

Расчет характеристик упругого изгиба

Согласно СНиП 2.05.06.85* расчет характеристик упругого изгиба выполняется с помощью следующих формул.

Кольцевые напряжения в трубе (в МПа) вычисляются следующим образом:

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{npD_{\text{вн}}}{2\delta},$$

где p — максимальное рабочее давление, МПа,

$D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр трубопровода, м,

δ — толщина стенки трубы, м,

n — коэффициент надежности по нагрузке.

Расчетное сопротивление растяжению определяется по формуле:

$$\overline{R}_2 = \frac{R_2^H m}{k_2 k_H},$$

где R_2^H — нормативный предел текучести материала трубы (по ГОСТ или ТУ),

k_2 — коэффициент надежности по материалу,

k_H — коэффициент надежности по назначению трубопровода,

m — коэффициент условий работы.

Значение коэффициента ψ_3 , используемого для учета поперечных напряжений, зависит от знака суммарных продольных напряжений. Если $(\mu\sigma_{\text{кц}} - \alpha\Delta t E) \geq 0$, то $\psi_3 = 1$, иначе

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{\text{кц}}}{m/0,9k_H \cdot R_2^H} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{\text{кц}}}{m/0,9k_H \cdot R_2^H},$$

где α — коэффициент линейного расширения материала трубы, 1/м;

E — модуль упругости материала трубопровода, МПа;

μ — коэффициент Пуассона;

Δt — максимальный температурный перепад для подземных трубопровода согласно СНиП ($\pm 40^\circ$).

Расчет упругого изгиба по Айнбиндеру

Радиус упругого изгиба выбирается как наибольшее значение из двух величин — радиуса для сжатой трубы и радиуса растянутой трубы ([3.33]; здесь и далее в этом разделе указаны номера формул из [1]), в метрах:

$$\rho_{\text{упр}} = \max(\rho_{\text{сж}}, \rho_{\text{раст}}),$$

где $\rho_{\text{сж}} = \frac{ED}{2(\psi_3 \overline{R_2} + \mu \sigma_{\text{кц}} - \alpha \Delta t E)}$ — радиус упругого изгиба для сжатой трубы ([3.34]),

$$\rho_{\text{раст}} = \frac{ED}{2(\overline{R_2} - \mu \sigma_{\text{кц}} + \alpha \Delta t E)}$$

([3.35]),

где E — модуль упругости материала трубопровода, МПа;

μ — коэффициент Пуассона;

D — наружный диаметр трубопровода, м,

α — коэффициент линейного расширения материала трубы, 1/м;

$\sigma_{\text{кц}}$ — кольцевые напряжения (согласно СНиП 2.05.06.85*), МПа,

Δt — температурный перепад, °С,

$\overline{R_2}$ — расчетное сопротивление растяжению для материала трубы (согласно СНиП 2.05.06.85*), МПа.

ψ_3 — коэффициент влияния поперечных напряжений (согласно СНиП 2.05.06.85*).

Радиус дна траншеи определяется из условия прилегания трубопровода ко дну траншеи при его монтаже:

$$\rho_{\text{вогн}} = \sqrt[3]{\frac{32}{9} \frac{EI}{q_{\text{тр}} \beta^2}} \text{ — для вогнутого профиля ([3.76]),}$$

$$\rho_{\text{вып}} = \sqrt[3]{\frac{8}{9} \frac{EI}{q_{\text{тр}} \beta^2}} \text{ — для выпуклого профиля ([3.78]),}$$

где E — модуль упругости, Па,

I — момент инерции поперечного сечения трубы, м⁴,

$q_{\text{тр}}$ — погонный вес трубы (с учетом изоляции), Н/м,

β — угол поворота, рад.

Профиль траншеи, имеющей вогнутый профиль, в вертикальной плоскости между линейными частями трубопровода, полученный из условия прилегания трубопровода к дну траншеи под действием веса трубопровода при монтаже в траншею, определяется по формуле ([3.66]):

$$y_0 = \frac{3}{2} \rho \beta^2 \left(\frac{\xi}{2} - \xi^3 + \frac{\xi^4}{4} \right) \text{ при } \xi = 0 \div 1,$$

где ξ — относительная координата в продольном направлении,

$\rho = \rho_{\text{упр}}$, если угол поворота $\beta > \beta_{\text{кр.вогн}}$, определенного соотношением

$$\beta_{\text{кр.вогн.}} = 1,885 \sqrt{\frac{EI}{q_{\text{тр}} \rho_{\text{упр}}^3}},$$

где $\rho_{\text{упр}}$ — радиус упругого изгиба, м.

Аналогично определяется линия дна траншеи выпуклого профиля ([3.75]):

$$y_0 = \frac{3}{2} \rho \beta^2 (3\xi^2 - 4|\xi|^3 + 2\xi^4) \text{ при } \xi = -0,5 \div +0,5,$$

где $\rho = \rho_{\text{упр}}$, если угол поворота $\beta > \beta_{\text{кр.вып.}}$, определенного соотношением

$$\beta_{\text{кр.вып.}} = 0,943 \sqrt{\frac{EI}{q_{\text{тр}} \rho_{\text{упр}}^3}}.$$

Величина тангенса для вогнутого профиля (в метрах):

$$T = \frac{3}{4} \rho \beta,$$

для выпуклого профиля:

$$T = \frac{3}{2} \rho \beta.$$

Расчет по методу Бабина

Для определения минимально допустимого по условиям прочности радиуса упругого изгиба необходимо вычислить максимально допустимые напряжения изгиба по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{и}} \leq \psi_3 \frac{m}{0.9k_{\text{и}}} R_2^{\text{и}} - |\mu \sigma_{\text{гв}}^{\text{и}} - \alpha_t E \Delta t|.$$

При этом кольцевые напряжения в стенках трубопровода от нормативного внутреннего давления не должны превышать следующую величину (в МПа):

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{и}} \leq \frac{m}{0.9k_{\text{и}}} R_2^{\text{и}}.$$

Радиус изгиба траншеи в вертикальной плоскости на вогнутом рельефе, как максимальное значение из двух величин:

$$\rho_{\text{вогн}} \geq \frac{3ED_{\text{и}}}{5\sigma_{\text{и}}} \text{ — из условий прочности,}$$

$$\rho_{\text{вогн}} = \sqrt[3]{\frac{384EI(1 - \cos \frac{\beta}{2})}{5q_{\text{тр}}\beta^4}} \text{ — из условий прилегания ко дну траншеи}$$

где β — угол поворота трассы, рад;

$q_{\text{тр}} = q_{\text{м}} + q_{\text{из}}$ — расчетная нагрузка от собственного веса трубопровода, Н/м;

$q_{\text{м}}$ — вес металла,

$q_{\text{из}}$ — вес изоляции.

Радиус изгиба траншеи в вертикальной плоскости на выпуклом рельефе, как максимальное значение из двух величин:

$$\rho_{\text{вып}} \geq \frac{ED_{\text{и}}}{2\sigma_{\text{и}}} \text{ — из условий прочности,}$$

$$\rho_{\text{вып}} = \sqrt[3]{\frac{8EI}{q_{\text{тр}}\beta^2}} \text{ — из условий прилегания ко дну траншеи.}$$

Во всех случаях выбирается наибольших радиус.

Пример расчета

Исходные данные для расчета	
Диаметр D_n , мм	325
Толщина стенки δ , мм	18
Толщина изоляции $\delta_{из}$, мм	3
Давление p , МПа	7.5
Модуль упругости E , МПа	$2.06 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона μ	0.3
Предел текучести R_2 , МПа	470
Врем. сопротивление разрыву R_1 , МПа	600
Коэффициент линейного расширения α , 1/м	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Температурный перепад Δt , °	60
Плотность материала трубы $\rho_{тр}$, г/см ³	7.85
Плотность изоляции $\rho_{из}$, г/см ³	0.85
Погонный вес материала трубы $q_{тр}$, Н/м	1528
Погонный вес изоляции, Н/м	26.3
Коэффициент по надежности k_n	1.0
Коэффициент k_1	1.4
Коэффициент k_2	1.1
Коэффициент условия работы m	0.9
Коэффициент по нагрузке n	1.1

Два участка трубопровода подходят друг к другу в вертикальной плоскости под одним углом к горизонту.

Промежуточные результаты	
Момент инерции сечения I , м ⁴	$2.05 \cdot 10^{-4}$
Площадь поперечного сечения F , м ²	$1.74 \cdot 10^{-2}$
Кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$, МПа	66
Расчетное сопротивление растяжению R_2 , МПа	385
Продольные напряжения $(\mu\sigma_{кц} - \alpha\Delta tE)$, МПа	-128
Коэффициент ψ_3 , МПа	0.992
Изгибные напряжения $\sigma_{изг}$, МПа	226
Напряжения сжатия $\sigma_{сж}$, МПа	226
Напряжения растяжения $\sigma_{раст}$, МПа	513
Минимальный радиус с учетом сжатия $\rho_{сж}$, м	148
Минимальный радиус с учетом растяжения $\rho_{раст}$, м	65
Критический угол поворота $\beta_{кр}$, град	9.977

Результаты расчета						
Угол	Радиус, м		Тангенс, м		Прогиб, м	
	вогн.	вып.	вогн.	вып.	вогн.	вып.
1°	686	432	8,98	11,32	0,049	0,074
2°	432	272	11,32	14,26	0,123	0,187
3°	330	208	12,95	16,32	0,212	0,320
4°	272	172	14,26	17,96	0,311	0,470
5°	235	148	15,36	19,35	0,419	0,633

Литература

1. А.Б. Айнбиндер «Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: Справочное пособие», М. Недра, 1991.