изгибающий момент, тс м | Горизонтальная сила, тс |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Рабочие условия | 66,36 | 18,09 | 2,463 |
| Условия монтажа | 25,19 | 16,78 | 2,344 |
| Условия испытаний | 21,71 | 9,667 | 1,382 |

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Взам. инв. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | | | 30.06.10 |

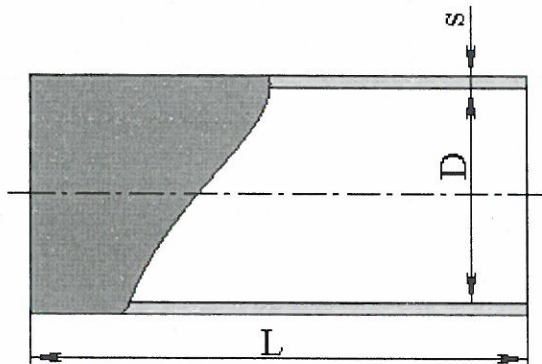
| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 30.06.10 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

27

9. Обечайка поз. 5



Исходные данные

| | |
|---|---------------------|
| Материал: | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Внутр. диаметр, D: | 6000 мм |
| Толщина стенки, s: | 20 мм |
| Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ : | 2 мм |
| Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ : | 0,8 мм |
| Прибавка технологическая, c ₃ : | 0 мм |
| Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: | 2,8 мм |
| Длина обечайки, L: | 850 мм |

Расчёт в рабочих условиях при внутреннем давлении

Условия нагружения:

| | |
|--|-------------|
| Расчётная температура, T: | 450 °C |
| Расчётное внутреннее избыточное давление, p: | 0,02000 МПа |
| Расчётный изгибающий момент, M: | 3,414 тс м |
| Расчётное поперечное усилие, Q: | 1,352 тс |
| Расчётное осевое сжимающее усилие, F: | 51,28 тс |

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 56,5$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

E = $1,4 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,02000 \cdot 6000) / (2 \cdot 56,5 \cdot 1 - 0,02000) + 2,8 = 3,862 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 56,5 \cdot 1 \cdot (20 - 2,8) / (6000 + 20 - 2,8) = 0,323 \text{ МПа}$$

0,323 МПа \geq 0,02000 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 2756 / (1 + (2756 / 4910)^2)^{1/2} = 2403 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 5682$ мм

| | |
|----------------|----------------|
| Инов. № подл. | Подпись и дата |
| Инов. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 22.06.10.16 |
| Инов. № подл. | 34 |

| | | | | |
|------|------|-------------|---------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | Д.А. | 22.06.10 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

28

$$[Q] = \frac{[Q]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\pi}}{[Q]_{\text{E}}} \right)^2}} = 457,9 / (1 + (457,9 / 789,2)^2)^{1/2} = 396,1 \text{ тс}$$

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0/0 + 51,28/2864 + 3,414/2403 + (1,352/396,1)^2 = 0,01934 \leq 1$$

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (6000 + 20 - 2,8) \cdot (20 - 2,8) \cdot 56,5 \cdot 1 = 1837 \text{ TC}$$
$$\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1.0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{wp}}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 6000^2 / 4) / 1837 + 3,414 / 2756 = 0,03202 \leq 1$$

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

| | |
|--|-------------|
| Расчётная температура, T: | 450 °C |
| Расчётное наружное избыточное давление, p: | 0,01000 МПа |
| Расчётный изгибающий момент, M: | 9,303 тс м |
| Расчётное поперечное усилие, Q: | 3,796 тс |
| Расчётное осевое сжимающее усилие, F: | 42,04 тс |

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \left\{ 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 6000 / 1 \cdot (0,01000 / (10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5))^{\cdot} \right. \\ \left. 5682 / 6000 \right)^{0,4}; 1,2 \cdot 0,01000 \cdot 6000 / (2 \cdot 56,5 - 0,01000) \} = 11,42 \text{ mm}$$

$$[p]_e = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \text{ E}}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 6000}{1^{2.5}} / (2,4 \cdot 1 \cdot 5682) \cdot (100 \cdot (20 - 2,8) / 6000) = 0,05637 \text{ МПа}$$

| | | | | | | | | | |
|----------------|--|--------------|--|--------------|--|----------------|--|--------------|--|
| Подпись и дата | | Инв. № дубл. | | Взам. инв. № | | Подпись и дата | | Инв. № подл. | |
| | | | | | | | | | |

$[F] + [M]_{\text{пр}}$
 Заключение: Условие прочности выполнено
Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении
Условия нагружения:
 Расчётная температура, Т: 450 °С
 Расчётное наружное избыточное давление, р: 0,01000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, М: 9,303 тс м
 Расчётное поперечное усилие, Q: 3,796 тс
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 42,04 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007
 Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 450 °С (рабочие условия):
 $[\sigma] = 56,5 \text{ МПа}$
 Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 450 °С :
 $E = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
 Расчётная длина для расчёта от действия давления:
 $l_p = 5682 \text{ мм}$
 Расчётная толщина стенки с учетом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \left\{ \frac{1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 6000}{1} \cdot \left(\frac{0,01000}{10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot 0,01000 \cdot 6000}{2 \cdot 56,5 - 0,01000} \right\} = 11,42 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости :

$$[p]_e = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 6000}{2,4 \cdot 1 \cdot 5682} \cdot \left(\frac{100 \cdot (20 - 2,8)}{6000} \right)^{2,5} = 0,05637 \text{ МПа}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,138 \cdot 10^4 / (1 + (1,138 \cdot 10^4 / 9306)^2)^{1/2} = 7204 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 5682 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1891 / (1 + (1891 / 1496)^2)^{1/2} = 1173 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 9,048 / 5429 + 1,645 / 7204 + (0,6684 / 1173)^2 = 0,001895 \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (6000 + 20 - 2,8) \cdot (20 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot 1 = 7587 \text{ тс}$$

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

Проверка условия прочности:
$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,06000 \cdot 3,142 \cdot 6000^2 / 4) / 7587 + 1,645 / 1,138 \cdot 10^4 = 0,02251 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения при монтаже:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 2,975 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 1,226 тс

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 12,31 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (20 - 2,8) / (6000 + 20 - 2,8) = 1,455 \text{ МПа}$$

| | | | |
|----------------------|-------------|----------------|---------|
| Инв. № подл. | 34 | Подпись и дата | |
| Взам. инв. № | | Инв. № дубл. | |
| Подпись и дата | 30.06.10.16 | | |
| Лист | 1 | Зам. | 1211-16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |
| | | | Дата |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | |
| Лист | | | |
| 31 | | | |

1,455 МПа \geq 0 МПа

Заключение: Условие прочности выполнено

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}} = 1,241 \cdot 10^4 / (1 + (1,241 \cdot 10^4 / 9306)^2)^{1/2} = 7446 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 5682 \text{ мм}$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_{\text{E}}}\right)^2}} = 2063 / (1 + (2063 / 1496)^2)^{1/2} = 1211 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

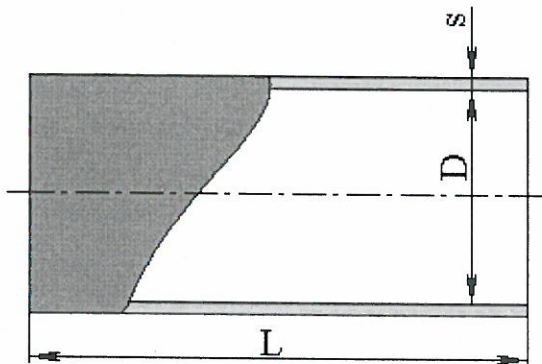
Обечайка, работающая под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 12,31 / 5429 + 2,975 / 7446 + (1,226 / 1211)^2 = 0,002667 \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

10. Обечайка поз. 6



Исходные данные

| | |
|---|---------------------|
| Материал: | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Внутр. диаметр, D: | 6000 мм |
| Толщина стенки, s: | 10 мм |
| Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ : | 2 мм |
| Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ : | 0,4 мм |
| Прибавка технологическая, c ₃ : | 0 мм |
| Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c: | 2,4 мм |
| Длина обечайки, L: | 3100 мм |

Расчёт в рабочих условиях при внутреннем давлении

Условия нагружения:

| | |
|--|-------------|
| Расчётная температура, T: | 450 °C |
| Расчётное внутреннее избыточное давление, p: | 0,02000 МПа |

| | | | |
|--------------|----------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 28.10.16 | | |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 28.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

32

Расчётный изгибающий момент, М: 2,381 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 1,078 тс

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 11,4 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С (рабочие условия):

$[\sigma] = 56,5$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °С :

$E = 1,4 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,02000 \cdot 6000) / (2 \cdot 56,5 \cdot 1 - 0,02000) + 2,4 = 3,462 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 56,5 \cdot 1 \cdot (10 - 2,4) / (6000 + 10 - 2,4) = 0,143 \text{ МПа}$$

$0,143 \text{ МПа} \geq 0,02000 \text{ МПа}$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 1216 / (1 + (1216 / 637,3)^2)^{1/2} = 564,4 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 5682$ мм

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 202,3 / (1 + (202,3 / 149,3)^2)^{1/2} = 120,2 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 11,4 / 371,7 + 2,381 / 564,4 + (1,078 / 120,2)^2 = 0,03498 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (6000 + 10 - 2,4) \cdot (10 - 2,4) \cdot 56,5 \cdot 1 = 810,4 \text{ тс}$$

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

$$\text{Проверка условия прочности: } \frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 6000^2 / 4) / 810,4 + 2,381 / 1216 = 0,07173 \leq 1$$

| | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Ине. № дубл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата | Ине. № подл. |
| 34 | 26.10.16 | | | | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

33

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 450 °C

Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,01000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 6,402 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 3,03 тс

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 12,29 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 56,5$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

$E = 1,4 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 5682$ мм

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \left\{ \frac{1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 6000}{1} \cdot \left(\frac{0,01000}{(10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5)} \cdot \frac{1}{6000} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot 0,01000 \cdot 6000}{2 \cdot 56,5 - 0,01000} \right\} = 11,42 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости :

$$[p]_e = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 6000}{2,4 \cdot 1 \cdot 5682} \cdot \left(\frac{100 \cdot (12 - 2,8)}{6000} \right)^{2,5} = 0,01180 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности :

$$[p]_n = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 56,5 \cdot (12 - 2,8)}{6000 + 12 - 2,8} = 0,173 \text{ МПа}$$

$0,01177 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_n}{[M]_e} \right)^2}} = \frac{1472}{\sqrt{1 + (1472/1027)^2}} = 842,5 \text{ тс м}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_e} \right)^2}} = \frac{244,9}{\sqrt{1 + (244,9/220)^2}} = 163,7 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,01000 / 0,01177 + 12,29 / 599,3 + 6,402 / 842,5 + (3,03 / 163,7)^2 = 0,8782 \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

| | | | |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|
| Ине. № подл. | Взам. инв. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | | | 26.10.16 |
| Ине. № подл. | Взам. инв. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | | | 26.10.16 |
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | |
| Лист | | | |
| 34 | | | |

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °С
 Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), р: 0,06000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, М: 1,139 тс м
 Расчётное поперечное усилие, Q: 0,5237 тс
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 6,652 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 20 °С (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре Т = 20 °С :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,06000 \cdot 6000) / (2 \cdot 233,3 \cdot 1 - 0,06000) + 2,4 = 3,172 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot (10 - 2,4) / (6000 + 10 - 2,4) = 0,5904 \text{ МПа}$$

$$0,5904 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 5020 / (1 + (5020 / 1208)^2)^{1/2} = 1174 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 5682 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 835,7 / (1 + (835,7 / 283)^2)^{1/2} = 268,1 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 6,652 / 704,5 + 1,139 / 1174 + (0,5237 / 268,1)^2 = 0,01042 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (6000 + 10 - 2,4) \cdot (10 - 2,4) \cdot 233,3 \cdot 1 = 3347 \text{ тс}$$

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

| | |
|----------------|----------------|
| Инов. № подл. | Подпись и дата |
| Инов. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 30.10.16 |
| Инов. № подл. | 34 |

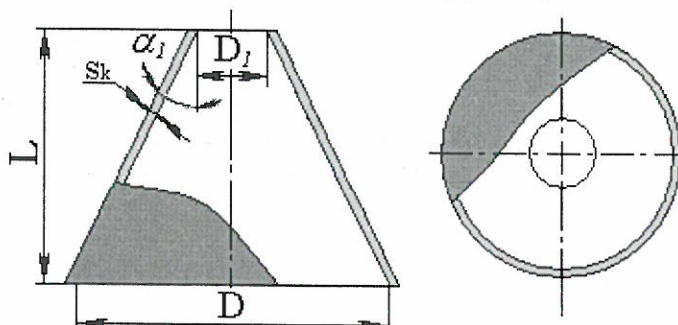
| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 30.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

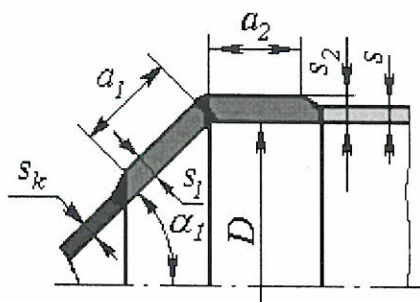
35

11. Днище коническое поз. 10,11



Исходные данные

| | |
|---|---------------------|
| Материал обечайки: | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Диаметр большего основания, D: | 6000 мм |
| Диаметр меньшего основания, D ₁ : | 1116 мм |
| Толщина стенки, s _k : | 16 мм |
| Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, c ₁ : | 2 мм |
| Прибавка для компенсации минусового допуска, c ₂ : | 0,8 мм |
| Прибавка технологическая, c ₃ : | 0 мм |
| Сумма прибавок, c: | 2,8 мм |
| Длина обечайки, L: | 900 мм |
| Смещение левого основания по горизонтали, X ₀ : | 0 мм |
| Смещение левого основания по вертикали, Y ₀ : | 0 мм |
| Левый (нижний) узел соединения: | |
| Соединение конической и цилиндрической обечаек | |



Параметры узла соединения :

| | |
|--|---------------------|
| Материал элемента s ₁ : | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Материал элемента s ₂ : | 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 |
| Толщина стенки вставки, s ₁ : | 20 мм |
| Толщина стенки вставки, s ₂ : | 20 мм |
| Длина участка вставки, a ₁ : | 400 мм |
| Длина участка вставки, a ₂ : | 300 мм |

Правый (верхний) узел соединения:

Соединение конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра без укрепления

| | |
|----------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата |
| Ине. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | 26.10.16 |
| Ине. № подл. | 34 |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Проверка условия прочности:
$$\left(\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{гр}} \leq 1 \right)$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{гр}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 6000^2 / 4) / 486,1 + 0,1048 / 729,2 = 0,1165 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$[\sigma]_1 = 71 \text{ МПа}$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$[\sigma]_2 = 71 \text{ МПа}$

$0,05608 \text{ МПа} \geq 0,02000 \text{ МПа}$

Заключение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности:
$$\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,02000 / 0,05608 + 3,831 / 146,5| + 0,1048 / 219,7 = 0,3833 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$[\sigma]_k = 56,5 \text{ МПа}$

Свойства материала соседнего элемента:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$[\sigma]_s = 71 \text{ МПа}$

$0,1906 \text{ МПа} \geq 0,02000 \text{ МПа}$

Заключение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности:
$$\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,02000 / 0,1906 + 2,306 / 21,14| + 0,02826 / 5,813 = 0,2189 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 450°C

Расчётное наружное избыточное давление, p : $0,01000 \text{ МПа}$

Расчётный изгибающий момент, M : $0,2349 \text{ тс м}$

Расчётное осевое сжимающее усилие, F : $3,831 \text{ тс}$

| | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | Инв. № подл. |
| 34 | 26.10.16 | | | | |

| | | | | | |
|------|------|-------------|----------|----------------------|------|
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 | 16017-43/6-K03.001PP | Лист |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | 39 |

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma] = 56,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$:

$$E = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{\pi} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 56,5 \cdot (16 - 2,8) / (5498 / \cos(69,77) + 16 - 2,8) = 0,09375 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[p]_{\text{E}} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_{\text{E}}}{l_{\text{E}}} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_{\text{E}}} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1,735 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 1 \cdot 2603} \cdot (100 \cdot (16 - 2,8) / 1,735 \cdot 10^4)^{2,5} = 0,01291 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{[p]_{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\pi}}{[p]_{\text{E}}} \right)^2}} = 0,09375 / (1 + (0,09375 / 0,01291)^2)^{1/2} = 0,01279 \text{ МПа}$$

$$0,01279 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\pi} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 6000 / 4 \cdot 3,142 \cdot 6000 \cdot (16 - 2,8) \cdot 56,5 \cdot 1 \cdot \cos(69,77) = 729,2 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\pi} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 1,735 \cdot 10^4 / 4 \cdot 3,142 \cdot 1,735 \cdot 10^4 \cdot (16 - 2,8) \cdot 56,5 \cdot \cos(69,77) = 6098 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{E}} = \frac{D_F}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 1,735 \cdot 10^4 / 3,5 \cdot 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot (1,735 \cdot 10^4 \cdot \cos(69,77))^2 / 2,4 \cdot (100 \cdot (16 - 2,8) / 1,735 \cdot 10^4)^{2,5} = 515,2 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ [M]_{\pi}; [M]_{\text{E}} \} = \min \{ 729,2; 513,4 \} = 513,4 \text{ тс м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 8.6.2)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0,01000 / 0,01279 + 3,831 / 1478 + 0,2349 / 513,4 = 0,7847 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (ст):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_1 = 71 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_2 = 71 \text{ МПа}$$

$$0,05608 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

| | | | | |
|----------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Име. № подл. | Име. № дубл. | Взам. име. № | Подпись и дата | Подпись и дата |
| 34 | | | 26.10.16 | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | Лист |
| | | | | 40 |

Проверка условия прочности: $\left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |(-0,01000)/0,05608 + 3,831/146,5| + 0,2349/219,7 = 0,1532 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_k = 56,5 \text{ МПа}$$

Свойства материала соседнего элемента:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рабочие условия):

$$[\sigma]_s = 71 \text{ МПа}$$

$$0,1906 \text{ МПа} \geq 0,01000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности и устойчивости выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности: $\left(\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \right| = |(-0,01000) / 0,1906 + 2,306 / 21,14| + 0,03562 / 5,813 = 0,06273 \leq 1$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, Т: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, р: 0,06000 МПа

Расчётный изгибающий момент, М: 0,04307 Тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 1,566 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta^* R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot (16 - 2,8) / (5498 / \cos(69,77) + 16 - 2,8) = 0,3872 \text{ МПа}$$

$$0,3872 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности :

$$[M]_{\text{тп}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 6000 / 4 * 3,142 * 6000 * (16 - 2,8) * 233,3 * 1 * \cos(69,77) = 3012 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\pi} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 1,735 \cdot 10^4 / 4 * 1,735 \cdot 10^4 * (16 - 2,8) * 233,3 * \cos(69,77) = 2,518 \cdot 10^4 \text{ TC M}$$

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0,06000 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 0,04307 тс м

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 1,566 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot (16 - 2,8) / (5498 / \cos(69,77) + 16 - 2,8) = 0,3872 \text{ МПа}$$

$$0,3872 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: Условие прочности выполнено

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности :

$$[M]_{\text{нп}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 6000 / 4 \cdot 3,142 \cdot 6000 \cdot (16 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot 1 \cdot \cos(69,77) = 3012 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{нп}} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 1,735 \cdot 10^4 / 4 \cdot 1,735 \cdot 10^4 \cdot (16 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot \cos(69,77) = 2,518 \cdot 10^4 \text{ тс м}$$

1

Зам.

1211-16

26.10.16

Изм.

Лист

№ документа

Подпись

Дата

16017-43/6-K03.001PP

Лист 41

$$[M]_E = \frac{D_F}{3.5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2.5} = 1,735 \cdot 10^4 / 3.5 \cdot 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot (1,735 \cdot 10^4 \cdot \cos(69,77))^2 / 1,8 \cdot (100 \cdot (16 - 2,8)) / 1,735 \cdot 10^4)^{2.5} = 976,4 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \min \{ M_{гр}; M_{уст} \} = \min \{ 3012, 975,7 \} = 975,7 \text{ тс м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 8.6.2)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0/0 + 1,566/2801 + 0,04307/975,7 = 0,6033 \cdot 10^{-3} \leq 1$$

Заключение: Условие устойчивости выполнено

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

Проверка условия прочности: $\left(\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{гр}} \leq 1 \right)$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{гр}} = (0 + 0,06000 \cdot 3,142 \cdot 6000^2 / 4) / 2008 + 0,04307 / 3012 = 0,08451 \leq 1$$

Заклучение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта левого (нижнего) узла соединения:

Свойства материала элемента s_1 (s_T):

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_1 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала элемента s_2 :

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_2 = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

$$0,1843 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заклучение: Условие прочности выполнено

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности: $\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,06000 / 0,1843 + 1,566 / 481,5| + 0,04307 / 722,2 = 0,3289 \leq 1$$

Заклучение: Условие прочности выполнено

Результаты расчёта правого (верхнего) узла соединения:

Свойства материала несущей обечайки:

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20}_k = \eta \cdot R_{e/20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Свойства материала соседнего элемента:

| | | | | | |
|----------------------|----------|-------------|----------|------|------|
| Подпись и дата | | | | | |
| Инв. № дубл. | | | | | |
| Взам. инв. № | | | | | |
| Подпись и дата | 26.10.16 | | | | |
| Инв. № подл. | 37 | | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | 26.10.16 | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | |
| 16017-43/6-K03.001PP | | | | | Лист |
| | | | | | 42 |

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

$$0,7257 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Закключение: **Условие прочности выполнено**

Дополнительное условие прочности переходной части от совместного действия нагрузок (п. 8.6.2.2)

Проверка условия прочности: $\left(\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} \leq 1 \right)$

$$\left| \frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} \right| + \frac{M}{[M]} = |0,06000 / 0,7257 + 0,09761 / 82,7| + 0,002078 / 22,74 = 0,08395 \leq 1$$

Закключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения при монтаже:

Расчётная температура, T : $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0 МПа

Расчётный изгибающий момент, M : $0,07164 \text{ тс м}$

Расчётное осевое сжимающее усилие, F : $1,691 \text{ тс}$

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos \alpha_1} + (s_k - c)} = 2 * 254,5 * 1 * (16 - 2,8) / (5498 / \cos(69,77) + 16 - 2,8) = 0,4223 \text{ МПа}$$

$$0,4223 \text{ МПа} \geq 0 \text{ МПа}$$

Закключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{\text{гр}} = \frac{D_1}{4} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T \cdot \cos(\alpha_1) = 6000 / 4 * 3,142 * 6000 * (16 - 2,8) * 254,5 * 1 * \cos(69,77) = 3285 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{п}} = \frac{D_F}{4} \cdot \pi \cdot D_F \cdot (s_k - c) \cdot [\sigma] \cdot \cos(\alpha_1) = 1,735 \cdot 10^4 / 4 * 1,735 \cdot 10^4 * (16 - 2,8) * 254,5 * \cos(69,77) = 2,747 \cdot 10^4 \text{ тс м}$$

$$[M]_{\text{Е}} = \frac{D_F}{3,5} \cdot \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_F \cdot \cos \alpha_1)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} = 1,735 \cdot 10^4 / 3,5 * 310 * 10^{-6} * 1,99 \cdot 10^5 * (1,735 \cdot 10^4 * \cos(69,77))^2 / 1,8 * (100 * (16 - 2,8) / 1,735 \cdot 10^4)^{2,5} = 976,4 \text{ тс м}$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min \{ [M]_{\text{гр}} ; [M]_{\text{уст}} \} = \min \{ 3285, 975,8 \} = 975,8 \text{ тс м}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 8.6.2)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = 0 / 0 + 1,691 / 2801 + 0,07164 / 975,8 = 0,6773 \cdot 10^{-3} \leq 1$$

| | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|---------|--------------|----------------------|--------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата | Ине. № дубл. | Ине. № | Взам. ине. № | Подпись и дата | Ине. № подл. |
| 34 | 36.10.16 | | | | | |
| 1 | Зам. | 1211-16 | | | | |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата | 16017-43/6-K03.001PP | Лист |
| | | | | | | 43 |

Прибавка технологическая, c_3 : 0 мм
 Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, c : 2,8 мм
 Длина обечайки, L : 400 мм

Расчёт в рабочих условиях при внутреннем давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T : 450 °C
 Расчётное внутреннее избыточное давление, p : 0,02000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M : 0,02823 тс м
 Расчётное поперечное усилие, Q : 0,08136 тс
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F : 2,275 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450$ °C (рабочие условия):

$[\sigma] = 71$ МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре $T = 450$ °C :

$E = 1,4 \cdot 10^5$ МПа

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,02000 \cdot 1100) / (2 \cdot 71 \cdot 1 - 0,02000) + 2,8 = 2,955 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 71 \cdot 1 \cdot (8 - 2,8) / (1100 + 8 - 2,8) = 0,6681 \text{ МПа}$$

0,6681 МПа \geq 0,02000 МПа

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 35,25 / (1 + (35,25 / 105,7)^2)^{1/2} = 33,44 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$l_p = 768,6$ мм

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 31,9 / (1 + (31,9 / 80,24)^2)^{1/2} = 29,64 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 2,275 / 336,2 + 0,02823 / 33,44 + (0,08136 / 29,64)^2 = 0,007617 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1100 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 71 \cdot 1 = 128,2 \text{ тс}$$

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---|------|---------|---------|------|----------------------|------|
| Инв. № подл. | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | 1 | Зам. | 1211-16 | Подпись | Дата | 16017-43/6-K03.001PP | Лист |
| | | | | | | | | | | 45 |
| 37 | | | 26.10.16 | | | | | | | |

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

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

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,02000 \cdot 3,142 \cdot 1100^2 / 4) / 128,2 + 0,02823 / 35,25 = 0,01563 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в рабочих условиях при наружном давлении

Условия нагружения:

Расчётная температура, T: 450 °C
 Расчётное наружное избыточное давление, p: 0,01000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M: 0,03553 тс м
 Расчётное поперечное усилие, Q: 0,1182 тс
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 2,275 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C (рабочие условия):

[σ] = 71 МПа

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 450 °C :

E = 1,4 · 10⁵ МПа

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

l_p = 768,6 мм

Расчётная толщина стенки с учетом прибавок :

$$s_p + c = \max \left\{ 1,06 \cdot \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \cdot \frac{1}{D} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] - p} \right\} = \max \left\{ \frac{1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 1100}{1} \cdot \left(\frac{0,01000}{10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5} \cdot \frac{1}{1100} \right)^{0,4}; \frac{1,2 \cdot 0,01000 \cdot 1100}{2 \cdot 71 - 0,01000} \right\} = \max \left\{ \frac{768,6}{1100} \cdot 10^{-0,4}; 1,2 \cdot 0,01000 \cdot 1100 / (2 \cdot 71 - 0,01000) \right\} = 4,199 \text{ мм}$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости :

$$[p]_e = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1100}{2,4 \cdot 1 \cdot 768,6} \cdot \left(\frac{100 \cdot (8 - 2,8)}{1100} \right)^{2,5} = 0,2668 \text{ МПа}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности :

$$[p]_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 71 \cdot (8 - 2,8)}{1100 + 8 - 2,8} = 0,6681 \text{ МПа}$$

0,2478 МПа ≥ 0,01000 МПа

Заключение: **Условие прочности и устойчивости выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{пр}}}{[M]_E} \right)^2}} = \frac{35,25}{\sqrt{1 + (35,25 / 105,7)^2}} = 33,44 \text{ тс м}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{пр}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{пр}}}{[Q]_E} \right)^2}} = \frac{31,9}{\sqrt{1 + (31,9 / 80,24)^2}} = 29,64 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 38 | 26.10.16 | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Нов. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |
| | | | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

46

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0,01000 / 0,2478 + 2,275 / 336,2 + 0,03553 / 33,44 + (0,1182 / 29,64)^2 = 0,04820 \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Расчёт в условиях испытаний (Пневмоиспытания)

Условия нагружения при испытаниях:

Расчётная температура, T: 20 °C
 Расчётное внутреннее избыточное давление (с учётом гидростатического), p: 0,06000 МПа
 Расчётный изгибающий момент, M: 0,002064 тс м
 Расчётное поперечное усилие, Q: 0,01042 тс
 Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0,07503 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия пневмоиспытаний):

$$[\sigma]^{20} = \eta * R_{e/20} / n_T = 1 * 280 / 1,2 = 233,3 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок:

$$s_p + c = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} + c = (0,06000 * 1100) / (2 * 233,3 * 1 - 0,06000) + 2,8 = 2,941 \text{ мм}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 * 233,3 * 1 * (8 - 2,8) / (1100 + 8 - 2,8) = 2,196 \text{ МПа}$$

$$2,196 \text{ МПа} \geq 0,06000 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E} \right)^2}} = 115,9 / (1 + (115,9 / 200,3)^2)^{1/2} = 100,3 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 768,6 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\Pi}}{[Q]_E} \right)^2}} = 104,8 / (1 + (104,8 / 152,1)^2)^{1/2} = 86,31 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 0,07503 / 637,2 + 0,002064 / 100,3 + (0,01042 / 86,31)^2 = 0,1384 \cdot 10^{-3} \leq 1$$

| | |
|----------------|----------------|
| Ине. № подл. | Подпись и дата |
| Ине. № дубл. | |
| Взам. ине. № | |
| Подпись и дата | 28.10.16 |
| Ине. № подл. | 34 |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Нов. | 1211-16 | 28.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

47

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

Обечайка, нагруженная осевым растягивающим усилием (п. 5.3.3)

Допускаемое осевое растягивающее усилие :

$$[F] = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = 3,142 \cdot (1100 + 8 - 2,8) \cdot (8 - 2,8) \cdot 233,3 \cdot 1 = 421,3 \text{ тс}$$

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

Проверка условия прочности:
$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} \leq 1,0$$

$$\frac{F + p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{\text{пр}}} = (0 + 0,06000 \cdot 3,142 \cdot 1100^2 / 4) / 421,3 + 0,002064 / 115,9 = 0,01355 \leq 1$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Расчёт в условиях монтажа

Условия нагружения при монтаже:

Расчётная температура, T: 20 °C

Расчётное внутреннее избыточное давление, p: 0 МПа

Расчётный изгибающий момент, M: 0,004068 тс м

Расчётное поперечное усилие, Q: 0,02054 тс

Расчётное осевое сжимающее усилие, F: 0,1346 тс

Расчёт на прочность и устойчивость по ГОСТ Р 52857.2-2007

Допускаемые напряжения для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C (условия монтажа):

$$[\sigma]^{20} = \eta \cdot R_{e20} / n_T = 1 \cdot 280 / 1,1 = 254,5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для материала 09Г2С Gr.ГОСТ 19281 при температуре T = 20 °C :

$$E^{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление :

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = 2 \cdot 254,5 \cdot 1 \cdot (8 - 2,8) / (1100 + 8 - 2,8) = 2,395 \text{ МПа}$$

$$2,395 \text{ МПа} \geq 0 \text{ МПа}$$

Заключение: **Условие прочности выполнено**

Допускаемый изгибающий момент :

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{е}}} \right)^2}} = 126,4 / (1 + (126,4 / 200,3)^2)^{1/2} = 106,9 \text{ тс м}$$

Расчётная длина для расчёта от действия давления:

$$l_p = 768,6 \text{ мм}$$

Допускаемое поперечное усилие :

$$[Q] = \frac{[Q]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\text{п}}}{[Q]_{\text{е}}} \right)^2}} = 114,4 / (1 + (114,4 / 152,1)^2)^{1/2} = 91,4 \text{ тс}$$

Обечайка, работающая под совместным действием нагрузок (п. 5.3.7)

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

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

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|----------|
| 1 | Нов. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись |

16017-43/6-K03.001PP

Лист

48

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 = 0 / 0 + 0,1346 / 637,2 + 0,004068 / 106,9 + (0,02054 / 91,4)^2 = 0,2493 \cdot 10^{-3} \leq 1$$

Заключение: **Условие устойчивости выполнено**

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. име. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | |

| | | | |
|------|------|-------------|--------------|
| 1 | Нов. | 1211-16 | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись Дата |

16017-43/6-K03.001PP

| |
|------|
| Лист |
| 49 |

13. Список литературы

- 1) ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
- 2) ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования.
- 3) ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

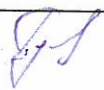
| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Име. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подпись и дата |
| 34 | 26.10.16 | | | |

| | | | | |
|------|------|-------------|------------------|----------|
| 1 | Нов. | 1211-16 | <i>[Подпись]</i> | 26.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |


16017-43/6-K03.001PP

| |
|-------------|
| Лист |
| 50 |

14. Лист регистрации изменений

| Изм. | Номера листов (страниц) | | | | Всего листов (страниц) в документе | № документа | Входящий № сопроводительного документа и дата | Подпись | Дата |
|------|-------------------------|------------|-------|---------|------------------------------------|-------------|---|---|----------|
| | Измененных | Замененных | Новых | Изъятых | | | | | |
| 1 | - | 1-45 | 46-51 | - | 51 | 1211-16 | |  | 28.10.16 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Изм. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Ине. № дубл. | Подпись и дата |
| 37 | 28.10.16 | | | |

| | | | | |
|------|------|-------------|---|----------|
| 1 | Нов. | 1211-16 |  | 28.10.16 |
| Изм. | Лист | № документа | Подпись | Дата |

16017-43/6-K03.001PP

Лист
51