

Строительные конструкции – лекция 2

Продольные перемещения трубопровода

Постоянные нагрузки на магистральный трубопровод

• Собственный вес трубопровода – вес погонного метра трубы вычисляется по формуле

$$q_{тр} = n \cdot \gamma_{ст} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{н}^4 - D_{вн}^4),$$

где n – коэффициент надежности по нагрузке, $n = 1,1$;

$\gamma_{ст}$ – удельный вес стали. $\gamma_{ст} = 78,5 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$;

$D_{н}, D_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры трубы.

• Вес одного метра изоляционного покрытия

$$q_{из} = n \cdot \gamma_{из} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{из}^2 - D_{н}^2),$$

где $n = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке;

$\gamma_{из}$ – удельный вес изоляции;

$D_{из}$ – наружный диаметр изоляции.

• Давление грунта на единицу длины трубопровода

$$q_{гр} = n \cdot \gamma_{гр} \cdot h_{ср} \cdot D_{из},$$

где $n = 1,2$ – коэффициент надежности по давлению грунта;

$\gamma_{гр}$ – удельный вес грунта;

$h_{ср}$ – средняя глубина заложения оси трубопровода.

• Гидростатическое давление воды на единицу длины трубопровода, определяемое высотой столба жидкости над *подводным трубопроводом*

$$q_{гс} = n \cdot \gamma_e \cdot h \cdot D_{из},$$

где $n = 1,0$ – коэффициент надежности гидростатического давления воды;

γ_e – удельный вес воды с учетом засоленности и наличия взвешенных частиц;

h – высота столба воды над рассматриваемой точкой трубы;

$D_{из}$ – диаметр изолированной и футерованной трубы.

• Выталкивающая сила воды, приходящаяся на единицу длины трубопровода полностью погруженного в воду

$$q_e = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{из}^2 \cdot \gamma_e,$$

где $n = 1,0$ – коэффициент надежности гидростатического давления воды.

Временные длительные нагрузки и воздействия

- Внутреннее рабочее (нормативное) давление — наибольшее избыточное давление, при котором обеспечивается заданный режим эксплуатации трубопровода. Устанавливается проектом.

- Нормативный вес нефти или нефтепродуктов в 1 метре трубопровода

$$q = \gamma_n \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4},$$

где γ_n - удельный вес нефти или нефтепродукта.

Для вычисления расчетного веса нефти в трубопроводе коэффициент надежности принимается $n = 1,0$.

• Вес перекачиваемого (транспортируемого) газа на единицу длин трубопровода. Для определения веса газа используется уравнение состояния идеального газа Менделеева – Клапейрона для высоких давлений

$$P \cdot V = z \cdot Q \cdot R \cdot T,$$

где P – давление газа;

V – объем газа;

z – коэффициент Ван-дер-Ваальса зависящий от давления, температуры состава газовой смеси;

$$R = 8,31 \frac{\text{дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}} - \text{универсальная газовая постоянная};$$

T – температура, К;

$$Q = \frac{m}{M} - \text{количество газа в молях};$$

m – масса газа в кг;

M – молекулярная масса кг/моль.

$$\frac{m}{M} = \frac{P \cdot V}{z \cdot R \cdot T}$$

Внутренний объем одного метра трубы равен

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot l, \quad \text{где } l = 1 \text{ м};$$

$q = m \cdot g$, погонный вес газа в трубе

где m – масса газа в одном метре трубы;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$.

22,4 литра - объем одного моля газа при нормальных условиях

$$M = \rho \cdot \frac{22,4}{1000} \quad \rho \text{ плотность газа}$$

$$q = \frac{P \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4 \cdot z \cdot R \cdot T} \cdot g \cdot \rho \cdot \frac{22,4}{1000}$$

$$\text{СИ} \quad q = 0,215 \cdot \frac{P \cdot D_{\text{вн}}^2}{z \cdot T} \cdot g \cdot \rho, \quad P \text{ в МПа, } D_{\text{вн}} \text{ в см.}$$

0° С

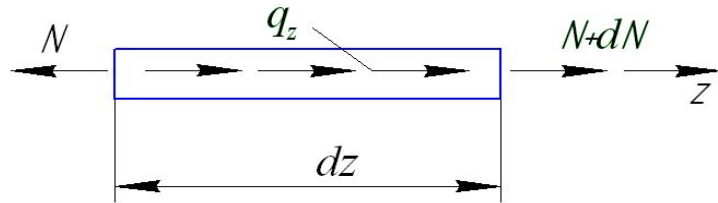
101325 Па

Кратковременные нагрузки

Деформации в прямых стержнях при растяжении – сжатии

Математическая модель стержня при растяжении

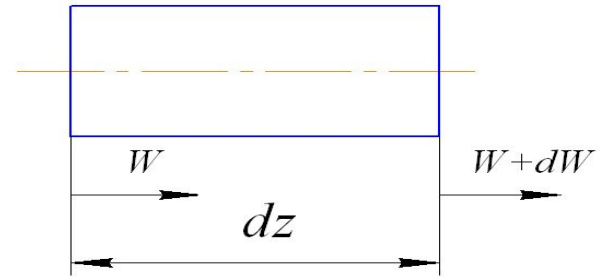
Уравнение равновесия элемента стержня



$$-N + N + dN + q_z \cdot dz = 0;$$

$$\frac{dN}{dz} + q_z = 0$$

Геометрические соотношения



$$\varepsilon_z = \frac{dW}{dz}$$

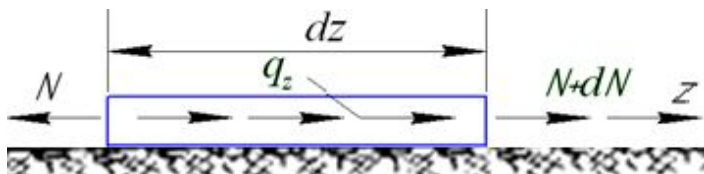
Физические зависимости. Закон Гука

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_z$$

$$\sigma_z = \frac{N}{F}$$

$$N = EF \cdot \varepsilon_z = EF \cdot \frac{dW}{dz}$$

Практический случай: стержень (труба) в упругой среде (в грунте)



$$q_z = -C \cdot W$$

$$EF \cdot \frac{d^2W}{dz^2} + q_z = 0.$$

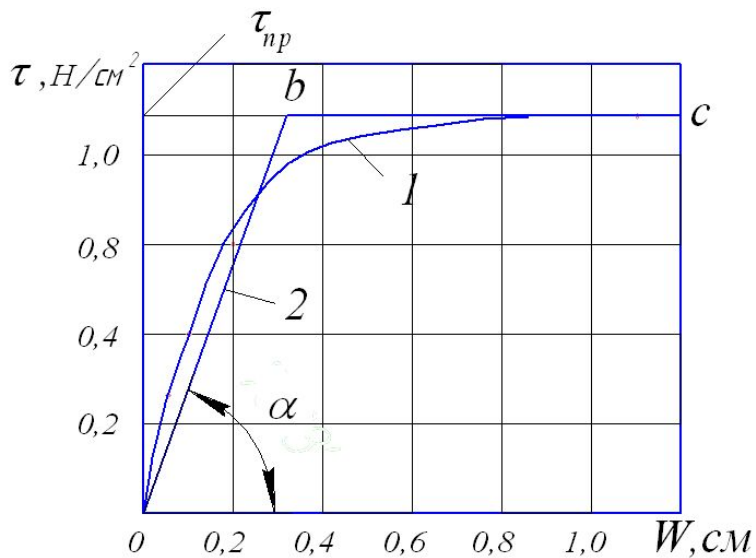
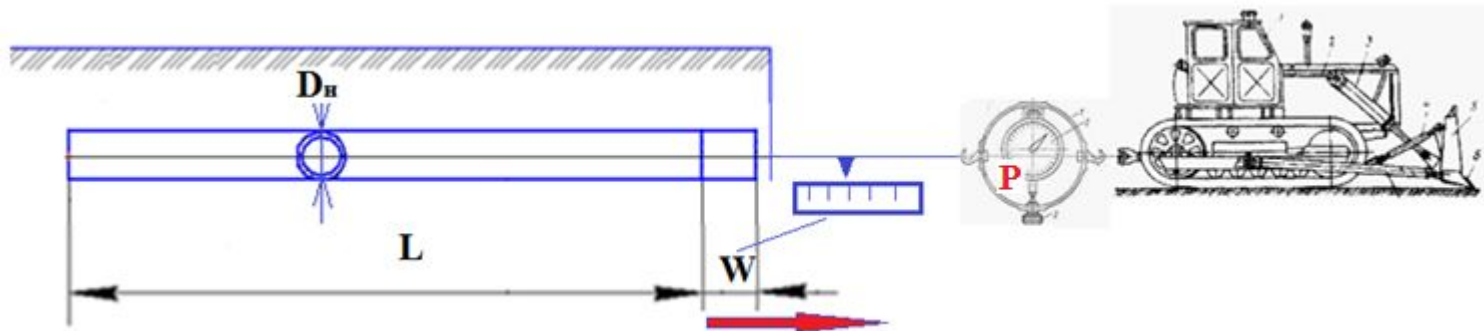
$$W(z) = W_0 + N_0 \cdot \frac{z}{EF} + \frac{1}{EF} \quad ()$$

Линейная модель грунта

$$\frac{d^2W}{dz^2} - k^2 W = 0$$

$$k^2 = \frac{C}{EF}$$

Сопротивление грунта продольным перемещениям трубы



$$\tau = \frac{P}{\pi D_n L}$$

$$\tau = C_{z0} \cdot W_z$$

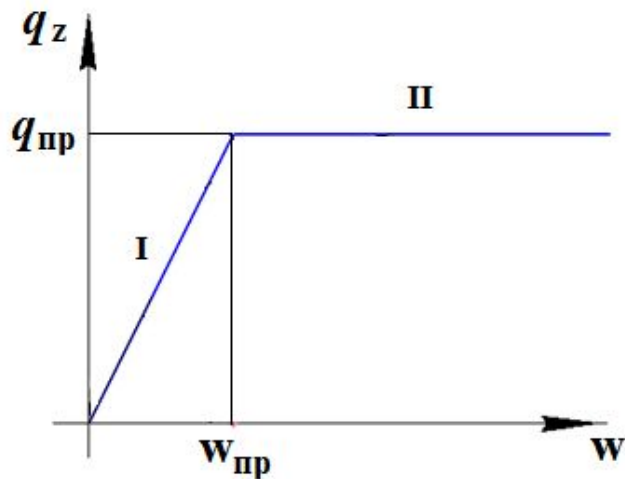
$C_{z0} = \operatorname{tg} \alpha$ – обобщенный коэффициент касательного сопротивления грунта

Погонная нагрузка от продольного сопротивления грунта

$$q_z = \tau \cdot \pi D$$

Диаграмма сопротивления грунта продольным перемещениям:
 1 – диаграмма реального грунта;
 2 – билинейная диаграмма

$$q_z = C_{z0} \cdot \pi D_n \cdot W$$

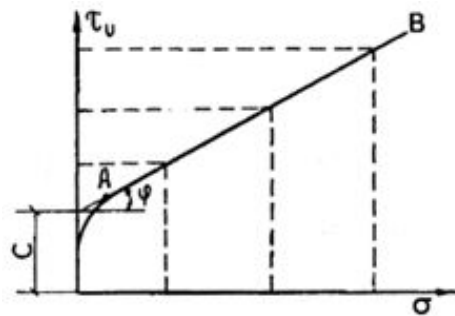
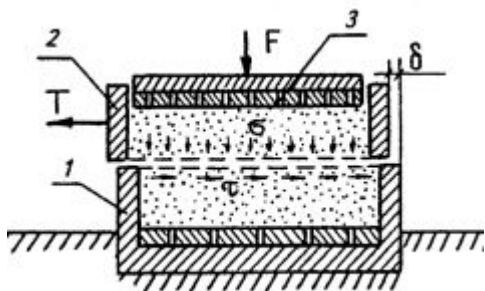


$$I - q_z = C_{z0} \cdot \pi \cdot D \cdot W \quad II - q_z = q_{np}$$

Предельное сопротивление грунта

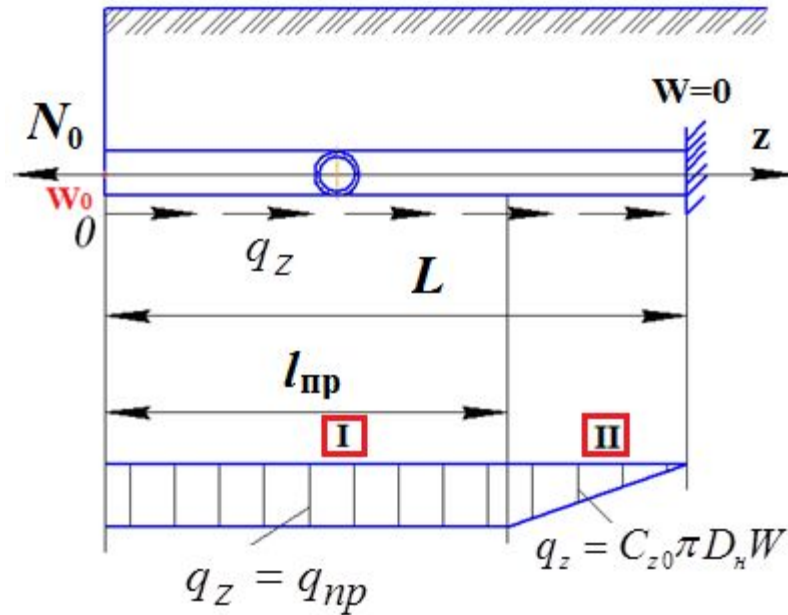
$$q_{np} = q_{mn} \operatorname{tg} \varphi_{gp} + 2\gamma_{gp} \cdot C_h \pi D_n^2 \operatorname{tg} \varphi_{gp} + 0,6 \pi D_n C_{gp}$$

C_{gp} - коэффициент сцепления грунта



$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c = \sigma \cdot f + c$$

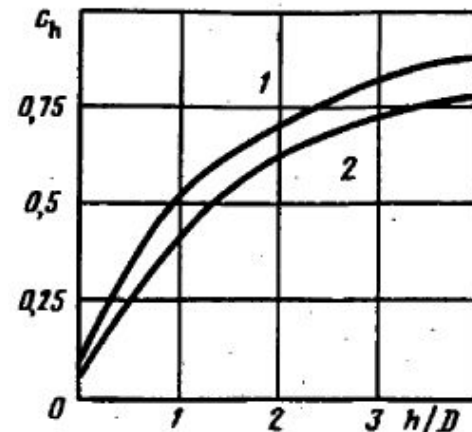
где $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения, характеризующий трение грунта о грунт, $\operatorname{tg} \varphi = f$; φ - угол внутреннего трения; $C = C_{gp}$



Коэффициент образования свода обрушения

1. Песок $C_h = 0,416 \frac{h}{D_n} - 0,056 \frac{h^2}{D_n^2} + 0,095$
2. Глина $C_h = 0,367 \frac{h}{D_n} - 0,046 \frac{h^2}{D_n^2} + 0,06$

h - глубина заложения трубы до верха



Математическая модель : продольные перемещения трубопровода

$$\varepsilon_z = \frac{N}{EF} + \alpha \cdot \Delta t - \mu \frac{\sigma_{кц}}{E}$$

$$N = EF \cdot \varepsilon_{кц} - \alpha \cdot \Delta t \cdot EF + \mu \cdot \sigma \cdot F$$

$$\varepsilon_z = \frac{dW}{dz}$$

$$N = EF \cdot \frac{dW}{dz} + N_\infty$$

$$N_\infty = -\alpha \cdot \Delta t \cdot EF + \mu \cdot \sigma_{кц} \cdot F$$

1-ый участок

2-ой участок

$$EF \cdot \frac{d^2W}{dz^2} + q_{np} = 0$$

$$\frac{d^2W}{dz^2} = -\frac{q_{np}}{EF}$$

$$W(z) = \frac{1}{EF} \left(-\frac{q_{np}}{2} z^2 + C_1 z + C_2 \right)$$

$$EF \frac{d^2W}{dz^2} - C_{z0} \pi D \cdot W = 0 \quad k^2 = \frac{C_{z0} \cdot \pi D}{EF}$$

Характеристическое уравнение

$$\frac{d^2W}{dz^2} - k^2 \cdot W = 0$$

$$\lambda^2 - k^2 = 0 \quad \lambda_{1,2} = \pm k$$

$$N = EF \cdot \frac{dW}{dz} + N_\infty$$

$$N(z) = -q_{np} \cdot z + C_1 + N_\infty$$

$$ch kz = \frac{e^{kz} + e^{-kz}}{2}$$

$$sh kz = \frac{e^{kz} - e^{-kz}}{2}$$

$$z = 0 \quad W = W_0 \quad W_0 = \frac{C_2}{EF}$$

$$W(z) = C_3 \cdot sh kz + C_4 \cdot ch kz,$$

$$e \approx 2,71$$

Экспонента – это показательная функция $y(x) = e^x$

$$z = 0 \quad N = N_0 \quad C_1 = N_0 - N_\infty$$

$$N(z) = EFk(C_3 ch kz + C_4 sh kz) + N_\infty$$

$$z = L \quad W = 0 \quad 0 = C_3 \cdot sh kL + C_4 \cdot ch kL$$

$$C_4 = -C_3 \cdot th kL$$

$$C_1 - C_4 \rightarrow ? \quad l_{np} \rightarrow ?$$

$$z = l_{np} \quad W_I = W_{II} \quad N_I = N_{II}$$

С учётом граничных условий

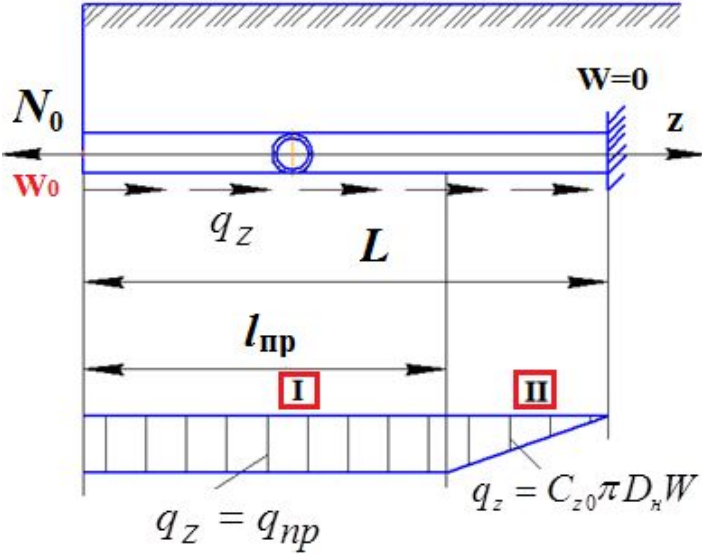
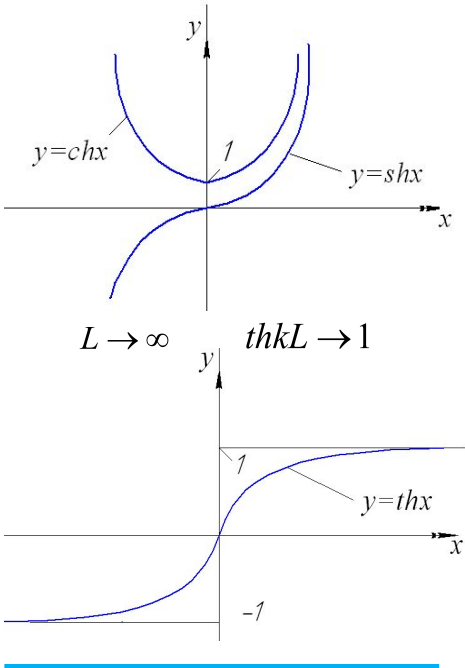
Критерий существования участка предельного равновесия грунта

$$k \cdot \frac{N_0 - N_\infty}{q_{np}} > 1$$

$$W_0 = -\frac{1}{2EF} \left[\frac{(N_0 - N_\infty)^2}{q_{np}} + \frac{q_{np}}{k^2} \right]$$

$$l_{np} = \frac{N_0 - N_\infty}{q_{np}} - \frac{1}{k}$$

$$L \approx \frac{N_0 - N_\infty}{q_{np}} + \frac{3}{k}$$



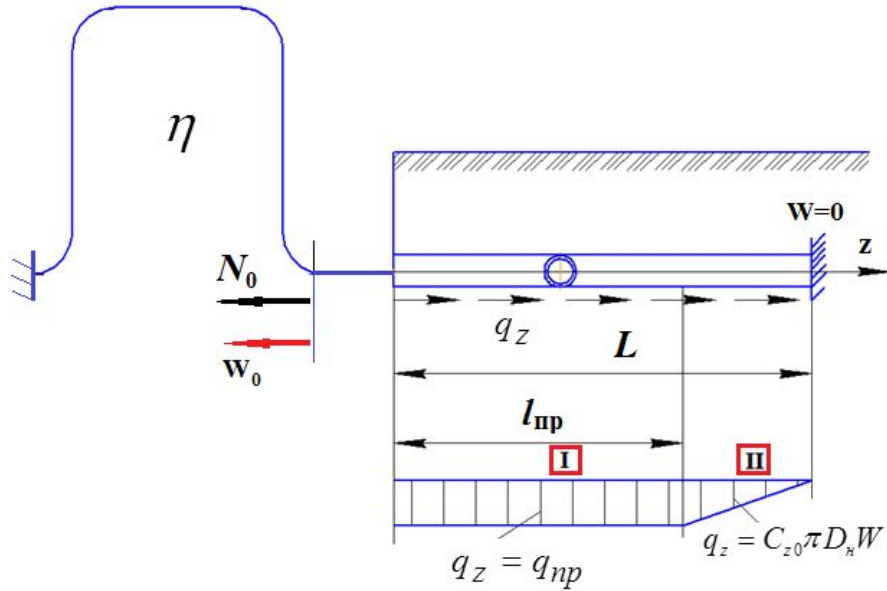
$$N_0 = p \cdot \frac{\pi}{4} D_n^2$$

$$N_\infty = -\alpha \cdot \Delta t \cdot EF + \mu \cdot \sigma_{к\mu} \cdot EF$$

$$k^2 = \frac{C_{\pi 0} \cdot \pi D}{EF}$$

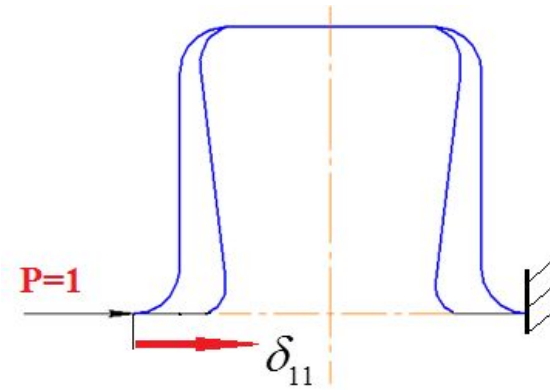
$$q_{np} = q_{mn} \operatorname{tg} \varphi_{zp} + 2\gamma_{zp} \cdot C_h \pi D_n^2 \operatorname{tg} \varphi_{zp} + 0,6\pi D_n C_{zp}$$

Определение продольных перемещений трубопровода в месте его сопряжения с компенсатором



$$N_0 = p \frac{\pi D_{en}^2}{4} + \eta \cdot W_0 = \sigma_{np} \cdot F + \eta \cdot W_0 = 0,5 \cdot \sigma_{кц} \cdot F + \eta \cdot W_0$$

Жесткость компенсатора



$$\eta = \frac{1}{\delta_{11}}$$

$$N_0 - N_\infty = 0,5 \cdot \sigma_{кц} \cdot F + \eta W_0 + \alpha \Delta t E F - \mu \cdot \sigma_{кц} \cdot F = (\alpha \Delta t E + 0,2 \sigma_{кц}) F + \eta W_0 = S + \eta W_0$$

$$W_0 = -\frac{1}{2EF} \left[\frac{(N_0 - N_\infty)^2}{q_{np}} + \frac{q_{np}}{k^2} \right]$$

$$N_0 - N_\infty = S + \eta W_0$$

$$W_0 = -\frac{1}{2EF} \left[\frac{(S + \eta W_0)^2}{q_{np}} + \frac{q_{np}}{k^2} \right]$$

$$2EFW_0 = -\frac{S^2}{q_{np}} - 2 \frac{S \cdot \eta W_0}{q_{np}} - \frac{(\eta W_0)^2}{q_{np}} - \frac{q_{np}}{k^2}$$

$$W_0^2 + 2 \left(\frac{S}{\eta} + \frac{EF \cdot q_{np}}{\eta^2} \right) W_0 + \left(\frac{S^2}{\eta^2} + \frac{q_{np}^2}{k^2 \cdot \eta^2} \right) = 0$$

$$a = \frac{S}{\eta} + \frac{EF \cdot q_{np}}{\eta^2}$$

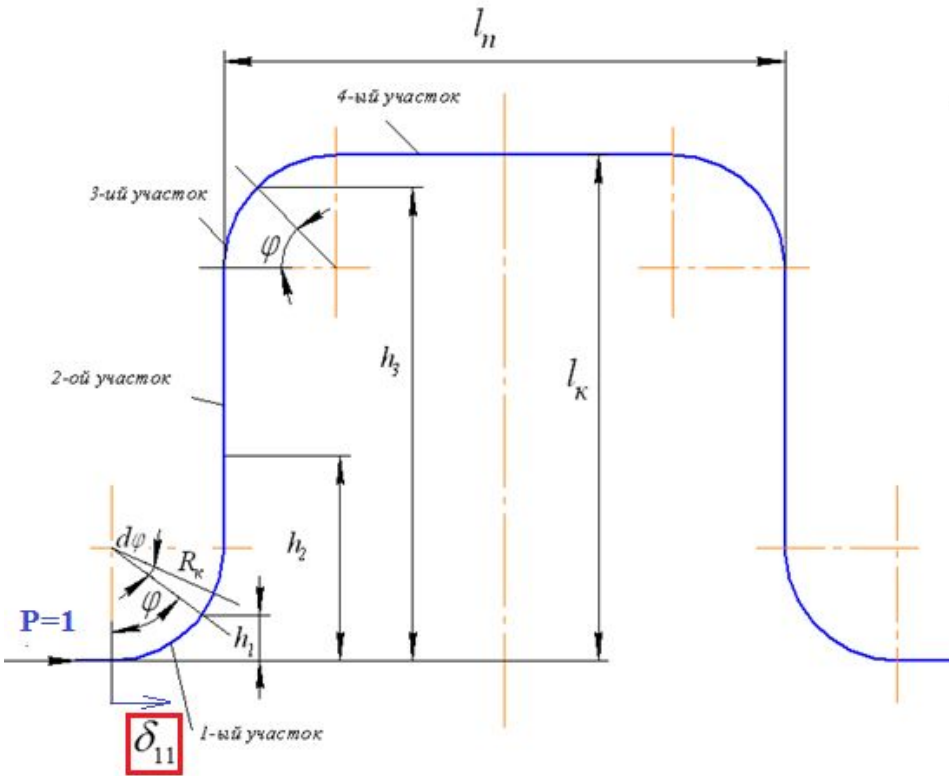
$$b = \frac{S^2}{\eta^2} + \frac{q_{np}^2}{k^2 \cdot \eta^2}$$

$$W_0 = -a + \sqrt{a^2 - b}$$

$$W_0 \approx -\frac{b}{2a}$$

$$L = \frac{3}{k} + \frac{S + \eta W_0}{q_{np}}$$

Расчетная схема П-образного компенсатора



$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \cdot \int_S M_1^2 ds \rightarrow \text{Интеграл Мора}$$

$$J_x = 0,05 \cdot (D_H^4 - D_B^4) \quad \text{Момент инерции сечения трубы}$$

$$\delta_{11} = 2 \cdot (\delta_{11}^{(1)} + \delta_{11}^{(2)} + \delta_{11}^{(3)} + \delta_{11}^{(4)})$$

1-ый круговой участок

$$M_1 = P_0 \cdot h_1 \quad h_1 = R_k - R_k \cos \varphi = R_k (1 - \cos \varphi)$$

$$ds = R_k \cdot d\varphi$$

$$\delta_{11}^{(1)} = \frac{1}{EJ} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (R_k - R_k \cos \varphi)^2 R_k d\varphi = \frac{R_k^3}{EJ} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - 2 \cos \varphi + \cos^2 \varphi) d\varphi$$

2-ой участок

$$M_1 = P_0 \cdot h_2 = 1 \cdot (R_k + z)$$

$$\delta_{11}^{(2)} = \frac{1}{EJ} \cdot \int_0^{l_k - 2R_k} (R_k + z)^2 dz$$

3-ий участок

$$M_1 = P_0 \cdot h_3 = 1 \cdot (l_k - R_k + R_k \cdot \sin \varphi)$$

$$\delta_{11}^{(3)} = \frac{1}{EJ} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} (l_k - R_k + R_k \cdot \sin \varphi)^2 R_k d\varphi$$

4-ый участок

$$M_1 = P_0 \cdot l_k = 1 \cdot l_k$$

$$\delta_{11}^{(4)} = \frac{1}{EJ} \cdot \int_0^{l_n - R_k} l_k^2 dz$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{k_{\text{ок}}} (1,42R_k^3 - 2,28R_k^2 l_k + \pi R_k l_k^2) + 0,67l_k^3 - 1,34R_k^3 + 2R_k^2 l_k - 4R_k l_k^2 + l_n l_k^2 \right]$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{k_{\text{эж}}} (1,42R_k^3 - 2,28R_k^2l_k + \pi R_k l_k^2) + 0,67l_k^3 - 1,34R_k^3 + 2R_k^2l_k - 4R_k l_k^2 + l_n l_k^2 \right]$$

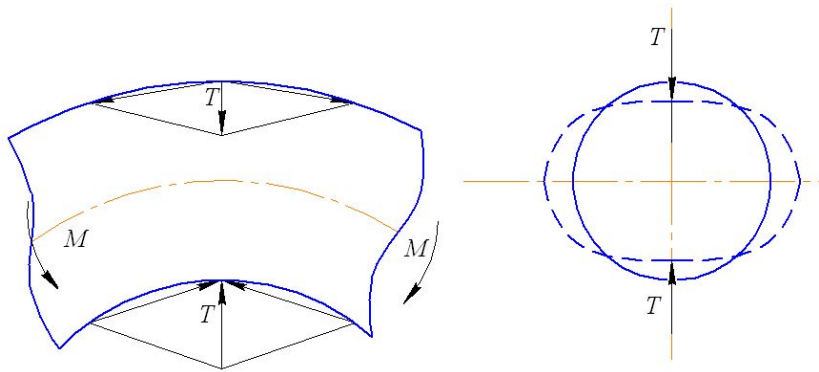
Схема деформации отвода при изгибе

Коэффициент снижения жесткости отводов при изгибе

$$k_{\text{эж}} = \frac{\lambda}{1,65}$$

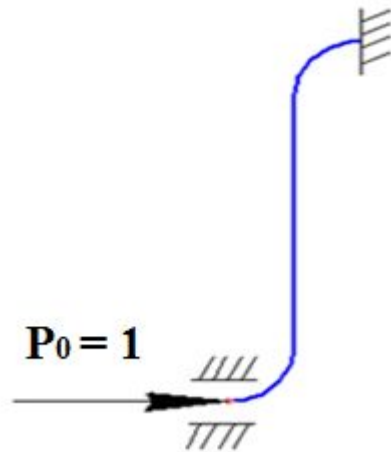
Коэффициент изогнутой трубы, геометрическая характеристика отвода

$$\lambda = \frac{\delta \cdot R_k}{r_{cp}^2}$$

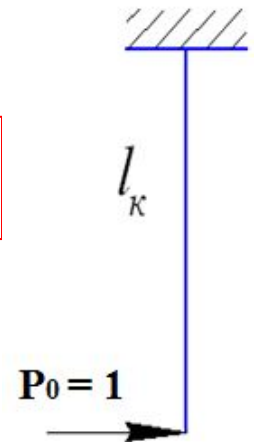


Расчетные схемы Z - образного и

Г-образного компенсатора

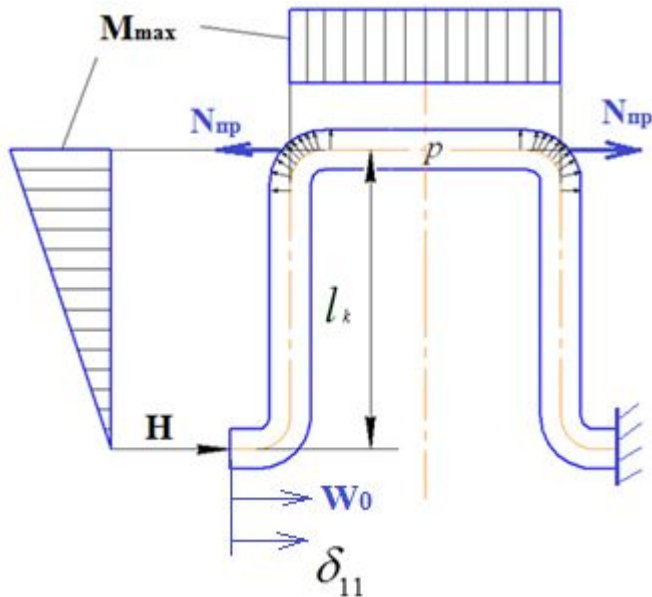


$$\delta_{11} = \frac{l_k^3}{3EJ}$$



$$\delta_{11} = \frac{1}{2EJ_{\text{эж}}} \left[\frac{1}{k} (1,42R_k^3 - 2,28R_k^2l_k + \pi R_k l_k^2) + 0,67l_k^3 - 1,34R_k^3 + 2R_k^2l_k - 2R_k l_k^2 \right]$$

Схема расчета П-образного компенсатора на прочность



$$\sigma_{\text{комп}} + |\sigma_{\text{м}}| \leq R_2 - 0,5\sigma_{\text{кц}}$$

$$R_2 = \frac{R_2^H \cdot m}{k_2 \cdot k_H}$$

$$N_{np} = \sigma_{np} \cdot F = 0,5 \cdot \sigma_{кц} \cdot F$$

$$H = \frac{W_0}{\delta_{11}}$$

$$M_{max} = H \cdot l_k = \frac{W_0 \cdot l_k}{\delta_{11}}$$

$$\sigma_{\text{комп}} = \frac{W_0 \cdot l_k}{W_x \cdot \delta_{11}} m_k$$

$$m_k = \frac{0,9}{\lambda_k^{2/3}}$$

12.6 Компенсаторы

12.6.1 Расчет компенсаторов на воздействие продольных перемещений трубопроводов, возникающих от изменения температуры стенок труб, внутреннего давления и других нагрузок и воздействий, следует производить по условию

$$\sigma_{\text{комп}} + |\sigma_{\text{м}}| \leq R_2 - 0,5 \cdot \sigma_{\text{кц}}, \quad (39)$$

где $\sigma_{\text{комп}}$ – расчетные продольные напряжения в компенсаторе от изменения длины трубопровода под действием внутреннего давления продукта и от изменения температуры стенок труб, МПа;

$\sigma_{\text{м}}$ – дополнительные продольные напряжения в компенсаторе от изгиба под действием поперечных и продольных нагрузок (усилий) в расчетном сечении компенсатора, МПа, определяемые согласно общим правилам строительной механики;

12.6.3 Коэффициенты уменьшения жесткости $k_{\text{ж}}$ и увеличения напряжений m_k для гнутых и сварных отводов компенсаторов при $\lambda_k < 0,3$ определяются по формулам:

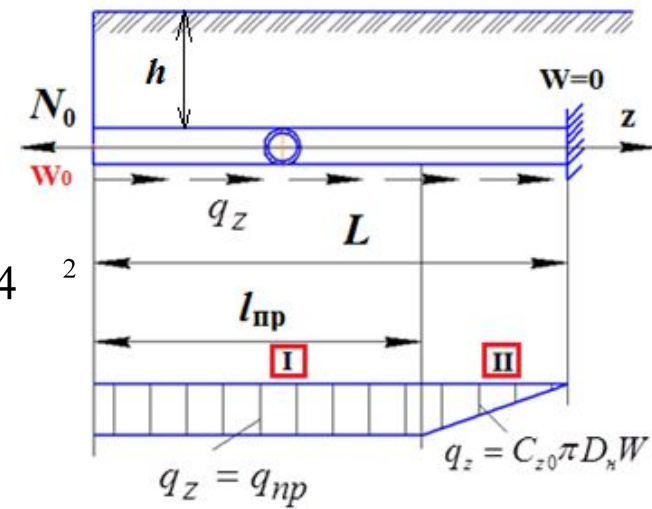
$$k_{\text{ж}} = \frac{\lambda_k}{1,65}; \quad (45)$$

$$m_k = \frac{0,9}{\lambda_k^{2/3}}; \quad (46)$$

$$\lambda_k = \frac{\delta_H \cdot \rho_k}{r_c^2}; \quad (47)$$

где δ_H – номинальная толщина стенки трубы, см
 r_c – средний радиус отвода, см.

Задача 2



$$D_M = 1020$$

$$\delta = 14 \text{ мм}$$

$$\rho = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$\mu = 0,5$

$$\Delta t = 60^\circ \text{C}$$

$$h_M = 100$$

Грунт - суглинок

$$\gamma_{gp} = 14,3 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$$

$$\varphi_{gp} = 11^\circ$$

$$C_{z0} = 3,5 \frac{\text{МПа}}{\text{м}}$$

$$C_{gp} = 0,01 \text{ МПа}$$

$$W_0 = ?$$

Площадь сечения трубы

$$D_{вн} = D_n - 2\delta = 1020 - 2 \cdot 14 = 992$$

$$F = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_{вн}^2) = \frac{\pi}{4} (1,02^2 - 0,992^2) = 0,044 \text{ м}^2$$

Вес трубы с нефтью

$$q_{mp} = \gamma_{mp} \cdot F = 78,5 \cdot 0,044 = 3,45 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$q_n = \rho_n \cdot g \cdot F_{вн} = \rho_n \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} D_{вн}^2 = 0,85 \cdot 9,81 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,992^2 = 6,44 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$q_{mn} = q_{mp} + q_n = 3,45 + 6,44 = 9,89 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Коэффициент образования свода обрушения

$$C_h = 0,367 \frac{h}{D_n} - 0,046 \frac{h^2}{D_n^2} + 0,06 = 0,367 \frac{1,0}{1,02} - 0,046 \left(\frac{1,0}{1,02} \right)^2 + 0,06 = 0,38$$

Предельное сопротивление грунта

$$q_{np} = q_{mn} \text{tg} \varphi_{gp} + 2\gamma_{gp} \cdot C_h \pi D_n^2 \text{tg} \varphi_{gp} + 0,6 \pi D_n C_{gp} =$$

$$9,89 \cdot \text{tg}(11^\circ) + 2 \cdot 14,3 \cdot 0,38 \cdot \pi \cdot 1,02^2 \cdot \text{tg}(11^\circ) + 0,6 \cdot \pi \cdot 1,02 \cdot 0,01 \cdot 10^3 = 27,8 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Продольные перемещения

$$N_0 - N_\infty = p \frac{\pi}{4} D_{\text{вн}}^2 - (-\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \mu \sigma_{\text{кц}}) F = 0,5 \cdot \sigma_{\text{кц}} \cdot F + \alpha \cdot \Delta t \cdot EF - 0,3 \cdot \sigma_{\text{кц}} \cdot F = 0,2 \cdot \sigma_{\text{кц}} \cdot F + \alpha \cdot \Delta t \cdot EF$$

$$N_0 - N_\infty = 0,2 \cdot \sigma_{\text{кц}} \cdot F + \alpha \cdot \Delta t \cdot EF$$

$$N_0 - N_\infty = S$$

$$N_0 - N_\infty = (1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 2,1 \cdot 10^5 + 0,2 \cdot 293) 0,044 = 9,3$$

$$N_0 - N_\infty = 9,3 \cdot 10^3$$

Параметр упругого взаимодействия грунта и трубы

$$k^2 = \frac{C_{\text{з0}} \cdot \pi D}{EF} \quad k = \sqrt{\frac{C_{\text{з0}} \cdot \pi \cdot D}{EF}} = \sqrt{\frac{3,5 \cdot \pi \cdot 1,02}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,044}} = 3,5 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{м}} \quad k = 3,5 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{м}}$$

Критерий выбора расчетной схемы

$$\frac{k(N_0 - N_\infty)}{q_{\text{нр}}} \geq 1$$

$$\frac{3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 9,3 \cdot 10^3}{27,8} = 11,7 > 1 \quad \longrightarrow$$

Участок предельного равновесия
грунта существует

Перемещение свободного конца участка МТ

$$W_0 = -\frac{1}{2EF} \left[\frac{(N_0 - N_\infty)^2}{q_{\text{нр}}} + \frac{q_{\text{нр}}}{k^2} \right] = -\frac{1}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,044} \left[\frac{(9,3 \cdot 10^3)^2}{27,8} + \frac{27,8}{(3,5 \cdot 10^{-2})^2} \right] = -0,170$$

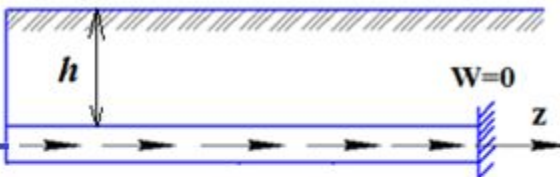
$$W_0 = 17,0$$

Длина участка, имеющего продольные перемещения

$$M = \frac{N_0 - N_\infty}{q_{np}} + \frac{3}{k} = \frac{9,3 \cdot 10^3}{27,8} + \frac{3}{3,5 \cdot 10^{-2}} = 420$$

$$M_{np} = \frac{N_0 - N_\infty}{q_{np}} - \frac{1}{k} = \frac{9,3 \cdot 10^3}{27,8} - \frac{1}{3,5 \cdot 10^{-2}} = 306$$

Определение продольных перемещений трубопровода в месте сопряжения с Г-образным компенсатором



$$J = 0,05(D_n^4 - D_{вн}^4) = 0,05(1,02^4 - 0,992^4) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4$$

Податливость и жесткость Г-образного компенсатора

$$\delta_{11} = \frac{M_k^3}{3EJ} = \frac{10^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 5,7 \cdot 10^{-3}} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\eta = \frac{1}{\delta_{11}} = \frac{1}{2,78 \cdot 10^{-7}} = 36,1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$\delta_{11} = \frac{l_k^3}{3EJ}$$

$$M_k = 10$$

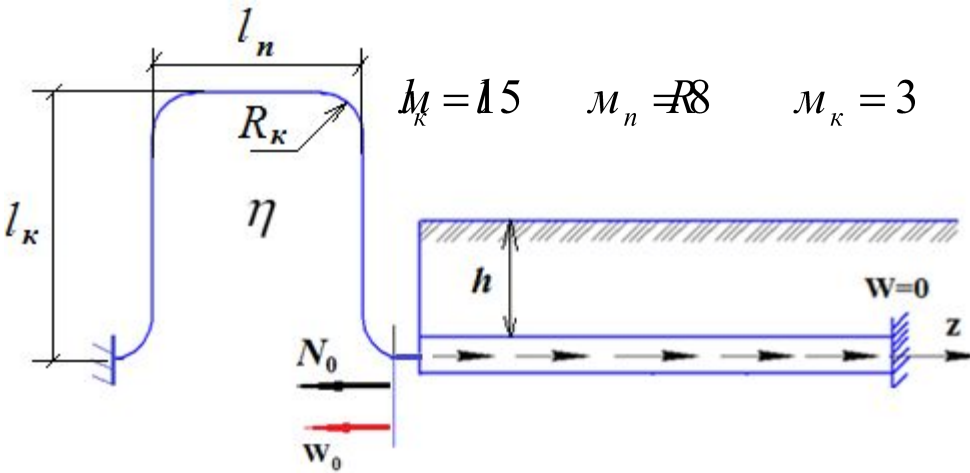
$$au = \frac{S}{\eta} + \frac{EF \cdot q_{np}}{\eta^2} = \frac{9,3 \cdot 10^6}{36,1 \cdot 10^5} + \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,044 \cdot 27,8 \cdot 10^3}{(36,1 \cdot 10^5)^2} = 22,3$$

$$bu = \frac{S^2}{\eta^2} + \frac{q_{np}^2}{k^2 \cdot \eta^2} = 6,65 + \frac{(27,8 \cdot 10^3)^2}{(3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 36,1 \cdot 10^5)^2} = 6,7 \text{ м}^2$$

$$W_0 \approx -\frac{b}{2a} = -\frac{6,7}{2 \cdot 22,3} = -0,150$$

$$W_0 = -a + \sqrt{a^2 - b} = -22,3 + \sqrt{22,3^2 - 6,7} = -0,150$$

$$EM_0 = 15,0$$



$$\lambda = \frac{\delta \cdot R_k}{r_{cp}^2} = \frac{14 \cdot 3000}{503^2} = 0,166$$

$$k_{\text{жс}} = \frac{\lambda}{1,65} = \frac{0,166}{1,65} = 0,101$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \left[\frac{1}{k_{\text{жс}}} (1,42R_k^3 - 2,28R_k^2l_k + \pi R_k l_k^2) + 0,67l_k^3 - 1,34R_k^3 + 2R_k^2l_k - 4R_k l_k^2 + l_n l_k^2 \right]$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 5,7 \cdot 10^{-3}} \left[\frac{1}{0,101} (1,42 \cdot 3^3 - 2,28 \cdot 3^2 \cdot 15 + \pi \cdot 3 \cdot 15^2) + 0,67 \cdot 15^3 - 1,34 \cdot 3^3 + 2 \cdot 3^2 \cdot 15 - 4 \cdot 3 \cdot 15^2 + 8 \cdot 15^2 \right] = 1,663 \cdot 10^{-5} \frac{M}{H}$$

$$\eta = \frac{1}{\delta_{11}} = \frac{1}{1,663 \cdot 10^{-5}} = 0,601 \cdot 10^5 \frac{H}{M}$$

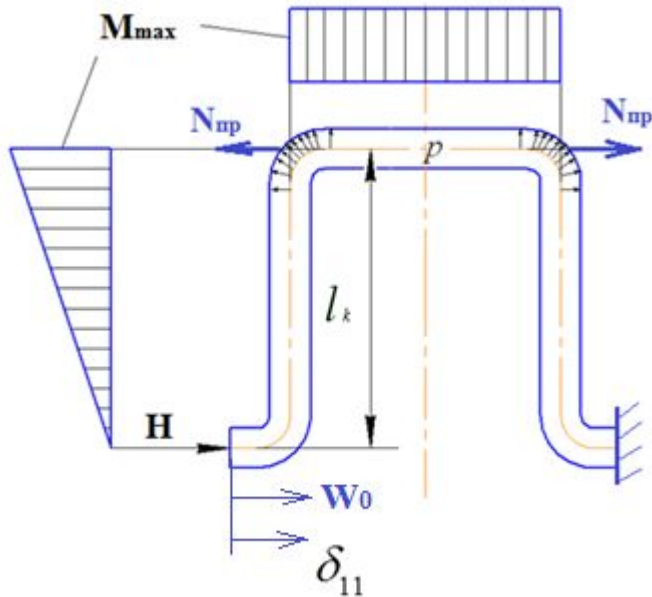
$$W_0 \approx -\frac{b}{2a} = -\frac{23890}{2 \cdot 71270} = -0,167$$

$$a = \frac{S}{\eta} + \frac{EF \cdot q_{np}}{\eta^2} = \frac{9,3 \cdot 10^6}{0,601 \cdot 10^5} + \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,044 \cdot 27,8 \cdot 10^3}{(0,601 \cdot 10^5)^2} = 71270$$

$$W_0 = 16,7$$

$$bx = \frac{S^2}{\eta^2} + \frac{q_{np}^2}{k^2 \cdot \eta^2} = 23716 + \frac{(27,8 \cdot 10^3)^2}{(3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,601 \cdot 10^5)^2} = 23890 \quad ^2$$

Момент сопротивления сечения трубы



$$\sigma_{\text{комп}} \leq R_2 - 0,5\sigma_{\text{кц}}$$

$$\sigma_{\text{кц}} = 293 \text{ МПа}$$

$$41 < 57$$

$$W_x = \frac{2 \cdot J_x}{D_H} = \frac{2 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3}}{1,02} = 11,2 \cdot 10^{-3} \quad 3$$

$$kH = \frac{W_0}{\delta_{11}} = \frac{0,167}{1,663 \cdot 10^{-5}} = 10,1$$

$$M_{\text{max}} = H \cdot l_k = 10,1 \cdot 15 = 152 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

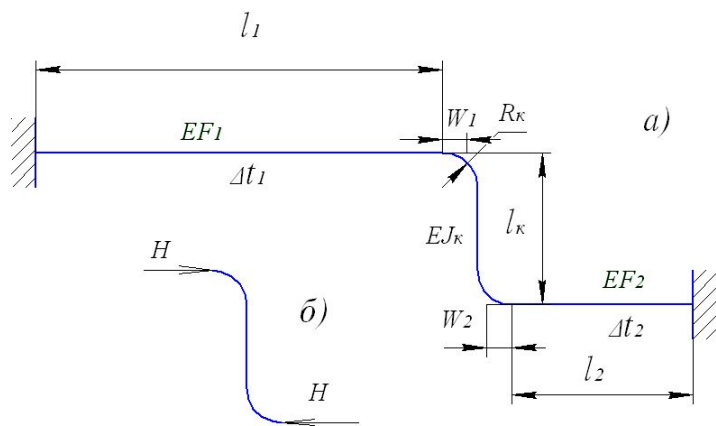
$$m_k = \frac{0,9}{\lambda^{0,67}} = \frac{0,9}{0,166^{0,67}} = 3,0$$

$$\sigma_{\text{комп}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_x} \cdot m_k = \frac{152}{11,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,0 = 41 \text{ МПа}$$

$$\frac{R_2^H \cdot m}{k_2 \cdot k_H} = \frac{300 \cdot 0,825}{1,1 \cdot 1,1} = 204$$

$$41 \leq 204 - 0,5 \cdot 293$$

Условие прочности компенсатора выполняется



$$W_1 = \frac{(N_1 - H) \cdot l_1}{EF_1} + \alpha \cdot \Delta t_1 \cdot l_1 - \mu \frac{\sigma_{\kappa 1}}{E} l_1$$

$$W_2 = \frac{(N_2 - H) \cdot l_2}{EF_2} + \alpha \cdot \Delta t_2 \cdot l_2 - \mu \frac{\sigma_{\kappa 2}}{E} l_2$$

$$\sigma_{\kappa} = \frac{p \cdot D_{6H}}{2\delta} \quad N = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{6H}^2}{4}$$

$$W_{\kappa} = W_1 + W_2$$

Распор компенсатора H пропорционален продольному перемещению W_{κ}

$$H = \eta \cdot W_{\kappa} \quad \longrightarrow \quad W_{\kappa} = H \cdot \delta_{11}$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{2EJ_{\text{жс}}} \left[\frac{1}{k} (1,42R_{\kappa}^3 + 3,14R_{\kappa}l_{\kappa}^2 - 2,28R_{\kappa}^2l_{\kappa}) + 0,67l_{\kappa}^3 - 1,34R_{\kappa}^3 + 2l_{\kappa}R_{\kappa}^2 - 2R_{\kappa}l_{\kappa}^2 \right]$$

$$J = 0,05(D_{\text{н}}^4 - D_{\text{вн}}^4)$$

Для случая симметричной конструкции и нагрузки

$$W_{\kappa} = 2W$$

$$W = \frac{N}{EF} l - \frac{H}{EF} l + \alpha \cdot \Delta t \cdot l - \mu \frac{\sigma_{\kappa}}{E} l$$

$$H \cdot \delta_{11} = \frac{N}{EF} l - \frac{H}{EF} l + \alpha \cdot \Delta t \cdot l - \mu \frac{\sigma_{\kappa}}{E} l \quad \longrightarrow$$

$$H = \frac{\left(\frac{N}{EF} + \alpha \cdot \Delta t - \mu \frac{\sigma_{\kappa}}{E} \right) l}{\delta_{11} + \frac{l}{EF}}$$