

## Задача 7. Расчет на прочность трубопровода

Трубопровод условным проходом  $D_N$ , мм изготовлен из стали 20, транспортирует горючую жидкость № класса опасности по ГОСТ 12.1.007-76 при рабочем давлении  $P_p$ , МПа и температуре  $t$ , °C. Скорость проникновения коррозии составляет  $\Pi$ , мм/год. Срок службы трубопровода  $n$  лет. Определить толщину стенки трубы и допускаемое внутреннее давление. Составить краткий вывод.

**Таблица 1. Исходные данные**

| №вар       | $D_N$ , мм | Класс опасности | $P_p$ , МПа | $t$ , °C | $\Pi$ , мм/год | $n$ |
|------------|------------|-----------------|-------------|----------|----------------|-----|
| 1, 11, 21  | 51         | 1               | 6,2         | 190      | 0,1            | 11  |
| 2, 12, 22  | 40         | 2               | 7,2         | 220      | 0,15           | 9   |
| 3, 13, 23  | 51         | 3               | 9,2         | 235      | 0,2            | 10  |
| 4, 14, 24  | 100        | 4               | 1,5         | 260      | 0,05           | 12  |
| 5, 15, 25  | 51         | 1               | 2,6         | 290      | 0,12           | 8   |
| 6, 16, 26  | 100        | 2               | 6,9         | 130      | 0,11           | 12  |
| 7, 17, 27  | 40         | 3               | 7,6         | 310      | 0,16           | 9   |
| 8, 18, 28  | 82         | 4               | 9,9         | 135      | 0,25           | 13  |
| 9, 19, 29  | 40         | 1               | 2,8         | 160      | 0,06           | 14  |
| 10, 20, 30 | 82         | 2               | 3,9         | 340      | 0,14           | 7   |

Для вариантов с 1 по 30 (группы ИЗ-1-18):

$$P_p = P_{p_{\text{таб}}} + 0,2 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$t = t_{\text{таб}} + 3 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$\Pi = \Pi_{\text{таб}} + 0,01 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$n = n_{\text{таб}} + 0,1 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

Для вариантов с 1 по 30 (группы ИЗ-2-18):

$$P_p = P_{p_{\text{таб}}} + 0,3 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$t = t_{\text{таб}} + 3,5 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$\Pi = \Pi_{\text{таб}} + 0,015 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

$$n = n_{\text{таб}} + 0,15 \cdot N_{\text{о,вар}}$$

### Пример. Расчет на прочность трубопровода.

Трубопровод условным проходом  $DN=100$  мм (номинальным диаметром) изготовлен из стали 20, транспортирует горючую жидкость 4 класса опасности по ГОСТ 12.1.007-76 при рабочем давлении  $P_p = 7,5$  МПа и температуре  $t = 270^\circ\text{C}$ . Скорость проникновения коррозии составляет  $\Pi = 0,1$  мм / год. Срок службы трубопровода 10 лет.

Определить толщину стенки трубы и допускаемое внутреннее давление.

Трубопроводы, транспортирующие горючие, вредные вещества 4 класса опасности по ГОСТ 12.1.007-76 относятся к группе трубопроводов **Бв**. По таблице 1.1 трубопроводы группы **Бв** при температуре  $270^\circ\text{C}$  относятся к категории II, а при расчетном давлении 7,5 МПа – к категории I. Поэтому категорию трубопровода принимаем по параметру, который требует отнесения его к более ответственной группе или категории, то есть к I категории трубопроводов.

По таблице 1.3 принимаем стальные бесшовные горячедеформированные трубы по ГОСТ 8731-74.

По таблице А.2 для стальных бесшовных горячедеформированных труб по ГОСТ 8731-74 минимальное значение предела текучести при температуре  $20^\circ\text{C}$  составляет  $R_e = 255$  МПа, а минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при температуре  $20^\circ\text{C}$  –  $R_m = 431$  МПа.

По таблице 2.1 для трубопроводов I категории, транспортирующих жидкие вещества групп **Б** и **В**, коэффициент надежности равен  $\gamma = 1,15$ .

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести определяем по формуле (2.2)

$$n_T = 1,3 \gamma = 1,3 \cdot 1,15 = 1,495$$

Коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению определяем по формуле (2.3)

$$n_\sigma = 2,1 \gamma = 2,1 \cdot 1,15 = 2,415$$

Допускаемое напряжение при температуре  $20^\circ\text{C}$ , без учета значений предела длительной прочности и предела ползучести, определяем по формуле (2.1)

$$\begin{aligned} [\sigma]_{20} &= \min \left[ \frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_T}, \frac{R_m}{n_\sigma} \right] = \min \left[ \frac{245}{1,495}, \frac{412}{2,415} \right] = \\ &= \min [163,87, 170,6] = 163,87 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Значение температурного коэффициента по таблице 2.2 для стали 20 при температуре 250 °C составляет  $A_t = 0,9$ , а при температуре 300 °C  $A_t = 0,75$ .

Методом линейной интерполяции определяем значение температурного коэффициента при расчетной температуре равной 270 °C

$$A_t = 0,9 + \frac{0,75 - 0,9}{300 - 250} (270 - 250) = 0,84.$$

Допускаемое напряжение при расчетной температуре 270 °C, определяем по формуле (2.5)

$$[\sigma] = [\sigma]_{20} \cdot A_t = 163,87 \cdot 0,84 = 137,65 \text{ МПа}.$$

Для трубопровода условным проходом  $DN=100$  мм (номинальным диаметром) наружный диаметр трубы по таблице А.1 принимаем  $D=108$  мм

При расчете бесшовных элементов коэффициент прочности принимается  $\varphi = 1,0$ .

Расчетную толщину стенки трубы определяем по формуле (2.10)

$$S_P = \frac{P \cdot D}{2\varphi \cdot [\sigma] + P} = \frac{7,5 \cdot 108}{2 \cdot 1 \cdot 137,65 + 7,5} = 2,86 \text{ мм.}$$

Прибавку для компенсации коррозии и износа вычисляем по формуле (2.9), приняв прибавку для компенсации износа  $C_u = 0$

$$C_2 = \Pi \cdot \tau + C_u = 0,1 \cdot 10 + 0 = 1,0 .$$

Исполнительная толщина стенки трубы без учета технологической прибавки должна быть

$$S \geq S_P + C_2 = 2,86 + 1,0 = 3,86 \text{ мм.}$$

Для стальных бесшовных горячедеформированных труб по ГОСТ 8732-78 при наружном диаметре труб до 219 мм, толщине стенки до 15 мм и обычной точности изготовления предельное минусовое отклонение составляет 15 %.

Предварительно приняв толщину стенки трубы  $S = 5 \text{ мм}$ , технологическая прибавка составит

$$C_1 = 0,15 \cdot S = 0,15 \cdot 5 = 0,75 \text{ мм.}$$

Прибавку к расчетной толщине определяем по формуле (2.8)

$$C = C_1 + C_2 = 0,75 + 1,0 = 1,75 \text{ мм.}$$

Номинальную толщину стенки  $S$  трубы определяем по формуле (2.7)

$$S \geq S_P + C = 2,86 + 1,75 = 4,61 \text{ мм.}$$

По ГОСТ 8732-78 принимаем толщину стенки трубы  $S = 5$  мм.

Расчетное напряжение от внутреннего давления, приведенное к нормальной температуре, определяем по формуле (2.13)

$$\sigma = \frac{P[D - (S - C)]}{2 A_t \cdot \varphi(S - C)} = \frac{7,5 \cdot [108 - (5 - 1,75)]}{2 \cdot 0,84 \cdot 1 \cdot (5 - 1,75)} = 143,89 \text{ МПа}$$

Условие прочности

$$\sigma = 143,89 \text{ МПа} < [\sigma]_{20} = 163,87 \text{ МПа}$$

выполняется.

Допустимое внутреннее давление вычисляем по формуле (2.15)

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_{20} \cdot A_t \cdot \varphi \cdot (S - C)}{D - (S - C)} = \frac{2 \cdot 163,87 \cdot 0,84 \cdot 1,0 \cdot (5 - 1,75)}{108 - (5 - 1,75)} = 8,54 \text{ МПа}.$$

Условие прочности

$$P_p = 7,5 < [P] = 8,54 \text{ МПа}$$

выполняется.

## Приложение 1.

Таблица 1.1

## Классификация стальных технологических трубопроводов

| Группа трубопровода | Транспортируемое вещество                                                                                | Расчетное давление $P$ , МПа | Расчетная температура $t$ , °С | Категория трубопровода |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| <b>Аа</b>           | <b>Вредные</b> классы опасности 1 и 2 по ГОСТ 12.1.007–76                                                | Независимо                   | Независимо                     | <b>I</b>               |
| <b>Аб</b>           | <b>Вредные</b> , класс опасности 3 по ГОСТ 12.1.007–76                                                   | Свыше 1,6                    | Свыше 300                      |                        |
|                     |                                                                                                          | До 1,6                       | До 300                         | <b>II</b>              |
| <b>Ба</b>           | <b>Взрыво – и пожаро-опасные:</b> взрывоопасные вещества (ВВ), горючие (в том числе сжиженные) газы (ГГ) | Свыше 2,5                    | Свыше 300                      | <b>I</b>               |
|                     |                                                                                                          | До 2,5                       | До 300                         | <b>II</b>              |
| <b>Бб</b>           | <b>Легковоспламеняющиеся жидкости</b> (ЛВЖ)                                                              | Свыше 2,5                    | Свыше 300                      | <b>I</b>               |
|                     |                                                                                                          | Свыше 1,6 до 2,5             | Свыше 120 до 300               | <b>II</b>              |
|                     |                                                                                                          | До 1,6                       | До 120                         | <b>III</b>             |
| <b>Бв</b>           | <b>Горючие жидкости</b> (ГЖ), <b>горючие вещества</b> (ГВ)                                               | Свыше 6,3                    | Свыше 350                      | <b>I</b>               |
|                     |                                                                                                          | Свыше 2,5 до 6,3             | Свыше 250 до 350               | <b>II</b>              |
|                     |                                                                                                          | Свыше 1,6 до 2,5             | Свыше 120 до 250               | <b>III</b>             |
|                     |                                                                                                          | до 1,6                       | до 120                         | <b>IV</b>              |
| <b>В</b>            | <b>Трудногорючие (ТГ) и негорючие (НГ)</b>                                                               | Свыше 6,3                    | Свыше 350 до 450               | <b>II</b>              |
|                     |                                                                                                          | Свыше 2,5 до 6,3             | Свыше 250 до 350               | <b>III</b>             |
|                     |                                                                                                          | Свыше 1,6 до 2,5             | Свыше 120 до 250               | <b>IV</b>              |
|                     |                                                                                                          | До 1,6                       | До 120                         | <b>V</b>               |

Примечания: 1. Группу и категорию трубопровода следует устанавливать по параметру, который требует отнесения его к более ответственной группе или категории.

2. Вредные вещества класса опасности 4 следует относить: взрыво – и пожаро-опасные к группе **Б**; негорючие к группе **В**.

Таблица 1.2

## Группа поставки труб

| Группа поставки труб | Нормируемые показатели                                                  |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| А                    | Механические свойства                                                   |
| Б                    | Химический состав                                                       |
| В                    | Механические свойства и химический состав                               |
| Г                    | Химический состав и механические свойства на термообработанных образцах |
| Д                    | Испытательное гидравлическое давление                                   |
| Е                    | Механические свойства после специальной термообработки                  |

Таблица 1.3

## Параметры применения труб

| Марка стали, стандарт            | Технические требования на трубы                   | Среда                                     | Температура, °C          |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Бесшовные трубы                  |                                                   |                                           |                          |
| 10, 20<br>ГОСТ 1050              | ГОСТ 550 группа А, Б                              | Все среды                                 | От минус 30 до плюс 450  |
|                                  | ГОСТ 8731 группа В, кроме изготовленных из слитка |                                           |                          |
|                                  | ГОСТ 8733 группа В                                |                                           |                          |
|                                  | ГОСТ 8731 группа В, изготовленные из слитка       | Среды группы В, кроме пара и горячей воды |                          |
| 20<br>ГОСТ 1050                  | ТУ 14-3-826-79                                    | Все среды                                 |                          |
|                                  | ТУ 14-3-1128-82                                   |                                           |                          |
| 10Г2<br>ГОСТ 4543                | ГОСТ 550 группа А, Б                              |                                           | От минус 60 до плюс 450  |
|                                  | ГОСТ 8731 группа В, кроме изготовленных из слитка |                                           |                          |
|                                  | ГОСТ 8733 группа В                                |                                           |                          |
|                                  | ТУ 14-3-826-79                                    |                                           |                          |
|                                  | ТУ 14-3-1577-88                                   |                                           |                          |
| 09Г2С<br>ГОСТ 19281              | ТУ 14-3-1128-82                                   |                                           | От минус 70 до плюс 450  |
| 12Х1МФ,<br>15Х1М1Ф<br>ГОСТ 20072 | ТУ 14-3-460-82                                    | Все среды                                 | От минус 20 плюс 560     |
| 15ХМ<br>ГОСТ 4543                | ТУ 14-3-460-82                                    |                                           | От минус 40 до плюс 560  |
| 15Х5М, 15Х5М-У<br>ГОСТ 20072     | ГОСТ 550 группа А, Б                              |                                           | От минус 40 плюс 600     |
| 10Х2М1<br>ГОСТ 550               | ГОСТ 550 группа А, Б                              |                                           | От минус 196 плюс 700    |
| 10Х17Н13М2Т<br>ГОСТ 5632         | ГОСТ 9940<br>ГОСТ 9941                            |                                           | От минус 253 до плюс 610 |
| 08Х18Н12Т<br>ГОСТ 5632           | ТУ 14-3-743-78                                    |                                           |                          |
| 08Х18Н10Т<br>ГОСТ 5632           | ТУ 14-3-218-80                                    |                                           |                          |
| 12Х18Н10Т<br>ГОСТ 5632           | ГОСТ 9940<br>ГОСТ 9941                            |                                           |                          |
| 12Х18Н12Т<br>ГОСТ 5632           |                                                   |                                           |                          |

Окончание таблицы 1.3

| Марка стали, стандарт                                              | Технические требования на трубы | Среда                             | Температура, °С          |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| <b>Электросварные трубы прямошовные</b>                            |                                 |                                   |                          |
| 20<br>ГОСТ 1050                                                    | ГОСТ 10705-группа В             | Среды групп А(б), Б, кроме СУГ    | От минус 20 до плюс 450  |
| ВСт3сп                                                             | ГОСТ 10705-группа В             | Среды групп Б, В                  | От 0 до плюс 200         |
| 10Х18Н10Т,<br>12Х18Н10Т,<br>12Х18Н12Т,<br>10Х17Н13М2Т<br>ГОСТ 5632 | ГОСТ 11068                      | Все среды кроме группы А(а) и СУГ | От минус 196 до плюс 600 |

Таблица А.1

Размеры бесшовных горячедеформированных труб

Размеры в мм

| Наружный диаметр, $D$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Толщина стенки, $S$ |       | Наружный диаметр, $D$             | Толщина стенки, $S$ |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-----------------------------------|---------------------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | $min$               | $max$ |                                   | $min$               | $max$ |
| 25; 28; 32; 38                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2,5                 | 4,0   | 127                               | 4,0                 | 30,0  |
| 42                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2,5                 | 6,0   | 133                               | 4,0                 | 32,0  |
| 45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2,5                 | 7,0   | 140; 146                          | 4,5                 | 36,0  |
| 50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2,5                 | 8,0   | 140; 146; 152; 159; 168; 180; 194 | 5,0                 | 45,0  |
| 54                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3,0                 | 11,0  | 203; 219                          | 6,0                 | 50,0  |
| 57                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3,0                 | 13,0  | 245; 273                          | 6,5                 | 50    |
| 60; 63,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3,0                 | 14,0  | 351                               | 8,0                 | 75,0  |
| 68; 70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3,0                 | 16,0  | 377; 402; 426                     | 9,0                 | 75,0  |
| 83                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3,5                 | 19,0  | 450                               | 16,0                | 75,0  |
| 89; 95; 102                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3,5                 | 24,0  | 465                               | 20,0                | 75,0  |
| 108; 114; 121                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4,0                 | 28,0  | 480; 500; 530; 550                | 25,0                | 75,0  |
| Примечания:<br>1 Толщина стенки 2,5; 2,8; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; (6,5); 7,0; (7,5); 8,0; (8,5); 9,0; (9,5); 10,0; 11,0; 12,0; (13,0); 14,0; (15,0) 16,0; 17,0; 18,0; (19,0); 20,0; 22,0; (24,0); 25,0; (26,0); 28,0; 30,0; 32,0; (34,0); (35,0); 36,0; (38,0); 40,0; (42,0); 45,0; (48,0); 50,0; 56,0; 60,0; 63,0; (65,0); 70,0; 75,0 мм.<br>2 Трубы, с толщиной взятой в скобки, применять при проектировании нового оборудования не рекомендуется. |                     |       |                                   |                     |       |

Таблица А.2

Предельные отклонения по наружному диаметру труб

| Наружный диаметр, мм   | Предельные отклонения для труб точности изготовления |               |
|------------------------|------------------------------------------------------|---------------|
|                        | Повышенной                                           | обычной       |
| От 25 до 50 включ.     | $\pm 0,5$                                            | $\pm 0,5$     |
| Свыше 50 до 219 включ. | $\pm 0,8 \%$                                         | $\pm 1,0 \%$  |
| Свыше 219              | $\pm 1,0 \%$                                         | $\pm 1,25 \%$ |

Таблица 2.1

Значения коэффициента надежности  $\gamma$

| Транспортируемые вещества                          | Коэффициент надежности $\gamma$ для трубопроводов категорий |         |      |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------|------|
|                                                    | I, II                                                       | III, IV | V    |
| Газы всех групп, сжиженные газы, вещества группы А | 1,25                                                        | 1,15    | 1,10 |
| Вещества групп Б и В, кроме газов                  | 1,15                                                        | 1,05    | 1,00 |

Таблица 2.2

Значения температурного коэффициента  $A_t$ 

| Марка стали                                                                                                                                                        | Расчетная температура $t$ , °C | Температурный коэффициент $A_t$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Ст3 – по ДСТУ 2651-94; 10, 20, 25 по ГОСТ 1050-74; 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С по ГОСТ 19282-73 (всех групп, категорий поставки и степеней раскисления) | До 200                         | 1,00                            |
|                                                                                                                                                                    | 250                            | 0,90                            |
|                                                                                                                                                                    | 300                            | 0,75                            |
|                                                                                                                                                                    | 350                            | 0,66                            |
|                                                                                                                                                                    | 400                            | 0,52                            |
|                                                                                                                                                                    | 420                            | 0,45                            |
|                                                                                                                                                                    | 430                            | 0,38                            |
|                                                                                                                                                                    | 440                            | 0,33                            |
|                                                                                                                                                                    | 450                            | 2,28                            |
| 15Х5М – по ГОСТ 20072-74                                                                                                                                           | До 200                         | 1,00                            |
|                                                                                                                                                                    | 325                            | 0,90                            |
|                                                                                                                                                                    | 390                            | 0,75                            |
|                                                                                                                                                                    | 430                            | 0,66                            |
|                                                                                                                                                                    | 450                            | 0,52                            |
| 08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т – по ГОСТ 5632-72; 15ХМ – по ГОСТ 4543-73; 12МХ – по ГОСТ 20072-74   | До 200                         | 1,00                            |
|                                                                                                                                                                    | 300                            | 0,90                            |
|                                                                                                                                                                    | 400                            | 0,75                            |
|                                                                                                                                                                    | 450                            | 0,69                            |
|                                                                                                                                                                    |                                |                                 |
| 12Х1МФ, 15Х1МФ – по ГОСТ 20072-74                                                                                                                                  | До 200                         | 1,00                            |
|                                                                                                                                                                    | 320                            | 0,90                            |
|                                                                                                                                                                    | 450                            | 0,75                            |
| 20Х3МВФ – по ГОСТ 20072-74                                                                                                                                         | До 200                         | 1,00                            |
|                                                                                                                                                                    | 350                            | 0,90                            |
|                                                                                                                                                                    | 450                            | 0,72                            |
| Примечания: 1. Для промежуточных значений температур значение величины $A_t$ следует определять линейной интерполяцией.                                            |                                |                                 |
| 2. Для углеродистой стали при температурах от 400 до 450 °C приняты средние значения на ресурс $2 \cdot 10^5$ ч.                                                   |                                |                                 |

Таблица 2.3.

Номинальная толщина стенки труб

Размеры в миллиметрах

| $D$                                   | $\leq 18$ | $\leq 45$ | $\leq 89$ | $\leq 133$ | $\leq 159$ | $\leq 219$ | $\leq 273$ | $\geq 325$             |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| Наименьшая номинальная толщина стенки | 1,5       | 2,0       | 2,5       | 3,0        | 3,5        | 4,0        | 4,5        | 5, но не менее $D/140$ |