

Проектировочный расчет компенсаторов

Исходные данные для расчета

1. Характеристики продукта

- Ø *Название продукта*¹
- Ø Плотность (удельный вес) продукта $\rho_{пр}$ [кгс/см²]
- Ø *Тип продукта: жидкий или газообразный*
- Ø *Наличие сероводородных примесей*

2. Характеристики материала трубы

- Ø *Название материала трубы*
- Ø Временное сопротивление R_1^H [кгс/см²]
- Ø Предел текучести R_2^H [кгс/см²]
- Ø Модуль упругости E [кгс/см²]
- Ø Коэффициент Пуассона μ [–]
- Ø Коэффициент линейного расширения α [1/°C]
- Ø Плотность (удельный вес) $\rho_{тр}$ [кгс/см³]

3. Характеристики материала изоляции и покрытия

- Ø *Название материала изоляции*
- Ø Плотность изоляции (удельный вес) $\rho_{из}$ [кгс/см³]
- Ø Толщина изоляции $h_{из}$ [см]
- Ø *Название материала покрытия*
- Ø Плотность покрытия (удельный вес) $\rho_{пок}$ [кгс/см³]
- Ø Толщина покрытия $h_{пок}$ [см]

4. Характеристики трубы

- Ø Наружный диаметр D_n [см]
- Ø Условный диаметр D_y [см]
- Ø Толщина стенки δ [см]
- Ø Тип компенсатора
- Ø Угол отвода φ [°]
- Ø Кривизна закругления $K_{кр}$ [–]
- Ø Коэффициент трения (скольжения) $K_{тр}$ [–]
- Ø Угол направления реакции в опоре №2 γ_2 [°]
- Ø Угол направления реакции в опоре №3 γ_3 [°]

Примечание. Угол направления реакции в опоре №3 используется только при расчете компенсаторов с двумя углами поворота.

¹ Курсивом выделены необязательные параметры

5. Нормативные коэффициенты

Ø Коэффициент надежности по назначению т/п k_n (п.3[1], табл.9)

Диаметр трубопровода условный, см	Давление, МПа				
	до 7,5	от 7,5 до 10	от 10 до 15	от 15 до 20	от 20 до 32
До 30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05
40 — 50	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
60 — 70	1,00	1,00	1,05	1,10	1,15
80 — 100	1,00	1,05	1,10	1,15	-
120	1,05	1,10	1,15	-	-
140	1,10*	1,15*	-	-	-

Примечание. * только для газопроводов.

Ø Коэффициент условий работы m (п.3[1], табл.10)

Категория трубопровода	Без сероводорода	Среднее содержание с/в	Низкое содержание с/в
I	0,6	0,4	0,5
II	0,75	0,5	0,6
III	0,9	0,6	0,65

Ø Коэффициент надежности по материалу (прочность) k_1 (п.3[1], табл.11)

Качество труб	k_1
1	1,34
2	1,40
3	1,47
4	1,55

Ø Коэффициент надежности по материалу (текучесть) k_2

Ø Коэффициент надежности по нагрузке n (п.3[1], табл.12)

Вид нагрузки	Характер нагрузки	n
Постоянные	Собственный вес т/п	1,1 (0,95)
	Вес изоляции	1,2
	Предварительное напряжение трубопровода и гидростатического давление воды	1,0
Временные длительные	Внутреннее давление транспортируемой среды: жидкой	1,15
	газообразной	1,1
	Вес транспортируемой среды: жидкой	1,0 (0,95)
	газообразной	1,1 (1,0)
	Температурный перепад металла стенок трубопровода	1,1
	Неравномерные деформации грунта	1,5
Кратковременные	Снеговая	1,4
	Гололедная	1,3
	Ветровая	1,2
	Прочие (транспортирование секций, сооружение т/п, испытание, пропуск очистных устройств)	1,0
Особые	Сейсмические, нарушения технологии, поломки оборудования, деформация и изменение структуры грунта и пр.	1,0

Примечание. Значения коэффициентов надежности по нагрузке указанные в скобках, должны приниматься в тех случаях, когда уменьшение нагрузки ухудшает условия работы трубопровода.

6. Нагрузки

∅ Давление внутреннее p [кгс/см²]

∅ Температурный перепад Δt [°C]

Общие параметры

1. Переопределяемые параметры

∅ Толщина стенки $\delta_{тр}$ [см]

Задается не меньше минимального и расчетного значения δ_{min}

∅ Оптимальное расстояние между опорами $l_{оп}$ [см]

Устанавливается с учетом расчетного значения путем округления в меньшую сторону.

2. Характеристики предельного состояния

∅ Расчетное сопротивление на прочность, в кгс/см²

$$R_1 = \frac{R_1^H m}{k_1 k_H} \quad (\text{см. [3], п.3.2, формула 1})$$

∅ Расчетное сопротивление на текучесть, в кгс/см²

$$R_2 = \frac{R_2^H m}{0.9 k_H} \quad (\text{согласно [2], п.8.4, формула 10}),$$

или

$$R_2 = \frac{R_2^H m}{k_2 k_H} \quad (\text{согласно [3], п.3.2, формула 1}).$$

∅ Коэффициенты учета двухосного напряженного состояния

$$y_1 = \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{s_2}{R_1^H} \right)^2} - 0.5 \frac{s_2}{R_1^H} \quad (\text{или } y_1 = 1); \quad (\text{см. [3], п.3.2, формула 3}),$$

где s_2 — максимальное продольное сжимающее напряжение в т/п от расчетных нагрузок [кгс/см²].

$$y_2 = \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{s_{кц}}{R_2^H} \right)^2} - 0.5 \frac{s_{кц}}{R_2^H} \quad (\text{см. [3], п.3.2, формула 6})$$

где $s_{кц}$ — кольцевые напряжения, вызванные внутренним давлением [кгс/см²].

3. Геометрические характеристики поперечного сечения

∅ Минимальная толщина стенки δ_{min}

Расчетная толщина стенки по внутреннему давлению, в см:

$$d = \frac{np_n D_H}{2(R + 0.6np_n)} \quad (\text{согласно СП 34-116-97 [2], п.8.4, формула 9})$$

где p_n — внутреннее давление, кгс/см²;

D_H — наружный диаметр трубопровода, см;

R — расчетное сопротивление металла трубы, кгс/см², равное для трубопроводов, транспортирующих продукты, не содержащие сероводород

$$R = \min\{R_1; R_2\},$$

для трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие продукты

$$R = \frac{R_2 n}{k_n}.$$

n — коэффициент надежности по нагрузке (1,1 — для газообразной среды и 1,15 — для жидкой).

Иной способ расчета толщины стенки изложен в [3] (см. Примечание 1).

Минимальная толщина стенки, в мм:

$$d_{\min} \geq \frac{D_n 10}{140}, \text{ а также}$$

$$d_{\min} \geq \begin{cases} 4 \text{ мм, при } D_y > 20 \text{ см} \\ 3 \text{ мм, при } D_y \leq 20 \text{ см} \end{cases}$$

Ø Внутренний диаметр, в см

$$D_{\text{вн}} = D_n - 2d.$$

Ø Площадь поперечного сечения

$$F = \frac{p}{4} (D_n^2 - D_{\text{вн}}^2) \text{ или } F = p d (D_n - d) \text{ [см}^2\text{]}$$

Ø Момент инерции поперечного сечения, в см⁴

$$J = \frac{p}{64} (D_n^4 - D_{\text{вн}}^4).$$

Ø Сопротивление изгибу, в см³

$$W = \frac{2J}{D_n}.$$

Ø Диаметр с учетом изоляции, в см

$$D_{\text{из}} = D_n + 2h_{\text{из}}.$$

Ø Диаметр полный, в см

$$D_{\text{полн}} = D_n + 2h_{\text{из}} + 2h_{\text{покр}} \text{ или } D_{\text{полн}} = D_{\text{из}} + 2h_{\text{покр}}.$$

4. Временные и кратковременные нагрузки

Ø Вес погонный трубы, в кгс/см

$$q_{\text{тр}} = 1.1 r_{\text{тр}} F.$$

Ø Вес погонный изоляции и покрытия

$$q_{\text{из}} = 1.1 \frac{p}{4} (D_{\text{из}}^2 - D_n^2) r_{\text{из}} + \frac{p}{4} (D_{\text{полн}}^2 - D_{\text{из}}^2) r_{\text{покр}}.$$

Ø Погонный вес продукта, в кгс/см

$$q_{\text{пр}} = \frac{p}{4} D_{\text{вн}}^2 r_{\text{пр}} \text{ [кгс/см] (для жидкого продукта).}$$

Ø Снеговая нагрузка погонная, в кгс/см

$$q_{\text{сн}} = \frac{1.4 \cdot 0.4 \cdot s_0}{10^4} D_{\text{полн}},$$

где s_0 — нормативное значение веса на 1 м² гориз. поверхности земли.

Для IV снегового района $s_0 = 150 \text{ кгс/м}^2$:

$$q_{\text{сн}} = \frac{1.4 \cdot 0.4 \cdot 150}{10^4} D_{\text{полн}}$$

Ø Ветровая нагрузка погонная, в кгс/см

$$q_{ветр} = \frac{1.2 \cdot 0.75 \cdot 1.4 \cdot w_0}{10^4} D_{полн},$$

где w_0 — нормативная ветровая нагрузка.

Ветровой район	I	II	III	IV	V	VI	VII
Нормативная ветровая нагрузка w_0 , кПа (кгс/м ²)	0.23 (23)	0.3 (30)	0.38 (38)	0.48 (48)	0.6 (60)	0.73 (73)	0.85 (85)

Для снегового района II $w_0 = 30$ кгс/м²:

$$q_{ветр} = \frac{1.2 \cdot 0.75 \cdot 1.4 \cdot 30}{10^4} D_{полн}$$

Ø Гололедная нагрузка погонная, в кгс/см

$$q_{лед} = 1.3 \cdot 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot t_i \cdot r_i \cdot D_{полн},$$

где t_i — толщина слоя льда, в см,

r_i — плотность льда (СНиП, §7, п.7.2) $r_i = 0.9$ г/см³.

Гололедный район	I	II	III	IV	V
Толщина слоя, мм	≥3	5	10	15	≥20

Для гололедного района II $t = 5$ мм:

$$q_{лед} = 1.3 \cdot 1.7 \cdot 0.5 \cdot 10^{-4} \cdot D_{полн}$$

Ø Полная нагрузка погонная, в кгс/см

$$q_{полн} = q_{тр} + q_{из} + 0.95 \cdot q_{нр} + 0.9 \cdot (q_{сн} + q_{вет} + q_{лед}) \text{ [кгс/см]}$$

5. Расчет напряжений и деформаций

Ø Кольцевые напряжения, в кгс/см²

$$s_{кц} = \frac{1.1 p D_{вн}}{2d} \text{ или } s_{кц} = np \left(\frac{D_H}{2d} - 1 \right).$$

Ø Продольные напряжения от давления, в кгс/см²

$$s_{прод} = m s_{кц}.$$

Ø Относительное удлинение трубопровода, в см

$$d_{тр} = a \Delta t + \frac{1.1 p D_{вн}}{10 E d} \text{ или } d_{тр} = a \Delta t + m s_{кц}.$$

Ø Полное удлинение системы, в см

$$\Delta_{тр} = B d_{тр} = B \left(a \Delta t + \frac{np D_{вн}}{10 E d} \right),$$

где B — расстояние между неподвижными опорами.

Ø Корректирующий коэффициент

$$n_{тр} = \frac{d_{тр}}{a \cdot 60 + \frac{1.1 \cdot 75 \cdot D_{вн}}{10 E d}} \text{ или } n_{тр} = \frac{d_{тр}}{(d_{тр})_1} = \frac{d_{тр}}{a \cdot 60 + m \frac{75 \cdot D_{вн}}{2 E d}}$$

Ø Условие удовлетворения прочности на растяжение

$$s_1^{\max} \leq R_2^H$$

Ø Условие удовлетворения прочности на сжатие

$$s_2^{\max} \leq y_2 R_2^H$$

6. Параметры компенсационного участка

- Ø Радиус кривизны криволинейной вставки, в см

$$r = K_{кр} D_n.$$

- Ø Длина криволинейной вставки, в см

$$l_{крив} = \frac{P}{180} r j.$$

- Ø Прогиб системы расчетный, в см

$$f_{расч} = \frac{q_{полн} (l_{онм})^4}{EJ \cdot 384}.$$

- Ø Прогиб системы допустимый, в см

$$f_{доп} \leq 0.02 D_y.$$

- Ø Номинальное (максимально допустимое) расстояние между опорами, в см

$$l_{онм} = \sqrt{\left(2R_2 - s_{кц} + 2Ea\Delta t - 2 \frac{ED_n}{(2D_n 900)}\right) \frac{12W}{4q_{полн}}} \quad \text{— для трапецеидального компенсатора;}$$

$$l_{онм} = \sqrt{(R_2 - 0.5s_{кц}) \frac{12W}{4q_{полн}}} \quad \text{— для П-образного компенсатора;}$$

$$l_{онм} = \sqrt{\frac{(2R_2 - s_{кц} - 2s_{унр} - 2s_{тр}) W}{4hq_{полн}}} \quad \text{— для слабоизогнутого компенсационного участка.}$$

В общем случае:

$$l_{онм} = \sqrt{(R_2 - 0.5s_{кц}) \frac{12W}{q_{полн}}} \quad \text{(для многопролетной системы)}$$

или

$$l_{онм} = \sqrt{(R_2 - 0.5s_{кц}) \frac{16W}{q_{полн}}} \quad \text{(для однопролетной системы).}$$

- Ø Максимально возможное расстояние между опорами по допустимому прогибу, в см

$$l_{онм} \leq \sqrt{\frac{0.02 D_y EJ \cdot 384}{q_{полн}}} = 2.77 \sqrt{\frac{D_y EJ}{q_{полн}}}.$$

- Ø Расстояние между неподвижными опорами, в см, кроме компенсатора с одним углом поворота:

$$B = L + nl_{онм},$$

где L — длина компенсационного участка, в см,

n — число опор вне компенсационного участка, (как правило, кратное 2),

$l_{онм}$ — заданное расстояние между опорами, в см.

7. Вспомогательные геометрические параметры

- Ø Средний радиус сечения трубы, в см:

$$r = 0.5(D_n - d).$$

Ø Геометрическая характеристика кривой трубы, в см:

$$l = \frac{rd}{r^2}.$$

Ø Параметр кривой

$$l^* = \frac{2}{p} \frac{l_{крив}}{D_n} \sqrt{\frac{d}{r}}$$

Ø Параметр внутреннего давления

$$p^* = \frac{p}{E} \left(l \frac{r}{d} \right)^2$$

Ø Коэффициент понижения жесткости

$$K_j = \frac{1 + \frac{12}{1-m^2} l^2 + (l^*)^{-4} l^2 + 48 p^*}{10 + \frac{12}{1-m^2} l^2 + (l^*)^{-4} l^2 + 48 p^*}$$

Приближенная формула для средних значений λ :

$$K_j = 0.58 l$$

Приближенная формула для крутозагнутых колен (с малым значением λ):

$$K_j = \frac{l}{1.65}$$

Переопределяемые специфические параметры

1. Трапецеидальный компенсатор

Ø Стрелка (вылет) компенсационного участка l_k [см]

Устанавливается с учетом расчетного значения и округляется для удобства разбивки

Ø Длина свободно-подвижной опоры $l_{под}$ [см]

Ø Число опор без учета компенсационного участка $n_{оп}$ [—]

Округляется в меньшую сторону расчетное значение

Ø Длина компенсационного участка $L_{комп}$ [см]

2. П-образный компенсатор

Ø Вылет компенсатора l_k [см]

Подбирается значение, близкое к расстоянию между смежными опорами $\sim l_{оп}$

После задания величины вылета необходимо проверить, не превышают ли продольные напряжения в компенсаторе допустимые:

$$s_{комп} \leq s_{комп.доп}$$

Если условие не выполняется, необходимо выбрать другое значение и повторить проверку.

Ø Длина свободно-подвижной опоры $l_{подв}$ [см]

Подбирается значение, близкое к расстоянию между опорами $\sim l_{оп}$.

Ø Число опор без учета компенсационного участка $n_{оп}$ [—]

Округляется в меньшую сторону расчетное значение

Ø Длина большого пролета $L_{бол}$ [см]

Соразмерна длине компенсационного участка $\sim L_{комп}$.

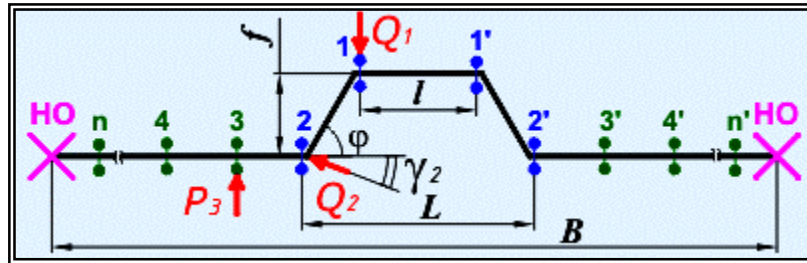
Ø Длина меньшего пролета $L_{мен}$ [см]

Может быть ~ 0.

Вычисляемые специфические параметры

Здесь и далее символ l обозначает заданное расстояние между смежными опорами.

1. Трапецеидальный компенсатор



Ø Приведенная длина пролета, в см:

$$l_n = l - 2l_{крив} + \frac{2l_{крив}}{K_j}.$$

Ø Расчетное значение стрелки компенсационного участка, в см:

при $r \leq 15D_n$

$$l_k = (l - 2l_{крив} + 2D_n) \sin j + 2r(1 - \cos j),$$

при $r > 15D_n$

$$l_k = (l - l_{крив}) \sin j + 2r(1 - \cos j).$$

Ø Длина компенсационного участка, в см:

$$L = 2l_k \cdot \operatorname{tg} j + l + 4 \cdot 20 + 2 \cdot l_{нодв} + 4 \cdot l_{крив} \text{ [см]}$$

Ø Сила реакции, действующая на участок между опорами, в кгс:

$$Q = q_{пол} \cdot l \cdot K_{тр}.$$

Ø Изгибное напряжение от силы Q , в кгс/см²:

$$s_Q^{изг} = \frac{Ql}{8W} (1 + \sin g_2) n_{тр}.$$

Ø Продольное напряжение от силы Q , в кгс/см²:

$$s_Q^{прод} = \left[\frac{Q(1 + \sin g_2)}{2F \sin j} + \frac{Q}{F} \left(\frac{\cos j}{\sin j} + \cos g_2 - 3 \right) \right] n_{тр}.$$

Ø Напряжения от ветровой нагрузки, в кгс/см²:

$$s_{вет} = \frac{q_{вет} l^2}{12W} + \frac{q_{вет} l}{2F \sin j}.$$

Ø Длина трубопровода между неподвижными опорами (предельное значение), в см:

$$B = \frac{R_2 - s_Q^{изг} + s_Q^{прод} - s_p - s_{вет}}{\frac{6d_{тр} EJ}{l_k (24l^2 + 22l l_n + 3l_n^2)} \left(\frac{4l + 2l_n}{W} - \frac{6l + 3l_n}{Fl_k} \right)}.$$

Число B округляется в меньшую сторону до величины, равной

$B = L + n \cdot l$ (кроме компенсатора с одним углом поворота),

$B = (n + 1) \cdot l$ (для компенсатора с одним углом поворота).

В случае невыполнения условий прочности:

$$s_1^{\max} \leq R_2^H \text{ и } s_2^{\max} \leq y_2 R_2^H$$

число опор надо уменьшить, пересчитать расстояние B , а также наибольшие напряжения, а затем вернуть к проверке условий прочности; процесс продолжается до тех пор, пока не будут удовлетворены условия прочности.

Ø Наибольшие растягивающие напряжение, в кгс/см²:

$$s_1^{\max} = \frac{6\Delta_{tp} EJ}{l_k (24l^2 + 22l l_n + 3l_n^2)} \left(\frac{4l + 2l_n}{W} - \frac{6l + 3l_n}{Fl_k} \right) + \left[\frac{Ql}{8W} (1 + \sin g_2) - \frac{Q(1 + \sin g_2)}{2F \sin j} - \frac{Q}{F} \left(\frac{\cos j}{\sin j} + \cos g_2 - 3 \right) \right] n_{tp} + s_p + s_{вем}$$

Ø Наибольшие сжимающие напряжение, в кгс/см²:

$$s_2^{\max} = \frac{6\Delta_{tp} EJ}{l_k (24l^2 + 22l l_n + 3l_n^2)} \left(\frac{4l + 2l_n}{W} + \frac{6l + 3l_n}{Fl_k} \right) + \left[\frac{Ql}{8W} (1 + \sin g_2) + \frac{Q(1 + \sin g_2)}{2F \sin j} + \frac{Q}{F} \left(\frac{\cos j}{\sin j} + \cos g_2 - 3 \right) \right] n_{tp} - s_p + s_{вем}$$

Ø Поперечное горизонтальное усилие на боковой ограничитель опоры №3, в кгс:

$$P_3 = \frac{3Q}{2} (1 + \sin g_2) \left(\frac{\Delta_{tp} - L_1 d_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) n_{tp} - \frac{9\Delta_{tp} EJ (l + l_n)}{l \cdot l_k (24l^2 + 22l \cdot l_n + 3l_n^2)} \pm q_{вем} l (2 + \cos j),$$

где L_1 — расстояние между опорами №3 и №3': $L_1 = L + 2l$.

Знак последнего члена в выражении для P_3 зависит от знака суммы двух первых членов. Если сумма положительна, то третий член принимает знак плюс, при отрицательной сумме — знак минус.

Ø Наибольшее продольное усилие на неподвижную опору, в кгс:

$$A_{н.о.} = \frac{3\Delta_{tp} EJ (11l + 6l_n)}{l_k^2 (24l^2 + 22l \cdot l_n + 3l_n^2)} + \left[\frac{Q}{2 \sin j} (1 + \sin g_2) + Q \left(\frac{\cos j}{\sin j} + \cos g_2 \right) \right] n_{tp} + \left[\text{кгс} \right] + \frac{B - 7ld_{tp}}{2} q_{полн} K_{mp} + \frac{q_{вем} l}{2 \sin j}$$

Ø Перемещение вершины компенсатора на опорах №1 и 2, в кгс/см²:

$$Y_1 = \frac{3\Delta_{tp} (l + l_n \cos j)}{2l_k} - \left[\frac{5Ql^3}{22EJ} (1 + \sin g_2) \left(\frac{\Delta_{tp} - L_1 d_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) \right] n_{tp},$$

$$Y_2 = 0.5Y_1$$

Ø Наибольшие изгибающие моменты на опорах №1, 2 и 3, в кгс*см:

на опоре №1:

$$M_1 = \frac{6\Delta_{tp} EJ (4l + 2l_n)}{l_k (24l^2 + 22l \cdot l_n + 3l_n^2)} + \left[\frac{Ql}{10} (1 + \sin g_2) \right] n_{tp} + q_{вем} l^2,$$

на опоре №2:

$$M_2 = - \frac{9\Delta_{tp} EJ (l + l_n)}{l_k (24l^2 + 22l \cdot l_n + 3l_n^2)} + \left[\frac{Ql}{20} (1 + \sin g_2) \right] n_{tp} - \frac{1}{2} q_{вем} l^2,$$

на опоре №3:

$$M_3 = - \frac{9\Delta_{tp} EJ (l + l_n)}{l_k (24l^2 + 22l \cdot l_n + 3l_n^2)} + \left[\frac{Ql}{20} (1 + \sin g_2) \right] n_{tp} \pm \frac{3}{2} q_{вем} l^2.$$

Знак последнего члена зависит от знака суммы двух предыдущих членов: при положительной сумме третий член принимает знак плюс, при отрицательном — минус.

- ∅ Продольное усилие на промежуточную неподвижную опору, в кгс:

$$A'_{н.о.} = 0.3 \cdot A_{н.о.}.$$

- ∅ Нагрузки на подвижную опору, в кгс:

$$Q_{верт} = q_{полн} l,$$

$$Q_{горз} = m Q_{верт}.$$

- ∅ Горизонтальные нагрузки, в кгс:

на опору №3:

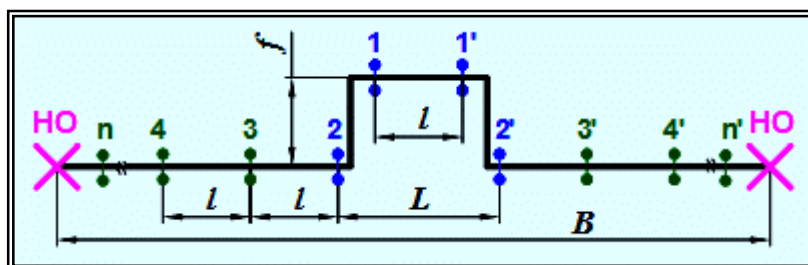
$$A_{гор.№3} = Q_{верт} K_{тр} + P_3 K_{тр},$$

на остальные опоры, в кгс:

$$A_{гор.попер.} = 1.2 q_{верт} l,$$

$$A_{гор.пр.подв} = Q_{верт} K_{тр} + A_{гор} K_{тр}.$$

2. П-образный компенсатор



- ∅ Ширина полки компенсатора

$$l_{пол} = 2l_{крив} + 2 \cdot 20 + l_{подв} + l \text{ [см]}$$

- ∅ Длина компенсационного участка

$$L = 2l_{крив} + 2 \cdot 20 + l_{подв} \text{ [см]}$$

- ∅ Расстояние между неподвижными опорами

$$B = L + n \cdot l \text{ [см]}$$

Где n — число подвижных опор; должно быть кратно 2.

- ∅ Коэффициент увеличения напряжений

$$m_k = \frac{0.9}{\sqrt[3]{l^2}}$$

- ∅ Напряжения в компенсаторе

$$s_{комп} = \frac{ED_n l_k m_k \Delta t_p}{2A} \text{ [кгс/см}^2\text{]}$$

где

$$A = \frac{1}{K_j} (p r l_k^2 - 2.28 r^2 l_k + 1.4 r^3) + 0.67 l_k^3 + l_{подв} l_k^2 - 4 r l_k^2 + 2 r^2 l_k - 1.33 r^3 \text{ [см}^3\text{]}$$

- ∅ Реакция отпора компенсатора

$$H_k = \frac{2W s_{комп}}{m_k l_k} \text{ [кгс]}$$

- ∅ Нагрузки на подвижную опору

$$Q_{верт} = q_{полн} l \text{ [кгс]}$$

$$Q_{горт} = mQ_{верт} [\text{кгс}]$$

Ø Горизонтальные нагрузки

На неподвижную опору (пролеты равные):

$$A_{гор.неподв} = m(H_k + 0.5K_{тр}q_{полн}L) [\text{кгс}]$$

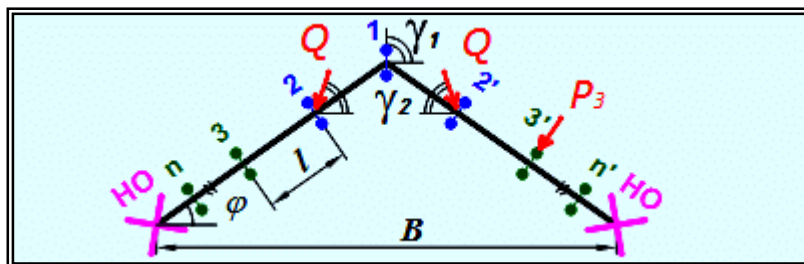
На неподвижную опору (пролеты разные):

$$A_{гор.неп.раз} = (H_k + K_{тр}q_{полн}L_{бол}) - 0.7(H_k + K_{тр}q_{полн}L_{мал}) [\text{кгс}]$$

На крайнюю неподвижную опору:

$$A_{гор.неп.крайн} = (H_k + K_{тр}q_{полн}L_{крайн}) [\text{кгс}]$$

3. Система с одним углом поворота (Λ-образный компенсатор)



Ø Приведенная длина пролета

$$l_n = l - \frac{l_{крив}}{2} + \frac{l_{крив}}{2K_j} [\text{см}]$$

Ø Изгибное напряжение от силы Q

$$s_Q^{изг} = \frac{2Ql}{5W} \sin(g_2 - j) n_{tp} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Продольное напряжение от силы Q

$$s_Q^{прод} = \frac{Q}{2F} \frac{\cos j}{\sin j} n_{tp} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Напряжения от ветровой нагрузки

$$s_{вет} = q_{вет} (l \cos j)^2 \left(\frac{1}{13W} - \frac{3}{4Fl \sin j} \right) [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Длина трубопровода между неподвижными опорами (предельное значение)

$$B = \frac{R_2 - s_Q^{изг} + s_Q^{прод} - s_p - s_{вет}}{\frac{3\Delta_{tp} EJ \cos 2j}{5l l_n \tan j} \left(\frac{1}{W} - \frac{\cos 2j}{Fl \sin 2j} \right)} [\text{см}]$$

Число B округляется в меньшую сторону до величины, кратной $2 \cdot l$

Затем надо проверить выполнение условий прочности:

$$s_1^{\max} \leq R_2^H \text{ и } |s_2^{\max}| \leq y_2 R_2^H$$

В случае невыполнения этих условий необходимо уменьшить длину системы; процесс продолжается до выполнения условий прочности.

Внимание! Критический случай при угле поворота 45° !

Ø Наибольшие растягивающие напряжение

$$s_1^{\max} = \frac{3\Delta_{tp} EJ \cos 2j}{5l l_n \tan j} \left(\frac{1}{W} - \frac{\cos 2j}{Fl \sin j} \right) + \left[\frac{2Ql}{5W} \sin(g_2 - j) - \frac{Q}{2F} \frac{\cos j}{\sin j} \right] n_{tp} + s_p + s_{вет} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Наибольшие сжимающие напряжение

$$s_2^{\max} = \frac{3\Delta_{tp} EJ \cos 2j}{5l l_n \operatorname{tg} j} \left(\frac{1}{W} + \frac{\cos 2j}{Fl \sin j} \right) + \left[\frac{2Ql}{5W} \sin(g_2 - j) + \frac{Q \cos j}{2F \sin j} \right] n_{tp} - s_p + s_{\text{вем}} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Поперечное горизонтальное усилие на боковой ограничитель опоры №3

$$P_3 = \frac{\Delta_{tp} EJ \cos 2j}{l^2 l_n \operatorname{tg} j} + \left[\frac{Q}{2} \sin(g_2 - j) \left(\frac{\Delta_{tp} - 4ld_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) \right] n_{tp} + 3q_{\text{вем}} l \cos^2 j [\text{кгс}]$$

Ø Наибольшее продольное усилие на неподвижную опору

$$A_{н.о.} = \frac{3\Delta_{tp} EJ \cos^2 2j}{5l^2 \cdot l_n \operatorname{tg} j \sin j} + \left(\frac{B}{2} q_{\text{нолн}} K_{mp} \right) n_{tp} + \frac{3q_{\text{вем}} l}{4 \operatorname{tg}^2 j} [\text{кгс}]$$

Ø Перемещение вершины компенсатора на опорах №1 и 2

$$Y_1 = \frac{\Delta_{tp} l_n \cos j}{2l \operatorname{tg} j} - \left[\frac{Ql^3 \cos j}{30 EJ} \sin(g_2 - j) \left(\frac{\Delta_{tp} - 2ld_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) \right] n_{tp} - \frac{A_{н.о.} B}{2EF} [\text{см}]$$

На опоре №2:

$$Y_2 = \frac{1}{2} Y_1 [\text{см}]$$

Ø Наибольшие изгибающие моменты на опорах №1 и 3

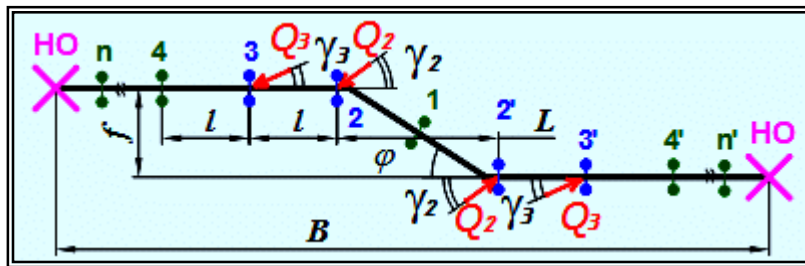
На опоре №1:

$$M_1 = \frac{3\Delta_{tp} EJ}{10l l_n \operatorname{tg} j} (2 \cos^2 j - \sin^2 j) + \frac{2Ql}{5} \sin(g_2 - j) n_{tp} + \frac{q_{\text{вем}} l^2 \cos j}{12} [\text{кгс*см}]$$

На опоре №3:

$$M_3 = -\frac{3\Delta_{tp} EJ}{20l l_n \operatorname{tg} j} (3 \cos^2 j - 4 \sin^2 j) + \frac{Ql}{5} \sin(g_2 - j) n_{tp} - \frac{3q_{\text{вем}} l^2 \cos j}{5} [\text{кгс*см}]$$

4. Система с двумя углами поворота (Z-образный компенсатор)



Ø Приведенная длина пролета

$$l_n = l - l_{\text{крив}} + \frac{l_{\text{крив}}}{K_j} [\text{см}]$$

В предварительных расчетах допускается принимать $l_n = l$.

Ø Расчетное значение стрелки компенсационного участка

При $r \leq 15D_n$

$$l_k = 2 \left[(l - l_{\text{крив}} + D_n) \sin j + 2r (1 - \cos j) \right] [\text{см}]$$

При $r > 15D_n$

$$l_k = (2l - l_{\text{крив}}) \sin j + 2r (1 - \cos j) [\text{см}]$$

Ø Изгибное напряжение от силы Q

$$s_Q^{изг} = \frac{Ql \sin g_3}{4W} n_{tp} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Продольное напряжение от силы Q

$$s_Q^{прод} = \left[\frac{2Ql \cos j}{Fl_\kappa} (\sin g_2 + \sin g_3) + \frac{Q}{F} (\cos g_2 + \cos g_3) + \frac{2Q}{F} \right] n_{tp} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Напряжения от ветровой нагрузки

$$s_{вет} = \frac{q_{вет} l^2 (3 + \cos j)}{12W} - \frac{q_{вет} l (1 + 3 \cos j)}{5F \sin j} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Длина трубопровода между неподвижными опорами (предельное значение)

$$B = \frac{R_2 - s_Q^{изг} + s_Q^{прод} - s_p - s_{вет}}{\frac{3\Delta_{tp} EJ}{4l^2 l_\kappa} \left(\frac{2l + l_n \cos j}{W} - \frac{3l + 4l_n \cos j + 2l_n \cos^2 j}{Fl} \right)} [\text{см}]$$

Число B округляется в меньшую сторону до величины, равной $L + nl$, где n — число, кратное двум.

Затем надо проверить выполнение условий прочности:

$$s_1^{\max} \leq R_2^H \text{ и } |s_2^{\max}| \leq y_2 R_2^H$$

В случае невыполнения этих условий необходимо уменьшить величину B и проверить напряжения повторно.

Ø Наибольшие растягивающие напряжение в опоре №1

$$s_1^{\max} = \frac{3\Delta_{tp} EJ}{4l^2 l_\kappa} \left(\frac{2l + l_n \cos j}{W} - \frac{3l + 4l_n \cos j + 2l_n \cos^2 j}{Fl_\kappa} \right) + \left[\frac{Ql \sin g_3}{4W} - \frac{2Ql \cos j}{Fl_\kappa} (\sin g_2 + \sin g_3) - \frac{Q}{F} (\cos g_2 + \cos g_3) - \frac{2Q}{F} \right] n_{tp} + s_p + s_{вет} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Наибольшие сжимающие напряжение в опоре №1

$$s_2^{\max} = \frac{3\Delta_{tp} EJ}{4l^2 l_\kappa} \left(\frac{2l + l_n \cos j}{W} + \frac{3l + 4l_n \cos j + 2l_n \cos^2 j}{Fl_\kappa} \right) + \left[\frac{Ql \sin g_3}{4W} + \frac{2Ql \cos j}{Fl_\kappa} (\sin g_2 + \sin g_3) + \frac{Q}{F} (\cos g_2 + \cos g_3) + \frac{2Q}{F} \right] n_{tp} - s_p + s_{вет} [\text{кгс/см}^2]$$

Ø Поперечное горизонтальное усилие на боковой ограничитель опоры №3

$$P_3 = \frac{3\Delta_{tp} EJ (3l + 4l_n \cos j)}{8l^3 l_\kappa} - \frac{3Q}{4} \sin g_2 \left(\frac{\Delta_{tp} - 2ld_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) n_{tp} \pm \frac{q_{вет} l}{2} (3 + \cos j) [\text{кгс}]$$

Знак последнего члена зависит от знака суммы двух предыдущих членов: при положительной сумме третий член принимает знак плюс, при отрицательном — минус.

Ø Наибольшее продольное усилие на неподвижную опору

$$A_{н.о.} = \frac{3\Delta_{tp} EJ (3l + 4l_n \cos j + 2l_n \cos^2 j)}{4l^3 \cdot l_\kappa} + \left[\frac{2Ql \cos j}{l_\kappa} (\sin g_2 + \sin g_3) + Q (\cos g_2 + \cos g_3) \right] n_{tp} + \frac{q_{вет} l}{5 \sin j} (1 + 3 \cos j) [\text{кгс}]$$

Ø Перемещение вершины компенсатора на опорах №2 и 3

$$Y_2 = \frac{\Delta_{tp} l_n \cos j}{l_k} - \frac{Q l^3 \cos j}{40 E J} \frac{(\sin g_2 + \sin g_3)}{2} \left(\frac{\Delta_{tp} - 2 l d_{tp}}{\Delta_{tp}} \right) n_{tp} - \frac{A_{н.о.} B}{2 E F} [\text{см}]$$

На опоре №3 и 1:

$$Y_3 = \frac{1}{2} Y_2; \quad Y_1 = 0$$

Ø Наибольшие изгибающие моменты на опорах №2, 3 и 4

На опоре №2:

$$M_2 = \frac{3 \Delta_{tp} E J (3l + 4l_n \cos j)}{8 l^2 \cdot l_k} + \frac{Q l \sin g_3}{4} n_{tp} + \frac{q_{вем} l^2 (3 + \cos j)}{12} [\text{кгс*см}]$$

На опоре №3:

$$M_3 = \frac{3 \Delta_{tp} E J}{8 l \cdot l_k} - \frac{5 Q l \sin g_3}{16} n_{tp} + \frac{q_{вем} l^2 (1 + \cos j)}{6} [\text{кгс*см}]$$

На опоре №4:

$$M_4 = - \frac{3 \Delta_{tp} E J (l + 2l_n \cos j)}{8 l^2 \cdot l_k} + \frac{3 Q l \sin g_3}{16} n_{tp} - \frac{5 q_{вем} l^2 (3 + \cos j)}{12} [\text{кгс*см}]$$

Примечания

1. Согласно Р 277-83 ([3], п. 3.3) толщина стенки трубы определяется по следующей формуле:

$$d_{расч} = \frac{n p D_n}{2(y_1 R_1 + n p)} [\text{см}] \quad (\text{см. [3], п.3.2, формула 2}),$$

где n — коэффициент перегрузки;

p — внутреннее давление, кгс/см²;

D_n — наружный диаметр трубопровода, см;

R_1 — расчетное сопротивление металла трубы, кгс/см²;

y_1 — коэффициент учета двухосного состояния.

Ссылки

1. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов СП 34-116-97 (МинТопЭнерго РФ, 1997)
2. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85*. Минстрой РФ, 1996.
3. Руководство по проектированию надземных трубопроводов Р 277-83, ВНИИСТ, 1984.