

# Практическое занятие № 2

**Тема: РАСЧЕТ  
НЕФТЕПРОВОДА НА  
ПРОЧНОСТЬ И  
УСТОЙЧИВОСТЬ**

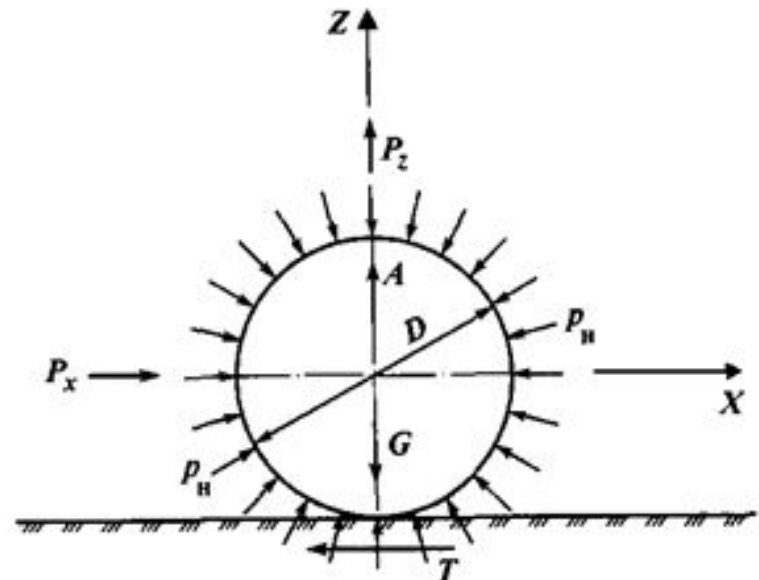
# РАСЧЕТ НЕФТЕПРОВОДА НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Подводный трубопровод может занимать три положения:

- располагаться в воде на некотором расстоянии от дна и поверхности воды,
- на дне без заглубления,
- в подводной траншее.

В каждом из положений трубопровод подвергается воздействию различных комбинаций сил и нагрузок.

Рис. 1. Схема сил и нагрузок, действующих на трубу



# РАСЧЕТ НЕФТЕПРОВОДА НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Условия устойчивости в общем виде:

$$k_y \geq \frac{\sum R_{уд}}{\sum R_{сдв}}, \quad (6)$$

где  $\sum R_{уд}$  — сумма всех удерживающих от сдвига сил;

$\sum R_{сдв}$  - сумма сдвигающих сил.

В приведенной на рис. 1 схеме сумму всех удерживающих сил представляет лишь одна сила —  $T$ ; величина ее определяется сопротивлением сил трения и сцепления по контактной поверхности труба — грунт ( $x = -D/2$ ).

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

## 1.1. Условие отсутствия осевых сжимающих напряжений

$$\sigma_{\text{пр N}} > 0, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{пр N}}$  - продольное осевое сжимающее напряжение, МПа,

Рассчитываются продольные осевые напряжения  $\sigma_{\text{пр N}}$  по формуле:

$$\sigma_{\text{пр N}} = -\alpha E \Delta t + \mu \frac{n_p P D_{\text{вн}}}{2\delta}, \quad (8)$$

где  $D_{\text{вн}} = D_{\text{н}} - 2 * \delta$ , мм (9)

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Определяется абсолютное значение максимального положительного и максимального отрицательного температурных перепадов по формулам:

$$\Delta t_{(+)} = \frac{\mu \cdot R_1}{\alpha_t \cdot E}, \text{ град} \quad (10)$$

$$\Delta t_{(-)} = \frac{(1 - \mu) \cdot R_1}{\alpha_t \cdot E}, \text{ град} \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации стали (коэффициент Пуассона);

$\alpha$  - коэффициент линейного расширения металла трубы, град-1 ;

$E$  – модуль Юнга, МПа;

$R_1$  - расчетное сопротивление металла трубы (5)

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Основные физические характеристики стали для труб следует принимать по таблице 12 СНиП 2.05.06-85.

Физическая характеристика и обозначение стали	Величина и размерность
Плотность $\rho$	7850 кг/м <sup>3</sup>
Модуль упругости $E_0$	206 000 МПа (2100 000 кгс/см <sup>2</sup> )
Коэффициент линейного расширения $\alpha$	0,000012 град <sup>-1</sup>
Коэффициент поперечной деформации Пуассона в стадии работы металла:	
упругой $\mu_0$	0,3
пластической $\mu$	По п. 8.25

Для дальнейшего расчета принимается большее из значений,  $\Delta t$ , град.

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Если при расчете получается отрицательное значение, то это указывает на наличие осевых сжимающих напряжений, поэтому необходимо вычислить коэффициент  $\psi_1$  по формуле:

$$\psi_1 = \sqrt{1 - 0,75 \left( \frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} \right)^2} - 0,5 \frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} \quad (12)$$

При наличии продольных осевых сжимающих напряжений толщину стенки следует определять по формуле:

$$\delta = \frac{n_p P D_n}{2(\psi_1 R_1 + n_p P)} \text{ , мм} \quad (13)$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Расчетная толщина стенки трубопровода должна отвечать требованию:

$$\delta \geq \delta_{\Gamma} \quad , \quad (14)$$

где  $\delta_{\Gamma}$  - толщина стенки трубопровода от действия внешнего гидростатического давления.

$$\delta_{\Gamma} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \gamma_{\text{в}} \cdot h \cdot r_{\text{ср}}^3}{E}} \quad , \quad (15)$$

где  $r_{\text{ср}}$  – средний радиус трубопровода,

$$r_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{вн}}}{2} \text{ , см; } \quad h - \text{ глубина моря, см;}$$



# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

$\gamma_B$  - удельный вес морской воды,  $\gamma_B = 10^{-3} \text{ кгс} / \text{см}^3$

$E$  - модуль упругости стали,  $E = 2100000 \text{ кгс} / \text{см}^2$

Если условие не выполняется, необходимо увеличить толщину стенки трубопровода.

## **Пример расчета**

*Исходные данные:*

- $D_H = 1220$  мм;
- $\delta = 14$  мм;
- $R = 278,57$  МПа;
- $P = 5,3$  МПа;
- *нефтепровод работает в системе «из насоса в насос»;*
- $h = 40$  м.

## Пример расчета

Вычисляем внутренний диаметр трубы:

$$D_{вн} = D_n - 2 \cdot \delta = 1220 - 2 \cdot 14 = 1192 \text{ мм}$$

Определяем абсолютное значение максимального положительного и максимального отрицательного температурных перепадов:

$$\Delta t_{(+)} = \frac{\mu \cdot R_1}{\alpha_t \cdot E} = \frac{0,3 \times 278,57}{1,2 \times 10^{-5} \times 2,06 \times 10^5} = 33,8 \text{ град}$$

$$\Delta t_{(-)} = \frac{(1 - \mu) \cdot R_1}{\alpha_t \cdot E} = \frac{(1 - 0,3) \times 278,57}{1,2 \times 10^{-5} \times 2,06 \times 10^5} = 78,9 \text{ град}$$

Для дальнейшего расчета принимаем большее из значений,  $\Delta t = 78,9 \text{ град}$ .

## Пример расчета

Рассчитаем продольные осевые напряжения :

$$\sigma_{npN} = -\alpha E \Delta t + \mu \frac{n_p P D_{сн}}{2\delta}$$

$$\sigma_{npN} = -1,2 \times 10^{-5} \times 2,06 \times 10^5 \times 78,9 + 0,3 \times \frac{1,15 \times 5,3 \times 1192}{2 \times 14} = -117,2 \text{ МПа.}$$

Отрицательное значение указывает на наличие осевых сжимающих напряжений, поэтому вычисляем коэффициент:

$$\psi_1 = \sqrt{1 - 0,75 \left( \frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} \right)^2} - 0,5 \frac{|\sigma_{npN}|}{R_1} = 0,93 - 0,21 = 0,72$$

## Пример расчета

Так как присутствуют продольные осевые сжимающие напряжения, толщину стенки определяем по формуле

$$\delta = \frac{n_p P D_H}{2(\Psi_1 R_1 + n_p P)} = \frac{1,15 \times 5,3 \times 1220}{2(0,72 \times 278,57 + 1,15 \times 5,3)} = 17,99 \text{ мм}$$

Полученное значение округляем в большую сторону до стандартного значения и принимаем за расчетную  **$\delta = 18 \text{ мм}$** .

Проверяем расчетную толщину стенки трубопровода на соответствие требованию:  $\delta \geq \delta_{\Gamma}$

$$\delta_{\Gamma} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 60^3}{2 \cdot 1 \cdot 10^6}} = \sqrt[3]{1,6457} = 1,18 \text{ см}$$

Условие выполняется.

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

1.2. Вычисляются кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{n_p \cdot P \cdot D_{\text{вн}}}{2\delta}, \text{ МПа} \quad (16)$$

Для предотвращения недопустимых деформаций подводных трубопроводов проверку необходимо производить по условиям:

$$\left| \sigma_{\text{нц}}^{\text{н}} \right| \leq \psi_3 \cdot \frac{m}{0.9 \cdot k_{\text{н}}} \cdot R_2^{\text{н}} \quad (17)$$

$$\sigma_{\text{нц}}^{\text{н}} \leq \frac{m}{0.9 \cdot k_{\text{н}}} \cdot R_2^{\text{н}} \quad (18)$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

где  $R_2^H$  - нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб и сварных соединений, ;

$\psi_3$  - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб; при растягивающих продольных напряжениях ( ), принимаемый равным единице; при сжимающих ( ) – определяемый по формуле:

$$(19) \quad \psi_3 = \sqrt{1 - 0.75 \cdot \left( \frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0.9 \cdot k_H} \cdot R_2^H} \right)^2} - 0.5 \frac{\sigma_{кц}^H}{\frac{m}{0.9 \cdot k_H} \cdot R_2^H}$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

где  $\sigma_{кц}^н$  - кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления;

$\sigma_{нр}^н$  - максимальные суммарные продольные напряжения.

$$\sigma_{кц}^н = \frac{P \cdot D_{вн}}{2 \cdot \delta_n} \quad (20)$$

$$\sigma_{нр}^н = \mu \cdot \sigma_{кц}^н + \alpha \cdot E \cdot \Delta T + \frac{E \cdot D_n}{2 \cdot \rho} \quad (21)$$

где  $\rho$  - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода (в первом приближении можно принять  $\rho \geq 900 D_n$ ).



# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Выполняется проверка по формулам (17), (18).

Если условия не выполняются, необходимо увеличить минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода.

Выполнив расчеты на прочность и устойчивость нефтепровода, результаты следует оформить в таблицу.

$\sigma_{кц}$ , МПа	$\sigma_{нрN}$ , МПа	$\delta_{Г}$ мм	$\delta$ мм	$\sigma_{кц}^H$ МПа	$\sigma_{нр}^H$ МПа	Выводы

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

## *Пример расчета.*

*Исходные данные:*

- $P=5,3$  МПа;
- $D_H = 1220$  мм;
- $D_{\text{вн}} = 1184$  мм;
- $\delta_H = 18$  мм;
- $m=0,9$ ;
- $k_H = 1,05$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

*Вычисляем кольцевые напряжения от расчетного внутреннего давления по формуле (16):*

$$\sigma_{кц} = \frac{n_p \cdot P \cdot D_{вн}}{2\delta} = \frac{1,15 \times 5,3 \times 1184}{2 \times 18} = 200,46 \text{ МПа}$$

*Вычисляем кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления по формуле (20):*

$$\sigma_{кц}^н = \frac{P \cdot D_{вн}}{2 \cdot \delta_n} = \frac{5,3 \cdot 1184}{2 \cdot 18} = 174,3 \text{ МПа}$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

*Вычисляем максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий по формуле (21):*

$$\begin{aligned}\sigma_{np}^н &= \mu \cdot \sigma_{кц}^н + \alpha \cdot E \cdot \Delta T + \frac{E \cdot D_{н}}{2 \cdot \rho} = \\ &= 0.3 \cdot 174,3 + 0.000012 \cdot 206000 \cdot 78,9 + \frac{206000 \cdot 1220}{2 \cdot 900 \cdot 1220} = 361,7 \text{ МПа}\end{aligned}$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

Так как  $\sigma_{np}^H = 361,7 \text{ МПа} > 0$ , то  $\psi_3 = 1$ , тогда, согласно формулам (17) и (18), имеем:

$$1 \cdot \frac{0,9}{0,9 \cdot 1,05} \cdot 359 = 342$$

$$\sigma_{np}^H = 361,7 \text{ МПа} > 342 \text{ МПа}$$

Так как условие не выполняется, принимаем

Тогда

$$\sigma_{np}^H = 0,3 \cdot 174,3 + 0,000012 \cdot 206000 \cdot 78,9 + \frac{206000 \cdot 1220}{2 \cdot 1100 \cdot 1220} = 341 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{np}^H = 341 \text{ МПа} < 342 \text{ МПа}$$

$$\frac{0,9}{0,9 \cdot 1,05} \cdot 359 = 342$$

$$\sigma_{кц}^H = 174,3 \text{ МПа} < 342 \text{ МПа}$$

# 1. Определение толщины стенки трубопровода с учетом условий прочности и устойчивости к смятию

$\sigma_{кц}$ , МПа	$\sigma_{npN}$ , МПа	$\delta_{Г}$ мм	$\delta$ мм	$\sigma_{кц}^H$ МПа	$\sigma_{np}^H$ МПа	Выводы
200,46	-117,20	11,8	18,0	174,30	341,00	Условия для предотвращения недопустимых деформаций подводного трубопровода выполняются