

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
По курсу «Проектування ТЕС та АЕС»

«Порядок гідравлічного розрахунку трубопроводів ТЕС »

ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ РІВЕНЬ «СПЕЦІАЛІСТ» ТА «МАГІСТР»
З НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ «ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»
(спеціальність «Теплові електричні станції»)

Київ

2014

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ «Порядок гідравлічного розрахунку трубопроводів ТЕС » по курсу «Проектування ТЕС та АЕС» освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст» та «магістр» з напрямку підготовки «Теплоенергетика» (спеціальність «Теплові електричні станції») / Уклад. О. Ю. Черноусенко– К.: ВПК «Політехніка», 2014. – 45 с.

Навчально-методичне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ**
по курсу «Проектування ТЕС та АЕС»
«Порядок гідравлічного розрахунку трубопроводів ТЕС »
ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ РІВЕНЬ «СПЕЦІАЛІСТ» та
«МАГІСТР» З НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ «ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»
(спеціальність «Теплові електричні станції»)

Укладачі *Черноусенко Ольга Юріївна*, докт. техн. наук, проф.

Відповідальний

за випуск *Георгієв Олександр Васильович*, канд. техн. наук, доц.

Підп. до друку Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Спосіб друку – ризографія.
Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк. Зам. № Наклад 100 прим.

Інформаційно-видавничий центр «Видавництво «Політехніка»» НТУУ «КПІ»
Свідоцтво про держреєстрацію ДК № 211 від 09.10.2000
03056, Київ-56, вул. Політехнічна, 14, корп. 15

Розрахункова величина гідравлічних втрат закладена в тепловому розрахунку, складає $[\Delta P]$.

Падіння тиску в трубопроводі визначається по заданій формулі:

$$\Delta P = \frac{c^2}{2 \cdot g \cdot V_l} \cdot \left[\frac{\lambda}{D_b} \cdot I + \sum_1^n \xi \right] + (H_2 \cdot H_1) \cdot \frac{1}{V_c} \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^2} \right)$$

де:

c – середня розрахункова швидкість середовища

V_l – середній питомий об'єм робочого середовища ($\text{м}^3/\text{кг}$)

λ – коефіцієнт тертя

D_b – розрахунковий внутрішній діаметр труби (м)

I – розгорнута довжина траси трубопроводу (м)

(при цьому розгорнута довжина I включає в себе довжину прямих ділянок, розгорнуту довжину відводів, зварних і литих колін, трійників і т.д.)

$\sum_1^n \xi$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів різних ділянок трубопроводу

H_2 і H_1 – відмітки початку і кінця траси (м) (В гідравлічних розрахунках паропроводів, газопроводів, повітропроводів членом $(H_2 \cdot H_1) \cdot \frac{1}{V_c}$ нехтують, тому що це мала величина)

Визначають розрахунковий діаметр паропроводу:

$$D_p = \left[D_n - S \left(2 + \frac{\Delta 1 + \Delta 2}{100} \right) \right] \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

де:

D_n – номінальний зовнішній діаметр труби (мм)

$\Delta 1$ – додатній допуск на товщину стінки %

$\Delta 2$ – від'ємний допуск на товщину стінки %

S – номінальна товщина стінки (мм)

Згідно технічних умов та виготовлення труб.

$$\Delta 1 = +20\%$$

$$\Delta 2 = -5\%$$

Визначаємо середній питомий об'єм середовища по формулі:

$$V_c = \frac{2 \cdot V_1 \cdot V_2}{V_1 + V_2} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)$$

де:

V_1 – питомий об'єм робочого середовища на початку траси ($\text{м}^3/\text{кг}$)

V_2 – питомий об'єм робочого середовища в кінці траси ($\text{м}^3/\text{кг}$)

Величину питомого об'єму робочого середовища в кінці траси визначаємо по заданому допустимому падінню тиску в кінці траси (у ПВТ).

При цьому вважається, що тепловий склад робочого середовища в кінці і на початку траси рівні.

Визначаємо розрахункову швидкість пари на ділянці від розтруба до входу в ПВТ (ділянка I – I див. Рис. 1)

$$C = 0.354 \frac{G \cdot V_c}{D_p^2} \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$$

де G – витрата робочого середовища (т/год).

Швидкість пари на ділянці від турбіни до раструба (ділянка II – II див. Рис. 1)

$$C_2 = \frac{C_1}{2} \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$$

Визначаємо коефіцієнт місцевих опорів і коефіцієнт тертя ' λ '

Знайдемо число Рейнольдса

$$Re = \frac{C \cdot D_l}{\nu}$$

де: – кінематична в'язкість робочого середовища ($\text{м}^2/\text{сек}$) при $Re > 2300$ потік являється турбулентним.

Коефіцієнт тертя в паропроводі ' λ ' визначається по формулі:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \lg \frac{D_p}{K_g} \right)^2}$$

де:

K_e – еквівалентна шорсткість труби. Для безшовних сталевих труб, які працюють в нормальних умовах: $K_e = 0,18 \dots 0,22$ мм

Значення коефіцієнта ' λ ' для труб по МВН приведені в таблиці.

При ламінарному потоці тобто при $Re < 2300$ коефіцієнт тертя

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору згину $\alpha = 90^\circ$

Коефіцієнт місцевого опору згину залежить від відношення R/D_n , діаметра труби і кута згину ' α ', де

R – радіус згину трубопроводу

Коефіцієнт місцевого опору литого коліна залежить від внутрішнього діаметра коліна і радіуса заокруглення R . В зв'язку з тим, що ненормалізовані литі коліна, як правило, проектується з радіусом заокруглення прийнятим по МВН, слід користуватись для визначення коефіцієнтів опорів таблицею.

Для $D_y = 150$ мм коефіцієнт місцевого опору $\xi = 0,49$.

По робочому кресленню литого коліна внутрішній діаметр його складає $D_b = 140$ мм. Тоді коефіцієнт місцевого опору коліна, віднесений до його фактичного внутрішнього діаметра визначається по формулі:

$$\xi_k = \xi' \cdot \left(\frac{D_y}{D_b} \right)^4 = 0,49 \cdot \left(\frac{150}{140} \right)^4 = 0,643$$

Коефіцієнт місцевого опору засувки визначається в залежності від типу засувки.

Якщо установка засувки відбувається за допомогою переходів, то необхідно коефіцієнт засувки ξ перерахувати на фактичний діаметр труби, що приєднується по формулі:

$$\xi_{\text{факт}} = \xi \cdot \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_3} \right)^4$$

де:

$D_{\text{тр}}$ – внутрішній діаметр труби (м)

D_3 – внутрішній діаметр засувки (м)

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору зворотного клапана КОС-150.

В зв'язку з тим, що в даний час офіційних даних по коефіцієнтах місцевих опорів зворотних клапанів типу КОС немає, слід користуватись експериментальними даними Уральського турбомоторного заводу.

Коефіцієнт місцевого опору розтруба залежить від конструктивних характеристик розтруба і схеми потоків руху робочого середовища.

Для знаходження коефіцієнт місцевого опору литого трійника складають розрахункову схему (рис.2).

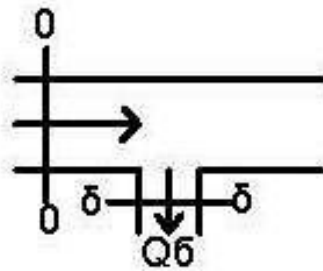


Рис.2. Розрахункова схема трійника.

Визначається відношення витрат в перерізах «0-0» і «δ-δ» $Q_{\delta}/Q_0=1$.

Коефіцієнт місцевого опору згину $\alpha=45^{\circ}$ знаходиться по $R_{згинну}$ по табл.

В зв'язку з тим, що згин $\alpha=45^{\circ}$ знаходиться на ділянці паропроводу II-II, де швидкість в 2 рази менша чим основна швидкість паропроводу, яка відповідає ділянці I-I, необхідно привести цей коефіцієнт до основної швидкості по формулі:

$$\xi_{г}^{пр} = \xi_{г} \cdot \left(\frac{C_{II}}{C_I}\right)^2$$

де: C_{II} , C_I - швидкість на ділянках II-II і I-I.

Коефіцієнт місцевого опору входу пари із турбіни в паропровід залежить від відношення діаметрів $(D_в/D1)^2$

де: $D_в$ – внутрішній діаметр трубопроводу; швидкість в перерізі перераховують на інший діаметр;

$D1$ – внутрішній діаметр камери відбору турбіни .

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору переходу знаходять по відношенню діаметрів $D_{входу}/D_{виходу}$ по таблиці. Потім приводять цей коефіцієнт до основної швидкості по формулі:

$$\xi_{\Gamma}^{\text{пр}} = \xi_{\Gamma} \cdot \left(\frac{C_{\text{II}}}{C_{\text{I}}}\right)^2$$

Визначають суму всіх коефіцієнтів місцевих опорів паропроводу.

$$\sum_1^n \xi = 4 \cdot \xi_{\Gamma} + \xi_{\text{к}} + \xi_{\text{з}} + \xi_{\text{КОС}} + \xi_{\text{Р}} + \xi_{\text{Т}} + \xi_{\Gamma}^{\text{пр}} + \xi_{\text{В}}^{\text{Р}} + \xi_{\text{пер}}^{\text{Ф}}$$

Потім визначають падіння тиску в паропроводі. Знайдена величина втрати тиску не перевищує допустимі втрати. Тоді паропровід можна експлуатувати.

Якщо втрати тиску ΔP більші, ніж задані на початку розрахунку $[\Delta P]$, то необхідно змінити трасу та арматуру трубопроводу. Після цього розрахунок повторюють до тих пір, доки ΔP не буде меншим за $[\Delta P]$.

Приклад розрахунку паропроводу II відбору парової турбіни К-300-240 ХТГЗ

Характеристики паропроводу

Розгорнута довжина траси	$\alpha=22,$ 4м
Зовнішній діаметр	Dy =199 см
Кількість литих колін	1 шт
Кількість литих розрубів	1 шт
Кількість переходів	1 шт
Кількість згинів $\alpha=90^\circ$	4 шт
Кількість згинів $\alpha=45^\circ$	1 шт
Кількість трійників	1 шт
Кількість засувки Dy ISO	1 шт
Кількість зворотних клапанів Dy ISO	1 шт

Розрахункова величина гідравлічних втрат закладена в тепловому розрахунку, складає 5%. Траса паропроводу та параметри робочого середовища вказані на рис. 1 ($P=50$ ата $t=550^{\circ}\text{C}$, труба 159×6 , сталь $12\times 1\text{МФ}$).

Падіння тиску в трубопроводі визначається по заданій формулі:

Визначають розрахунковий діаметр паропроводу:

Згідно технічних умов та виготовлення труб.

$$\Delta 1 = +20\%$$

$$\Delta 2 = -5\%$$

тоді

$$D_p = \left[159 - 6 \left(2 + \frac{20 - 5}{100} \right) \right] \cdot 10^{-3} = 0,146 \text{ м}$$

Визначаємо середній питомий об'єм середовища по формулі:

$$V_c = \frac{2 \cdot 0,0758 \cdot 0,08}{0,0758 + 0,08} = 0,078 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

де:

V_1 – питомий об'єм робочого середовища на початку траси ($\text{м}^3/\text{кг}$), $V_1 = 0,0758 \text{ м}^3/\text{кг}$

V_2 – питомий об'єм робочого середовища в кінці траси ($\text{м}^3/\text{кг}$), $V_2 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$

Величину питомого об'єму робочого середовища в кінці траси визначаємо по заданому допустимому падінню тиску в кінці траси (у ПВТ).

При цьому вважається, що тепловий склад робочого середовища в кінці і на початку траси рівні.

Визначаємо розрахункову швидкість пари на ділянці від розтруба до входу в ПВТ (ділянка I – I див. Рис. 1)

$$C = 0.354 \frac{35 \cdot 0,078}{0,146^2} = 45,4 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

де

G – витрата робочого середовища (т/год)

Швидкість пари на ділянці від турбіни до розтруба (ділянка II – II див. Рис. 1)

$$C_2 = \frac{45.4}{2} = 22.7 \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$$

Визначаємо коефіцієнт місцевих опорів і коефіцієнт тертя 'λ' по числу Рейнольдса

$$Re = \frac{45,4 \cdot 0,146}{2,42 \cdot 10^{-6}} = 2740000 = 2,74 \cdot 10^6$$

при $Re > 2300$ потік являється турбулентним.

Коефіцієнт тертя в паропроводі 'λ' визначається по формулі:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \lg \frac{146}{0,2}\right)^2} = 0,021$$

де: K_e – еквівалентна шорсткість труби. Для безшовних сталених труб, які працюють в нормальних умовах: $K_e = 0,18 \dots 0,22$ мм. Приймаємо для розрахунку $K_e = 0,2$ мм.

Значення коефіцієнта 'λ' для труб по МВН приведені в таблиці.

При ламінарному потоці тобто при $Re < 2300$ коефіцієнт тертя

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору згину $\alpha = 90^\circ$.

Коефіцієнт місцевого опору згину залежить від відношення R/D_n , діаметра труби і кута згину 'α', де R – радіус згину трубопроводу.

Визначаємо відношення R/D_n $R = 650$ мм, $D_n = 159$ мм,
 $650/159 = 4,1$.

По співвідношенню $R/D_n = 4,1$, умовному діаметру паропроводу $D_u = 150$ мм і кута згину $\alpha = 90^\circ$ визначаємо коефіцієнт місцевого опору $\xi_r = 0,1$.

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору литого коліна. Він залежить від внутрішнього діаметра коліна і радіуса заокруглення R . В зв'язку з тим, що ненормалізовані литі коліна, як правило, проектуються з радіусом заокруглення прийнятим по МВН, слід користуватись для визначення коефіцієнтів опорів таблицею.

Для $D_u = 150$ мм коефіцієнт місцевого опору $\xi = 0,49$.

По робочому кресленню литого коліна внутрішній діаметр його складає $D_b = 140$ мм. Тоді коефіцієнт місцевого опору коліна, віднесений до його фактичного внутрішнього діаметра визначається по формулі:

$$\xi_k = \xi' \cdot \left(\frac{D_y}{D_b}\right)^4 = 0.49 \cdot \left(\frac{150}{140}\right)^4 = 0.643$$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору засувки, який визначається в залежності від типу засувки.

Якщо установка засувки відбувається за допомогою переходів, то необхідно коефіцієнт засувки ξ перерахувати на фактичний діаметр труби, що приєднується по формулі:

$$\xi_{\text{факт}} = \xi \cdot \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_3}\right)^4$$

де:

$D_{\text{тр}}$ – внутрішній діаметр труби (м)

D_3 – внутрішній діаметр засувки (м)

Для засувки типу В-207-К знаходимо коефіцієнт місцевого опору $\xi_3 = 0,95$.

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору зворотного клапана КОС-150.

В зв'язку з тим, що в даний час офіційних даних по коефіцієнтах місцевих опорів зворотних клапанів типу КОС немає, слід користуватись експериментальними даними Уральського турбомоторного заводу.

По цих даних для КОС-150 коефіцієнт $\xi_{\text{КОС}} = 6,8$.

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору розтруба. Він залежить від конструктивних характеристик розтруба і схеми потоків руху робочого середовища. Для даного випадку коефіцієнт розтруба $\xi_p = 0,56$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору литого трійника.

Складемо розрахункову схему трійника (рис.2).

Визначаємо відношення витрат в перерізах «0-0» і « δ - δ » $Q_\delta/Q_0=1$.

Тоді коефіцієнт $\xi_T = 1,62$.

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору згину $\alpha=45^\circ$ $R_{\text{згинну}}=650$ мм по табл. коефіцієнт $\xi_r = 0,13$. В зв'язку з тим, що згин $\alpha=45^\circ$ знаходиться на ділянці

паропроводу II-II, де швидкість в 2 рази менша чим основна швидкість паропроводу, яка відповідає ділянці I-I, необхідно привести цей коефіцієнт до основної швидкості по формулі:

$$\xi_{\Gamma}^{\text{пр}} = \xi_{\Gamma} \cdot \left(\frac{C_{\text{II}}}{C_{\text{I}}}\right)^2$$

де:

C_{II} , C_{I} - швидкість на ділянках II-II і I-I.

$$\xi_2^{\text{пр}} = 0,13 \cdot \left(\frac{22,7}{45,4}\right)^2 = 0,0325$$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору входу пари із турбіни в паропровід. Він залежить від відношення діаметрів $(D_{\text{в}}/D_1)^2$

де: $D_{\text{в}}$ – внутрішній діаметр трубопроводу, $D_{\text{в}} = 120$ мм. При цьому швидкість в перерізі $D_{\text{в}}$ складає

$$C_{\text{в}} = 0,354 \cdot \frac{35 \cdot 0,078}{2 \cdot 0,120^2} = 33,6 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

D_1 – внутрішній діаметр камери відбору турбіни (1450 мм).

Визначимо відношення цих діаметрів $(D_{\text{в}}/D_1)^2 = (120/1450)^2 = 0,07$.

По таблиці знаходимо $\xi_{\text{в}} = 0,45$.

Приведемо цей коефіцієнт до основної швидкості по формулі:

$$\xi_{\text{в}}^{\text{р}} = 0,45 \cdot \left(\frac{33,6}{45,4}\right)^2 = 0,248$$

Знайдемо коефіцієнт місцевого опору переходу.

$D_{\text{входу, переходу}} = 120$ мм

$D_{\text{виходу, переходу}} = 146$ мм

Знайдемо відношення цих діаметрів.

$D_{\text{входу}}/D_{\text{виходу}} = 120/146 = 0,822$

По таблиці знаходимо $\xi_{\text{пер}} = 0,06$

Приведемо цей коефіцієнт до основної швидкості по формулі:

$$\xi_{\text{пер}}^{\text{ф}} = 0,06 \cdot \left(\frac{22,7}{45,4}\right)^2 = 0,015$$

Визначаємо суму всіх коефіцієнтів місцевих опорів паропроводу.

$$\sum_1^n \xi = 4 \cdot 0,1 + 0,643 + 0,95 + 6,8 + 0,56 + 1,62 + 0,0325 + 0,248 + 0,015 = 11,239$$

Визначаємо падіння тиску в паропроводі

$$\Delta P = \frac{45,4^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,078} \cdot \left[\frac{0,021}{0,146} \cdot 22,4 + 11,239 \right] = 19500 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2}$$

$$\Delta P = 1,9 \frac{\text{КГ}}{\text{СМ}^2}$$

Складає 3,91% від P_0

Знайдена величина втрати тиску не перевищує допустимі втрати 5%. Для визначення більш точної величини втрати тиску необхідно перерахувати $V_{\text{ср}}$ із умови $\Delta P = 3,91\%$ і шляхом послідовних наближень визначається точна величина ΔP .

Приклад розрахунку паропроводу III відбору парової турбіни К-300-240 ХТГЗ

Гідравлічний розрахунок трубопроводу

В якості трубопроводу, для котрого проведено розрахунок, вибрано паропровід на приводну турбіну

Пара на приводну турбіну йде з 3-го відбору головної турбіни (ЦСД-1).

Параметри пари на виході з турбіни (в камері відбору) складають:

$$P_n = 25 \frac{\text{КГС}}{\text{СМ}^2} = 2,453 \text{ МПа}, t_n = 515^\circ \text{С}.$$

Витрата пари на приводну турбіну:

$$G = 165 \frac{\text{Т}}{\text{Ч}}.$$

Сталь паропроводу - низьколегована перлітна 12Х1МФ, застосовується для паропроводів на параметри пари: P - до 30 КГС/СМ^2 , t до 515 °С.

По сортаменту труб для паропроводів до критичного тиску для даної стали при $D_y = 450$ мм и параметрах пари: 25 КГС/СМ^2 и 515 °С

$$d_n \times S = 465 \times 19 \text{ мм}.$$

Розрахунковий внутрішній діаметр трубопроводу:

$$d_p = d_n - S \cdot \left(2 + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{100} \right), \text{ мм}$$

де Δ_1 и Δ_2 - додатний і від'ємний допуски по товщині

$$\Delta_1 = +20\%, \Delta_2 = -5\%$$

$$\text{тоді } d_p = d_n - S \cdot \left(2 + \frac{20-5}{100} \right) = 424,15 \text{ мм.}$$

По значенням d_p и G визначають швидкість в паропроводі:

$$C = 0,354 \frac{G \cdot v}{d_p^2}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\text{де } G = 165 \frac{\text{Т}}{\text{ч}}$$

v - питомий об'єм пари $\text{м}^3/\text{кг}$.

$v = f(P; t)$ - визначають по таблиці води і водяної пари.

$$v = \frac{v_{\text{нач}} + v_{\text{кон}}}{2},$$

$$v_{\text{нач}} = f(P_{\text{н}}; t_{\text{нач}}) = f(2,453 \text{ МПа}; 515^0 \text{ С}) = 0,1516754 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

$$v_{\text{кон}} = f(P_{\text{кон}}; t_{\text{кон}}).$$

Для визначення $v_{\text{кон}}$ приймають втрату тиску в трубопроводі $\Delta P = 5\%$. Тоді $P_{\text{кон}} = 2,33 \text{ МПа}$. Приймають також, що втрати температури по довжині трубопроводу відсутні:

$$v_{\text{кон}} = 0,166644 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

$$v_{\text{ср}} = \frac{0,1516754 + 0,166644}{2} = 0,1574934 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Швидкість пари:

$$C = 0,354 \cdot \frac{165 \cdot 0,1574934}{(424,15)^2} = 51,13 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Отримане значення швидкості у межах допустимих швидкостей для трубопроводів відбору пари (50-90 м/с).

Втрати тиску в трубопроводі:

$$\Delta P = \left(\frac{\zeta_{\text{мп}} \cdot L}{d_h} + \sum \zeta_m \right) \cdot \frac{C^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot v}, \text{ МПа},$$

ζ_{mp}, ζ_m - коефіцієнти тертя прямих труб і коефіцієнти місцевого опору (арматура, відводи, трійники и т.д.).

ζ_{mp} - залежить від відносної шорсткості внутрішньої поверхні труб і характеру руху пари в трубі та визначається числом R_e :

$$R_e = \frac{C \cdot d_p}{\nu},$$

де ν - динамічна в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$;

$$\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}.$$

$$\text{При } P_n \text{ і } t_n \quad \nu_n = 1,3525 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^2}{\text{с}},$$

$$P_k \text{ і } t_k \quad \nu_k = 1,414 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^2}{\text{с}},$$

$$\nu_{cp} = \left(\frac{1,3525 + 1,414}{2} \right) \cdot 10^{-6} = 1,38325 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}^2}{\text{с}},$$

$$R_e = \frac{51,13 \cdot 0,32415}{1,38325 \cdot 10^{-6}} = 1,568 \cdot 10^7 > 2300.$$

Відповідно, течія в трубопроводі турбулентна.

Коефіцієнт тертя прямих труб розрахований по формулі:

$$\zeta_{mp} = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \lg \cdot \frac{d_p}{\kappa_s} \right)^2},$$

де κ_s - еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби, мм; для безшовних труб, що працюють в нормальних умовах:

$$\kappa_s \div 0,2 \text{ мм}$$

$$\zeta_{mp} = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \lg \cdot \frac{424,15}{0,2} \right)^2} = 0,01647.$$

Довжина трубопроводу дорівнює $L = 42,419 \text{ м}$.

Визначають коефіцієнти місцевого опору по ділянках (см. схему).

ділянка 2 – $\alpha = 90^\circ, R = 2100 \text{ мм}, d_{465 \times 19 \text{ мм}}, R/D_y = 2100/450 > 3 \quad \zeta_1 = 0,2$;

ділянка 3 – $\alpha = 90^\circ, R = 2100 \text{ мм}, d_{465 \times 19 \text{ мм}}, R/D_y = 2100/450 > 3 \quad \zeta_2 = \zeta_1 = 0,2$;

ділянка 18 – засувка з електроприводом $D_y = 450\text{мм}$ - засувка ВА3 шифр В-781 на

$$D_y = 450\text{мм} \left(41 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}, 570^\circ \text{C} \right) - \zeta_3 = 0,3;$$

ділянка 19 – КОС-450-II на $D_y = 450\text{мм}$ - $\zeta_4 = 6,9$;

ділянка 6 – у вигляді качки $R = 465\text{мм}, D_n = 465\text{мм}, R/D_n = 1, R_e > 1,5 \cdot 10^5$ $\zeta_5 = 2,16$;

ділянка 7 — блок $D_y = 450\text{мм}, R_1 = R_2 = 1500\text{мм}, \alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ, R/D_y = 3,3 > 3$
 $\zeta_7' = \zeta_7'' = 0,16$;

ділянка 8 – $\alpha = 90^\circ, R = 650\text{мм}, R/D_y = 650/450 = 1,44$ $\zeta_8 = 0,288$;

ділянка 9 – $\alpha = 15^\circ, R = 2100\text{мм}, R/D_y > 3$ $\zeta_9 = 0,07$;

ділянка «трійник» :

«с-с» - «п - п»

$$F_c = F_n, C_n/C_o \langle 1, Q_o/Q_c = 0,5,$$

$$\zeta_n = 0,1;$$

«с-с» - «б-б»

$$F_b = 0,0924\text{м}^2, F_c = 0,1432\text{м}^2, q = Q_b/Q_c = 0,5,$$

$$\zeta_b = 1,505;$$

ділянка «перехід на менший діаметр»

$$\left(\frac{d}{D} \right)^2 = 0,504;$$

$$\zeta_m = 0,066.$$

За трійником трубопровід має розмір $d377 \times 17$. Потік за трійником розділяється на два потоки, тому швидкості на ділянках: 10-14 приблизно в два рази менше, чим на ділянках до трійника. Коефіцієнти місцевого опору на цих ділянках необхідно привести к швидкості на цих ділянках.

Ділянка 10 $R = 525\text{мм}, \alpha = 90^\circ, R/D_y = 525/325 = 1,5$;

Ділянки 11, 12, 13, 14 мають ті ж розміри

$$R = 525\text{мм}, \alpha = 90^\circ, R/D_y = 525/325 = 1,5;$$

$$\text{Швидкість на цих ділянках } C' = \frac{C}{2} = \frac{51,13}{2} = 25,565 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Тоді коефіцієнти місцевого опору на ділянках 10 – 14 дорівнюють:

$$\zeta'_{10} = \zeta'_{11} = \zeta'_{12} = \zeta'_{13} = \zeta'_{14} = 0,25 \cdot \left(\frac{25,565}{51,13} \right)^2 = 0,0625.$$

Сума місцевих опорів на розрахунковій ділянці визначається за формулою:

$$\sum \zeta_m = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 + \zeta_5 + \zeta_7' + \zeta_7'' + \zeta_6 + \zeta_9 + \zeta_6 + \zeta_n + \zeta_m + 5 \cdot \zeta'_{10} = \\ = 0,2 + 0,2 + 0,3 + 6,9 + 2,16 + 0,16 \cdot 2 + 0,288 + 0,07 + 0,1 + 1,505 + 0,066 + 0,0625 \cdot 5 = 12,4215$$

Втрата тиску по довжині трубопроводу дорівнює:

$$\Delta P_{mp} = \left(\frac{0,01647 - 42,419}{0,42415} + 12,4215 \right) \cdot \frac{(51,13)^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,1574934} = 0,116678 \text{ МПа}.$$

Це складає 4,76 % від $P_{нач}$ та не перевищує допустимого значення втрати тиску $\Delta P = 5\%$.

Розрахунок ділянки трубопроводу на самокомпенсацію.

Розрахунок ділянки трубопроводу проводиться по методу пружнього центру, який не враховує вагу трубопроводу і реакції проміжних опор.

Лінійна схема трубопроводу розбивається на ділянки.

Вибирається система координат так, щоб осі координат були паралельні прямим ділянкам. Визначаються центри ваги ділянок. Елементи, що заняті арматурою, фасонними частинами і пристроями, жорсткість яких прямує до безкінечності, не враховуються.

Осьовий момент інерції поперечного перетину трубопроводу:

$$I = \frac{\pi \cdot (d_n^4 - d_e^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (0,465^4 - 0,427^4)}{64} = 6,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4.$$

Момент опору:

$$W = \frac{2 \cdot I}{d_n} = \frac{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-4}}{0,465} = 2,852 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Середній радіус ділянки трубопроводу визначають по формулі:

$$r_{cp} = \frac{d_n + d_{вн}^p}{4} = \frac{465 + 424,15}{4} = 222,288 \text{ мм}.$$

Модуль пружності сталі 12Х1МФ при робочій температурі $t_p = 515^\circ \text{C}$:

$$E_{515} = 1,775 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Розрахункова жорсткість труби $E \cdot I = 1,775 \cdot 10^5 \cdot 6,63 \cdot 10^{-4} = 1,177 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^3$

Коефіцієнт температурного подовження (лінійного розширення):

$$L_1 = 13,66 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ \text{C}}.$$

При радіусі згину $R=2,1 \text{ м}$ геометрична характеристика:

$$\lambda = \frac{4 \cdot S \cdot R}{(d_H - S^2)} = \frac{4 \cdot 19 \cdot 2100}{(465 - 19)^2} = 0,802.$$

Коефіцієнт гнучкості Кармана:

$$K = \frac{10 + 12 \cdot \lambda^2}{1 + 12 \lambda^2} = \frac{10 + 12 \cdot (0,802)^2}{1 + 12 \cdot (0,802)^2} = 2,03.$$

Приведена довжина дугового елемента:

$$l_{np} = k \cdot l,$$

де l – геометрична довжина дугового елемента

$$l = \frac{\pi \cdot R \cdot L}{180} = \frac{\pi \cdot 2100 \cdot 90}{180} = 3298,7 \text{ мм},$$

тоді $l_{np} = 2,03 \cdot 3298,7 = 6696,4 \text{ мм}.$

Координати центру тяжіння дуги:

$$P = 0,637 \cdot R = 0,637 \cdot 2,1 = 1,3377 \text{ м}$$

$$q = 0,363 \cdot R = 0,363 \cdot 2,1 = 0,7623 \text{ м}$$

Координати центрів тяжіння прямолінійних ділянок розташовані посередині кожної з ділянок.

Статичні моменти всієї траси:

$$S_{x_{mp}} = \sum S_{xI} = 15,905 \text{ м}^2, S_{y_{mp}} = \sum S_{yI} = 29,813 \text{ м}^2.$$

Координати пружного центру тяжіння

$$x_S = \frac{S_{y_{mp}}}{\sum l_{np}} = \frac{29,813}{11,0984} = 2,6867 \text{ м}; y_S = \frac{S_{x_{mp}}}{\sum l_{np}} = \frac{15,905}{11,0984} = 1,43 \text{ м}.$$

Моменти інерції елементів отримують як суму власного моменту інерції елемента відносно осей, що проходять крізь його центр тяжіння I_{ox} , I_{oy} , I_{oxy} і додаткового члену, що враховує перенос осей на початок координат.

$$I_x = I_{ox} + \frac{l_{np} \cdot \bar{y}^2}{m}, I_y = I_{oy} + \frac{l_{np} \cdot \bar{x}^2}{m}, I_{xy} = I_{oxy} + \frac{l_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{n},$$

Тоді
$$\sum I_x = \sum I_{ox} + \sum \frac{l_{np} \cdot \bar{y}^2}{m} = 48,397 \text{ м}^3;$$

$$\sum I_y = \sum I_{oy} + \sum \frac{l_{np} \cdot \bar{x}^2}{m} = 97,4917 \text{ м}^3;$$

$$\sum I_{xy} = \sum I_{oxy} + \sum \frac{l_{np} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{n} = 54,9205 \text{ м}^3;$$

Для переносу координат осей в УЦГ

$$I_{xS} = I_x - l_{np} \cdot y_S^2 = 48,397 + 11,0964 \cdot 1,43^2 = 71,04 \text{ м}^3;$$

$$I_{yS} = I_y - l_{np} \cdot x_S^2 = 97,4917 + 11,0964 \cdot 1,6867^2 = 177,53 \text{ м}^3;$$

$$I_{xys} = I_{xy} - l_{np} \cdot x_S \cdot y_S = 54,9205 + 11,0964 \cdot 1,43 \cdot 1,6867 = 97,553 \text{ м}^3.$$

Власні моменти інерції прямих і дугових елементів:

$$I_{ox} = \frac{l_{np} \cdot \bar{l}_y^2}{12m}, I_{oy} = \frac{l_{np} \cdot \bar{l}_x^2}{12m}, I_{oxy} = \frac{l_{np} \cdot \bar{l}_x \cdot \bar{l}_y}{12n}.$$

Знак I_{oxy} залежить від положення хорди дугового елемента відносно додатного напрямку координатних осей: як що луч, що проведений через початок координат паралельно відрізку або хорді дуги проходить в 1^{ом} або 3^{ем} квадрантах – знак «+», в 2^{ом} и 4^{ом} – «-».

Температурне подовження ділянки трубопроводу:

$$\Delta x_t = L_t \cdot (t_p - t_m) \cdot L_x = 13,2 \cdot 10^{-6} \cdot (515 - 20) \cdot 3,5 = 0,02365 \text{ м} \text{ — по осі } x;$$

$$\Delta y_t = L_t \cdot (t_p - t_m) \cdot L_y = 13,65 \cdot 10^{-6} \cdot (515 - 20) \cdot 5,1 = 0,03446 \text{ м} \text{ — по осі } y.$$

Тут t_p и t_m – температура трубопроводу робоча і монтажна, °С.

Попередня розтяжка трубопроводу:

$$\Delta x_p = 0,5 \cdot \Delta x_t = 0,5 \cdot 0,02365 = 0,011825 \text{ м};$$

$$\Delta y_p = 0,5 \cdot \Delta y_t = 0,5 \cdot 0,03446 = 0,01723 \text{ м}.$$

Сумарне переміщення:

$$\Delta x = \Delta x_t - \Delta x_p = 0,02365 - 0,011825 = 0,011825 \text{ м};$$

$$\Delta y = \Delta y_t - \Delta y_p = 0,03446 - 0,01723 = 0,01723 \text{ м.}$$

Зусилля:

$$P_x = E \cdot I \cdot \frac{\Delta x \cdot I_{yS} + \Delta y \cdot I_{xyS}}{I_{xS} \cdot I_{yS} - I_{xyS}^2} = 1,177 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,011825 \cdot 177,59 + 0,01723 \cdot 97,553}{71,04 \cdot 177,59 - 97,553^2} = 143577,48 \text{ Н ;}$$

$$P_y = E \cdot I \cdot \frac{\Delta y \cdot I_{xS} + \Delta x \cdot I_{xyS}}{I_{xS} \cdot I_{yS} - I_{xyS}^2} = 1,177 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,01723 \cdot 71,04 + 0,011825 \cdot 97,553}{71,04 \cdot 17,59 - 97,553^2} = 90288,78 \text{ Н.}$$

Згинаючий момент:

$$M_u = P_x \cdot (y - y_S) - P_y \cdot (x - x_S).$$

Визначають згинаючий момент для точок 0 и 0₁.

Для точки 0:

$$M_u = 143577,48 \cdot (0 - 1,43) - 90288,78(0 - 2,6867) = 37263,07 \text{ Н.м.}$$

Напруження від згинаючого моменту:

$$\sigma_u^{ек} = \frac{M_u}{\varphi_u \cdot W} = \frac{37263,07 \cdot 10^{-6}}{0,9 \cdot 2,825 \cdot 10^{-3}} = 14,517 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}.$$

де φ_u – коефіцієнт міцності поперечного зварного з'єднання при згині.

Розглядається пласка ділянка трубопроводу :

$$M_{кр} = 0, \tau = 0.$$

Напруження стискання:

$$\sigma_p = \frac{P_{вн}}{f} = \frac{P_x}{f} = \frac{143577,48 \cdot 10^{-6}}{2,662 \cdot 10^{-2}} = 5,394 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2},$$

де $f = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{лн}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0,465^2 - 0,427^2) = 2,662 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ – площа поперечного

перетину трубопроводу.

Приведений тиск обумовлений внутрішнім тиском пари:

$$\sigma_{np} = \frac{P \cdot (d_n - (S - c))}{2 \cdot (S - c)},$$

P – робочий тиск в трубопроводі $P=2,453$ МПа.

S – товщина стінки, $S=19$ мм.

c – прибавка до товщини стінки при найбільшому від'ємному допуску 5%.

$$c = A \cdot (S - c), c = \left(\frac{A}{A+1} \right) \cdot S.$$

Згідно норм $A=0,11$:

$$c = \left(\frac{0,11}{0,11+1} \right) \cdot 19 = 1,88 \text{ мм},$$

$$\sigma_{np} = \frac{2,453 \cdot (465 - (19 - 1,88))}{2 \cdot (19 - 1,88)} = 32,087 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}.$$

Результуюче еквівалентне напруження самокомпенсації:

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{ск}} = \sqrt{(\sigma_p + 0,8 \cdot \sigma_u)^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sigma_p + 0,8 \cdot \sigma_u = 5,394 + 0,8 \cdot 14,517 = 17,008 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2};$$

$\sigma_{\text{екв}}^{\text{ск}}$ перевіряють:

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{ск}} \leq 0,87 \cdot \sigma_{\text{дон}} \cdot \sqrt{2 - \left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{\text{дон}}} \right)^2},$$

$$0,87 \cdot \sigma_{\text{дон}} \cdot \sqrt{2 - \left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{\text{дон}}} \right)^2} = 0,87 \cdot 93,75 \cdot \sqrt{2 - \left(\frac{32,087}{93,75} \right)^2} = 289,15 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2},$$

$$17,008 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} \leq 289,15 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}.$$

Умова міцності задовольняється.

Для точки 0_1 розрахунки аналогічні:

$$M_u = 143577,48 \cdot (5,1 - 1,43) - 90288,78 \cdot (3,5 - 2,6867) = 453424,09 \text{ Н.м.}$$

Для точки 0_1 Умова міцності також задовольняється.