

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Ігор АНДРЕЄВ**

**РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ТРУБОПРОВОДІВ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю  
133 «Галузеве машинобудування»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2023

Рецензент: Ігор Мікульонок, д-р техн. наук, проф., с. н. с.,  
кафедра хімічного, полімерного і силікатного  
машинобудування “КПІ ім. Ігоря Сікорського”

Відповідальний  
редактор Ярослав Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 4 від 19.01.2023 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 11 від 28.11.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Ігор Андреев, канд. техн. наук, доц.*

## **РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВІДІВ**

Розрахунок технологічних трубопроводів [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 104 с.

Посібник містить конструкції технологічних трубопроводів, алгоритми і приклади розрахунків елементів трубопроводів. Наведені необхідні довідкові дані для виконання розрахунків.

Для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

© Ігор Андреев, 2023

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТРУБОПРОВОДИ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ .....	10
2 ДЕТАЛІ ТРУБОПРОВОДІВ.....	16
2.1 Труби.....	17
2.2 Відводи.....	18
2.3 Переходи.....	19
2.4 Трійники.....	20
2.5 Заглушки.....	20
2.6 З'єднання труб з деталями.....	22
3 РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ І ДОПУСТИМІ НАПРУЖЕННЯ.....	23
3.1 Розрахункова температура.....	23
3.2 Робочий і розрахунковий тиски.....	24
3.3 Номінальний тиск.....	24
3.4 Номінальний діаметр.....	25
3.5 Допустиме напруження.....	26
3.6 Коефіцієнт міцності.....	28
4 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДІВ, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД НОМІНАЛЬНИМ ТИСКОМ ДО 10 МПА.....	29
4.1 Виконавча товщина стінки елемента.....	29
4.2 Розрахунок товщини стінки труби.....	30
4.3 Розрахунок товщини стінок гнутих відводів.....	31
4.4 Розрахунок безшовних відводів з постійною товщиною стінки...32	
4.5 Розрахунок товщини стінок секторних відводів.....	32
4.6 Розрахунок товщини стінок штампозварних відводів.....	33
4.7 Допустимий внутрішній тиск у відводах.....	34
4.8 Розрахунок товщини стінок переходів.....	34

4.9 Розрахунок товщини стінок трійникових з'єднань.....	35
4.10 Розрахунок товщини стінок трійників з відбортованими отворами і врізаними сідловинами.....	38
4.11 Розрахунок товщини стінок плоских круглих заглушок.....	39
4.12 Розрахунок товщини стінки еліптичної заглушки.....	40
4.13 Розрахунок товщини стінки еліптичної заглушки з отвором.....	41
4.14 Алгоритми і приклади розрахунків елементів трубопроводів....	43
<b>5 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВІДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ.....</b>	<b>64</b>
5.1 Розрахунок товщини стінки труби.....	65
5.2 Перевірний розрахунок товщини труби з урахуванням температурних напружень.....	66
5.3 Розрахунок непрямолінійних труб, які призначені для роботи при підвищеній температурі.....	67
5.4 Розрахунок криволінійних елементів.....	70
5.5 Розрахунок конічних переходів.....	72
5.6 Алгоритми і приклади розрахунків елементів трубопроводів високого тиску.....	73
ДОДАТОК А. Допустимі напруження металів.....	90
ДОДАТОК Б. Прокат листовий.....	96
ДОДАТОК В. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу.....	100
ДОДАТОК Г. Коефіцієнти лінійного розширення.....	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ...	102

## ВСТУП

За призначенням трубопроводи поділяють на магістральні, технологічні, санітарно-технічні та ін.

Технологічні трубопроводи суттєво відрізняються від інших типів трубопроводів за своїм призначенням і умовам застосування. Експлуатація трубопроводів здійснюється як при вакуумі, так і при високому тиску, при від'ємній і додатній температурах, може застосовуватися для транспортування токсичних, вибухо- і пожежонебезпечних середовищ.

У навчальному посібнику містяться теоретичні відомості основ конструювання і розрахунків елементів технологічних трубопроводів, сучасні стандартні розрахункові формули, питання для самоконтролю, приклади розрахунку, а також довідковий матеріал для забезпечення проведення розрахунків. Розроблені алгоритми розрахунків і наведені приклади допоможуть студентам при виконанні практичних завдань, курсових і дипломних проектів.

Розглянутий у навчальному посібнику матеріал відповідає освітньому компоненту "Розрахунки технологічних трубопроводів", який відіграє важливу роль при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю "Галузеве машинобудування".

## ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$A_t$  – температурний коефіцієнт;

$A_n$  – зміцнювальна площа накладки, м<sup>2</sup>;

$A_{ш}, A_{ш1}, A_{ш2}$  – зміцнювальні площі штуцера, м<sup>2</sup>;

$a_r$  – відносний радіус кривизни елемента;

$b$  – ширина прокладки, м;

$b_n$  – фактична ширина накладки, м;

$b_{нR}$  – розрахункова ширина накладки, м;

$C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;  
 $C_1$  – додаток для компенсації корозії і (або) ерозії, м;  
 $C_2$  – додаток для компенсації мінусового допуску, м;  
 $C_e$  – додаток для компенсації ерозії, м;  
 $D, d$  – внутрішній діаметр, м;  
 $D, D_1$  – діаметр відгалуження, м;  
 $D_1$  – зовнішній діаметр більшого циліндра конічного переходу, м;  
 $D_3, d_3$  – зовнішній діаметр, м;  
 $d_1$  – внутрішній діаметр більшого циліндра конічного переходу, м;  
 $d_2$  – внутрішній діаметр меншого циліндра конічного переходу, м;  
 $d_{екв}$  – еквівалентний діаметр отвору при наявності радіусного переходу, м;  
 $E$  – модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури, МПа;  
 $h$  – висота випуклої частини заглушки, м;  
 $h_{ш}$  – фактична висота штуцера, м;  
 $h_{ш1}$  – розрахункова висота внутрішньої частини штуцера, м;  
 $j_1, j_2$  – коефіцієнти, які характеризують, відповідно, необхідне стовщення стінки в перерізі товщиною  $S_1$  і допустиме стоншення стінки в перерізі товщиною  $S_2$  порівняно з прямою трубою;  
 $K, K_1, K_2$  – коефіцієнти;  
 $k_i$  – коефіцієнт збільшення напружень у відводах;  
 $L$  – розрахункова висота еліптичної заглушки, м;  
 $l$  – довжина відбортованої частини еліптичної заглушки, м;  
 $M_u$  – згинаючий момент, МН·м/м;  
 $M_u^o$  – згинаючий момент при його окремій дії (коли інші силові фактори дорівнюють нулю), МН·м/м;

$M_{кр}$  – крутильний момент, МН·м/м;

$M_{кр}^o$  – крутильний момент при його окремій дії (коли інші силові фактори дорівнюють нулю), МН·м/м;

$M_{кр}^T$  – крутний момент, який визиває появлення на зовнішній поверхні труби напружень, що дорівнюють границі плинності матеріалу, МН·м/м;

$N$  – число циклів навантаження за розрахунковий термін служби;

$N_T$  – осьова сила, яка діє на трубу, МН;

$N_T^o$  – осьова сила при її окремій дії (коли інші силові фактори дорівнюють нулю), МН;

$n$  – коефіцієнт запасу міцності;

$n_e$  – коефіцієнт запасу міцності за границею міцності;

$n_D$  – коефіцієнт запасу міцності за границею тривалої міцності;

$n_T$  – коефіцієнт запасу міцності за границею плинності;

$PN$  – номінальний тиск;

$p^o$  – граничний тиск при його окремій дії (коли інші силові фактори дорівнюють нулю), МПа;

$p_R$  – внутрішній розрахунковий тиск, МПа;

$p_T$  – тиск, який відповідає початку процесу плинності на внутрішній поверхні труби, МПа;

$R$  – радіус кривизни осьової лінії відводу, м;

$R_{0,2}$  – мінімальне значення умовної границі плинності за розрахункової температури (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;

$R_r$  – радіус вигину криволінійного елемента по нейтральній осі, м;

$R_e$  – мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за розрахункової температури, МПа;

$R_D$  – мінімальне значення границі тривалої міцності за розрахункової температури, МПа;

$r$  – радіус закруглення, м;

$S, S_1, S_2$  – товщина деталей, м;

$S_1$  – товщина криволінійного елемента на увігнутій поверхні, товщина стінки більшого циліндра конічного переходу м;

$S_2$  – товщина криволінійного елемента на опуклій поверхні, товщина стінки меншого циліндра конічного переходу м;

$S_3$  – товщина стінки заготовки криволінійного елемента, м;

$S_R, S_{Ri}$  – розрахункові товщини стінок, м;

$S_H$  – виконавча товщина накладки, м;

$S_{ш}$  – виконавча товщина стінки штуцера, м;

$S_{шR}$  – розрахункова товщина стінки штуцера в м при  $\varphi_w = 0$ ;

$t_R$  – розрахункова температура, °С;

$t_6$  – внутрішня температура, 1/°С;

$t_3$  – зовнішня температура, 1/°С;

$v_{кор}$  – швидкість корозії (проникність), м/рік;

$W_x$  – осьовий момент опору труби, м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – кут нахилу стінки переходу, град.;

$\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб, 1/°С;

$\alpha_k$  – кут між віссю і твірною конуса, град.;

$\beta$  – коефіцієнт товстостінності труби;

$\beta_R$  – розрахунковий коефіцієнт товстостінності труби;

$\beta_{Rk}$  – розрахунковий коефіцієнт товстостінності конічного переходу;

$\delta$  – мінусовий допуск, %;

$\gamma$  – коефіцієнт надійності трубопроводу;

$\gamma_1$  – розрахунковий коефіцієнт для плоскої заглушки;



$\Delta_{min}$  – мінімальний розрахунковий розмір зварного шва, м;  
 $\Delta_t$  – перепад температур, °С;  
 $\mu$  – коефіцієнт Пуасона;  
 $\xi_p, \xi_u, \xi_{кр}$  – коефіцієнти;  
 $\sigma_T$  – границя плинності за розрахункової температури, МПа;  
 $\sigma_T$  – границя плинності за розрахункової температури, МПа;  
 $[\sigma]$  – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа;  
 $[\sigma]_{20}$  – допустиме напруження при температурі 20 °С, МПа;  
 $[\sigma]_M$  – допустиме напруження для зміцнювальних деталей при розрахунковій температурі, МПа;  
 $\tau$  – строк служби елемента, рік;  
 $\varphi$  – коефіцієнт міцності;  
 $\varphi_u$  – коефіцієнт міцності кільцевого зварного шва;  
 $\varphi_o$  – коефіцієнт недовантаження магістралі;  
 $\varphi_d$  – коефіцієнт міцності елемента з отвором;  
 $\varphi_w$  – коефіцієнт міцності зварного шва;

Тлумачення позначень в тексті подається один раз при першому їх появленні.

## **1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТРУБОПРОВОДИ. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ**

Трубопровід являє собою споруду з труб, щільно з'єднаних між собою, для транспортування газоподібних, рідких або твердих продуктів і виробів.

До технологічних трубопроводів належать трубопроводи, призначені для транспортування у межах промислового підприємства або групи цих підприємств сировини, напівфабрикатів, готової продукту, допоміжних матеріалів, що забезпечують ведення технологічного процесу та експлуатацію обладнання (пар, вода, повітря, гази, холодоагенти, мазут, мастила, емульсії тощо), відходів виробництва при агресивних стоках, а також трубопроводи оборотного водопостачання, що монтуються з готових вузлів.

Не належать до технологічних трубопроводів трубопроводи пожежного водопостачання, опалення, каналізації неагресивних стоків та зливової каналізації.

При об'єднаному водопостачанні (протипожежно-виробничо-питному), а також при суміщеному використанні трубопроводів (коли вони транспортують газ, воду, пару тощо), призначених для технологічних цілей та побутових потреб, до технологічних трубопроводів відносяться тільки ділянки для підключення апаратів та машин до ліній об'єднаних та поєднаних трубопроводів [1].

Технологічні трубопроводи призначені для транспортування рідких, газоподібних, газорідких речовин і таких, що містять тверді частинки.

Технологічні трубопроводи знаходяться у межах промислових підприємств і під час експлуатації можуть бути під вакуумом або під тиском до 320 МПа, у широкому діапазоні температур (від – 253 до 700 °С), відчувати навантаження від сили тяжіння труб, деталей, арматури,

транспортованої речовини та теплоізоляції, теплового подовження, вібрації та ін. [2].

### **Класифікація трубопроводів:**

- за довжиною: довгі (місцеві втрати напору складають не більше 10% від втрат напору по довжині) і короткі (місцеві втрати напору співмірні з втратами напору по довжині);
- за конструкцією: прості (послідовне з'єднання труб) і складні (розгалуження з паралельними та кільцевими з'єднаннями);
- за матеріалом: металеві і неметалеві (бетонні, керамічні, скляні, азбоцементні, пластмасові і т. ін.);
- по розташуванню: цехові і міжцехові.

### **Склад трубопроводів**

Технологічні трубопроводи разом з трубами містять ще деталі, які призначені:

- для зміни напрямку потоку речовини, що транспортується (відводи, коліна);
- для з'єднання труб різного діаметра (переходи);
- для розгалуження потоків сировини (трійники);
- для закриття кінців трубопроводів (заглушки, днища)

Основні типи та розміри приварних деталей стандартизовані або нормалізовані.

Залежно від фізико-хімічних властивостей, розрахункових тисків  $p_R$  і температур  $t_R$  середовищ у трубах технологічні трубопроводи підрозділяють на групи і категорії (табл. 1.1) [3].

Таблиця 1.1 Класифікація трубопроводів, що експлуатуються під тиском до 10 МПа [3]

Технологічне середовище		Категорія трубопроводів									
Група середовища	Клас небезпеки речовини згідно з Постановою КМУ № 956 від 11.07.2002	I		II		III		IV		V	
		$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C
А (токсична)	а) високо-токсичні (гостро-токсичні, надзвичайно небезпечні, отруйні) речовини	Незалежно	Незалежно	—	—	—	—	—	—	—	—
	б) інші речовини з токсичними властивостями	Понад 2,5	Понад 300 і нижче мінус 40	Вакуум від 0,08 (абс.) до 2,5	Від мінус 40 до 300	—	—	—	—	—	—
		Вакуум нижче 0,08 (абс.)	Незалежно	—	—	—	—	—	—	—	—

Продовження табл.1.1

Технологічне середовище		Категорія трубопроводів									
Група середовища	Клас безпеки речовини згідно з Постановою КМУ № 956 від 11.07.2002	I		II		III		IV		V	
		$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C
Б (вибухо-небезпечна і пожежо-небезпечна)	а) горючі (займисті) гази (ГЗГ), у тому числі зріджені вуглеводні гази (ЗВГ)	Понад 2,5	Понад 300 і нижче мінус 40	Вакуум від 0,08 (абс) до 2,5 (абс)	Від мінус 40 до 300	—	—	—	—	—	—
		Вакуум нижче 0,08 (абс.)	Незалежно	—	—	—	—	—	—	—	—
	б) горючі легкозаймисті рідини (ЛЗР)	Понад 2,5	Понад 300 і нижче мінус 40	Понад 1,6 до 2,5	Від 120 до 300	До 1,6	Від мінус 40 до 120	—	—	—	—
		Вакуум нижче 0,08 (абс)	Незалежно	Вакуум понад 0,08 (абс)	Від мінус 40 до 300	—	—	—	—	—	—
	в) інші горючі рідини (ГР)	Понад 6,3	Понад 350 і нижче мінус 40	Понад 2,5 до 6,3	Понад 250 до 350	Понад 1,6 до 2,5	Понад 120 до 250	До 1,6	Від мінус 40 до 120	—	—
		Вакуум нижче 0,003 (абс)	Понад 350 і нижче мінус 40	Вакуум нижче 0,08 (абс)	Понад 250 до 350	Вакуум до 0,08 (абс)	Від мінус 40 до 250	—	—	—	—

Продовження табл.1.1

Технологічне середовище		Категорія трубопроводів									
Група середовища	Клас небезпеки речовини згідно з Постановою КМУ № 956 від 11.07.2002	I		II		III		IV		V	
		$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C	$p_R$ , МПа	$t_R$ , °C
B	Важкогорючі (ВГ) та негорючі речовини (НГ)	Вакуум нижче 0,003 (абс)	Незалежно	Понад 6,3 або вакуум нижче 0,08 (абс)	Понад 350 до 450	Понад 2,5 до 6,3	Від 250 до 350	Понад 1,6 до 2,5	Понад 120 до 250	До 1,6	Від мінус 40 до плюс 120

**Примітки до табл. 1.1:** Групу небезпечності технологічного середовища, клас безпеки хімічної речовини (суміші) та категорію трубопроводу визначає розробник проектної документації і вказує їх у паспорті трубопроводу.

У разі відсутності в таблиці певних параметрів тиску та температури технологічного середовища в категоріях трубопроводу для певного класу безпеки речовини цей трубопровід має бути віднесений до категорії, у якій тиск і температура перевищують значення параметрів технологічного середовища цього трубопроводу.

Клас безпеки хімічних речовин (сумішей), що утворюються під час технологічного процесу на окремих стадіях, але не є товарною продукцією, визначається на підставі граничнодопустимих концентрацій шкідливих речовин або нижньої межі вибуховості вибухонебезпечних парів і газів.

Клас безпеки хімічної речовини (суміші), яка є сировиною або товарною продукцією, має відповідати класу безпеки, визначеному в паспорті безпеки хімічної речовини (суміші), який складається постачальником хімічних речовин (сумішей) чи суб'єктом господарювання згідно з ДСТУ ГОСТ 30333:2009 "Паспорт безпечності хімічної продукції. Загальні вимоги".

Позначення "трубопровід А(б) категорії II" визначає клас небезпечності трубопроводу низького тиску, по якому транспортується токсичне технологічне середовище з речовиною з іншими токсичними властивостями (крім гостротоксичних) під вакуумом від 0,08 МПа (абс.) до 2,5 МПа (абс.) і за температури від мінус 40 до 300° С.

Трубопроводи, що транспортують речовини з робочою температурою, що дорівнює чи перевищує температуру їх samozapalennya, або з робочою температурою нижче мінус 40° С, а також речовини, що несумісні з водою чи з повітрям за нормальних умов, відносяться до I категорії.

## **Питання для самоконтролю до розділу 1**

- 1 Обґрунтувати призначення технологічних трубопроводів.
- 2 Навести класифікацію трубопроводів.
- 3 Навести склад технологічних трубопроводів.
- 4 Навести групи і категорії технологічних трубопроводів.

## **2 ДЕТАЛІ ТРУБОПРОВОДІВ**

При виборі матеріалів для виготовлення трубопроводу треба враховувати розрахунковий тиск, розрахункову температуру стінки, технологічні властивості і корозійну стійкість матеріалів трубопроводу, хімічний склад та характеристику середовища.

При виборі матеріалів для трубопроводів, які призначені для установлення на відкритих майданчиках або в приміщеннях без опалення, треба враховувати:

– абсолютну мінімальну температуру зовнішнього повітря для даного району у випадку, якщо температура стінки трубопроводу, що знаходиться під тиском, може стати мінусовою від дії навколишнього повітря;

– середню температуру повітря найбільш холодної п'ятиденки даного району з забезпеченістю 0,92, якщо температура стінки трубопроводу, що знаходиться під тиском, позитивна [4].

Вибір марок сталей для трубопроводів, що знаходяться без тиску, залежно від середньої температури повітря найбільш холодної п'ятиденки здійснюється за таблицею 2.1.



Таблиця 2.1. Марки сталей для трубопроводів, що знаходяться без тиску, залежно від середньої температури повітря найбільш холодної п'ятиденки

Середня температура повітря найбільш холодної п'ятиденки, °С	Марка сталі
Не нижче мінус 30	Ст3пс3, Ст3сп3, Ст3Гпс3
	16ГС-3, 09Г2С-3, 10Г2С1-3
	15К-3, 16К-3, 18К-3, 20К-3
Від мінус 31 до мінус 40	Ст3пс4, Ст3сп4, Ст3Гпс4
	20К-5
	16ГС-6, 09Г2С-6, 10Г2С1-6
Від мінус 41 до мінус 60	09Г2С-8, 10Г2С1-8

Для матеріалів, які не наведені в таблиці 1.2, нижчу температурну границю застосування визначають відповідно до вимог державних стандартів.

Якщо при перевірці якості сталі на відповідність вимог таблиці 1.2 станеться, що державні стандарти рекомендують різні категорії сталі, то необхідно застосовувати сталь більш високої категорії.

## 2.1 Труби

Найчастіше в технологічних трубопроводах застосовують сталеві зварні і безшовні гарячекатані, холоднокатані і холоднотягнуті труби. Безшовні труби, як більш надійні, використовують для транспортування пожежовибухонебезпечних і отруйних речовин.

Труби сталеві з вуглецевих і легованих сталей регламентуються відповідними нормативно-технічними документами.

Труби, що закріплюють у посудинах методом розвальцювання, треба випробувати на роздавання, в інших випадках – на згинання або сплюснення згідно з нормативними документами на труби.

Дозволено застосовувати безшовні труби без проведення гідравлічного випробування на підприємстві-виробнику труб у таких випадках:

– якщо всю поверхню труби піддають контролю фізичними методами (радіографічним, ультразвуковим або рівноцінним);

– для труб при робочому тиску не вище, ніж 5 МПа, якщо підприємство-виробник труб гарантує позитивні результати гідравлічних випробувань [4].

У необхідних випадках труби можуть виготовлятися з захисним покриттям, з кольорових металів, скла, кераміки, пластмас і т. ін.

## 2.2 Відводи

За способом виготовлення та конструкції відводи поділяють на безшовні крутовигнуті, гнуті, зварні та штампозварні [2, 4–6].

Відводи виготовляють з кутом згину  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $180^\circ$  (рис. 2.1).

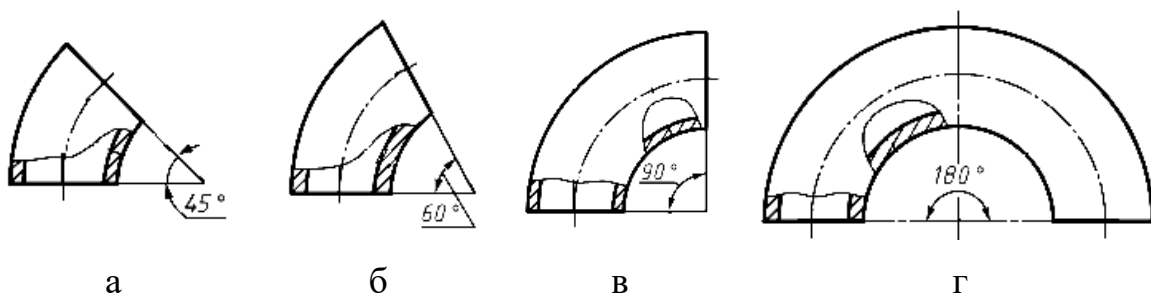


Рисунок 2.1 – Відводи з кутом згину  $45^\circ$  (а),  $60^\circ$  (б),  $90^\circ$  (в) та  $180^\circ$  (г)

Відводи, гнуті із труб під кутом  $180^\circ$ , дозволено виготовляти зварним із двох відводів під кутом  $90^\circ$ .

Змінювання кута згину дозволено за погодженням із замовником.

Крутовигнуті відводи дозволено виготовляти із труб та листового прокату. При виготовленні секторних відводів кут між поперечними перерізами секторів не повинен перевищувати  $30^\circ$ . Відстань між сусідніми зварними швами по внутрішній стороні відводу повинна забезпечувати доступність контролю цих швів по зовнішній поверхні.

Застосування секторних відводів у посудинах 1 та 2 груп не дозволено для  $DN \leq 800$ .

### 2.3 Переходи

За конструкцією переходи поділяють на концентричні і ексцентричні [7] (рис. 2.2).

Безшовні переходи виготовляють  $DN 40 \dots 400$  для умовного тиску до 10 МПа.

Зварні переходи виготовляють з листової сталі  $DN 100 \dots 1400$  для умовного тиску до 10 МПа.

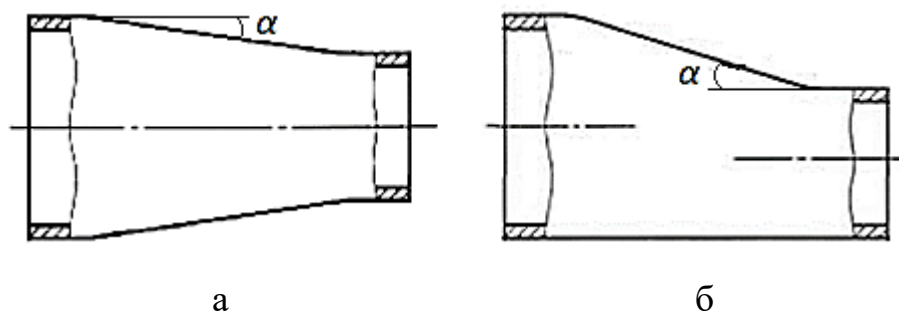


Рисунок 2.2 – Переходи: концентричний (а) і ексцентричний (б)

## 2.4 Трійники

Трійники можуть бути рівнопрохідними (без зміни діаметра відгалуження  $D$ ) або перехідними із зменшенням діаметра відгалуження  $D_1$  (рис. 2.3).

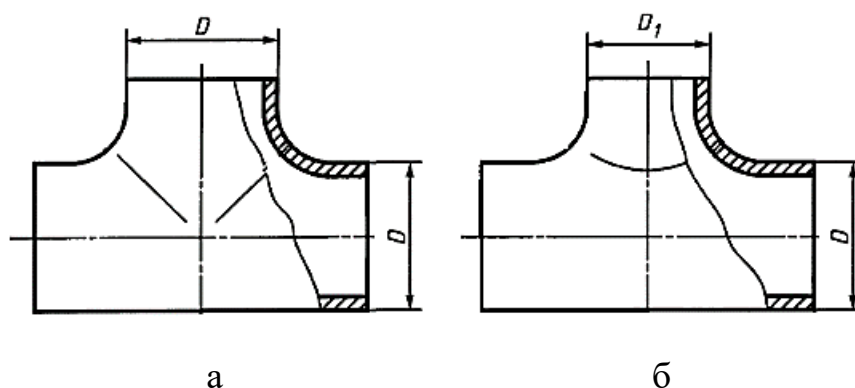


Рисунок 2.3 – Трійники: рівнопрохідний (а) і перехідний (б)

Розміри стандартних трійників наведені у ДСТУ ГОСТ 17376:2003 [8].

## 2.5 Заглушки

За конструкцією заглушки поділяють на еліптичні, плоскі, плоскі ребристі та фланцеві (рис. 2.4). Еліптичні заглушки  $DN$  15-500 (стандартні  $DN$  15–250 [9]) виготовляють з листової сталі холодною або гарячою витяжкою в штампах, плоскі  $DN$  40–1000 та плоскі ребристі днища  $DN$  300–1600 – вирізкою з листової сталі з наступним зварюванням на місці монтажу трубопроводу, фланцеві днища виготовляють розміром  $DN$  15–1200.

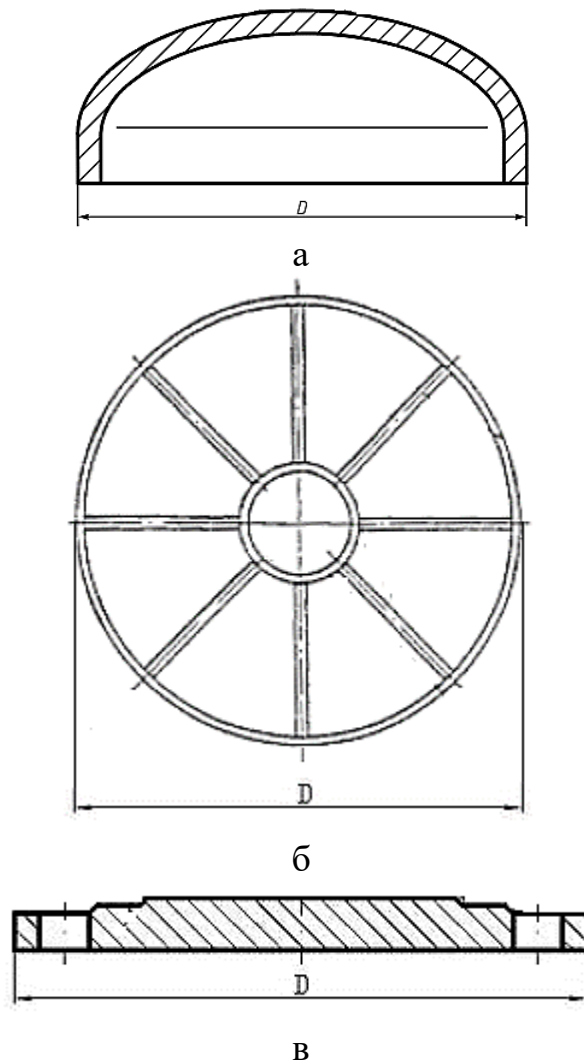


Рисунок 2.4 – Конструкції заглушок: еліптичні (а), плоскі ребристі (б), фланцеві (в)

Приварні безшовні деталі (відводи, трійники, переходи та заглушки), які розраховані на умовний тиск до 10 МПа виготовляють із сталі 20 для роботи при температурі від мінус 40 °С до плюс 450 °С і зі сталі 10Г2 і 09Г2С – при температурі від мінус 70 °С до плюс 450 °С. Деталі трубопроводів високого тиску (відводи, переходи, трійники) виготовляють безшовними з поковок, штампувань і труб з приєднувальними кінцями, обробленими під фланцеве різьбове чи зварне з'єднання [2].

## 2.6 З'єднання труб з деталями

Підготовка під зварювання стикових з'єднань труб і деталей неоднакової товщини при різниці, що не перевищує значень, наведених у таблиці 2.2, має проводитися так само, як деталей однакової товщини, при цьому конструктивні елементи підготовлених крайок і розміри зварного шва слід вибирати по більшій товщині [10].

Таблиця 2.2 Допустима різниця товщини деталей

Товщина тонкої деталі, мм	Різниця товщини деталей, мм
До 3	1
Понад 3 до 7	2
Понад 7 до 10	3
Понад 10	4

Для здійснення плавного переходу від однієї деталі до іншої допускається похиле розташування поверхні шва.

При різниці в товщині труб і деталей, що зварюються, понад зазначену у таблиці 2.2, на деталі, що має більш у товщину  $S_1$ , має бути зроблений скіс до товщини тонкої деталі  $S$ , як показано на рисунку 2.5. При цьому конструктивні елементи підготовлених крайок і розміри зварного шва слід вибирати по меншій товщині.

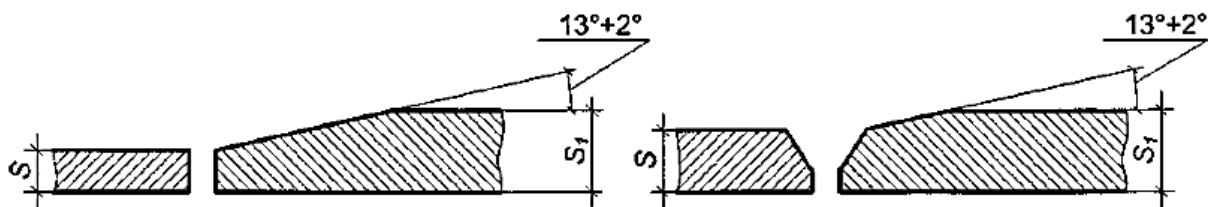


Рисунок 2.5 – Стикування труб різної товщини

## Питання для самоконтролю до розділу 2

- 1 Обґрунтувати вибір матеріалів для технологічних трубопроводів.
- 2 Які труби застосовуються в технологічних трубопроводах?
- 3 В яких випадках слід застосовувати безшовні труби?
- 4 Обґрунтувати застосування відводів в технологічних трубопроводах.
- 5 Навести класифікацію відводів.
- 6 Навести конструкції переходів.
- 7 Навести різновиди трійників.
- 8 Навести конструкції заглушок.
- 9 Обґрунтувати особливості з'єднань труб з деталями.

## 3 РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ І ДОПУСТИМИ НАПРУЖЕННЯ

### 3.1 Розрахункова температура

*Розрахункову температуру  $t_R$*  використовують для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу й допустимих напружень.

Розрахункову температуру стінки трубопроводу  $t_R$  належить приймати такою, що дорівнює робочій температурі речовини, яка транспортується. При від'ємній робочій температурі за розрахункову температуру належить приймати 20 °С і при виборі матеріалу враховувати допустиму для нього мінімальну температуру. Робоча температура речовини повинна відповідати проєктній документації.

### 3.2 Робочий і розрахунковий тиски

Під *робочим тиском*  $p_{роб}$  для посудини та апарата належить розуміти максимальний внутрішній надлишковий або зовнішній тиск, що виникає за нормального проходження робочого процесу без урахування гідростатичного тиску середовища та допустимого короткочасного підвищення тиску під час дії запобіжного клапана або інших запобіжних пристроїв.

Під *розрахунковим тиском*  $p_R$  у робочих умовах слід розуміти тиск, на який виконують розрахунок елементів трубопроводу на міцність.

Для технологічних трубопроводів розрахунковий тиск  $p_R$  належить приймати таким, що дорівнює робочому тиску відповідно до проєктної документації.

### 3.3 Номінальний тиск

Номінальний тиск  $PN$  застосовується для трубопроводів та елементів трубопроводів. Номінальний тиск позначають літерами « $PN$ » із наступним довідковим числом.

Номінальний тиск – це числова позначка, яка є зручним зведеним числом для довідкових цілей. Під номінальним тиском розуміється найбільший надлишковий тиск при температурі робочого середовища 20 °С, при якому забезпечується заданий термін роботи з'єднань трубопроводів і арматури, що мають відповідні розміри, обґрунтовані розрахунком на міцність при обраних матеріалах і їх характеристиках міцності за температури 20 °С [11, 12].

Значення та позначення номінальних тисків подано у таблиці 3.1.



Таблиця 3.1 Значення та позначення номінальних тисків

Позначення номінального тиску	Значення номінального тиску, МПа (кГ/см <sup>2</sup> )	Позначення номінального тиску	Значення номінального тиску, МПа (кГ/см <sup>2</sup> )
PN 0,1	0,01 (0,1)	PN 40	4,0 (40,0)
PN 0,16	0,016 (0,16)	PN 63	6,3 (63,0)
PN 0,25	0,025 (0,25)	PN 80	8,0 (80,0)
PN 0,4	0,040 (0,40)	PN 100	10,0 (100,0)
PN 0,63	0,063 (0,63)	PN 125	12,5 (125,0)
PN 1	0,1 (1,0)	PN 160	16,0 (160,0)
PN 1,6	0,16 (1,6)	PN 200	20,0 (200,0)
PN 2,5	0,25 (2,5)	PN 250	25,0 (250,0)
PN 4	0,4 (4,0)	PN 320	32,0 (320,0)
PN 6,3 (PN 6)	0,63 (6,3)	PN 400	40,0 (400,0)
PN 10	1,0 (10,0)	PN 500	50,0 (500,0)
PN 16	1,6 (16,0)	PN 630	63,0 (630,0)
PN 25	2,5 (25,0)	PN 800	80,0 (800,0)
		PN 1000	100,0 (1000,0)

### 3.4 Номінальний діаметр

В трубопровідних системах застосовується параметр *DN* (номінальний діаметр), як характеристика частин арматури, що приєднуються.

*DN* не має одиниці вимірювання і приблизно дорівнює внутрішньому діаметру трубопроводу, що приєднується, вираженому в міліметрах.

За ДСТУ ГОСТ 28338:2008 [13] значення *DN* слід вибирати з ряду: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 16\*, 20, 25, 32, 40, 50, 63\*, 65, 80, 100, 125, 150, 160\*, 175\*\*, 200, 250, 300, 350, 400, 450\*\*, 500, 600, 700, 800, 900\*\*, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600\*\*, 2800, 3000, 3200\*\*, 3400, 3600\*\*, 3800\*\*, 4000.

Примітки до значень  $DN$ :

1 \*Допускається застосовувати тільки для гідравлічних і пневматичних пристроїв.

2 \*\*Для арматури загального призначення застосовувати не допускається.

### 3.5 Допустиме напруження

Допустиме напруження  $[\sigma]$  при розрахунку елементів і з'єднань трубопроводів на статичну міцність належить приймати за формулою [14]:

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_{0,2}}{n_T}; \frac{R_\epsilon}{n_\epsilon}; \frac{R_D}{n_D}\right),$$

де  $R_{0,2}$  – мінімальне значення умовної границі плинності за розрахункової температури (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;  $R_\epsilon$  – мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за розрахункової температури, МПа;  $R_D$  – мінімальне значення границі тривалої міцності за розрахункової температури, МПа;  $n_T$  – коефіцієнт запасу міцності за границею плинності;  $n_\epsilon$  – коефіцієнт запасу міцності за границею міцності;  $n_D$  – коефіцієнт запасу міцності за границею тривалої міцності.

Коефіцієнти  $n_T$ ,  $n_\epsilon$ ,  $n_D$  належить визначати за формулами:

$$n_T = n_D = 1,3\gamma;$$

$$n_\epsilon = 2,1\gamma,$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт надійності трубопроводу.

Допустиме напруження  $[\sigma]$  можна визначити за формулою [14]:

$$[\sigma] = [\sigma]_{20} A_t,$$

де  $[\sigma]_{20}$  – допустиме напруження при температурі 20 °С, МПа;  $A_t$  – температурний коефіцієнт, який визначається за таблицею 3.2.

Таблиця 3.2 Температурний коефіцієнт

Марка сталі	$t_R, ^\circ\text{C}$	$A_t$
Ст.3, 10, 20, 25, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С	До 200	1,00
	250	0,90
	300	0,75
	350	0,66
	400	0,52
	420	0,45
	430	0,38
	440	0,33
	450	0,28
15Х5М	До 200	1,00
	325	0,90
	390	0,75
	430	0,66
	450	0,52
08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х17Н15М3Т	До 200	1,00
	300	0,90
	400	0,75
	450	0,69
12Х1МФ, 15Х1МФ	До 200	1,00
	320	0,90
	450	0,75
20Х3МВФ	До 200	1,00
	350	0,90
	450	0,72

Примітки до табл. 3.2. 1 Для проміжних значень температур значення величини  $A_t$  слід визначати лінійною інтерполяцією.

2 Для вуглецевої сталі при температурах від 400 до 450 °С прийняті середні значення на ресурс  $2 \cdot 10^5$  годин.

Коефіцієнт надійності трубопроводу  $\gamma$  визначається за таблицею 3.3.

Таблиця 3.3 Коефіцієнти надійності трубопроводів  $\gamma$

Речовина	Коефіцієнти надійності $\gamma$ для трубопроводів категорій		
	I, II	III, IV	V
Гази всіх груп, скраплені гази, речовини групи А	1,25	1,15	1,10
Речовини груп Б і В, крім газів	1,15	1,05	1,00

### 3.6 Коефіцієнт міцності

Коефіцієнт міцності  $\varphi$  належить враховувати при розрахунках елементів, які мають отвори або зварні шви.

$$\varphi = \min\{\varphi_d; \varphi_w\},$$

де  $\varphi_d$  – коефіцієнт міцності елемента з отвором;  $\varphi_w$  – коефіцієнт міцності зварного шва.

При розрахунку безшовних елементів без отворів належить приймати  $\varphi = 1,0$ .

Коефіцієнт міцності зварного шва  $\varphi_w = 1$  при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і  $\varphi_w = 0,8$  у інших випадках.

### Питання для самоконтролю до розділу 3

- 1 Для чого використовується і як визначається розрахункова температура?
- 2 Навести відмінності робочого тиску від розрахункового тиску.
- 3 Для чого застосовується і як визначається номінальний тиск?
- 4 Обґрунтувати позначення номінального тиску.
- 5 В яких випадках застосовується і як позначається номінальний діаметр?
- 6 Як розраховується допустиме напруження?
- 7 Як розраховується коефіцієнт міцності?

### **4 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДІВ, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД НОМІНАЛЬНИМ ТИСКОМ ДО 10 МПА**

Методика розрахунку дійсна для технологічних сталевих трубопроводів, які слугують для транспортування рідких і газоподібних речовин номінальним тиском до 10 МПа і температурою від мінус 70 °С до плюс 450 °С.

Перевірку на витривалість слід проводити тільки при спільному виконанні двох умов: при розрахунку на самокомпенсацію і при заданому числі повних циклів зміни тиску в трубопроводі [14].

#### **4.1 Виконавча товщина стінки елемента**

Виконавчу товщину стінки елемента слід визначати з умови:

$$S \geq S_R + C,$$

де  $S_R$  – розрахункова товщина, м;  $C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м.

Сума додатків до розрахункової товщини стінки:

$$C = C_1 + C_2,$$

де  $C_1$  – додаток для компенсації корозії і (або) ерозії, м;  $C_2$  – додаток для компенсації мінусового допуску, м.

Додаток для компенсації корозії і ерозії:

$$C_1 = v_{кор} \tau + C_e,$$

де  $v_{кор}$  – швидкість корозії (проникність), м/рік;  $\tau$  – строк служби елемента у роках;  $C_e$  – додаток для компенсації ерозії, м.

Звичайно, при  $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$  м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають  $10^{-3}$  м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині  $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка  $C_1$  для компенсації корозії приймається  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

Додаток  $C_e$  належить враховувати у таких випадках:

- 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с);
- 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок;
- 3) при ударній дії середовища на деталь [15].

Додаток  $C_2$  дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.

## 4.2 Розрахунок товщини стінки труби

Розрахункова товщина стінки:

$$S_R = \frac{p_R D_3}{2[\sigma] \varphi + p_R},$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр, м.

Допустимий внутрішній тиск:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(S - C)}{D_3 - (S - C)}$$

### 4.3 Розрахунок товщини стінок гнутих відводів

Для гнутих відводів з  $\frac{R}{(D_3 - S)} \geq 1,7$ , які не підлягають перевірці на витривалість, розрахункову товщину стінок належить визначати за розділом 4.2.

В наведеній формулі  $R$  – радіус кривизни осьової лінії відводу, м (рис. 4.1).

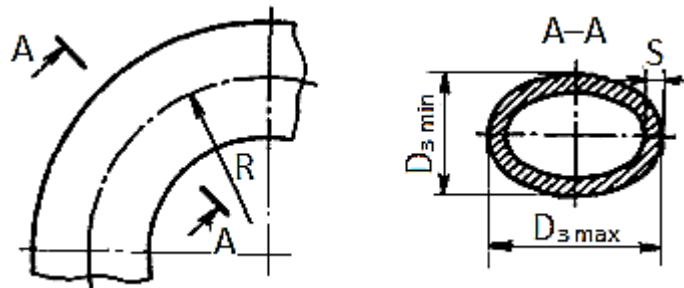


Рисунок 4.1 – Гнутий відвід

В трубопроводах, які підлягають перевірці на витривалість, розрахункову товщину стінок відводів  $S_{RI}$  належить визначати за формулою:

$$S_{RI} = k_I S_R,$$

де  $k_I$  – коефіцієнт, який залежить від розмірів і відносної овальності відводу і визначається за таблицею [14].

При визначенні виконавчої товщини стінки  $S$  додаток  $C_2$  не повинен враховувати стоншення на зовнішньому боці гнутого відводу.

#### 4.4 Розрахунок безшовних відводів з постійною товщиною стінки

Розрахункову товщину стінок відводів  $S_{R2}$  належить визначати за формулою:

$$S_{R2} = k_2 S_R,$$

де  $k_2$  – коефіцієнт, який визначається за таблицею 4.1.

Таблиця 4.1 Значення коефіцієнта  $k_2$

$\frac{R}{(D_3 - S_R)}$	Більше 2,0	1,5	1,0
$k_2$	1,00	1,15	1,30

*Примітка.* Для проміжних значень  $\frac{R}{(D_3 - S_R)}$  значення  $k_2$  визначається лінійною інтерполяцією.

#### 4.5 Розрахунок товщини стінок секторних відводів

Розрахункову товщину стінок секторних відводів  $S_{R3}$  (рис. 4.2) належить визначати за формулою:

$$S_{R3} = k_3 S_R,$$

де  $k_3$  – коефіцієнт для відводів, які складаються з півсекторів і секторів, визначається за формулою:

при кутах скосу  $\theta \leq 15^\circ$ :

$$k_3 = \frac{4R - D_3 + S_R}{4R - 2D_3 + 2S_R};$$

при кутах скосу  $\theta > 15^\circ$ :

$$k_3 = 1 + 1,25 \operatorname{tg} \theta \sqrt{\frac{D_3 - S_R}{2S_R}}.$$



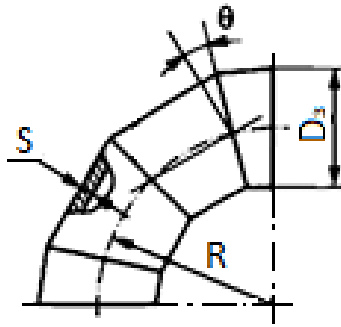


Рисунок 4.2 – Секторний відвід

Секторні відводи з кутом скосу  $\theta > 15^\circ$  належить застосовувати у трубопроводах, які працюють у статичному режимі і не потребують перевірки на витривалість.

#### 4.6 Розрахунок товщини стінок штампозварних відводів

Якщо зварні шви розташовані у площині вигину (рис. 4.3а):

$$S_{R4} = k_3 S_R / \varphi_w.$$

Якщо зварні шви розташовані у нейтральній площині (рис. 4.3б):

$$S_{R5} = \max \left\{ \frac{S_R}{\varphi_w}; k_3 S_R \right\}.$$

Якщо зварні шви розташовані під кутом  $\beta$  до нейтралі (рис. 4.3б):

$$S_{R5} = \max \left\{ k_3 S_R; \frac{1 + \frac{D_3 - S_R}{4R} \sin \beta}{1 + \frac{D_3 - S_R}{2R} \sin \beta} \cdot \frac{S_R}{\varphi_w} \right\}.$$

Кут  $\beta$  визначають для кожного зварного шва, відраховуючи його від нейтралі за рис. 4.3б.

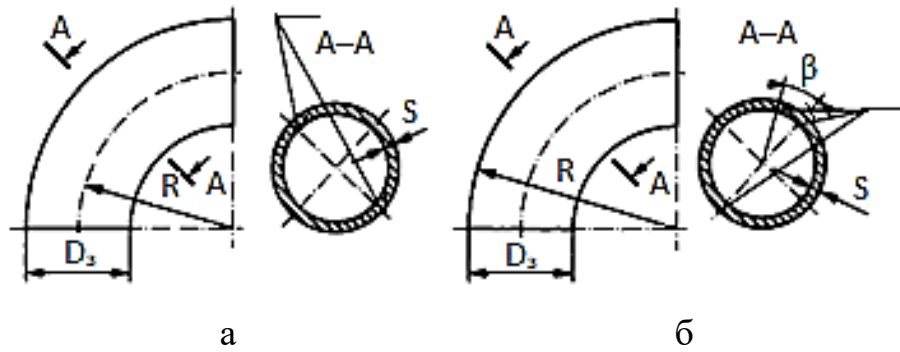


Рисунок 4.3 – Штамповарні відводи: а – розташування зварних швів у площині вигину; б – розташування зварних швів у нейтральній площині

#### 4.7 Допустимий внутрішній тиск у відводах

Допустимий внутрішній тиск у відводах належить визначати за формулою:

$$[p] = \frac{2[\sigma](S - C)}{k_i[D_3 - (S - C)]}$$

де  $k_i$  – коефіцієнт збільшення напружень у відводах ( $i = 1, 2$  або  $3$  залежно від типу відводу – див. розділи 4.3–4.6).

#### 4.8 Розрахунок товщини стінок переходів

Розрахункову товщину стінки конічного переходу  $S_{R6}$  (рис. 4.4) належить визначати за формулою:

$$S_{R6} = \frac{p_R D_3}{2[\sigma] \varphi_w \cos \alpha + p_R}$$

де  $\alpha$  – кут нахилу стінки переходу, град.

Формула застосовна, якщо  $\alpha \leq 15^\circ$  і  $0,003 \leq \frac{S_{R6}}{D_3 - 2S} \leq 0,25$  або якщо

$$15^\circ < \alpha \leq 45^\circ \text{ і } 0,003 \leq \frac{S_{R6}}{D_3 - 2S} \leq 0,15 \text{ і } \frac{d_3 - 2S}{D_3 - 2S} \leq 1 - \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{\cos \alpha}} \sqrt{\left(1 + \frac{S_{R6}}{D_3 - 2S}\right) \frac{S_{R6}}{D_3 - 2S}},$$

де  $S$  – товщина стінки труби діаметром  $D_3$ .

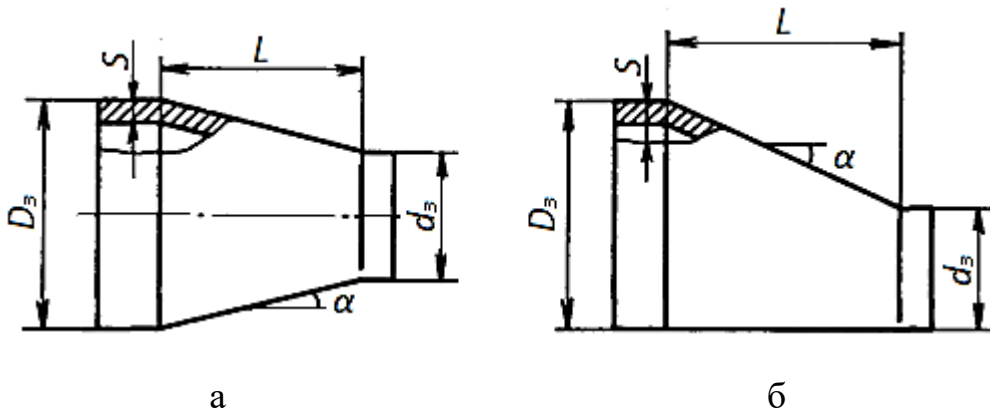


Рисунок 4.4 – Переходи: конічний (а) і ексцентричний (б)

Кут нахилу твірної  $\alpha$  визначають за формулами:

для конічного переходу

$$\alpha = \arctg \frac{D_3 - d_3}{2L},$$

для ексцентричного переходу

$$\alpha = \arctg \frac{D_3 - d_3}{L}.$$

Розрахункова товщина стінки переходів, штампованих з труб, визначається як для труб великого діаметра.

Допустимий внутрішній тиск переходу:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_w(S - C)\cos\alpha}{D_3 - (S - C)}.$$

#### 4.9 Розрахунок товщини стінок трійникових з'єднань

Розрахункову товщину стінки магістралі  $S_{R7}$  (рис. 4.5) належить визначати за формулою:

$$S_{R7} = \frac{p_R D_3}{2[\sigma]\varphi_d + p_R}.$$

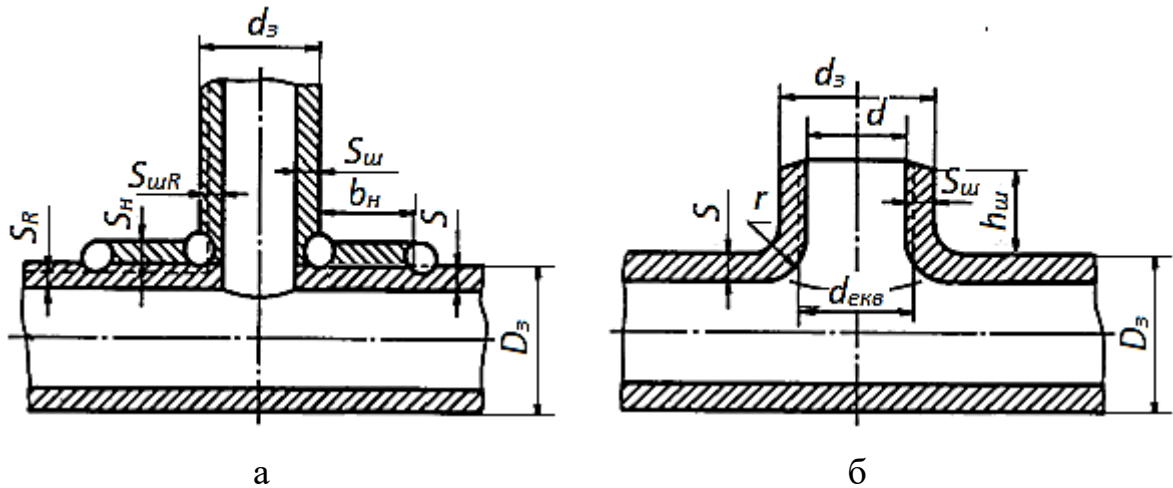


Рисунок 4.5 – Трійники: зварний (а) і штампований (б)

Розрахункову товщину стінки штуцера належить визначити за розділом 4.2.

Розрахунковий коефіцієнт міцності магістралі:

$$\varphi_d = \frac{2}{1,75 + \frac{d}{\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}}} \left[ 1 + \frac{\sum A}{2(S - C)\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}} \right],$$

де  $S \geq S_{R7} + C$ ;  $\sum A$  – сума зміцнювальних площ, м<sup>2</sup>.

При визначенні суми зміцнювальних площ  $\sum A$  площу наплавленого металу зварних швів допускається не враховувати.

Якщо виконавча товщина стінки штуцера  $S_{ш}$  або приєднувальної труби дорівнює  $S_{шR} + C$  і відсутні накладки ( $S_{шR}$  – розрахункова товщина стінки штуцера при  $\varphi_w = 0$ ), тоді належить приймати  $\sum A = 0$ . В цьому випадку діаметр отвору повинен бути не більше розрахованого за формулою:

$$d_o = \left( \frac{2}{\varphi_o} - 1,75 \right) \sqrt{(D_3 - S)(S - C)},$$

де  $\varphi_o$  – коефіцієнт недовантаження магістралі.

$$\varphi_o = \frac{p_R [D_3 - (S - C)]}{2[\sigma](S - C)}.$$

Зміцнювальну площу штуцера (див. рис. 4.5а) належить визначати за формулою:

$$A_{ш} = 2(S_{ш} - S_{шR} - C)\sqrt{(d_3 - S_{ш})(S_{ш} - C)},$$

де  $d_3$  – зовнішній діаметр штуцера, м.

Для штуцерів, пропущених всередину магістралі на глибину  $h_{ш1}$  (рис. 4.6б), зміцнювальну площу слід обчислювати за формулою:

$$A_{ш2} = A_{ш} + A_{ш1}.$$

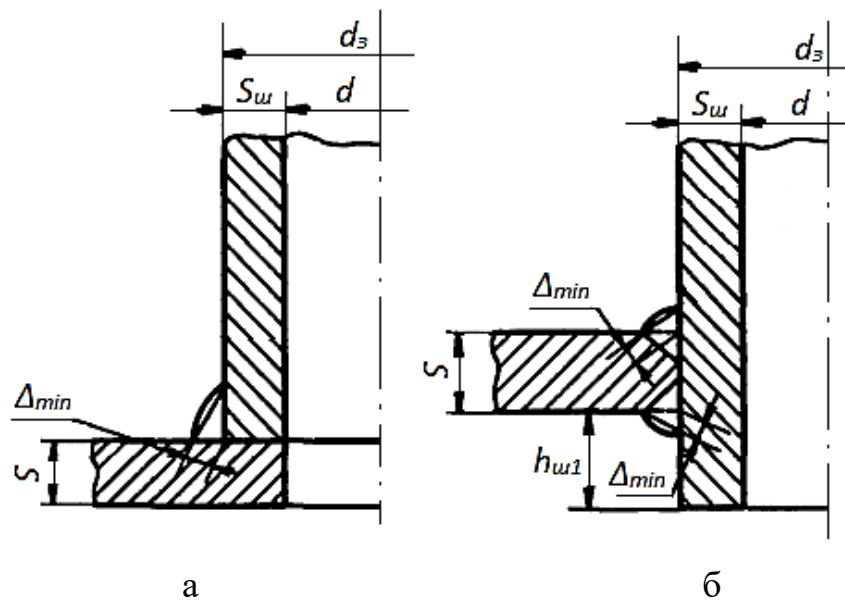


Рисунок 4.6 – Зварні з’єднання трійників зі штуцером, що примикає до зовнішньої поверхні магістралі (а) і зі штуцером, який пропущений всередину магістралі (б)

$$A_{ш1} = \min \left\{ 2h_{ш1}(S_{ш} - C); 2(S_{ш} - C)\sqrt{(d_3 - S_{ш})(S_{ш} - C)} \right\},$$

де  $h_{ш1}$  – розрахункова висота внутрішньої частини штуцера, м.

Зміцнювальна площа накладки:

$$A_{н} = 2b_{нR}S_{н},$$

де  $b_{HR}$  – розрахункова ширина накладки, м;  $S_H$  – виконавча товщина накладки, м.

Розрахункова ширина накладки обчислюється за формулою:

$$b_{HR} = \min \left\{ b_H; \sqrt{(D_3 - C)(S - C)} \right\},$$

де  $b_H$  – фактична ширина накладки, м.

Якщо допустиме напруження для зміцнювальних деталей  $[\sigma]_M$  менше допустимого напруження матеріалу труби  $[\sigma]$ , тоді при розрахунку укріплення отворів розрахункові значення зміцнювальних площ помножуються на  $[\sigma]_M/[\sigma]$ .

Умова укріплення отвору:

$$\Sigma A \geq (d - d_o)S_R.$$

Мінімальний розрахунковий розмір зварного шва визначається за формулою:

$$\Delta_{min} = 2,1 \frac{S_{ш} \sqrt{(d_3 - S_{ш})(S_{ш} - C)}}{d},$$

але не менше товщини штуцера  $S_{ш}$ .

Допустимий внутрішній в магістралі:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_d(S - C)}{D_3 - (S - C)}.$$

#### **4.10 Розрахунок товщини стінок трийників з відбортованими отворами і врізаними сідловинами**

Розрахункова товщина стінок трийників з відбортованими отворами і врізаними сідловинами (рис. 4.5б) визначається за розділом 4.9, але при обчисленні розрахункового коефіцієнта міцності магістралі  $\varphi_d$  замість  $d$  належить приймати величину  $d_{екв}$ .

Еквівалентний діаметр отвору при наявності радіусного переходу:

$$d_{екв} = d + 0,5 r,$$

де  $r$  – радіус закруглення, м.

Зміцнювальну площу відбортованої ділянки розраховують за формулою для  $A_{ш}$  (розділ 4.9), якщо фактична висота штуцера  $h_{ш} > \sqrt{(d_з - S_{ш})(S_{ш} - C)}$ .

При менших значеннях  $h_{ш}$  площу зміцнювального перерізу належить визначати за формулою:

$$A_{ш} = 2h_{ш}(S_{ш} - S_{шR} - C).$$

Розрахункова товщина стінки магістралі з врізаною сідловиною повинна бути не менше значення, яке розраховується за формулою розділу 4.2 при  $\varphi = \varphi_w$ .

Допустимий внутрішній в магістралі розраховується за формулою розділу 4.9.

#### **4.11 Розрахунок товщини стінок плоских круглих заглушок**

Розрахункову товщину стінки плоскої круглої заглушки  $S_{R8}$  (рис. 4.7а, 4.7б) належить визначати за формулою:

$$S_{R8} = \gamma_1 (D - r) \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]}}$$

де розрахунковий коефіцієнт для плоскої заглушки  $\gamma_1 = 0,53$  при  $r = 0$  по рис. 4.7а;  $\gamma_1 = 0,45$  по рис. 4.7б.

Розрахункова товщина плоскої круглої заглушки між двома фланцями (рис. 4.7в):

$$S_{R9} = 0,41(D + b) \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]}}$$

де  $b$  – ширина прокладки, м.

Ширина ущільнювальної прокладки  $b$  визначається за стандартами, технічними умовами або кресленнями.

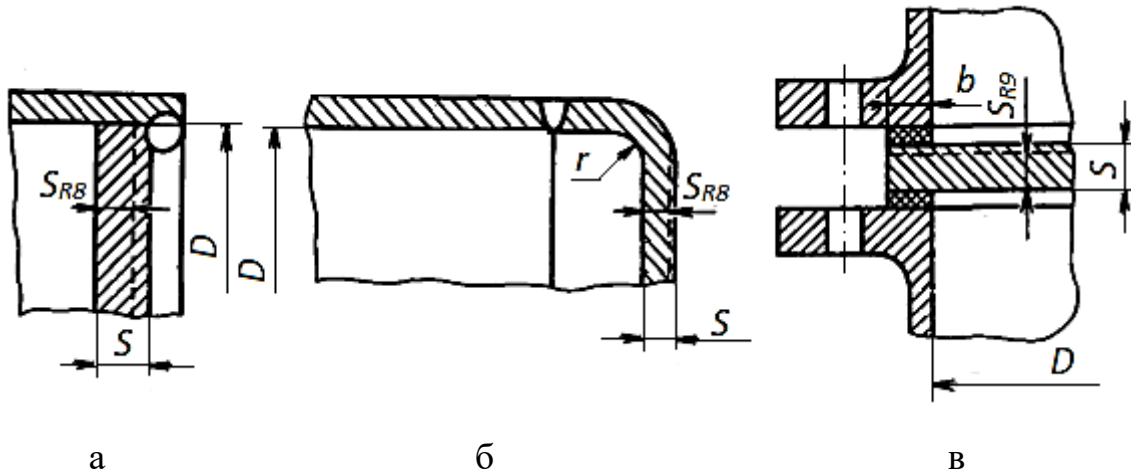


Рисунок 4.7 – Круглі плоскі заглушки: а) пропущена всередину труби; б) приварена до торця труби; в) фланцева

Допустимий внутрішній тиск для плоскої заглушки (рис. 4.7а, 4.7б):

$$[p] = \frac{[\sigma](S - C)^2}{\gamma_1^2(D - r)^2}$$

Допустимий внутрішній тиск для плоскої заглушки між двома фланцями (рис. 4.7в):

$$[p] = \frac{[\sigma](S - C)^2}{0,17(D + b)^2}$$

#### 4.12 Розрахунок товщини стінки еліптичної заглушки

Розрахункову товщину стінки безшовної еліптичної заглушки (рис. 4.8) при  $0,2 \leq h/D_3 \leq 0,5$  належить розраховувати за формулою:

$$S_{R10} = \frac{p_R D_3^2}{8h[\sigma]}$$

де  $h$  – висота випуклої частини заглушки, м.



Якщо  $S_{R10}$  виходить менше розрахункової товщини стінки труби  $S_R$ , тоді належить приймати  $S_{R10} = S_R$ .

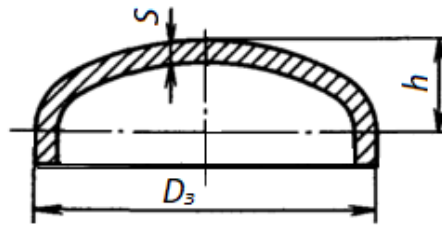


Рисунок 4.8 – Еліптична заглушка

#### 4.13 Розрахунок товщини стінки еліптичної заглушки з отвором

Розрахункову товщину стінки еліптичної заглушки з центральним отвором (рис. 4.9) при  $d/D_3 \leq 0,6$  належить розраховувати за формулою:

$$S_{R11} = \frac{p_R D_3^2}{8h[\sigma]\varphi_d}$$

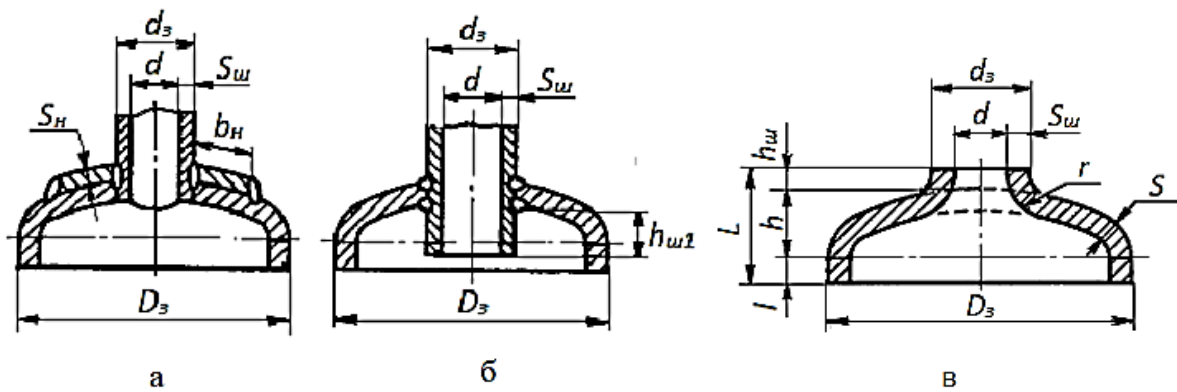


Рисунок 4.9 – Еліптичні заглушки зі штуцером: з накладкою (а); зі штуцером, пропущеним усередину (б); з відбортованим отвором (в)

Коефіцієнти міцності заглушок з отворами (рис. 4.9а, 4.9б) слід приймати відповідно до розділу 4.9, приймаючи  $S_R = S_{R10}$  і  $S > S_{R11} + C$ , а розміри штуцера – за трубою меншого діаметра.

Коефіцієнти міцності заглушок з відбортованими отворами (рис. 4.9в) необхідно розраховувати за розділом 4.10. Значення  $h_{\text{ш}}$  належить приймати  $L - l - h$ , де  $L$  – розрахункова висота еліптичної заглушки, м;  $l$  – довжина відбортованої частини еліптичної заглушки, м.

Мінімальний розрахунковий розмір зварного шва по периметру отвору в заглущі належить визначати залежно до розділу 4.9.

Допустимий внутрішній тиск для еліптичної заглушки:

$$[p] = \frac{8[\sigma]\varphi_d(S - C)h}{D_3^2}.$$

### **Питання для самоконтролю до розділів 4.1–4.13**

- 1 Обґрунтувати визначення виконавчої товщини стінки елемента.
- 2 Навести додатки до розрахункової товщини стінки елемента.
- 3 Як визначається додаток для компенсації корозії і ерозії?
- 4 Навести формули для розрахунку товщини стінки прямолінійної труби.
- 5 Обґрунтувати особливості розрахунку гнутих, секторних і штампозварних відводів.
- 6 Навести алгоритм розрахунку товщини стінок переходів.
- 7 Навіщо розраховуються зміцнювальні площі штуцерів і накладок?
- 8 Обґрунтувати особливості розрахунку товщин стінок трійників з відбортованими отворами і врізаними сідловинами.
- 9 Навести відмінності розрахунку товщини стінки плоскої круглої заглушки від розрахунку товщини стінки еліптичної заглушки.
- 10 Обґрунтувати особливості розрахунку товщини стінки еліптичної заглушки з центральним отвором.

#### 4.14 Алгоритми і приклади розрахунків елементів трубопроводів

##### 4.14.1 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки прямолінійної труби

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки безшовної сталеві труби без отворів, яка призначена для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Труба знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 3$  МПа.

Марка сталі – 16ГС.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Зовнішній діаметр труби  $D_3 = 0,245$  м.

Допустиме напруження сталеві труби при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 177$  МПа.

Швидкість корозії сталеві труби  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби труби  $\tau = 10$  років.

Таблиця 4.2 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки прямолінійної труби

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу труби за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 177$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$	Для зварних труб $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках. Для безшовних труб $\varphi_w = 1$ .	$\varphi_w = 1$
3	Коефіцієнт міцності елемента з отвором $\varphi_d$	$\varphi_d = \frac{2}{1,75 + \frac{d}{\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}}} \left[ 1 + \frac{\sum A}{2(S - C)\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}} \right]$ <p>Через те, що труба не має отворів <math>\varphi_d = 1</math></p>	
4	Коефіцієнт міцності $\varphi$	$\varphi = \min\{\varphi_d; \varphi_w\}$	$\varphi = \min\{1; 1\} = 1$
5	Розрахункова товщина стінки $S_R$ , м	$S_R = \frac{p_R D_3}{2[\sigma]\varphi + p_R}$	$S_R = \frac{p_R D_3}{2[\sigma]\varphi + p_R} = \frac{3 \cdot 0,245}{2 \cdot 177 \cdot 1 + 3} = 0,002$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
7	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3} \text{ м}$ . Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .	$C_1 =$ $= 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
8	Товщина труби у першому наближенні $S^I$ , м	$S^I = S_R + C_1$	$S^I =$ $= 0,002 + 0,0007 =$ $0,0027 \text{ м}$ Приймаємо $S^I =$ $= 0,003 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.	За ДСТУ 8938:2019 для безшовних сталевих труб з $D_3 > 0,219$ м і $S^l \leq 0,015$ м $C_2 = 0,15$ $S^l = 0,15 \cdot 0,003 = 0,00045$ м
10	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,00045 = 0,00115$ м
11	Виконавча товщина стінки $S$	$S \geq S_R + C$	$S \geq 0,002 + 0,00115 = 0,00315$ м Приймаємо $S = 0,004$ м
12	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(S - C)}{D_3 - (S - C)}$	$[p] = \frac{2 \cdot 177 \cdot 1(0,004 - 0,00115)}{0,245 - (0,004 - 0,00115)} = 4,16$ МПа
13	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$3$ МПа $<$ $4,16$ МПа Умова міцності виконується

#### 4.14.2 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки відводів

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки штампованого відводу, який призначений для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Відвід знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 3$  МПа.

Марка сталі – 16ГС.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Зовнішній діаметр відводу  $D_3 = 0,245$  м.

Радіус кривизни осьової лінії відводу  $R = 0,4$  м.

Зварні шви розташовані під кутом  $\beta = 30^\circ$  до нейтралі.

Допустиме напруження сталевого відводу при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 177$  МПа.

Забезпечений 100% контроль зварних швів неруйнівними методами.

Швидкість корозії сталевого відводу  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби відводу  $\tau = 10$  років.

Таблиця 4.3 Алгоритм розрахунку відводів і приклад розрахунку товщини стінки штампозварного відводу

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу відводу за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 177$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$ визначається при наявності зварювання	Для зварних відводів $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках. Для безшовних труб $\varphi_w = 1$ .	Забезпечений 100% контроль зварних швів неруйнівними методами: $\varphi_w = 1$
3	Розрахункова товщина стінки прямолінійної труби $S_R$ , м	$S_R = \frac{p_R D_3}{2[\sigma]\varphi + p_R}$	$S_R = \frac{3 \cdot 0,245}{2 \cdot 177 \cdot 1 + 3} = 0,002 \text{ м}$
4	Коефіцієнт $k_i$	Для гнутих відводів $k_1$ визначається за таблицею посібника [14]. Для відводів з постійною товщиною стінки $k_2$ визначається за таблицею 4.1.	



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		<p>Для секторних відводів при кутах скосу <math>\theta \leq 15^\circ</math>:</p> $k_3 = \frac{4R - D_3 + S_R}{4R - 2D_3 + 2S_R};$ <p>при кутах скосу <math>\theta &gt; 15^\circ</math>: <math>k_3 = 1 + 1,25 \operatorname{tg} \theta \sqrt{\frac{D_3 - S_R}{2S_R}}</math>.</p> <p>Для штампозварних відводів: <math>k_3 = 1 + 1,25 \sqrt{\frac{D_3 - S_R}{2S_R}}</math>.</p>	$k_3 = 1 + 1,25 \sqrt{\frac{0,245 - 0,002}{2 \cdot 0,002}} =$ $= 10,74$
49	5 Розрахункова товщина стінки відводу $S_{Ri}$ , м	<p>Для гнутих відводів трубопроводів, які підлягають перевірці на витривалість <math>S_{R1} = k_1 S_R</math>.</p> <p>Для відводів з постійною товщиною стінки <math>S_{R2} = k_2 S_R</math>.</p> <p>Для секторних відводів <math>S_{R3} = k_3 S_R</math>.</p> <p>Для штампозварних відводів, якщо зварні шви розташовані у площині вигину: <math>S_{R4} = k_3 S_R / \varphi_w</math>;</p> <p>якщо зварні шви розташовані у нейтральній площині: <math>S_{R5} = \max \left\{ \frac{S_R}{\varphi_w}; k_3 S_R \right\}</math>;</p> <p>якщо зварні шви розташовані під кутом <math>\beta</math> до нейтралі:</p> $S_{R5} = \max \left\{ k_3 S_R; \frac{1 + \frac{D_3 - S_R}{4R} \sin \beta}{1 + \frac{D_3 - S_R}{2R} \sin \beta} \cdot \frac{S_R}{\varphi_w} \right\}.$	$S_{R5} = \max \left\{ \begin{array}{l} 10,74 \cdot 0,002; \\ 1 + \frac{0,245 - 0,002}{4 \cdot 0,4} \sin 30^\circ \cdot \frac{0,002}{1} \\ 1 + \frac{0,245 - 0,002}{2 \cdot 0,4} \sin 30^\circ \cdot \frac{0,002}{1} \end{array} \right\} = \max \{0,022; 0,0019\} = 0,022 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
7	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3}$ м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3}$ м.	$C_1 = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4}$ м
8	Товщина труби у першому наближенні $S^I$ , м	$S^I = S_{Ri} + C_1$	$S^I = 0,022 + 0,0007 = 0,0227$ м Приймаємо $S^I = 0,024$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.	За ДСТУ 8938:2019 для безшовних сталевих труб з $D_3 > 0,219$ м і $0,015$ м $< S^l < 0,030$ м $C_2 = 0,125 S^l = 0,125 \cdot 0,024 = 0,003$ м
10	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,003 = 0,0037$ м
11	Виконавча товщина стінки $S$	$S \geq S_{Ri} + C$	$S \geq 0,022 + 0,0037 = 0,0257$ м Приймаємо $S = 0,026$ м
12	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{2[\sigma](S - C)}{k_i[D_3 - (S - C)]}$	$[p] = \frac{2 \cdot 177(0,026 - 0,0037)}{10,74[0,245 - (0,026 - 0,0037)]} = 3,3$ МПа
13	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$3$ МПа $< 3,3$ МПа Умова міцності виконується

#### 4.14.3 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки переходів

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки конічного переходу, який призначений для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Відвід знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 3$  МПа.

Марка сталі – 16ГС.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Зовнішні діаметри переходу  $D_3 = 0,245$  м,  $d_3 = 0,203$  м.

Довжина переходу  $L = 0,2$  м.

Допустиме напруження сталевого конічного переходу при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 177$  МПа.

Забезпечений 100% контроль зварних швів неруйнівними методами.

Швидкість корозії конічного переходу  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби переходу  $\tau = 10$  років.

Таблиця 4.4 Алгоритм розрахунку переходів і приклад розрахунку товщини стінки конічного переходу

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу переходу за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 177$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$ визначається при наявності зварювання	Для зварних відводів $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках. Для безшовних труб $\varphi_w = 1$ .	Забезпечений 100% контроль зварних швів неруйнівними методами: $\varphi_w = 1$
3	Кут нахилу твірної $\alpha$ , град.	Для конічного переходу $\alpha = \arctg \frac{D_3 - d_3}{2L}$ Для ексцентричного переходу $\alpha = \arctg \frac{D_3 - d_3}{L}$	$\alpha = \arctg \frac{0,245 - 0,203}{2 \cdot 0,2} = \arctg 0,105 = 6^\circ$
4	Розрахункова товщина стінки конічного переходу $S_{R6}$ , м	$S_{R6} = \frac{p_R D_3}{2[\sigma] \varphi_w \cos \alpha + p_R}$	$S_{R6} = \frac{3 \cdot 0,245}{2 \cdot 177 \cdot 1 \cdot \cos 6^\circ + 3} = 0,0021 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
6	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3} \text{ м}$ . Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .	$C_1 = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
7	Товщина переходу у першому наближенні $S^I$ , м	$S^I = S_{R6} + C_1$	$S^I = 0,0021 + 0,0007 = 0,0028 \text{ м}$ Приймаємо $S^I = 0,003 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на листовий прокат	За ГОСТ 19903–2015 для листового гарячекатаного прокату товщиною 3 мм нормальної точності $C_2 = 0,0002$ м
9	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,0002 = 0,0009$ м
11	Виконавча товщина стінки $S$	$S \geq S_{R1} + C$	$S \geq 0,0021 + 0,0009 = 0,003$ м Приймаємо $S = 0,003$ м
12	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_w(S - C)\cos\alpha}{D_3 - (S - C)}$	$[p] = \frac{2 \cdot 177 \cdot 1(0,003 - 0,0009)\cos 6^\circ}{0,245 - (0,003 - 0,0009)} = 3,04$ МПа
13	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$3$ МПа < $3,04$ МПа Умова міцності виконується

#### 4.14.4 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінок плоских круглих заглушок

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки плоскої круглої заглушки, яка пропущена всередину труби.

Середовище переміщується в трубі зі швидкістю 10 м/с.

Кругла заглушка знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 3$  МПа.

Марка сталі заглушки – 16ГС.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Внутрішній діаметр труби  $D = 0,24$  м.

Швидкість корозії конічного переходу  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби переходу  $\tau = 10$  років.



Таблиця 4.5 Алгоритм розрахунку товщини стінок плоских круглих заглушок і приклад розрахунку товщини стінки заглушки, яка пропущена всередину труби

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу заглушки за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі 16ГС за розрахункової температури $t_R = 100$ °С допустиме напруження $[\sigma] = 177$ МПа
2	Розрахунковий коефіцієнт $\gamma_1$ (визначається для плоских заглушок, які пропущені всередину труби або приварені до торця труби)	Для плоскої круглої заглушки, яка пропущена всередину труби $\gamma_1 = 0,53$ ; для плоскої круглої заглушки, яка приварена до торця труби $\gamma_1 = 0,45$ .	$\gamma_1 = 0,53$
3	Розрахункова товщина стінки плоскої круглої заглушки $S_{Ri}$ , м	Для плоских заглушок, які пропущені всередину труби або приварені до торця труби: $S_{R8} = \gamma_1(D - r) \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]}}$ Для фланцевих плоских заглушок: $S_{R9} = 0,41(D + b) \sqrt{\frac{p_R}{[\sigma]}}$	Для плоских заглушок, які пропущені всередину труби $r = 0$ . $S_{R8} = 0,53 \cdot 0,24 \sqrt{\frac{3}{177}} = 0,017 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
5	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3}$ м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3}$ м.	$C_1 =$ $= 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4}$ м
6	Товщина заглушки у першому наближенні $S^I$ , м	$S^I = S_{Ri} + C_1$	$S^I =$ $= 0,017 + 0,0007 =$ $0,0177$ м Приймаємо $S^I =$ $= 0,018$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ визначають за таблицею Б.2 додатка Б	За таблицею Б.2: $C_2 = 0,0009$ м
8	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,0009 = 0,0016$ м
9	Виконавча товщина стінки $S$	$S \geq S_{Ri} + C$ Остаточно величину $S$ обираємо за додатком Б	$S \geq 0,017 + 0,0016 = 0,0186$ м За таблицею Б.1 приймаємо $S = 0,019$ м
10	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{[\sigma](S - C)^2}{\gamma_1^2(D - r)^2}$	$[p] = \frac{177(0,019 - 0,0016)^2}{0,53^2 \cdot 0,24^2} = 3,31$ МПа
11	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$3,0$ МПа $<$ $3,31$ МПа Умова міцності виконується

#### 4.14.5 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінок еліптичних заглушок

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки еліптичної заглушки.

Середовище переміщується в трубі зі швидкістю 10 м/с.

Еліптична заглушка знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 3$  МПа.

Марка сталі заглушки – 16ГС.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Зовнішній діаметр труби  $D_3 = 0,245$  м.

Висота випуклої частини заглушки  $h = 0,08$  м.

Швидкість корозії еліптичної заглушки  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби переходу  $\tau = 10$  років.

Таблиця 4.6 Алгоритм розрахунку товщини стінок еліптичних заглушок і приклад розрахунку.

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок дійсний при $0,2 \leq h/D_3 \leq 0,5$			
1	Допустиме напруження для матеріалу заглушки за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі 16ГС за розрахункової температури $t_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 177 \text{ МПа}$
2	Розрахункова товщина стінки еліптичної заглушки $S_{R10}$ , м	$S_{R10} = \frac{p_R D_3^2}{8h[\sigma]}$	$S_{R10} = \frac{3 \cdot 0,245^2}{8 \cdot 0,08 \cdot 177} = 0,0016$
3	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e.$ При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3}$ м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3}$ м.	$C_1 =$ $= 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
5	Товщина заглушки у першому наближенні $S^I$ , м	$S^I = S_{R10} + C_1.$ Остаточну величину $S^I$ приймаємо за Додатком Б	$S^I =$ $= 0,0016 + 0,0007 =$ $= 0,0023 \text{ м}$ За таблицею Б1 Додатка Б приймаємо $S^I = 0,0025$ м
6	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ визначають за таблицею Б.2 додатка Б	За таблицею Б.2: $C_2 = 0,0002$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,0002 = 0,0009$ м
8	Виконавча товщина стінки $S$	$S \geq S_{R10} + C$ Остаточно величину $S$ обираємо за додатком Б	$S \geq 0,0016 + 0,0009 = 0,0025$ м За таблицею Б.1 приймаємо $S = 0,0025$ м
9	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{8[\sigma](S - C)h}{D_3^2}$	$[p] = \frac{8 \cdot 177(0,0025 - 0,0009)0,08}{0,245^2} = 3,019$ МПа
10	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$3,0$ МПа < $3,019$ МПа Умова міцності виконується

## 5 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

Методика розрахунку [16] припускає, що розрахунковий тиск дорівнює робочому тиску, розрахункова температура  $t_R$  дорівнює робочій температурі середовища, яке протікає по трубопроводу. Для визначення допустимого напруження  $[\sigma]$  при температурі нижче  $0\text{ }^\circ\text{C}$  (але не нижче  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ) приймається  $t_R = 20\text{ }^\circ\text{C}$ . Допустиме напруження повинно відповідати чинним науково-технічним документам.

При розрахунку зварних з'єднань в формули вводять коефіцієнт міцності зварного шва  $\varphi_w$ .

Деталі трубопроводу працюють при навантаженнях, які багаторазово змінюються в процесі експлуатації. Якщо число змін напружень (число циклів  $N$ ) з амплітудою напружень, що перевищує 15% розрахункового рівня, задовольняє умові  $N \leq 10^3$ , тоді вважають, що трубопровід працює в умовах повторно-статичних навантажень і виконують статичний розрахунок деталей по механічним характеристикам, отриманим при статичних випробуваннях. Якщо  $N > 10^3$ , тоді навантаження вважають циклічним і деталі трубопроводів розраховують на циклічну міцність при змінному навантаженні з урахуванням границі витривалості матеріалу.

Для виготовлення трубопроводів високого тиску рекомендують використовувати безшовні труби.

В хімічній і нафтохімічній промисловості використовуються труби із сталей 20, 15ГС, 15ХМ, 12Х1ММФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР, 12Х11В2МФ і 12Х18Н12Т.



## 5.1 Розрахунок товщини стінки труби

Розрахункова товщина стінки:

$$S_R = \frac{0,5D_3(\beta_R - 1)}{\beta_R},$$

де  $\beta_R$  – розрахунковий коефіцієнт товстостінності труби.

$\beta_R$  розраховується за формулою:

$$\beta_R = \exp\left(\frac{p_R}{[\sigma]\varphi}\right).$$

Виконавча товщина стінки:

$$S = K(S_R + C),$$

де  $K$  – коефіцієнт.

Коефіцієнт  $K$  залежить від мінусового допуску  $\delta$  і визначається графічно (рис. 5.1) або розраховується за формулою:

$$K = \frac{1}{1 - 0,01\delta}.$$

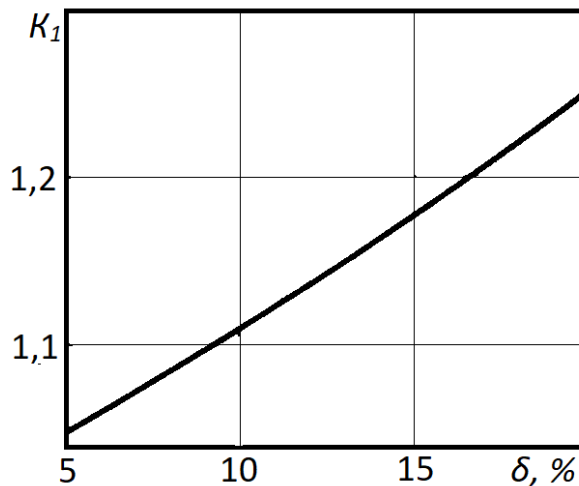


Рисунок 5.1 – Графік для визначення коефіцієнта  $K$

Допустимий тиск в трубі:

$$[p] = [\sigma]\varphi \ln \frac{D_3 - 2C_2}{d + 2C_1}.$$

## 5.2 Перевірний розрахунок товщини труби з урахуванням температурних напружень

Якщо температура середовища в трубі відмінна від зовнішньої, тоді холодніші ділянки протидіють розширенню більш нагрітих. Внаслідок цього виникають температурні напруження.

Якщо внутрішня температура більша за зовнішню ( $t_e > t_3$ ), тоді вважають, що перепад температур  $\Delta t > 0$  і еквівалентне напруження слід визначати за формулою [16, 17]:

$$\sigma_{екв} = \frac{1}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p_R^2 + 3p_R K_1 \Delta t + K_1^2 \Delta t^2},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт товстостінності труби;  $K_1 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2 \ln \beta} - 1 \right)$ ,  $\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $E$  – модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури, МПа;  $\mu$  – коефіцієнт Пуасона.

Коефіцієнт товстостінності:

$$\beta = \frac{d + 2(S - C)}{d}.$$

Коли внутрішня температура менша за зовнішню ( $t_e < t_3$ ), вважають, що перепад температур  $\Delta t < 0$  і еквівалентне напруження розраховують за формулою:

$$\sigma_{екв} = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p_R^2 + 3p_R K_2 \Delta t + K_2^2 \Delta t^2},$$

$$\text{де } K_2 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2\beta^2 \ln \beta} - 1 \right).$$

Умова міцності:

$$\sigma_{екв} \leq \frac{\sigma_T}{1,1},$$

де  $\sigma_T$  – границя плинності за розрахункової температури, МПа.

Якщо умова міцності не виконується можна зменшити перепад температур  $\Delta t$  шляхом застосування теплоізоляції і т. ін.

### 5.3 Розрахунок непрямолинійних труб, які призначені для роботи при підвищеній температурі

Такі труби розраховують на самокомпенсацію температурних розширень. Для цього визначають розташування опор, навантаження на опори і додаткові навантаження в трубопроводі: осьову силу  $N_T$ , згинаючий момент  $M_u$ , крутильний момент  $M_{кр}$ .

Перевірочний розрахунок труби на міцність виконують з урахуванням сумісної дії  $p_R, N_T, M_u, M_{кр}$ .

Умова граничного стану труби, яка навантажена  $p_R, N_T, M_u, M_{кр}$ , що розраховані з урахуванням допустимих пластичних деформацій:

$$\frac{p_R}{p^o} + \left( \frac{N_T}{0,9N_T^o} + \frac{M_u}{M_u^o} \right)^2 + \left( \frac{M_{кр}}{M_{кр}^o} \right)^2 \leq \frac{1}{n^2},$$

де  $p^o, N_T^o, M_u^o, M_{кр}^o$  – граничні тиск, осьова сила, згинаючий момент, крутильний момент при їх окремій дії (коли інші силові фактори дорівнюють нулю);  $n = 1,15$  – коефіцієнт запасу міцності.

Граничний тиск  $p^o$ :

$$p^o = p_T \xi_p,$$

де  $p_T$  – тиск, який відповідає початку процесу плинності на внутрішній поверхні труби, МПа;  $\xi_p$  – коефіцієнт.

Тиск  $p_T$ :

$$p_T = \frac{\sigma_T(\beta^2 - 1)}{\sqrt{3}\beta^2}.$$

Коефіцієнт  $\xi_p$  визначається за рис. 5.2.

Гранична осьова сила  $N_T^o$ :

$$N_T^o = 0,25\pi\sigma_T d^2(\beta^2 - 1).$$

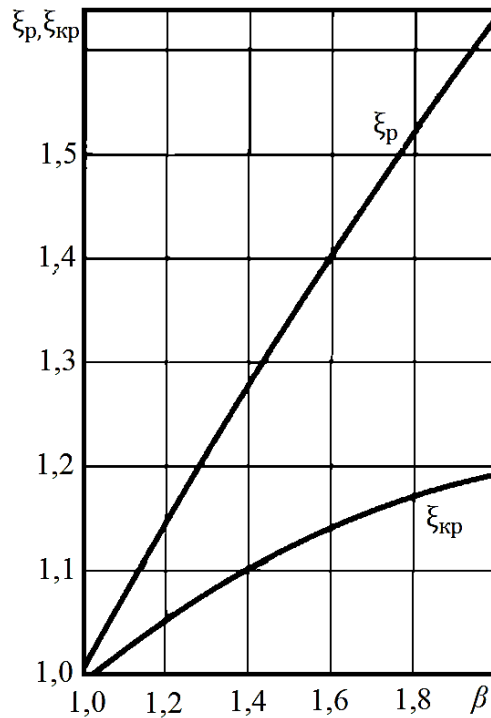


Рисунок 5.2 – Графіки для визначення коефіцієнтів  $\xi_p$  і  $\xi_{кр}$

Граничний згинаючий момент  $M_u^o$ :

$$M_u^o = M_u^T \xi_u \varphi_u,$$

де  $M_u^T$  – згинаючий момент, який визиває з’явлення на зовнішній поверхні труби напружень, що дорівнюють границі плинності матеріалу, МН·м/м;  $\xi_u$  – коефіцієнт;  $\varphi_u$  – коефіцієнт міцності кільцевого зварного шва.

Згинаючий момент  $M_u^T$ :

$$M_u^T = \sigma_T W_x,$$

де  $W_x$  – осьовий момент опору труби, м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт  $\xi_u$  залежить від коефіцієнта товстостінності  $\beta$  і границі плинності за розрахункової температури  $\sigma_T$  і визначається за таблицею 5.1.

Коефіцієнт міцності кільцевого зварного шва  $\varphi_u$  визначається за чинними науково-технічними документами.

Таблиця 5.1. Коефіцієнт  $\xi_u$

$\sigma_T$ , МПа	Значення $\beta$									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
200	1,30	1,35	1,39	1,42	1,45	1,47	1,49	1,51	1,52	1,53
300	1,28	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44	1,45	1,47	1,48	1,49
400	1,27	1,31	1,34	1,37	1,39	1,41	1,42	1,43	1,45	1,46
500	1,25	1,29	1,32	1,35	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42
600	1,24	1,27	1,30	1,33	1,35	1,36	1,37	1,38	1,39	1,39
700	1,22	1,25	1,29	1,31	1,33	1,33	1,34	1,35	1,35	1,35
800	1,21	1,24	1,27	1,29	1,31	1,32	1,33	1,33	1,33	1,34
900	1,20	1,23	1,26	1,27	1,27	1,29	1,29	1,30	1,30	1,30
1000	1,19	1,22	1,24	1,25	1,26	1,27	1,27	1,27	1,28	1,28

Осьовий момент опору труби:

$$W_x = \frac{\pi d^3 (\beta^4 - 1)}{32\beta}$$

Граничний крутильний момент  $M_{кр}^o$ :

$$M_{кр}^o = M_{кр}^T \xi_{кр}$$

де  $M_{кр}^T$  – крутний момент, який визиває появлення на зовнішній поверхні труби напружень, що дорівнюють границі плинності матеріалу, МН·м/м;  
 $\xi_{кр}$  – коефіцієнт.

Крутний момент  $M_{кр}^T$ :

$$M_{кр}^T = \frac{2}{\sqrt{3}} W_x \sigma_T$$

Коефіцієнт  $\xi_{кр}$  визначається за графіком (рис. 5.2).

Якщо умова граничного стану не виконується, тоді необхідно зменшити додаткові навантаження до допустимих (змінюючи конфігурацію трубопроводу, оптимальним розташуванням опор і т. ін.).

## 5.4 Розрахунок криволінійних елементів

Розрахунок колін, подвійних колін і відводів (рис. 5.3) зводиться до визначення товщини стінок у перерізах за формулами, які отримані на основі оцінки граничного стану криволінійного елемента.

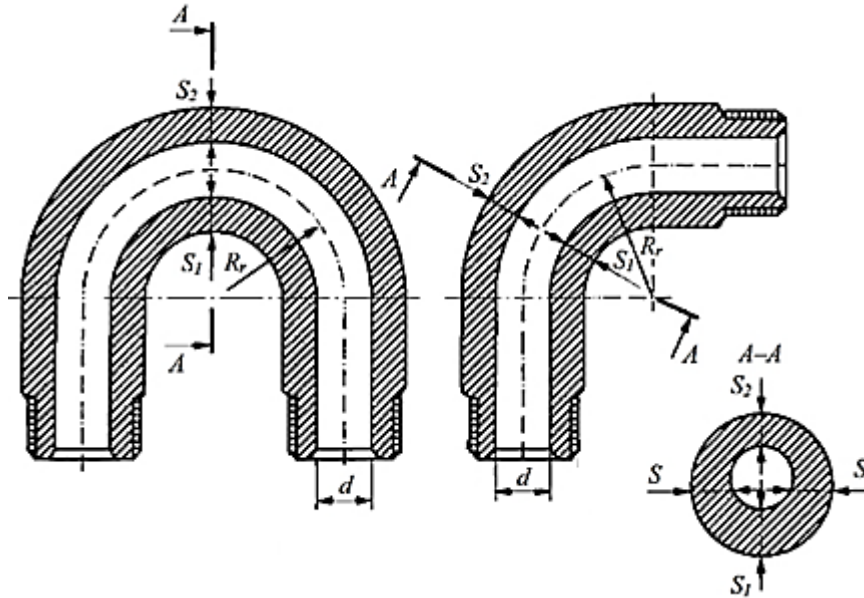


Рисунок 5.3 – Розрахункова схема криволінійного елемента

Товщина стінки криволінійного елемента на гнутій ділянці повинна бути не менше:

на боковій поверхні

$$S = 0,5(d + 2C_1)(\beta_R - 1) + C;$$

на увігнутій поверхні

$$S_1 = 0,5(d + 2C_1)(j_1\beta_R - 1) + C;$$

на опуклій поверхні

$$S_2 = 0,5(d + 2C_1)(j_2\beta_R - 1) + C,$$

де  $j_1, j_2$  – коефіцієнти, які характеризують, відповідно, необхідне стовщення стінки в перерізі товщиною  $S_1$  і допустиме стоншення стінки в перерізі товщиною  $S_2$  порівняно з прямою трубою.

Коефіцієнти  $j_1, j_2$  визначаються за графіками (рис. 5.4).

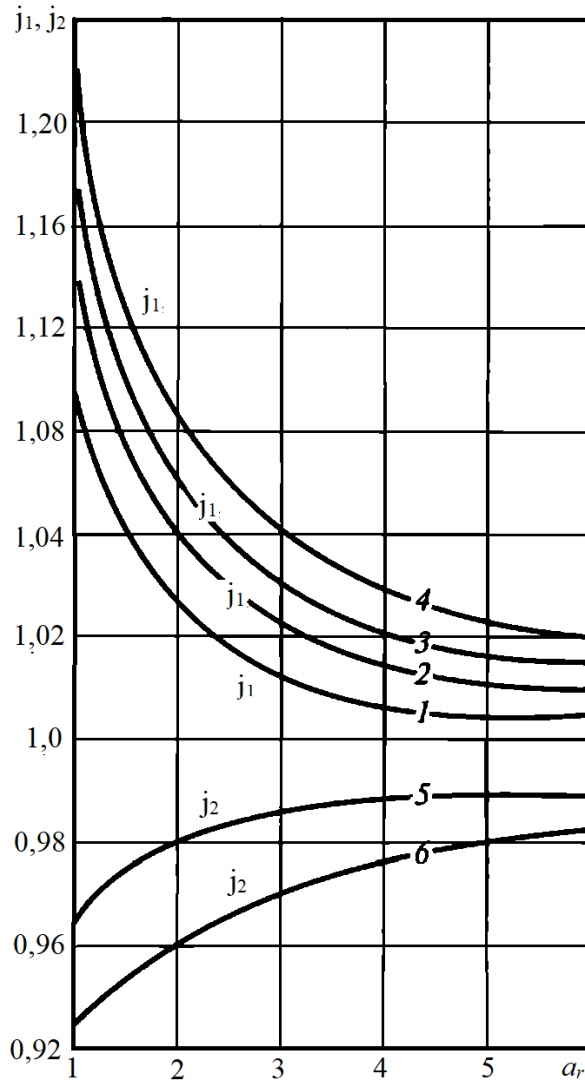


Рисунок 5.4 – Залежність коефіцієнтів  $j_1$  (криві 1–4) і  $j_2$  (криві 5, 6) від відносного радіусу кривизни  $a_r$  для різних значень  $\beta_R$ :

1 – при  $1,10 \leq \beta_R \leq 1,20$ ; 2 – при  $1,20 \leq \beta_R \leq 1,35$ ;

3 – при  $1,35 \leq \beta_R \leq 1,55$ ; 4 – при  $1,55 \leq \beta_R \leq 2,0$ ;

5 – при  $1,10 \leq \beta_R \leq 1,55$ ; 6 – при  $1,55 \leq \beta_R \leq 2,0$

Для забезпечення необхідних розмірів криволінійних елементів в місці вигину товщина стінки заготовки  $S_3$  повинна задовольняти умові:

$$S_3 \geq \max \left\{ 0,5d(j_1\beta_R - 1) \frac{8a_r - 1}{8a_r + 1}; S \right\},$$

де  $a_r$  – відносний радіус кривизни елемента.

$$a_r = \frac{R_r}{D_3},$$

де  $R_r$  – радіус вигину елемента по нейтральній осі, м.

Зовнішній діаметр заготовки:

$$D_3 = d + 2S_3.$$

Допустимий тиск:

$$[p] = [\sigma] \varphi \ln \frac{D_3 - 2C_2}{d + 2C_1}.$$

### 5.5 Розрахунок конічних переходів

Товщини  $S_1$  і  $S_2$  стінок переходу (рис. 5.5) повинні бути не менше товщин стінок прямих труб. Їх значення розраховуються за формулами:

$$S_1 = 0,5(d_1 + 2C_1)(\beta_{RK} - 1) + C;$$

$$S_2 = 0,5(d_2 + 2C_1)(\beta_{RK} - 1) + C,$$

де  $d_1$  – внутрішній діаметр більшого циліндра конічного переходу, м;  $d_2$  – внутрішній діаметр меншого циліндра конічного переходу, м;  $\beta_{RK}$  – розрахунковий коефіцієнт товстостінності конічного переходу.

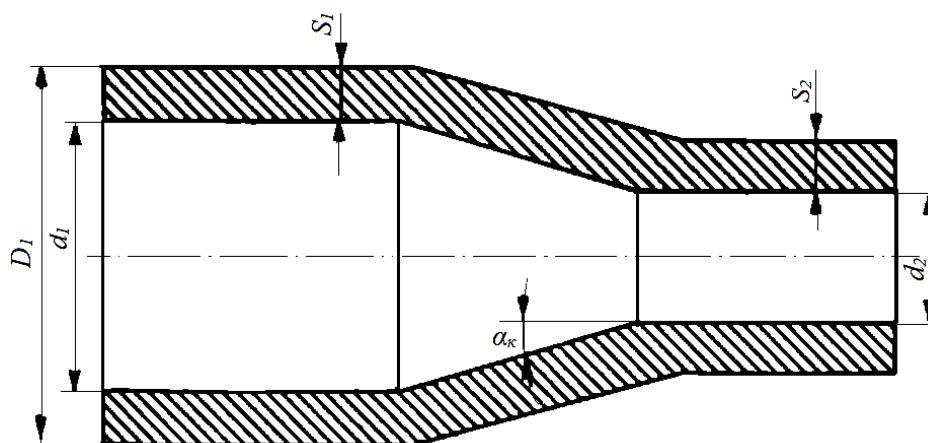


Рисунок 5.5 – Конічний перехід

Розрахунковий коефіцієнт товстостінності конічного переходу:



$$\beta_{RK} = e^{\frac{p_R}{[\sigma]\varphi \cos \alpha_k}},$$

де  $\alpha_k$  – кут між віссю і твірною конуса, град.

Кут  $\alpha_k$  рекомендується приймати не більше  $45^\circ$ .

Допустимий робочий тиск у готовій деталі:

$$[p] = [\sigma]\varphi \ln \frac{D_1}{d_1 + 2C_1},$$

де  $D_1 = d_1 + 2S_1$ .

## 5.6 Алгоритми і приклади розрахунків елементів трубопроводів високого тиску

### 5.6.1 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки прямолінійної труби

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки безшовної сталеві труби без отворів, яка призначена для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Труба знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 45$  МПа.

Марка сталі – 25Х3МН.

Розрахункова температура (температура всередині труби)  $t_R = 100$  °С.

Зовнішній діаметр труби  $D_3 = 0,25$  м.

Допустиме напруження сталеві труби при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 221$  МПа.

Швидкість корозії сталеві труби  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби труби  $\tau = 10$  років.

Мінусовий допуск  $\delta = 8\%$ .

Таблиця 5.2 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки прямолінійної труби

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу труби за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 221$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$	Для зварних труб $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках. Для безшовних труб $\varphi_w = 1$ .	$\varphi_w = 1$
3	Коефіцієнт міцності елемента з отвором $\varphi_d$	$\varphi_d = \frac{2}{1,75 + \frac{d}{\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}}} \left[ 1 + \frac{\Sigma A}{2(S - C)\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}} \right]$ <p>Через те, що труба не має отворів <math>\varphi_d = 1</math></p>	
4	Коефіцієнт міцності $\varphi$	$\varphi = \min\{\varphi_d; \varphi_w\}$	$\varphi = \min\{1; 1\} = 1$
5	Розрахунковий коефіцієнт товстостінності труби $\beta_R$	$\beta_R = \exp\left(\frac{p_R}{[\sigma]\varphi}\right)$	$\beta_R = \exp\left(\frac{45}{221 \cdot 1}\right) = 1,226$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6	Розрахункова товщина стінки $S_R$ , м	$S_R = \frac{0,5D_3(\beta_R - 1)}{\beta_R}$	$S_R = \frac{0,5 \cdot 0,25(1,226 - 1)}{1,226} = 0,023 \text{ м}$
7	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	<p>Додаток <math>C_e</math> належить враховувати у таких випадках:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с);</li> <li>2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок;</li> <li>3) при ударній дії середовища на деталь.</li> </ol>	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
8	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e.$ <p>При <math>v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}</math> додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають <math>10^{-3} \text{ м}</math>. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині <math>v_{кор}</math>, але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка <math>C_1</math> для компенсації корозії приймається <math>2 \cdot 10^{-3} \text{ м}</math>.</p>	$C_1 = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
9	Мінусовий допуск $\delta$ , %	$\delta$ визначається за чинними науково-технічними документами	За вихідними даними $\delta = 8\%$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.	Попередньо прийmemo що $S = 0,025$ м, тоді $C_2 = 0,01\delta S = 0,01 \cdot 8 \cdot 0,025 = 0,002$ м
11	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,002 = 0,0027$ м
12	Коефіцієнт $K$	$K = \frac{1}{1 - 0,01\delta}$ або визначається за графіком (рис. 5.1)	$K = \frac{1}{1 - 0,01 \cdot 8} = 1,09$
13	Виконавча товщина стінки $S$	$S = K(S_R + C)$	$S = 1,09(0,023 + 0,0027) = 0,028$ м
14	Внутрішній діаметр $d$ , м	$d = D_3 - 2S$	$d = 0,25 - 2 \cdot 0,028 = 0,194$ м
15	Допустимий внутрішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = [\sigma] \varphi \ln \frac{D_3 - 2C_2}{d + 2C_1}$	$[p] = 221 \cdot 1 \cdot \ln \frac{0,25 - 2 \cdot 0,002}{0,194 + 2 \cdot 0,0007} = 50,89$ МПа
16	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	$45,0$ МПа $<$ $50,89$ МПа Умова міцності виконується

## 5.6.2 Алгоритм і приклад перевірного розрахунку товщини труби з урахуванням температурних напружень

**Завдання.** Виконати перевірений розрахунок товщини труби з урахуванням температурних напружень.

Труба знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 45$  МПа.

Марка сталі – 25Х3МН.

Температура всередині труби  $t_6 = 100$  °С.

Температура зовні труби  $t_3 = 20$  °С.

Зовнішній діаметр труби  $D_3 = 0,25$  м.

Внутрішній діаметр труби  $d = 0,194$  м.

Товщина стінки труби  $S = 0,028$  м.

Границя плинності за розрахункової температури  $\sigma_T = 490$  МПа.

Коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,3$ .

Сума додатків до розрахункової товщини стінки  $C = 0,0027$  м.

Таблиця 5.3 Алгоритм і приклад перевірного розрахунку товщини труби з урахуванням температурних напружень

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу $E$ , МПа	$E$ визначається за таблицею В.1 Додатка В залежно від розрахункової температури і матеріалу труби	За табл. В.1 $E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа
2	Коефіцієнти лінійного розширення $\alpha$ , $1/^\circ\text{C}$	$\alpha$ визначається за таблицею Г.1 Додатка Г залежно від розрахункової температури і матеріалу труби	За табл. Г.1 $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$
3	Границя плинності за розрахункової температури $\sigma_T$ , МПа	$\sigma_T$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $\sigma_T = 490$ МПа
4	Перепад температур $\Delta t$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta t = t_8 - t_3$	$\Delta t = 100 - 20 = 80$ $^\circ\text{C}$
5	Коефіцієнт товстостінності $\beta$	$\beta = \frac{d + 2(S - C)}{d}$	$\beta = \frac{0,194 + 2(0,028 - 0,0027)}{0,194} = 1,26$
6	Коефіцієнт $K_1$ (розраховується якщо $\Delta t > 0$ )	$K_1 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2 \ln \beta} - 1 \right)$	$K_1 = \frac{11,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2,15 \cdot 10^5}{1 - 0,3} \left( \frac{1,26^2 - 1}{2 \ln 1,26} - 1 \right) = 0,99$

Продовження табл. 5.3

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7	Коефіцієнт $K_2$ (розраховується якщо $\Delta t < 0$ )	$K_2 = \frac{\alpha_t E}{1 - \mu} \left( \frac{\beta^2 - 1}{2\beta^2 \ln \beta} - 1 \right)$	–
8	Еквівалентне напруження $\sigma_{екв}$ , МПа	Якщо $\Delta t > 0$ , тоді $\sigma_{екв} = \frac{1}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p_R^2 + 3p_R K_1 \Delta t + K_1^2 \Delta t^2}.$ Якщо $\Delta t < 0$ , тоді $\sigma_{екв} = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \sqrt{3p_R^2 + 3p_R K_2 \Delta t + K_2^2 \Delta t^2}.$	$\sigma_{екв} = \frac{1}{1,26^2 - 1} \times$ $\times \sqrt{3 \cdot 45^2 + 3 \cdot 45 \cdot 0,99 \cdot 80 + 0,99^2 \cdot 80^2} =$ $= 258,34 \text{ МПа}$
9	Умова міцності	$\sigma_{екв} \leq \frac{\sigma_T}{1,1}$	$\frac{\sigma_T}{1,1} = \frac{490}{1,1} = 445,45 \text{ МПа}$ $258,34 < 445,45 \text{ МПа}$ Умова міцності виконуються

### 5.6.3 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки криволінійних елементів

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки безшовного відводу, який призначений для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Відвід не має отворів.

Відвід знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 45$  МПа.

Марка сталі – 25Х3МН.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Зовнішній діаметр відводу  $D_3 = 0,25$  м.

Внутрішній діаметр відводу  $d = 0,194$  м.

Радіус вигину елемента по нейтральній осі  $R_r = 0,28$  м.

Допустиме напруження сталевого відводу при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 221$  МПа.

Швидкість корозії сталевого відводу  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби відводу  $\tau = 10$  років.

Додаток для компенсації мінусового допуску  $C_2 = 0,002$  м.



Таблиця 5.4 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки криволінійного елемента

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу криволінійного елемента за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 221$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$	Для зварних елементів $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках. Для безшовних криволінійних елементів $\varphi_w = 1$ .	$\varphi_w = 1$
3	Коефіцієнт міцності елемента з отвором $\varphi_d$	$\varphi_d = \frac{2}{1,75 + \frac{d}{\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}}} \left[ 1 + \frac{\sum A}{2(S - C)\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}} \right]$ <p>Через те, що відвід не має отворів <math>\varphi_d = 1</math></p>	
4	Коефіцієнт міцності $\varphi$	$\varphi = \min\{\varphi_d; \varphi_w\}$	$\varphi = \min\{1; 1\} = 1$
5	Розрахунковий коефіцієнт товстостінності криволінійного елемента $\beta_R$	$\beta_R = \exp\left(\frac{p_R}{[\sigma]\varphi}\right)$	$\beta_R = \exp\left(\frac{45}{221 \cdot 1}\right) = 1,226$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщення середовища менше 20 м/с
7	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3}$ м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3}$ м.	$C_1 = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 =$ $= 7 \cdot 10^{-4}$ м
8	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ визначається за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.	За вихідними даними $C_2 = 0,002$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,002 = 0,0027$ м
10	Відносний радіус кривизни елемента $a_r$	$a_r = \frac{R_r}{D_3}$	$a_r = \frac{0,28}{0,25} = 1,12$
11	Коефіцієнт $j_1$	$j_1$ визначається за графіком залежно від $a_r$ і $\beta_R$ (рис. 5.4)	$j_1 = 1,120$
12	Коефіцієнт $j_2$	$j_2$ визначається за графіком залежно від $a_r$ і $\beta_R$ (рис. 5.4)	$j_2 = 0,968$
13	Товщина стінки бокової поверхні гнutoї ділянки криволінійного елемента $S$ , м	$S = 0,5(d + 2C_1)(\beta_R - 1) + C$	$S = 0,5(0,194 + 2 \cdot 0,0007)(1,226 - 1) + 0,0027 = 0,025$ м
11	Товщина стінки увігнутої поверхні гнutoї ділянки криволінійного елемента $S_1$ , м	$S_1 = 0,5(d + 2C_1)(j_1\beta_R - 1) + C$	$S_1 = 0,5(0,194 + 2 \cdot 0,0007)(1,12 \cdot 1,226 - 1) + 0,0027 = 0,039$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12	Товщина стінки опуклої поверхні гнutoї ділянки криволінійного елемента $S_2$ , м	$S_2 = 0,5(d + 2C_1)(j_2\beta_R - 1) + C$	$S_2 = 0,5(0,194 + 2 \cdot 0,0007)(0,968 \cdot 1,226 - 1) + 0,0027 = 0,021$ м
13	Товщина стінки заготовки $S_3$ , м	$S_3 \geq$ $\geq \max \left\{ 0,5d(j_1\beta_R - 1) \frac{8a_r - 1}{8a_r + 1}; S \right\}$	$S_3 = \max \left\{ 0,5 \cdot 0,194(1,12 \cdot 1,226 - 1) \frac{8 \cdot 1,12 - 1}{8 \cdot 1,12 + 1}; 0,025 \right\} =$ $= \max\{0,029; 0,025\} = 0,029$ м
14	Зовнішній діаметр заготовки $D_3$ , м	$D_3 = d + 2S_3$	$D_3 = 0,194 + 2 \cdot 0,029 = 0,252$ м
15	Допустимий тиск $[p]$ , МПа	$[p] = [\sigma] \varphi \ln \frac{D_3 - 2C_2}{d + 2C_1}$	$[p] = 221 \cdot 1 \cdot \ln \frac{0,252 - 2 \cdot 0,002}{0,194 + 2 \cdot 0,0007} = 52,68$ МПа
16	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	45,0 МПа < 52,68 МПа Умова міцності виконується

#### 5.6.4 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки конічного переходу

**Завдання.** Розрахувати товщину стінки зварного конічного переходу без отворів, який призначений для переміщення рідких середовищ зі швидкістю 10 м/с.

Передбачений 100% контроль зварних швів переходу неруйнівними методами.

Перехід знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p_R = 45$  МПа.

Марка сталі – 25Х3МН.

Розрахункова температура  $t_R = 100$  °С.

Внутрішній діаметр більшого циліндра конічного переходу  $d_1 = 0,194$  м.

Внутрішній діаметр меншого циліндра конічного переходу  $d_2 = 0,1$  м.

Кут між віссю і твірною конуса  $\alpha_k = 20^\circ$ .

Допустиме напруження сталевій труби при розрахунковій температурі  $[\sigma] = 221$  МПа.

Швидкість корозії сталевій труби  $v_{кор} = 7 \cdot 10^{-5}$  м/рік.

Термін служби труби  $\tau = 10$  років.

Додаток для компенсації мінусового допуску  $C_2 = 0,002$  м.

Таблиця 5.5 Алгоритм і приклад розрахунку товщини стінки конічного переходу

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1	Допустиме напруження для матеріалу переходу за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	$[\sigma]$ визначається за чинними науково-технічними документами.	За вихідними даними $[\sigma] = 221$ МПа
2	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_w$	Для зварних переходів $\varphi_w = 1$ при 100% контролі зварних швів неруйнівними методами і $\varphi_w = 0,8$ у інших випадках.	$\varphi_w = 1$
3	Коефіцієнт міцності елемента з отвором $\varphi_d$	$\varphi_d = \frac{2}{1,75 + \frac{d}{\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}}} \left[ 1 + \frac{\Sigma A}{2(S - C)\sqrt{(D_3 - S)(S - C)}} \right]$ <p>Через те, що перехід не має отворів <math>\varphi_d = 1</math></p>	
4	Коефіцієнт міцності $\varphi$	$\varphi = \min\{\varphi_d; \varphi_w\}$	$\varphi = \min\{1; 1\} = 1$
5	Розрахунковий коефіцієнт товстостінності конічного переходу $\beta_{RK}$	$\beta_{RK} = e^{\frac{pR}{[\sigma]\varphi \cos\alpha_k}}$	$\beta_{RK} = \exp\left(\frac{45}{221 \cdot 1 \cdot \cos 20^\circ}\right) = 1,242$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6	Додаток для компенсації ерозії $C_e$ , м	Додаток $C_e$ належить враховувати у таких випадках: 1) при переміщенні середовища в зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с); 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок; 3) при ударній дії середовища на деталь.	$C_e = 0$ через те, що швидкість переміщенні середовища менше 20 м/с
7	Додаток для компенсації корозії і ерозії, $C_1$ , м	$C_1 = v_{кор} \tau + C_e$ . При $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/рік}$ додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають $10^{-3} \text{ м}$ . Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$ , але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатка $C_1$ для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .	$C_1 = 7 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 0 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
8	Додаток для компенсації мінусового допуску $C_2$ , м	Додаток $C_2$ дорівнює мінусовому допуску за чинними науково-технічними документами на елементи трубопроводів.	За вихідними даними $C_2 = 0,002 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9	Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	$C = C_1 + C_2$	$C = 0,0007 + 0,002 = 0,0027$ м
10	Розрахункова товщина стінки більшого циліндра конічного переходу м; $S_{1R}$ , м	$S_{1R} = 0,5(d_1 + 2C_1)(\beta_{RK} - 1)$	$S_{1R} = 0,5(0,194 + 2 \cdot 0,0007)(1,242 - 1) = 0,0236$ м
11	Розрахункова товщина стінки меншого циліндра конічного переходу м; $S_{2R}$ , м	$S_{2R} = 0,5(d_2 + 2C_1)(\beta_{RK} - 1)$	$S_{2R} = 0,5(0,1 + 2 \cdot 0,0007)(1,242 - 1) = 0,0123$ м
12	Виконавча товщина стінки більшого циліндра конічного переходу м; $S_1$ , м	$S_1 = S_{1R} + C$	$S_1 = 0,0236 + 0,0027 = 0,0263$ м Приймаємо $S_1 = 0,028$ м
13	Виконавча товщина стінки меншого циліндра конічного переходу м; $S_2$ , м	$S_2 = S_{2R} + C$	$S_1 = 0,0123 + 0,0027 = 0,015$ м



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
16	Зовнішній діаметр більшого циліндра кінцевого переходу $D_1$ , м	$D_1 = d_1 + 2S_1$	$D_1 = 0,194 + 2 \cdot 0,028 = 0,25$ м
17	Допустимий робочий тиск $[p]$ , МПа	$[p] = [\sigma] \varphi \ln \frac{D_1}{d_1 + 2C_1}$	$[p] = 221 \cdot 1 \cdot \ln \frac{0,25}{0,194 + 2 \cdot 0,0007} = 54,45$ МПа
18	Перевірка умови міцності	$p_R \leq [p]$	45,0 МПа < 54,45 МПа Умова міцності виконується

## ДОДАТОК А

### Допустимі напруження металів

Властивості конструкційних матеріалів подані за ГОСТ 34233.1 [18].

*Таблиця А.1.* Допустимі напруження для вуглецевих і низьколегованих марганцевистих і марганцевекрем'янистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа, для сталей марок																
	Ст3				09Г2С, 16ГС				20, 20К		10	10Г2, 09Г2		17ГС, 17Г1С, 10Г2С1			
	Товщина, мм																
	до 20		понад 20		до 32		понад 32		до 160								
	Розрахунковий ресурс, год.																
	$10^5$		$2 \cdot 10^5$		$10^5$		$2 \cdot 10^5$		$10^5$		$2 \cdot 10^5$		$10^5$		$2 \cdot 10^5$		
20	154		140		196		183		147		130		180		183		
100	149		134		177		160		142		125		160		160		
150	145		131		171		154		139		122		154		154		
200	142		126		165		148		136		118		148		148		
250	131		120		162		145		132		112		145		145		
300	115		108		151		134		119		100		134		134		
350	105		98		140		123		106		88		123		123		
375	93		93		133		116		98		82		108		116		
400	85	68	85	68	122		105	92	74	77	61	92	78		105		
410	81	65	81	65	104		104	86	69	75	60	86	73		104		
420	75	60	75	60	92		92	80	64	72	57	80	68		92		
430	71*	57*	71*	57*	86	73	86	73	75	60	68	54	75	64	86	73	
440	–		–		78	66	78	66	67	53	60	48	67	57	78	66	
450	–		–		71	53	71	53	61	49	53	42	61	46	71	53	
460	–		–		64	48	64	48	55	44	47	37	55	41	64	48	
470	–		–		56	42	56	42	49	39	42	33	49	37	56	42	
475	–		–		53	40	53	40	46	36	37	29	46	34	53	40	

\*Для розрахункової температури стінки 425 °С.

*Примітки.* 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 °С для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Для сталі марки 20, якщо  $R_T^{20} < 220$  МПа допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення  $R_T^{20} / 220$ .

4. Для сталі марки 10Г2, якщо  $R_{0,2}^{20} < 270$  МПа допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення  $R_{0,2}^{20} / 270$ .

Таблиця А.2. Допустимі напруження для теплостійких хромомолібденових сталей

Розрахункова температура стінки, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для сталей марок											
	12ХМ		12МХ		15ХМ		15Х5М		15Х5М-У		10Х2М1А-А	
	Розрахунковий ресурс, год.											
	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>
20	147		147		155		146		240		204	
100	146,5		146,5		153		141		235		190	
150	146		146		152,5		138		230		180	
200	145		145		152		134		225		175	
250	145		145		152		127		220		170	
300	141		141		147		120		210		168	
350	137		137		142		114		200		165	
375	135		135		140		110		180		163	
400	132		132		137		105		170		160	
410	130		130		136		103		160		159	
420	129		129		135		101		150		158	
430	127		127		134		99		140	119	156	
440	126		126		132		96		135	115	155	
450	126		126		132		96		130	110	154	
460	126		126		132		96		126	107	140	
470	117		117		122		89	75	122	104	130	
480	114		114		117		86	73	116	100	120	107
490	105	89	105	89	107	91	83	70	114	97	104	93
500	96	72	96	72	99	74	79	59	108	81	88	78
510	82	61	82	61	84	63	72	54	97	73	80	71
520	69	52	69	52	74	55	66	50	85	64	70	62
530	60	45	57	43	67	50	60	45	72	54	60	53
540	50	37	47	35	57	43	54	40	58	43	52	45
550	41	31	–	–	49	37	47	35	52	39	45	38
560	33	25	–	–	41	31	40	30	45	34	38	33
570	–	–	–	–	–	–	35	26	40	30	32	27
580	–	–	–	–	–	–	30	22	34	25	27	23
590	–	–	–	–	–	–	28	21	30	22	24	20
600	–	–	–	–	–	–	25	19	25	19	19	16
610	–	–	–	–	–	–	20	15	20	15	17	–
620	–	–	–	–	–	–	18	13	18	13	14	–
630	–	–	–	–	–	–	17	12	17	12	11	–
640	–	–	–	–	–	–	16	11	16	11	10	–
650	–	–	–	–	–	–	14	10	14	10	9	–

Примітки 1. При розрахункових температурах нижче 20°С допустимі напруження приймають такими ж, як при 20°С при умови допустимого застосування матеріалу при даній температурі.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Вище risks наведені значення допустимих напружень, що не залежать від розрахункового ресурсу.

Розрахунковий ресурс роботи в умовах повзучості визначають за умовами навантаження і тривалості роботи посудини при повзучості.

Таблиця А.3. Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для сталей марок							
	03X21Н21М4ГБ	03X18Н11	03X17Н14М3	08X18Н10Т, 08X18Н12Т, 08X17Н13М2Т, 08X17Н15М3Т		12X18Н10Т, 12X18Н12Т, 10X17Н13М2Т, 10X17Н13М3Т		10X14Г14Н4Т
				Розрахунковий ресурс, год.				
				10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup>	
20	180	160	153	168		184		167
100	173	133	140	156		174		153
150	171	125	130	148		168		146
200	171	120	120	140		160		137
250	167	115	113	132		154		130
300	149	112	103	123		148		123
350	143	108	101	113		144		118
375	141	107	90	108		140		115
400	140	107	87	103		137		113
410	–	107	83	102		136		112
420	–	107	82	101		135		111
430	–	107	81	100,5		134		110
440	–	107	81	100		133		109
450	–	107	80	99		132		108
460	–	–	–	98		131		–
470	–	–	–	97,5		130		–
480	–	–	–	97		129		–
490	–	–	–	96		128		–
500	–	–	–	95		127		–
510	–	–	–	94		126		–
520	–	–	–	79		125		–
530	–	–	–	79	71	124	111	–
540	–	–	–	78	70	111	100	–
550	–	–	–	76	68	111	99	–
560	–	–	–	73	66	101	91	–
570	–	–	–	69	62	97	87	–
580	–	–	–	65	58	90	81	–
590	–	–	–	61	55	81	73	–
600	–	–	–	57	46	74	59	–
610	–	–	–	–	–	68	54	–
620	–	–	–	–	–	62	50	–
630	–	–	–	–	–	57	45	–
640	–	–	–	–	–	52	41	–
650	–	–	–	–	–	48	38	–
660	–	–	–	–	–	45	36	–
670	–	–	–	–	–	42	33	–
680	–	–	–	–	–	38	30	–
690	–	–	–	–	–	34	27	–
700	–	–	–	–	–	30	24	–

*Примітки до таблиці 1.* При розрахункових температурах нижче 20°C допустимі напруження приймають такими ж, як при 20°C при умови допустимого застосування матеріалу при даній температурі.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають інтерполяцією двох найближчих табличних значень з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

3. Для поковок зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на 0,83.

4. Для сортового прокату зі сталі марок 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на відношення  $R_{0,2}^{20}/240$ .

5. Для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08X18H10T допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на 0,95.

6. Для поковок зі сталі марки 03X17H14M3 допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,9.

7. Для поковок зі сталі марки 03X18H11 допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,9; для сортового прокату зі сталі марки 03X18H11 допустимі напруження множать на 0,8.

8. Для труб зі сталі марки 03X21H21M4ГБ допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,88.

9. Для поковок зі сталі марки 03X21H21M4ГБ допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на відношення  $R_{0,2}^{20}/250$ .

10. Вище risks наведені значення допустимих напружень, що не залежать від розрахункового ресурсу.

Розрахунковий ресурс роботи в умовах повзучості визначають за умовами навантаження і тривалості роботи посудини при повзучості.

*Таблиця А.4.* Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного і аустенітно-феритного класу і сплавів на залізнікелевій основі

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °C	Допустиме напруження [ $\sigma$ ], МПа для сталей марок					
	08X18Г8Н2Т	07X13АГ20	02X8Н22С6	15X18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т
20	230	233	133	233	147	233
100	206	173	106,5	220	138	200
150	190	153	100	206,5	130	193
200	175	133	90	200	124	188,5
250	160	127	83	186,5	117	166,5
300	144	120	76,5	180	110	160
350	–	113	–	–	107	–
375	–	110	–	–	105	–
400	–	107	–	–	103	–

*Примітки 1.* При розрахункових температурах нижче 20°C допустимі напруження приймають такими ж, як при 20°C при умови допустимого застосування матеріалу при даній температурі.

2. Для проміжних розрахункових температур стінки допустиме напруження визначають інтерполяцією двох найближчих табличних значень з округленням результатів до 0,5 МПа у бік меншого значення.

Таблиця А.5. Допустимі напруження для алюмінію і його сплавів

Розрахункова температура, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для алюмінію і його сплавів марок				
	А85М, А8М	АДМ, АДОМ, АД1М	АМцМ, АМцСМ	АМг2М, АМг3М	АМг5М, АМг6М
20	16	20	33	47	73
50	15	19	31	47	69
100	14	17	28	45	61
120	13	14	25	44	58
130	12	13	24	40	52
140	11	12	19	34	46
150	11	11	16	31	40

Примітки 1. Допустимі напруження наведені для алюмінію і його сплавів у відпаленому стані.

2. Допустимі напруження наведені для товщин листів і плит алюмінію марок А85М, А8М не більше 30 мм, інших марок – не більше 60 мм.

3. Для проміжних значень розрахункових температур стінки допустимі напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,1 МПа у бік меншого значення.

Таблиця А.6. Допустимі напруження для міді і її сплавів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для міді і її сплавів					
	М2	М3	М3р	Л63, ЛС59-1	ЛО62-1	ЛЖМц59-1-1
20	51	54	54	70	108	136
50	49	50	51	67	106	134
100	48	45	46	63	100	124
150	43	42	42	60	95	120
200	38	39	38	57	90	106
210	–	38	37	55	80	97
220	–	37	36	52	70	85
230	–	36	35	42	60	69
240	–	34	34	34	50	51
250	–	33	33	33	40	30

Примітки 1. Допустимі напруження наведені для міді та її сплавів у відпаленому стані.

2. Допустимі напруження наведені для товщин листів від 3 до 10 мм.

3. Для проміжних значень розрахункових температур стінки допустимі напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,1 МПа у бік меншого значення.

Таблиця А.7. Допустимі напруження для титану і його сплавів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для титанового листового прокату і прокатних труб			
	BT1-0	OT4-0	AT3	BT1-00
20	143	181	226	113
100	126	156	199	96
200	106	129	169	75
250	94	118	162	64
300	85	96	156	55
350	–	94	143	–
400	–	92	–	–

Примітки 1. При розрахункових температурах нижче 20°C допустимі напруження приймають такими ж, як при 20°C при умови допустимого застосування матеріалу при даній температурі.

2. Для поковок і прутків допустимі напруження, зазначені в цій таблиці, множать на 0,8.

## ДОДАТОК Б

### Прокат листовий

Розміри прокату подані за ГОСТ 19903–2015 [19] і ДСТУ 8971:2019 [20]

*Таблиця Б.1. Розміри сталевих листового прокату*

Тип прокату	Розміри прокату, мм		
	товщина	ширина	довжина
Прокат листовий гарячекатаний (ГОСТ 19903–2015): виготовлений у листах	Від 0,40 до 0,60 включно з кроком 0,05; 0,63; від 0,65 до 0,80 включно з кроком 0,05; 0,9; 1,0; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; від 4,0 до 26,0 включно з кроком 0,5; від 27,0 до 31,0 включно з кроком 1,0; від 32,0 до 42,0 включно з кроком 2,0; 45,0; 48,0; 50,0; 52,0; 55,0; 58,0; 60,0; 62,0; 65,0; 68,0; 70,0; 72,0; 75,0; 78,0; 80,0; 82,0; 85,0; 87,0; 90,0; 92,0; від 95,0 до 160 включно з кроком 5,0.	500 – 4400	710 – 12000
виготовлений у рулонах	Від 1,2 до 1,6 включно з кроком 0,1; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0; 4,5; 5,0; 5,3; 5,5; 6,0; 6,3; від 7,0 до 12 включно з кроком 0,5; 12,7; від 13,0 до 25,0 включно з кроком 0,5	500 – 2200	Розвернута довжина рулонів не регламентується
Прокат листовий холоднокатаний (ДСТУ 8971:2019): виготовлений у листах	Від 0,35 до 0,80 включно з кроком 0,05; Від 0,90 до 1,80 включно з кроком 0,10; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,50; 3,80; 3,90; 4,00; 4,20; 4,50; 4,80; 5,00	500 – 2350	1000 – 6000
виготовлений у рулонах	—”—	—”—	Розвернута довжина рулонів не регламентується



Таблиця Б.2. Граничні відхилення по товщині прокату гарячекатаного листового і виготовленого у рулонах [19]

Товщина прокату	Граничні відхилення по товщині прокату при його ширині, мм													
	Від 500 до 750 включно		Більше 750 до 1000 включно		Більше 1000 до 1500 включно		Більше 1500 до 2000 включно		Більше 2000 до 2300 включно		Більше 2300 до 2700 включно		Більше 2700 до 3000 включно	
	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ
Від 0,40 до 0,50 включно	± 0,05	± 0,07	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 0,50 до 0,60 включно	± 0,06	± 0,08	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 0,60 до 0,75 включно	± 0,07	± 0,09	± 0,07	± 0,09	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 0,75 до 0,90 включно	± 0,08	± 0,10	± 0,08	± 0,10	± 0,12	± 0,15	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 0,90 до 1,10 включно	± 0,09	± 0,11	± 0,09	± 0,12	± 0,12	± 0,15	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,10 до 1,20 включно	± 0,10	± 0,12	± 0,11	± 0,13	± 0,12	± 0,15	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,20 до 1,30 включно	± 0,11	± 0,13	± 0,12	± 0,14	± 0,12	± 0,15	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,30 до 1,40 включно	± 0,11	± 0,14	± 0,12	± 0,15	± 0,12	± 0,18	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,40 до 1,60 включно	± 0,12	± 0,15	± 0,13	± 0,15	± 0,13	± 0,18	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,60 до 1,80 включно	± 0,13	± 0,15	± 0,14	± 0,17	± 0,14	± 0,18	–	–	–	–	–	–	–	–
Від 1,80 до 2,00 включно	± 0,14	± 0,16	± 0,15	± 0,17	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,20	–	–	–	–	–	–
Від 2,00 до 2,20 включно	± 0,15	± 0,17	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	–	–	–	–	–	–
Від 2,20 до 2,50 включно	± 0,16	± 0,18	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	–	–	–	–	–	–
Від 2,50 до 3,00 включно	± 0,17	± 0,19	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	± 0,20	± 0,22	± 0,23	± 0,25	–	–	–	–
Від 3,00 до 3,50 включно	± 0,18	± 0,20	± 0,19	± 0,21	± 0,20	± 0,22	± 0,22	± 0,24	± 0,26	± 0,29	–	–	–	–
Від 3,50 до 3,90 включно	± 0,20	± 0,22	± 0,21	± 0,23	± 0,22	± 0,24	± 0,24	± 0,26	± 0,28	± 0,31	–	–	–	–
Від 3,90 до 5,50 включно	+0,10	+0,20	+0,15	+0,30	+0,10	+0,30	+0,20	+0,40	+0,25	+0,45	–	–	–	–
	–0,40	–0,40	–0,40	–0,40	–0,50	–0,50	–0,50	–0,50	–0,50	–0,50	–	–	–	–
Від 5,50 до 7,50 включно	–0,50	+0,10	+0,10	+0,20	+0,10	+0,25	+0,20	+0,40	+0,25	+0,45	–	–	–	–
		–0,50	–0,60	–0,60	–0,60	–0,60	–0,60	–0,60	–0,60	–0,60	–	–	–	–
Від 7,50 до 10,00 включно	–0,80	+0,10	+0,10	+0,20	+0,20	+0,30	+0,20	+0,35	+0,25	+0,45	+0,20	+0,30	–	–
		–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–	–
Від 10,0 до 12,7 включно	–0,80	+0,20	+0,10	+0,20	+0,20	+0,30	+0,30	+0,40	+0,35	+0,50	+0,60	+0,70	+0,90	+1,00
		–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80	–0,80

Продовження табл. Б.2

Товщина прокату	Від 500 до 750 включно		Більше 750 до 1000 включно		Більше 1000 до 1500 включно		Більше 1500 до 2000 включно		Більше 2000 до 2300 включно		Більше 2300 до 2700 включно		Більше 2700 до 3000 включно	
	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ	ПТ	НТ
Від 12,7 до 15,5 включно	+0,15	+0,20	+0,15	+0,25	+0,25	+0,35	+0,35	+0,40	+0,40	+0,55	+0,65	±0,80	±0,90	+1,00
	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80			-0,90
Від 15,0 до 25,0 включно	+0,20	+0,20	+0,20	+0,25	+0,25	+0,35	+0,35	+0,45	+0,50	+0,60	+0,70	±0,90	±0,90	±1,00
	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90			

*Примітка:* ПТ – підвищена точність; НТ – нормальна точність.

98

Таблиця Б.3. Граничні відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного, мм [19]

Товщина прокату	Більше 25 до 30	Більше 30 до 34	Більше 34 до 40	Більше 40 до 50	Більше 50 до 60	Більше 60 до 70	Більше 70 до 80	Більше 80 до 90	Більше 90 до 100	Більше 100 до 115	Більше 115 до 125	Більше 125 до 140	Більше 140 до 160
Мінусовий допуск	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	2,2	2,5	2,7	3,1	3,5	3,8	4,2

Таблиця Б.4. Граничні відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного, мм [20]

Товщина прокату	Граничні відхилення по товщині прокату при його ширині, мм											
	До 1000 включно			Більше 1000 до 1500 включно			Більше 1500 до 2000 включно			Більше 2000 до 2350 включно		
	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ	ВТ	ПТ	НТ
Від 0,35 до 0,40 включно	± 0,02	± 0,03	± 0,04	± 0,03	± 0,04	± 0,05	–	–	–	–	–	–
Від 0,40 до 0,50 включно	± 0,03	± 0,04	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,06	–	–	–	–	–	–
Від 0,50 до 0,65 включно	± 0,04	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,06	± 0,07	± 0,09	–	–	–
Від 0,65 до 0,90 включно	± 0,04	± 0,06	± 0,08	± 0,05	± 0,06	± 0,08	± 0,07	± 0,09	± 0,11	–	–	–
Від 0,90 до 1,20 включно	± 0,05	± 0,08	± 0,10	± 0,06	± 0,09	± 0,11	± 0,07	± 0,10	± 0,13	–	–	–
Від 1,20 до 1,40 включно	± 0,06	± 0,09	± 0,10	± 0,07	± 0,10	± 0,12	± 0,08	± 0,12	± 0,15	–	–	–
Від 1,40 до 1,50 включно	± 0,07	± 0,10	± 0,12	± 0,08	± 0,11	± 0,13	± 0,09	± 0,13	± 0,16	–	–	–
Від 1,50 до 1,80 включно	± 0,08	± 0,12	± 0,14	± 0,09	± 0,12	± 0,15	± 0,10	± 0,14	± 0,17	± 0,14	± 0,17	± 0,21
Від 1,80 до 2,00 включно	± 0,08	± 0,12	± 0,15	± 0,09	± 0,13	± 0,16	± 0,10	± 0,15	± 0,18	± 0,15	± 0,18	± 0,22
Від 2,00 до 2,50 включно	± 0,10	± 0,14	± 0,17	± 0,11	± 0,15	± 0,18	± 0,12	± 0,18	± 0,20	± 0,18	± 0,20	± 0,23
Від 2,50 до 3,00 включно	± 0,12	± 0,16	± 0,18	± 0,13	± 0,16	± 0,19	± 0,14	± 0,19	± 0,22	± 0,19	± 0,21	± 0,25
Від 3,00 до 3,20 включно	± 0,13	± 0,17	± 0,19	± 0,14	± 0,18	± 0,21	± 0,18	± 0,20	± 0,23	± 0,20	± 0,22	± 0,27
Від 3,20 до 4,00 включно	± 0,14	± 0,18	± 0,20	± 0,16	± 0,19	± 0,22	± 0,19	± 0,21	± 0,24	± 0,21	± 0,23	± 0,28
Від 4,00 до 5,00 включно	± 0,16	± 0,19	± 0,20	± 0,18	± 0,20	± 0,23	± 0,20	± 0,22	± 0,25	± 0,23	± 0,25	± 0,30

*Примітки:* 1) ВТ – висока точність; ПТ – підвищена точність; НТ – нормальна точність.  
2) За вимогою споживача допускається виготовлення прокату з мінусовими допустимими граничними відхиленнями, які дорівнюють сумі граничних відхилень.

## ДОДАТОК В. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу

*Таблиця В.1.* Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу за

ГОСТ 34233.1–2017 [18]

Матеріал	Модуль поздовжньої пружності $E \cdot 10^{-5}$ , МПа, при температурі, °С													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Вуглецеві і низьколеговані сталі	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	–	–	–	–	–
Теплотривкі і корозійно-стійкі хромисті сталі	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	–	–
Жароміцні і жаростійкі аустенітні сталі і сплави на залізнікелевій основі	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32
Алюміній і його сплави	0,72	0,69	0,67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Мідь	1,24	1,21	1,19	1,17	1,15	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сплави на основі міді	1,05	1,02	1,00	0,98	0,97	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Титан	1,15	1,10	1,06	1,01	0,95	0,88	–	–	–	–	–	–	–	–
Сплави титану	1,10	1,06	1,02	0,96	0,90	0,83	0,76	0,70	–	–	–	–	–	–

## ДОДАТОК Г

### Коефіцієнти лінійного розширення

Таблиця Г.1. Коефіцієнти лінійного розширення за ГОСТ 34233.1 [18]

Марка матеріалу	Розрахункове значення коефіцієнта лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$ , $1/^\circ\text{C}$ за температури $^\circ\text{C}$				
	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500
Ст3, 10, 20, 20К, 09Г2С, 16ГС, 17ГС, 17Г1С, 10Г2С1, 10Г2, 09Г2	11,6	12,6	13,1	13,6	14,1
12ХМ, 12МХ, 15ХМ, 15Х5М, 15Х5М-У	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0
10Х2М1А-А	12,1	12,7	13,2	13,7	14,0
08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	9,6	13,8	16,0	16,0	16,5
12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 03Х17Н14М3, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 03Х18Н11, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т, 10Х14Г14Н4Т	16,6	17,0	18,0	18,0	18,0
03Х21Н21М4ГБ	14,9	15,7	16,6	17,3	17,5
06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	15,3	15,9	16,5	16,9	17,3
08Х18Г8Н2Т	12,3	13,1	14,4	14,4	15,3
07Х13АГ20	16,5	17,5	18,0	18,5	–
02Х8Н22С6	12,3	13,9	14,9	15,7	16,2
20Х23Н18	15,7	–	16,6	17,3	17,5
А8, А85, АД0М, АД1М, АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, АДМ	24,8	24,8	14,4	14,4	15,3
М2, М3, М3р, Л63, ЛС 59-1, ЛО 62-1, ЛЖМц 59-1-1	16,7	17,5	–	–	–
ВТ1-0, ВТ1-00, ОТ4-0, АТ3	8,8	8,9	9,3	–	–

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1 ДБН Д.2.3–12–99. Технологічні трубопроводи. [Чинний від 2000-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держбуд, 2000. 226 с.

2 Штонда Ю. Н., Барвин А. И., Табунщиков В. Г. Методические указания к расчету на прочность технологических стальных трубопроводов на  $P_u$  до 10 МПа. Северодонецк: ТИ, 2009. 112 с. URL: [https://ohpkaf.at.ua/k\\_raschetu\\_na\\_prochnost\\_tekhnologicheskikh.pdf](https://ohpkaf.at.ua/k_raschetu_na_prochnost_tekhnologicheskikh.pdf).

3 НПАОП 0.00–1.73–14. Правила охорони праці та безпечної експлуатації технологічних трубопроводів. [Чинний від 2014-11-12]. Вид. офіц. Київ: ДНАОП, 2015. URL: [https://dnaop.com/html/54573/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_0.00-1.73-14](https://dnaop.com/html/54573/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-1.73-14).

4 СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2009–07–07]. Вид. офіц. Київ: Міністерство промислової політики України, 2009. 339 с.

5 ДСТУ ГОСТ 30753:2003 Деталі трубопроводів безшовні приварні з вуглецевої і низьколегованої сталі. Відводи крутовигнуті типу 2D ( $R = DN$ ). Конструкція. [Чинний від 2004–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 11 с.

6 ДСТУ ГОСТ 17375:2003 Деталі трубопроводів безшовні приварні з вуглецевої і низьколегованої сталі. Відводи крутовигнуті типу 3D ( $R = 1,5 DN$ ) (ГОСТ 17375-2001 (ИСО 3419-81), IDT). [Чинний від 2008–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 13 с.

7 ДСТУ ГОСТ 17378:2003. Деталі трубопроводів безшовні приварні з вуглецевої і низьколегованої сталі. Переходи. Конструкція. (ИСО 3419-81, IDT). [Чинний від 2004–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 19 с.

8 ДСТУ ГОСТ 17376:2003. Деталі трубопроводів безшовні приварні з вуглецевої і низьколегованої сталі. Трійники. Конструкція. (ГОСТ 17376-

2001 (ИСО 3419-81, IDT). [Чинний від 2004–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 15 с.

9 ДСТУ ГОСТ 17379:2003. Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Заглушки эллиптические. Конструкция (ГОСТ 17379-2001, ИСО 3419-81, IDT). [Чинний від 2004–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 9 с.

10 ДСТУ-Н Б А.3.1-27:2014. Настанова щодо виготовлення, монтажу та випробування технологічних трубопроводів, що працюють під тиском до 10 МПа. [Чинний від 2015–10–01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015. 111 с.

11 ДСТУ ISO 7268:2009. Трубопроводы та елементи трубопроводів. Визначення номінального тиску (ISO 7268:1983, IDT). [Чинний від 2011–07–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 6 с.

12 ГОСТ 26349–84. Соединение трубопроводов и арматура. Давления номинальные (условные). Ряды. [Чинний від 1986–01–01]. Вид. офіц. М.: Издательство стандартов, 1985. 2 с.

13 ДСТУ ГОСТ 28338:2008. Соединения трубопроводов и арматура. Проходы условные (размеры номинальные). Ряды. [Чинний від 2008–07–01]. Вид. офіц. Київ: ДНАОП, 2008. URL: [https://dnaop.com/html/62149/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2\\_28338\\_2008](https://dnaop.com/html/62149/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_28338_2008).

14 Пособие по расчёту на прочность технологических стальных трубопроводов на  $P_y$  до 10 МПа. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 32 с.

15 Михалев М. Ф., Третьяков Н. П., Мильченко А. И., Злобин В. В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи: уч. пособ. для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1984. 301 с.

16 Поникаров И. И., Поникаров С. И., Рачковский С. В. Расчёты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки (примеры и задачи): уч. пособ. М.: Альфа-М, 2008. 720 с.

17 Андреев І. А., Зубрій О. Г. Конструювання і розрахунок апаратів високого тиску: навч. Посібник. Київ: ІЗМН, 1999. 144 с.

18 ГОСТ 34233.1–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 30 с.

19 ГОСТ 19903–2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2016-09-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2016. 12 с.

20 ДСТУ 8971:2019. Прокат листовий холоднокатаний. Основні параметри і розміри [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 8 с.