

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

**Ігор АНДРЕЄВ**

**КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК  
КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

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

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент: Олександр Сокольський, д-р техн. наук, доц.,  
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 № 2 від 30.09.2022 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 8 від 01.09.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

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

## **КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

Конструювання і розрахунок кожухотрубних теплообмінників [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 140 с.

Посібник містить конструкції кожухотрубних теплообмінників, теорію, алгоритми і приклади розрахунків елементів кожухотрубних теплообмінних апаратів. Наведені необхідні довідкові дані для виконання розрахунків.

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

© Ігор Андреев, 2022  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
1 КОНСТРУКЦІЇ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ .....	14
1.1 Стандартні сталеві кожухотрубні теплообмінники.....	14
1.1.1 Апарат з нерухомими трубними решітками (Н) .....	15
1.1.2 Апарат з компенсатором на кожусі (К) .....	16
1.1.3 Апарат з розширювачем на кожусі (Р) .....	17
1.1.4 Апарат з U-подібними трубами (У) .....	18
1.1.5 Апарат з плаваючою головою (П) .....	20
1.1.6 Апарат з плаваючою головою і компенсатором на ній (ПК) ....	22
1.2 Кріплення трубних решіток до кожуху апарата .....	23
1.3 Розміщення труб в трубних решітках .....	26
1.4 З'єднання труб з трубними решітками .....	28
1.5 Відбійники .....	31
1.6 Багатоходові теплообмінники .....	32
1.7 Поперечні перегородки в кожухотрубних теплообмінниках .....	35
1.8 Елементи кожухотрубчатих теплообмінників .....	38
1.9 Шляхи інтенсифікації теплообміну в кожухотрубних теплообмінниках .....	40
2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ .....	45
2.1 Розрахунок трубних решіток .....	45
2.2 Розрахунок міцності і стійкості кожуха .....	54
2.3 Розрахунок труб на міцність, стійкість та жорсткість та розрахунок кріплення труб у решітці .....	57
2.4 Алгоритм і приклад розрахунку елементів кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками, компенсатором або розширювачем на кожусі .....	61

3	ТЕМПЕРАТУРНІ КОМПЕНСАТОРИ .....	77
3.1	Конструкції хвильових компенсаторів .....	77
3.1.1	Лінзові компенсатори .....	77
3.1.2	Сильфонні компенсатори .....	83
3.1.3	Компенсатори інших типів .....	84
3.2	Розрахунок лінзових і сильфонних компенсаторів .....	85
3.2.1	Розрахунок напружень у компенсаторі .....	87
3.2.2	Визначення коефіцієнтів жорсткості компенсатора .....	89
3.2.3	Розрахунок на міцність в умовах статичного навантаження внутрішнім (зовнішнім) тиском .....	89
3.2.4	Розрахунок компенсатора на малоциклову міцність .....	90
3.2.5	Алгоритм розрахунку лінзових і сильфонних компенсаторів на міцність, жорсткість і малоциклову міцність і приклад розрахунку .....	92
	ДОДАТКИ.....	103
	Додаток А. Коефіцієнти лінійного розширення .....	103
	Додаток Б. Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити .....	104
	Додаток В. Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб .....	104
	Додаток Г. Допустимі напруження сталей .....	105
	Додаток Д. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу .....	111
	Додаток Е. Розрахункові значення коефіцієнтів для визначення напруження й жорсткості .....	112
	Додаток Ж. Коефіцієнти міцності зварних швів .....	136
	Додаток И. Розрахункові значення тимчасового опору (границі міцності) .....	137
	Додаток К. Мінімальні значення умовної граници плинності .....	138
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ...	139

## ВСТУП

У навчальному посібнику містяться теоретичні відомості основ конструювання і інженерних розрахунків, сучасні стандартні розрахункові формули, питання для самоконтролю, приклади розрахунку, а також довідковий матеріал для забезпечення проведення розрахунків кожухотрубних теплообмінників. Розроблений алгоритм розрахунку і наведений приклад допоможуть студентам при виконанні курсових і дипломних проєктів.

Розглянутий у навчальному посібнику матеріал відповідає освітньому компоненту "Розрахунки і конструювання обладнання-2. Розрахунок і конструювання елементів обладнання галузі", який відіграє важливу роль при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю "Галузеве машинобудування".

Основні стандартизовані терміни і визначення, вимоги до конструювання і виготовлення обладнання та окремих елементів, класифікація сталей і чавунів та їх застосування, методики визначення допустимих напружень і нормативних параметрів, основи теорії розрахунку, а також розрахунки на міцність і стійкість елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під дією внутрішнього і зовнішнього тисків наведені у попередніх роботах [1–8].

## ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$A$  – ширина наплавлення або зварного з'єднання з боку трубної решітки, м;

$A_a$  – змінна величина для розрахунку допустимих амплітуд напружень, МПа;

$a$  – внутрішній радіус кожуха, м;

$a_{ш}$  – розмір кутового зварного шва, м;

$a_1$  – відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби, м;

$B$  – глибина наплавлення або виступу оброблення кромки у трубній решітці, м;

$B_a$  – змінна величина для розрахунку допустимих амплітуд напружень, МПа;

$b$  – відстань від відбійника до першої перегородки, м;

$b_1$  – ширина тарілки фланця кожуха, м;

$b_2$  – ширина тарілки фланця камери, м;

$C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;

$C_K$  – розрахунковий додаток до товщини стінки кожуха, м;

$C_W$  – коефіцієнт жорсткості однієї хвилі компенсатора під час осьового розтягування;

$c$  – сума додатків до розрахункової товщини компенсатора, м;

$D$  – внутрішній діаметр кожуха, м;

$D_E$  – діаметр кола, вписаного в максимальну безтрубну площу, м;

$D_з$  – зовнішній діаметр кожуха, м;

$D_л$  – зовнішній діаметр лінзового компенсатора, м;

$D_H$  – зовнішній діаметр фланця, м;

$D_n$  – зовнішній діаметр западини хвилі компенсатора, м;

$D_c$  – зовнішній діаметр циліндричної частини сільфонного компенсатора (компенсаційного пристрою), м;

$D_y$  – умовний діаметр, м;

$D_w$  – внутрішній діаметр штуцера, м;

$d$  – розрахунковий діаметр западини хвилі компенсатора, м;

$d_0$  – діаметр отворів в решітці, м;

$d_T$  – зовнішній діаметр труби, м;

$E$  – модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури, МПа;

$E_1$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця кожуха, МПа;  
 $E_2$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця камери, МПа;  
 $E_D$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу камери, МПа;  
 $E_K$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу кожуха, МПа;  
 $E_p$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу решітки, МПа;  
 $E_{p1}$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу 1-ї решітки, якщо модулі пружності двох трубних решіток відрізняються один від одного, МПа;

$E_{p2}$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу 2-ї решітки, якщо модулі пружності двох трубних решіток відрізняються один від одного, МПа;

$E_T$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу труб, МПа;

$F$  – осьова сила, яка діє на кожух, МН;

$h$  – висота з'єднувального виступу (хвилі компенсатора), м;

$h_1$  – товщина тарілки фланця кожуха, м;

$h_2$  – товщина тарілки фланця камери, м;

$h_e$  – відстань від внутрішньої поверхні корпусу до відбійника, м;

$i$  – кількість труб;

$J_T$  – момент інерції поперечного перерізу труби, м<sup>4</sup>;

$K$  – катет кутового шва, м;

$K_1$  – коефіцієнт жорсткості втулки фланця кожуха при вигині, Н·м;

$K_2$  – коефіцієнт жорсткості втулки фланця камери при вигині, Н·м

$K_p$  – коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії тиску;

$K_p^*$  – відношення осьового переміщення компенсатора або розширювача при дії тиску до осьового переміщення країв корпусу міжтрубного простору без компенсатора та розширювача від дії тиску

$K_q$  – коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії осьової сили;

$K_q^*$  – відношення осьового переміщення компенсатора або розширювача при дії сили, що розтягує, до осьового переміщення країв корпусу міжтрубного простору без компенсатора і розширювача від дії тієї ж сили;

$K_T$  – коефіцієнт умов роботи при розрахунку труб на стійкість;

$K_y$  – модуль пружності основи (системи труб), Н/м<sup>3</sup>;

$K_\phi$  – коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при вигині Н·м;

$K_{\phi 1}$  – коефіцієнт жорсткості фланця кожуха при вигині, Н·м;

$K_{\phi 2}$  – коефіцієнт жорсткості фланця камери при вигині, Н·м;

$K_w$  – катет кутового шва, м;

$K_\sigma$  – ефективний коефіцієнт концентрації;

$L_k$  – ширина компенсатора (компенсаційного пристрою), м;

$l$  – половина довжини труби теплообмінного апарата або апарата повітряного охолодження, м;

$l$  – ширина хвилі компенсатора, м;

$l_{1R}$  – максимальний проліт труби між решіткою та перегородкою, м;

$l_{2R}$  – максимальний проліт труби між перегородками, м;

$l_B$  – глибина розвальцювання труб, м;

$l_R$  – розрахункова довжина труб при поздовжньому вигині, м.

$l_{пр}$  – зведена довжина труби, що використовується при розрахунку прогину труб і згинального моменту, що діє на трубу, м;

$M_a$  – згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої частини трубної решітки, МН·м/м;

$M_{II}$  – згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки, МН·м/м;



$M_T$  – згинальний момент, що діє на трубу, МН·м;  
 $m_1$  – коефіцієнт впливу тиску на вигин 1-го фланця, м<sup>2</sup>;  
 $m_2$  – коефіцієнт впливу тиску на вигин 2-го фланця, м<sup>2</sup>;  
 $m_n$  – відносна характеристика безтрубного краю трубної решітки;  
 $m_{cp}$  – коефіцієнт впливу тиску на поздовжню деформацію труб;  
 $N$  – число циклів навантаження за розрахунковий термін служби;  
 $N_T$  – осьова сила, яка діє на трубу, МН;  
 $[N]_{TP}$  – допустиме навантаження на з'єднання труби з решіткою способом розвальцювання, МН;  
 $n_N$  – коефіцієнт запасу міцності за кількістю циклів;  
 $n_\sigma$  – коефіцієнт запасу міцності за напруженнями;  
 $p_0$  – зведений тиск на решітку, МПа;  
 $p_1$  – зведений тиск на фланці, МПа;  
 $p_R$  – внутрішній або зовнішній розрахунковий тиск, МПа;  
 $p_M$  – розрахунковий тиск у міжтрубному просторі, МПа;  
 $p_p$  – розрахунковий тиск, що діє на решітку кожухотрубного теплообмінного апарата, МПа;  
 $p_T$  – розрахунковий тиск у трубному просторі, МПа;  
 $R$  – радіус проточки, м;  
 $R$  – внутрішній радіус тороїдного переходу у верхній і нижній частинах компенсатора, м;  
 $R_1$  – радіус центру ваги тарілки фланця кожуха, м;  
 $R_2$  – радіус центру ваги тарілки фланця камери, м;  
 $R_{(CW)}$  – розрахунковий коефіцієнт для визначення жорсткості однієї хвилі компенсатора під час переміщення  $W = 1,0$  мм ( $10^{-3}$  м);  
 $R_{(P)}$  – розрахунковий коефіцієнт для визначення напруження в умовах навантаження тиском  $p_R = 0,1$  МПа;

$R_{(W)}$  – розрахунковий коефіцієнт для визначення напруження в умовах навантаження осьовим переміщенням  $W = 1,0$  мм ( $10^{-3}$  м);

$r$  – радіус тороїдного переходу у верхній і нижній частинах компенсатора, м;

$Q_a$  – розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує, МН/м;

$Q_K$  – розподілене зусилля по периметру кожуха, МН/м;

$Q_{\Pi}$  – розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує, МН/м;

$S_1$  – товщина стінки кожуха в місці з'єднання з трубною решіткою або фланцем або товщина з'єднувального виступу, м;

$S_2$  – товщина стінки камери в місці з'єднання з трубною решіткою або фланцем, м;

$S_{1p}$  – товщина решітки у зоні кільцевої канавки, м;

$S_K$  – товщина стінки кожуха, м;

$S_p$  – товщина трубної решітки, м;

$S_{p1}$  – товщина 1-ї решітки, якщо дві трубні решітки відрізняються одна від одної, м;

$S_{p2}$  – товщина 2-ї решітки, якщо дві трубні решітки відрізняються одна від одної, м;

$S_c$  – виконавча товщина циліндричної частини сильфонного компенсатора (компенсаційного пристрою), м;

$S_T$  – товщина стінки труби, м;

$S_{\Sigma}$  – еквівалентна товщина втулки фланця, м;

$s$  – виконавча товщина стінки компенсатора, м;

$T_1, T_2, T_3$  – коефіцієнти, що враховують вплив безтрубного краю та вплив труб;

$t$  – безрозмірний параметр;

$t_R$  – розрахункова температура, °C;

$t_k$  – приєднувальна довжина циліндрової частини компенсатора, м;

$t_0$  – монтажна температура, 1/°C ( $t_0 = 20^\circ\text{C}$ );

$t_K$  – середня температура стінки кожуха, 1/°C;

$t_p$  – крок розташування отворів в решітці, м.

$t_T$  – середня температура стінок труб, 1/°C;

$W$  – осьове переміщення однієї хвилі компенсатора, м;

$z_l$  – кількість лінз у компенсаторі;

$\alpha_K$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кожуха при температурі  $t_K$ , 1/°C;

$\alpha_T$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб при температурі  $t_T$ , 1/°C;

$\beta$  – коефіцієнт системи решітка – труби, 1/м;

$\beta_1$  – коефіцієнт системи кожух – решітка, 1/м;

$\beta_2$  – коефіцієнт системи обичайка – фланець камери, 1/м;

$\delta$  – висота зварного шва в місці приварювання труби до решітки, м;

$\delta_{ком}$  – компенсувальна здатність компенсатора, м;

$\delta_l$  – компенсувальна здатність однієї лінзи, м;

$\eta_T$  – коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору;

$\eta_M$  – коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору;

$\lambda$  – коефіцієнт;

$\xi$  – коефіцієнт, що враховує тип зварного шва;

$\rho$  – зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха;

$\rho_{ш}$  – коефіцієнт, що враховує обробку зварного шва;

$\rho_I$  – зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання;

$\sigma_{1T}$  – мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку, МПа;

$\sigma_{2T}$  – мембранне напруження в трубах в окружному напрямку, МПа;

$\sigma_{AP}$  – амплітуда максимального еквівалентного напруження від тиску, МПа;

$\sigma_{AW}$  – амплітуда максимального еквівалентного напруження від переміщення однієї хвилі, МПа;

$\sigma_{c0}$  – границя витривалості при вигині для  $10^6$  циклів, МПа;

$\sigma_{MX}$  – мембранне напруження в кожусі в місці приєднання до решітки у меридіанному напрямку, МПа;

$\sigma_{um}$  – середнє колове напруження, МПа;

$\sigma_{V(P)}$  – максимальні еквівалентні напруження, зумовлені дією внутрішнього (зовнішнього) тиску, МПа;

$\sigma_{V(W)}$  – максимальні еквівалентні напруження під час осьового переміщення однієї хвилі компенсатора, МПа;

$\sigma_{\epsilon}$  – тимчасовий опір (границя міцності) за розрахункової температури, МПа;

$\sigma_T$  – границя плинності за розрахункової температури, МПа;

$\sigma_B^{20}$  – мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за температури 20 °С;

$\sigma_T^{20}$  – границя плинності за температури 20 °С, МПа;

$[\sigma]$  – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_{AP}$  – допустима амплітуда напружень для кількості циклів  $N_P$ , МПа;

$[\sigma]_{AW}$  – допустима амплітуда напружень для кількості циклів  $N_W$ , МПа;

$[\sigma]_K$  – допустиме напруження для матеріалу кожуха теплообмінного апарата або кришки апарата повітряного охолодження, МПа.

$[\sigma]_P$  – допустиме напруження для матеріалу решітки, МПа;

$[\sigma]_T$  – допустиме напруження матеріалу труб, МПа;

$\tau$  – напруження зрізу в шві приварювання труби до решітки, МПа;

$\tau_{p1}$  – дотичні напруження в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом, МПа;

$\tau_{p2}$  – дотичні напруження в перфорованій частині трубної решітки, МПа;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварного шва;

$\varphi_0$  – коефіцієнт ослаблення решітки отворами;

$\varphi_p$  – коефіцієнт ослаблення решіток кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками та компенсатором на кожусі;

$\varphi_C$  – коефіцієнт міцності шва приварювання труби до решітки;

$\varphi_T$  – коефіцієнт зменшення напруження при поздовжньому вигині;

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  – коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб;

$\psi_0$  – коефіцієнт жорсткості перфорованої плити.

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

# 1 КОНСТРУКЦІЇ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ

Найпоширенішим типом теплообмінників в хімічній промисловості є кожухотрубні апарати, які складають біля 80% від всіх теплообмінників.

Перевагою кожухотрубних теплообмінників є простота виготовлення, надійність в експлуатації і універсальність (можуть використовуватися для здійснення теплообміну між газами, паром, рідинами у будь-якій комбінації теплоносіїв і у широкому діапазоні тисків і температур.

## 1.1 Стандартні сталеві кожухотрубні теплообмінники

Наведені стандартні сталеві кожухотрубні теплообмінники відповідають ГОСТ 34233.7 [9].

В хімічній промисловості близько 75% кожухотрубних теплообмінників – це апарати типу Н, 15% кожухотрубних теплообмінників – це апарати типу К.

Мідні кожухотрубні теплообмінники виготовляються 2 типів: Н і К.

Розміри стандартних кожухотрубних теплообмінників наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.1. Розміри стандартних кожухотрубних теплообмінників [10]

Діаметр кожуха, мм		Мінімальна товщина стінок із сталі, мм			
		вуглецевої і низьколегованої, двохшарової		високолегованої хромонікелевої	
зовнішній	внутрішній	для апаратів типу			
		Н і К	П і У	Н і К	П і У
159, 219, 273, 325, 426, 530	400, 500	5	5	3	3
630	600	6	6	4	4
–	700, 800	6	8	4	6
–	900, 1000	6	10	6	8
–	1200	6	12	6	10
–	1400 і більше	6	14	6	12

### 1.1.1 Апарат з нерухомими трубними решітками (Н)

Перевагою теплообмінників типу Н (рис. 1.1) є простота і мала вартість.

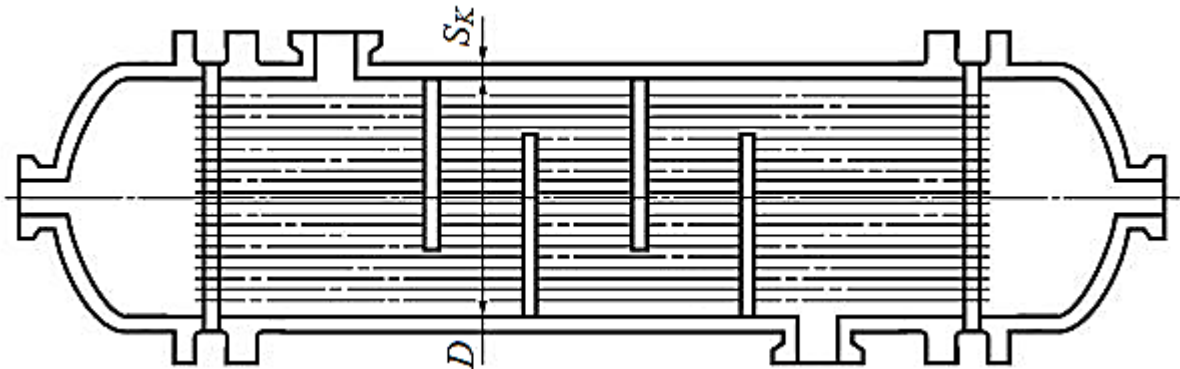


Рисунок 1.1 – Апарат з нерухомими трубними решітками

Недоліки теплообмінників типу Н:

1. Зовнішня поверхня труб не може бути очищена механічним способом від забруднень, накипу і ін.

Шар відкладень має малий коефіцієнт теплопередачі  $K$ , що погіршує теплопередачу в апараті.

2. Галузь застосування теплообмінників обмежена виникненням в кожусі і трубах апарата температурних напружень. Різниця температурних подовжень кожуха і труб збільшується, коли кожух і труби виконані з матеріалів, що мають різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Напруження, які виникають при цьому, разом з напруженнями від тиску середовища в апараті, можуть сприяти появі деформації апарата і, навіть, його руйнуванню.

Тому, теплообмінники типу Н використовують при різниці температур кожуха і труб менше  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для виключення значних температурних напружень під час пуску апарата типу Н спочатку направляють теплоносій у міжтрубний простір для виравнювання температур кожуха і труб, а потім вводять середовище у труби. Інакше буде мати місце різка зміна температури труб по відношенню до температури кожуха.

Якщо розрахункова різниця температур кожуха і труб більше 50 °С, тоді застосовують кожухотрубні теплообмінники конструкцій К, ПК, Р (часткова компенсація температурних напружень) або У, П (повна компенсація температурних напружень).

### 1.1.2 Апарат з компенсатором на кожусі (К)

Компенсатори використовують для часткової компенсації температурних деформацій (рис. 1.2).

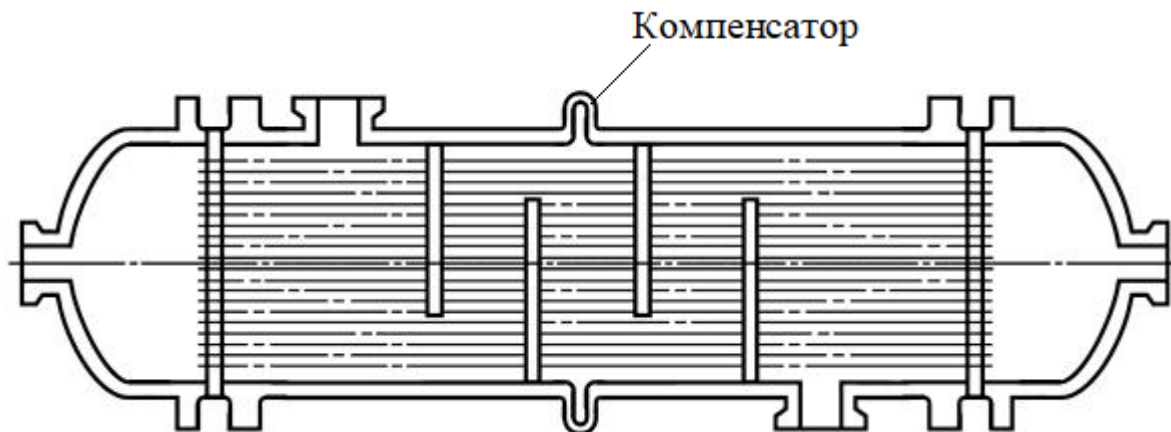


Рисунок 1.2 – Апарат з компенсатором на кожусі

У кожухотрубних теплообмінниках типу К між двома частинами кожуха вварюють компенсатор та обтічник (рис. 1.3).

Обтічник використовують для зменшення гідравлічного опору міжтрубного простору і приварюють до кожуха з боку входу теплоносія у міжтрубний простір.



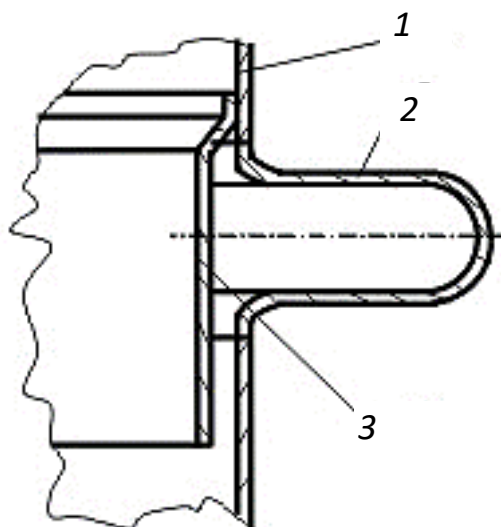


Рисунок 1.3 – Лінзовий компенсатор: 1 – кожух; 2 – компенсатор; 3 – обтічник

Найчастіше в апаратах типу К використовують одно- і багатоелементні лінзові компенсатори, які виготовляють обкатуванням з коротких циліндричних обичайок.

### 1.1.3 Апарат з розширювачем на кожусі (Р)

Теплообмінник з розширювачем на кожусі (рис. 1.4) забезпечує часткову компенсацію температурного розширення за рахунок гнучких елементів у кожусі.

Перевагою цих теплообмінників є ефективний теплообмін внаслідок виключення застійних зон у міжтрубному просторі. Для кожухотрубних теплообмінників характерно утворення таких зон поблизу трубних решіток через те, що штуцери вводу і виводу теплоносіїв розташовані на деякій відстані від решіток. У теплообміннику з розширювачем на кожусі передбачений розподільник, який забезпечує рівномірний розподіл теплоносія у міжтрубному просторі.

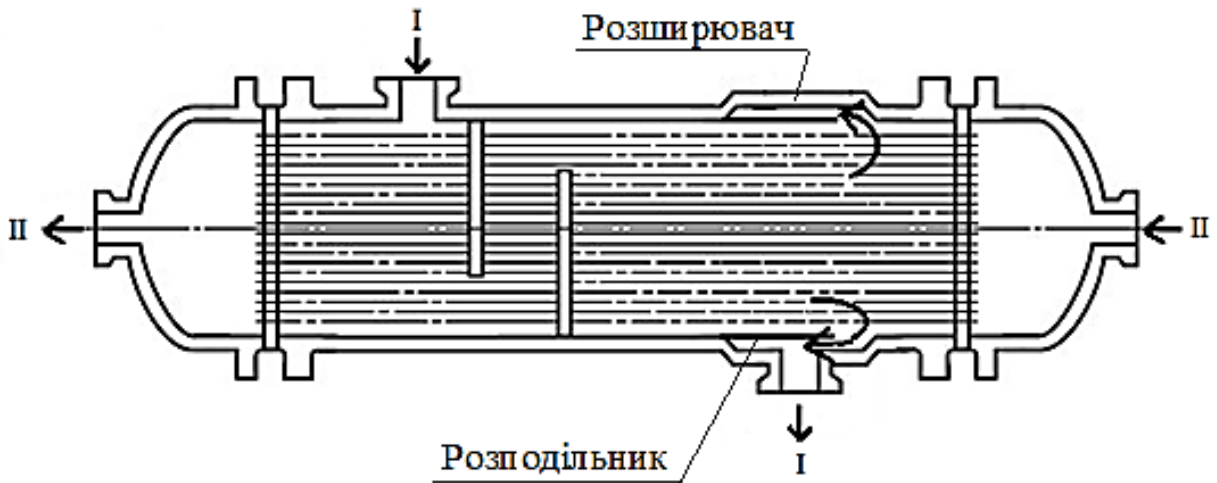


Рисунок 1.4 – Апарат з розширювачем на кожусі

Застосування апарата з розширювачем на кожусі обмежено тиском 2,5 МПа.

#### 1.1.4 Апарат з U-подібними трубами (У)

В цих теплообмінниках забезпечується вільне подовження труб, що виключає можливість появи температурних напружень через різницю температур труб і корпусу (рис. 1.5).

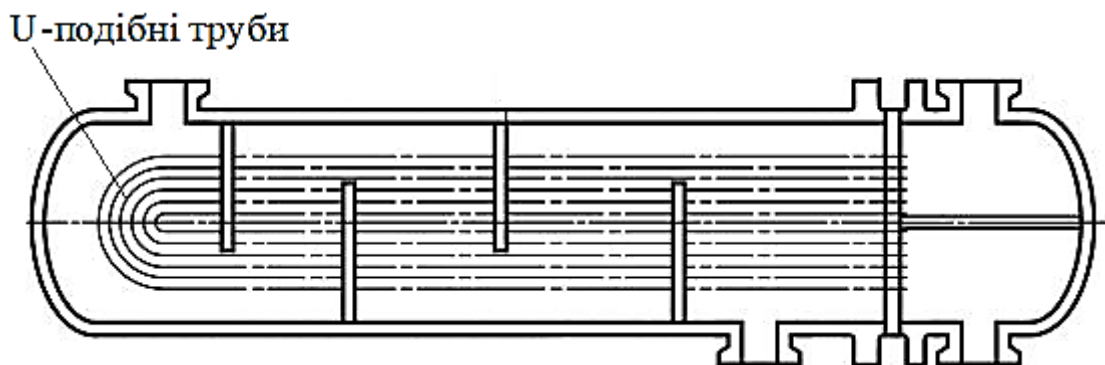


Рисунок 1.5 – Апарат з U-подібними трубами

Трубна решітка і розподільна камера кріпляться до корпусу апарата на фланцях.

Різниця температур стінок труб по ходам не повинна перевищувати 100 °С, інакше можуть виникнути небезпечні температурні напруження у трубній решітці.

Переваги теплообмінника з U-подібними трубами:

1. Відсутнє роз'ємне з'єднання всередині корпусу.
2. Можливе періодичне вилучення пучка труб для очищення зовнішньої поверхні і заміни.

Недоліки теплообмінника з U-подібними трубами:

1. Утруднене механічне очищення внутрішньої поверхні труб, тому у трубний простір належить спрямовувати чисте середовище, яке не спричиняє появи забруднень.

Внутрішню поверхню труб очищають водою, водяною парою, гарячими нафтопродуктами або хімічними реагентами. Використовують також гідромеханічний спосіб: подають у трубний простір потік рідини, що вміщує абразивний матеріал.

2. Зовнішня поверхня також незручна для чистки.
3. Заміна труб, за винятком крайніх, утруднена.
4. Поширений дефект – порушення герметичності вузла з'єднання труб з трубною решіткою через вигин, напруження від маси труб і середовища всередині труб. Тому теплообмінники з діаметром більше 0,8 м для зручності монтажу і зменшення згинаючого моменту мають роликові опори.

5. Відносно погане заповнення кожуха трубами через їх форму.

Труби у теплообмінниках з U-подібними трубами розташовують по вершинам рівнобічних трикутників.

Стандартні теплообмінники з U-подібними трубами виготовляють діаметром від 325 мм до 1400 мм з довжиною труб від 3 м до 9 м. Поверхня теплообмінників становить 10...1200 м<sup>2</sup>, умовний тиск – 1,6...6,4 МПа.

Корпуси теплообмінників з U-подібними трубами виготовляють зі сталей Ст3сп, 16ГС і біметалевими з захисним шаром із сталей 08Х13, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т.

Труби теплообмінників з U-подібними трубами виготовляють зі сталей 10, 20, Х8, 08Х13, 08Х22Н6Т, 08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т, а також з латуней і алюмінієвих сплавів.

Трубні решітки теплообмінників з U-подібними трубами виготовляють із сталей 16ГС, 15Х5М, 12Х18Н10Т або біметалевими з наплавленням шару латуні товщиною біля 10 мм або з високолегованого хромонікелевого сплаву.

Теплообмінники з U-подібними трубами є двоходовими по трубному простору.

Кожна труба може вільно подовжуватись незалежно від кожуху і сусідніх труб.

### 1.1.5. Апарат з плаваючою головкою (П)

Трубчатий пучок з боку плаваючої головки не зв'язаний з корпусом і вільно змінює довжину при зміні температури труб (рис. 1.6). Це усуває температурні напруження в конструкції апарата.

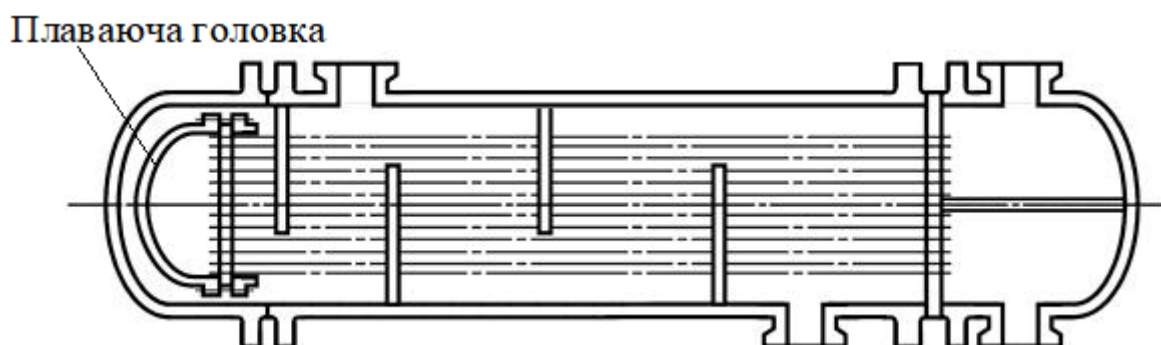


Рисунок 1.6 – Апарат з плаваючою головкою

Температурні напруження також можуть виникати у трубчатому пучку через різницю температур самих труб. Так, у багатоходових теплообмінниках діаметром більше 1 м при значній різниці температур входу і виходу середовища в трубчатому пучку рухому решітку виконують розбірною по діаметру, що зменшує температурні напруження у трубах (рис. 1.7).

Трубний пучок опирається на поперечні перегородки. Найближча до плаваючої головки перегородка має товщину 16–20 мм, інші – меншу товщину.

Інколи для підтримки трубчатого пучка до решіток приварюють опорні ребра.

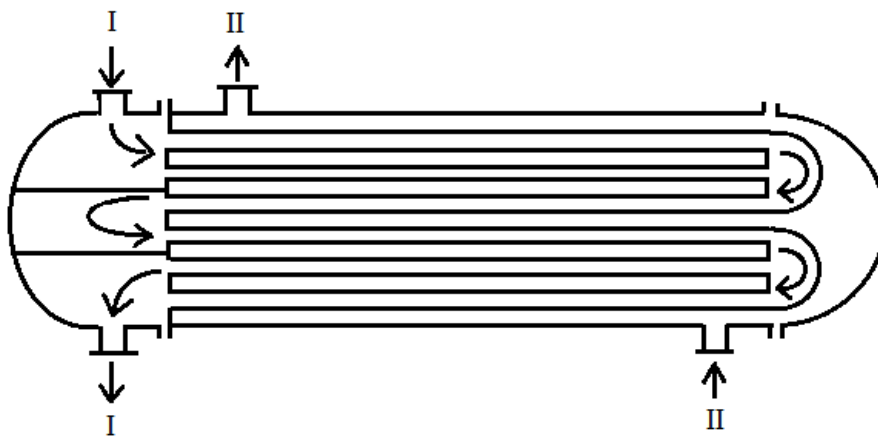


Рисунок 1.7 – Теплообмінник з плаваючою головкою і розбірною трубною решіткою

При діаметрі корпусу більше 1 м і значній масі трубчатого пучка його опирають на каткові опори.

У теплообміннику з рухомою решіткою можна виконувати ремонт, заміну трубчатого пучка, механічну чистку труб зовні.

Недоліком є відносна складність конструкції, більша металоємність з розрахунку на одиницю поверхні теплообміну, недоступність для огляду плаваючої головки при роботі апарата.

### 1.1.6 Апарат з плаваючою головкою і компенсатором на ній (ПК)

Теплообмінники з плаваючою головкою і компенсатором на ній є апаратами напівжорсткої конструкції.

Компенсацію температурних напружень забезпечує гнучкий елемент – компенсатор, який встановлюється на плаваючій голівці (рис. 1.8).

Теплообмінники типу ПК виконують одноходовими з протиточним рухом теплоносіїв і використовують при підвищеному тиску середовищ (5...10 МПа).

Плаваюча головка з компенсатором

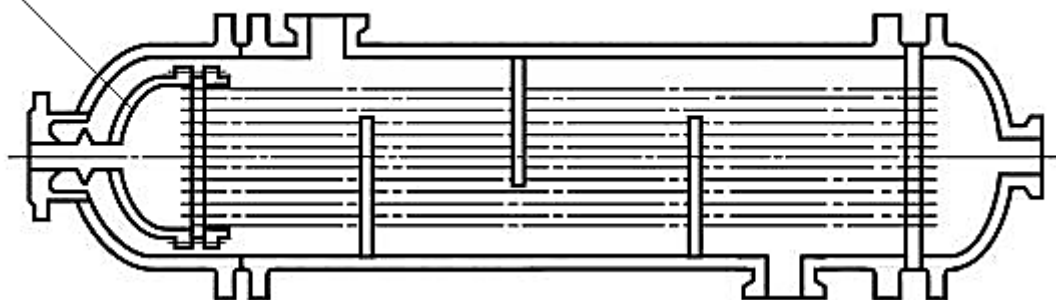


Рисунок 1.8 – Апарат з плаваючою головкою і компенсатором на ній

На кришці теплообмінника є подовжений штуцер, який має компенсатор всередині. Компенсатор встановлюється між плаваючою головкою і штуцером на кришці теплообмінника.

В теплообміннику можна вилучати трубний пучок із корпусу для контролю його стану і механічного очищення труб.

## Питання для самоконтролю до розділу 1.1

1. Обґрунтувати переваги кожухотрубних теплообмінників.
2. Навести стандартні кожухотрубні теплообмінники.
3. Навести відмінності, переваги і недоліки теплообмінників залежно від типу.
4. Які типи кожухотрубних теплообмінників забезпечують компенсацію температурних напружень?

### 1.2 Кріплення трубних решіток до кожуху апарата

Труби жорстко з'єднуються з трубними решітками, а решітки приварюються до кожуху, що виключає можливість взаємних переміщень труб і кожуха (рис. 1.9).

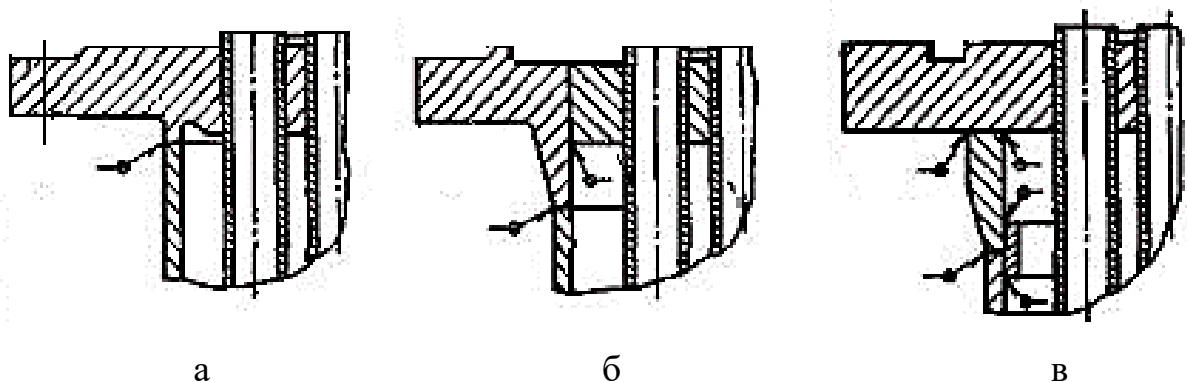


Рисунок 1.9 – Варіанти кріплення трубних решіток до кожуху апарата

Трубні решітки виготовляють найчастіше з листового прокату, інколи вони можуть бути литими. Матеріал трубної решітки повинен бути більш міцним і жорстким, ніж матеріал труб.

При жорсткому з'єднанні трубних решіток з обичайкою при наявності надлишкового тиску в місці з'єднання будуть діяти крайові навантаження, які викликають додаткові напруження. Ці напруження в міру віддалення від місця з'єднання швидко зменшуються.

Для зменшення концентрації напружень рекомендується:

1) обичайку в місці приєднання до решітки виконувати стовщеною у 1,2...1,4 рази на довжині не менше десяти товщин обичайки  $i$ , одночасно, не менше 100 мм (рис. 1.9б, рис. 1.9в);

2) решітку виконувати з галтеллю, радіусом, що дорівнює товщині обичайки, яка приєднується (див. рис. рис. 1.9а).

Ці рекомендації є обов'язковими для апаратів із крихких матеріалів або матеріалів, які зменшують пластичність в робочих умовах.

Варіанти роз'ємних з'єднань трубних решіток з кожухом наведені на рисунку 1.10а і 1.10б.

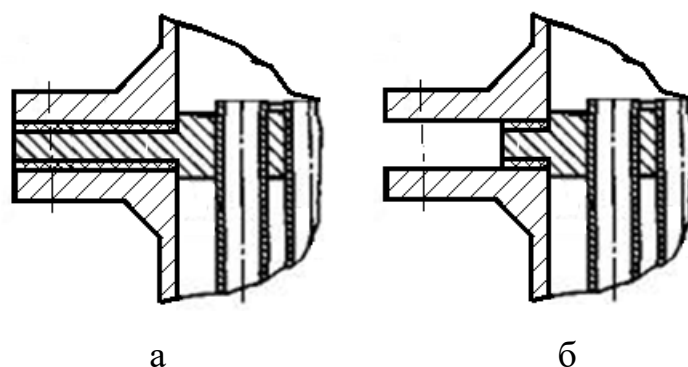
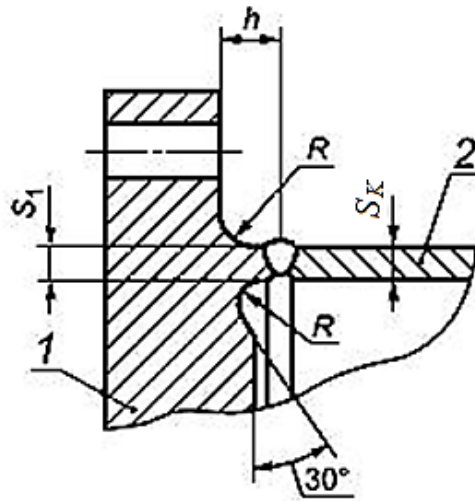


Рисунок 1.10 – Роз'ємні з'єднання трубних решіток з кожухом і кришкою

Вузол з'єднання трубної решітки з обичайкою кожуха апаратів типів Н і К за міждержавним стандартом ГОСТ 31842-2012 (ИСО 16812:2007) [10] повинен відповідати зазначеним на поданих нижче рисунках 1.11–1.13.

Розміри з'єднувального виступу (рис. 1.11) повинні задовольняти умовам: висота з'єднувального виступу  $h \geq S_K$ ; радіус проточки  $R \geq S_K$ ; товщина з'єднувального виступу  $S_I \geq S_K$ .

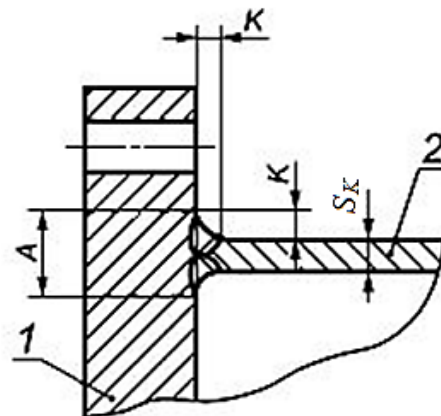




1 – трубна решітка; 2 – обичайка кожуха

Рисунок 1.11 – Вузол з'єднання обичайки кожуха з трубною решіткою, виконаною із поковки з будь-якої марки сталі

Розміри зварного з'єднання (рис. 1.12) повинні задовольняти умовам: ширина наплавлення або зварного з'єднання з боку трубної решітки  $A \geq 2S_K$ ; катет кутового шва  $K \geq 0,5S_K$ .

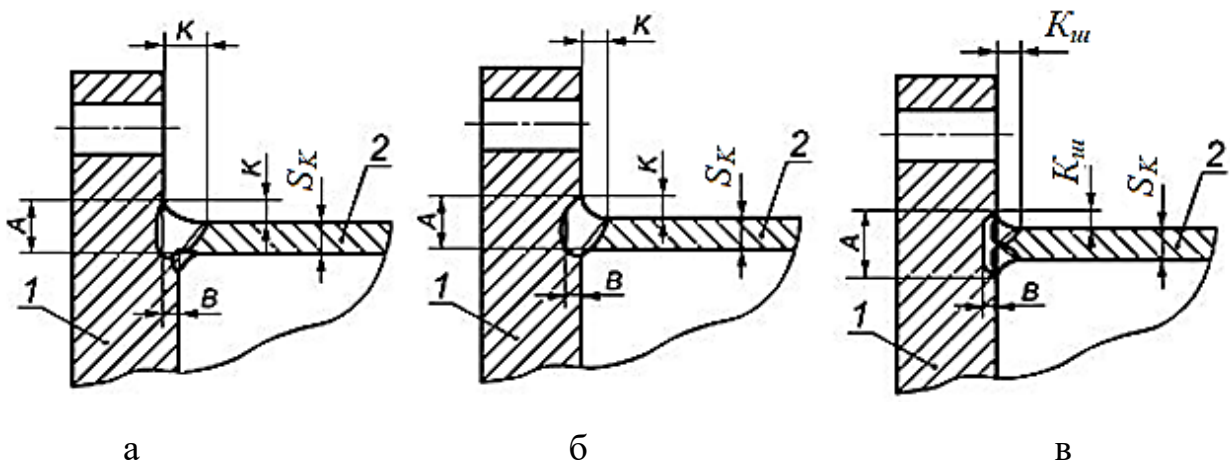


1 – трубна решітка; 2 – обичайка кожуха

Рисунок 1.12 – Вузол з'єднання обичайки кожуха з трубною решіткою, виконаною із поковки з будь-якої марки сталі і листового прокату зі сталі аустенітного класу

Розміри зварного з'єднання (рис. 1.13) повинні задовольняти умовам: ширина наплавлення або зварного з'єднання з боку трубної решітки  $A \geq 2S_K$ ; глибина наплавлення або виступу оброблення кромки у трубній решітці  $B \geq 0,5S_K$ ; катет кутового шва  $K \geq S_K$ ; катет кутового шва  $K_{ш} \geq 0,5S_K$ .

Трубна решітка з'єднання в (рис. 1.13) повинна бути наплавленою до зварювання з обичайкою.



1 – трубна решітка; 2 – обичайка кожуха

Рисунок 1.13 – Вузли з'єднання обичайки кожуха з трубною решіткою, виконаною із поковки або листового прокату з будь-якої марки сталі

### Питання для самоконтролю до розділу 1.2

1. Навести вимоги до матеріалу трубних решіток.
2. Обґрунтувати рекомендації, які забезпечують зменшення концентрацій напружень в місці з'єднання трубних решіток з обичайкою.
3. Навести варіанти кріплення трубних решіток до кожуху апарата.

### 1.3 Розміщення труб в трубних решітках

Труби в трубних решітках розміщують по вершинам рівнобічних шестикутників (застосовують для теплообмінників типу Н, К, П, Р, У, ПК),

по вершинам квадратів (застосовують для теплообмінників типу П, У, ПК) і по концентричних колах (застосовують у кисневих теплообмінниках) (рис. 1.14).

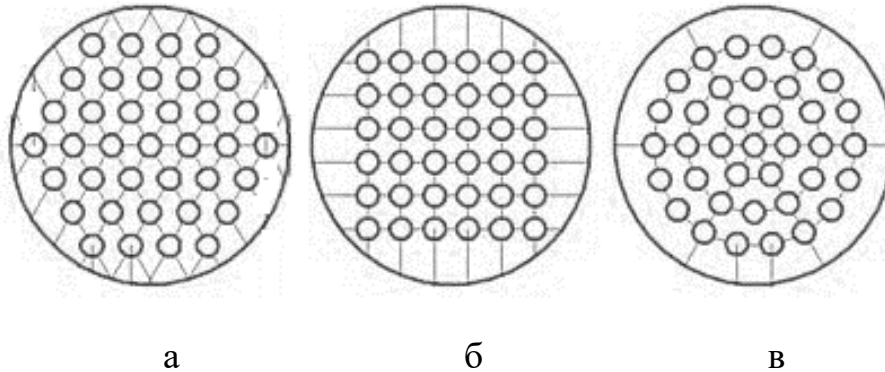


Рисунок 1.14 – Розміщення труб в трубних решітках: а) по вершинам рівнобічних шестикутників; б) по вершинам квадратів; г) по концентричних колах

Розміщення труб по вершинам рівнобічних шестикутників забезпечує найбільш компактне розташування труб в трубній решітці при однаковим кроці.

Розміщення труб по вершинам квадратів дозволяє очищати труби зовні механічним способом.

Зазор між внутрішньою поверхнею кожуха і пучком труб повинен бути мінімальним, інакше значна частина теплоносія може пройти повз основної поверхні теплообміну. Для зменшення кількості теплоносія, що проходить у цьому зазорі встановлюють спеціальні заповнювачі – приварюють поздовжні стрічки або глухі труби, які не проходять крізь трубні решітки.

### Питання для самоконтролю до розділу 1.3

1. Навести варіанти розміщення труб в трубних решітках.

2. Обґрунтувати особливості кожного виду розміщення труб в трубних решітках.

3. Яким чином можна зменшити кількість теплоносія, що проходить у зазорі між внутрішньою поверхнею кожуха і пучком труб?

### 1.4 З'єднання труб з трубними решітками

**1. Розвальцьовування.** Цей спосіб найбільш часто використовується. При цьому труби вставляють в отвори решітки з деяким зазором, а потім обкатують зсередини вальцівкою.

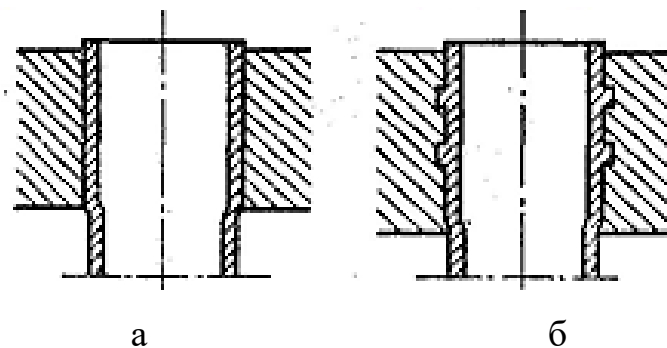


Рисунок 1.15 – Розвальцьовування: а) гладке; б) з проточкою

**2. Зварювання.** Для зменшення концентрацій напружень в місці з'єднання решітку можна виконати з галтеллю (рис. 1.16).

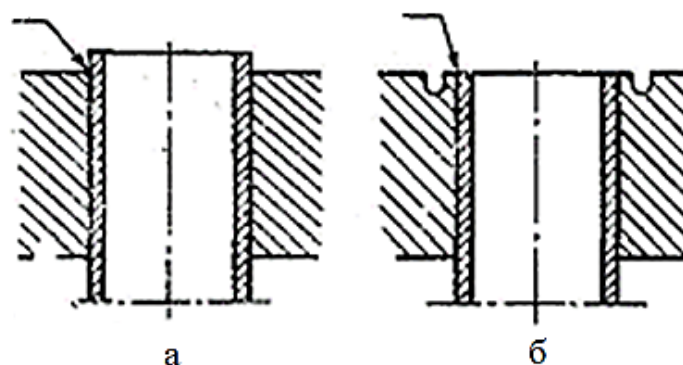


Рисунок 1.16 – Способи кріплення труб зварюванням: а) кутовим швом;  
б) з галтеллю

Кріплення труб зварюванням з розвальцьовуванням застосовується без обмеження по тискам і температурам теплоносіїв. Причому спочатку виконують зварку, а потім розвальцьовування труби.

**3. Пайка.** Застосовується при з'єднанні мідних і латунних труб (рис. 1.17).

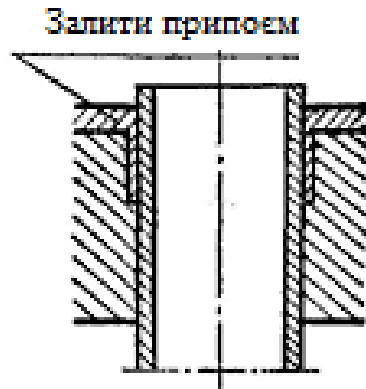


Рисунок 1.17 – Кріплення труб пайкою

**4. Клеєння.** Застосовується для неметалевих матеріалів (рис.1.18).

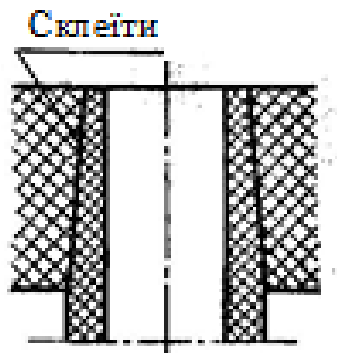


Рисунок 1.18 – Клеєння труб у трубній решітці

**5. Зачеканення.** Застосовується для закріплення чавунних трубок в чавунних або сталевих решітках (рис. 1.19).

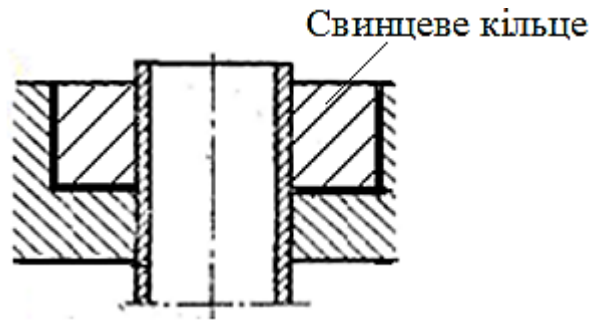


Рисунок 1.19 – Зачеканення труб у трубній решітці

В кільцеву виточку вкладається свинцеве кільце, яке розчekanюється чеканом. Кільце забезпечує міцність і щільність. Недоліком є те, що свинець – дефіцитний і вартісний матеріал.

**6. Кріплення крихких труб з прокладкою.** Застосовується для крихких керамічних і графітових трубок. Натискне кільце притискається гвинтами (шпильками) через прокладку до верхньої частини трубок. Трубки контактують тільки з м'якими прокладками (рис.1.20). Така конструкція складна і громіздка.

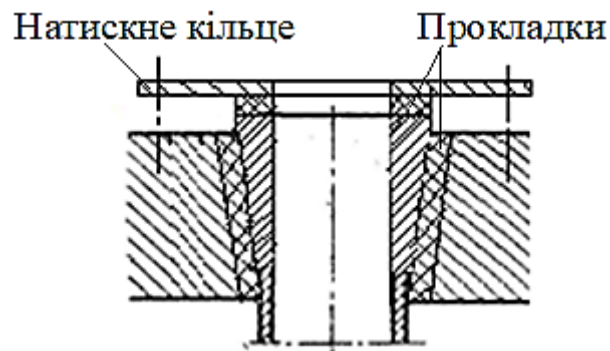


Рисунок 1.20 – Кріплення крихких труб у трубній решітці

#### Питання для самоконтролю до розділу 1.4

1. Навести варіанти з'єднання труб з трубними решітками.

2. Обґрунтувати застосування кожного виду з'єднання труб з трубними решітками.

3. Обґрунтувати особливості кріплення крихких труб у трубній решітці.

### 1.5 Відбійники

При вході середовища в міжтрубний простір часто ставлять відбійники для захисту від місцевого зносу труб, які розташовані проти вхідного штуцера (рис. 1.21).

Відбійник виконують у вигляді круглої або прямокутної пластини.

Розмір відбійника повинен бути не менше внутрішнього діаметра штуцера (звичайно його приймають більшим на 10...20 мм).

Відбійник не повинен створювати зайвий гідравлічний опір, тому відстань  $h_e$  від внутрішньої поверхні корпусу до відбійника повинна задовольняти умові:  $h_e > 0,2D_{ш}$ , де  $D_{ш}$  – внутрішній діаметр штуцера, м.

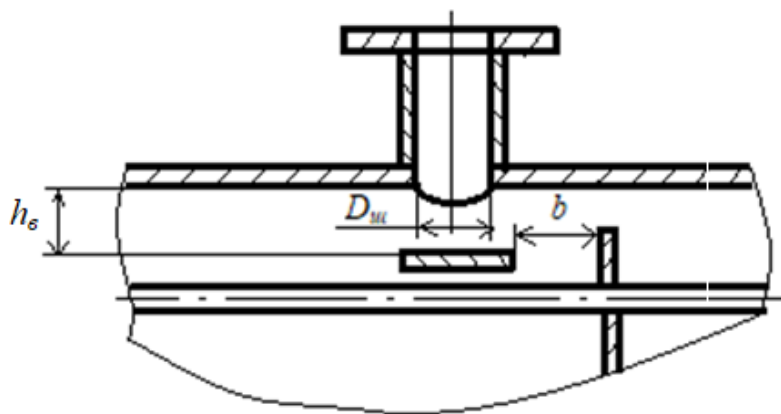


Рисунок 1.21 – Розташування відбійника на вході середовища в міжтрубний простір

Відбійник приварюють до тяг або кріплять хомутами до труб.

Приварювати відбійники до труб не рекомендується через небезпеку пропалювання стінки труби.

Відстань  $b$  від відбійника до першої перегородки повинна бути не менше 100 мм для забезпечення вільного розподілу вхідного потоку середовища.

### **Питання для самоконтролю до розділу 1.5**

1. Обґрунтувати необхідність застосування відбійників у міжтрубному просторі теплообмінників.
2. Навести вимоги до конструкції і розташуванню відбійників.
3. Навести умову зменшення гідравлічного опору відбійника..

### **1.6 Багатоходові теплообмінники**

В кожухотрубних теплообмінниках для отримання більших коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  необхідно забезпечити достатньо високі швидкості теплоносіїв. Для газів такими швидкостями є 8...30 м/с, а для рідин – не менше 1,5 м/с.

При русі рідин в трубах для збільшення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  можна зменшити діаметр труб  $i$ , відповідно, збільшити їх довжину, не змінюючи поверхню теплообміну. Але теплообмінники малого діаметра і великої довжини не зручні для монтажу, при цьому збільшується їх матеріалоемність.

Через це, більш раціонально збільшити швидкість теплоносія, застосовуючи багатоходові теплообмінники.

Пучок труб розділений на декілька секцій (ходів) по яким теплоносій проходить послідовно (рис. 1.22).



Розбивка труб на секції здійснюється поздовжніми перегородками, які розташовані в розподільчих камерах теплообмінника.

Промисловістю випускаються двох-, чотирьох- і шестиходові теплообмінники жорсткої конструкції.

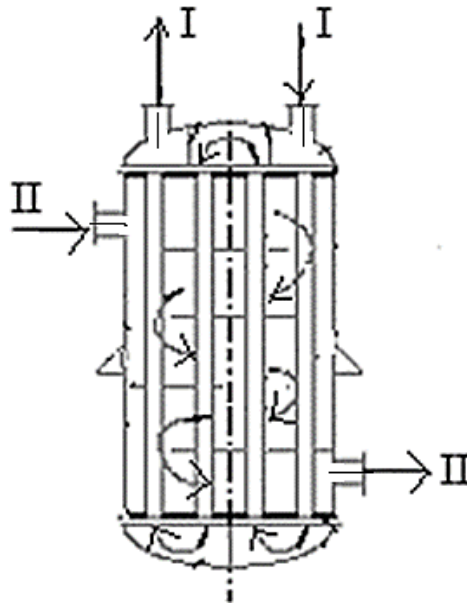


Рисунок 1.22 – Багатогодовий теплообмінник

Поздовжні перегородки в розподільчих камерах теплообмінників можуть використовуватися для одночасного нагрівання або охолодження кількох теплоносіїв в одному апараті (рис. 1.23).

Для збільшення швидкості і подовження шляху руху середовища у міжтрубному просторі встановлюють сегментні перегородки. В горизонтальних теплообмінниках ці перегородки слугують одночасно проміжними опорами для пучка труб.

Також інтенсивність тепловіддачі при поперечному обтіканні труб вище.

На вході теплоносія в міжтрубний простір встановлюють відбійник у вигляді пластини для запобігання ерозійного зношування труби (рис. 1.24).

З двох теплоносіїв необхідно збільшувати швидкість у першу чергу того, який при теплообміні має більший термічний опір або менший коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ .

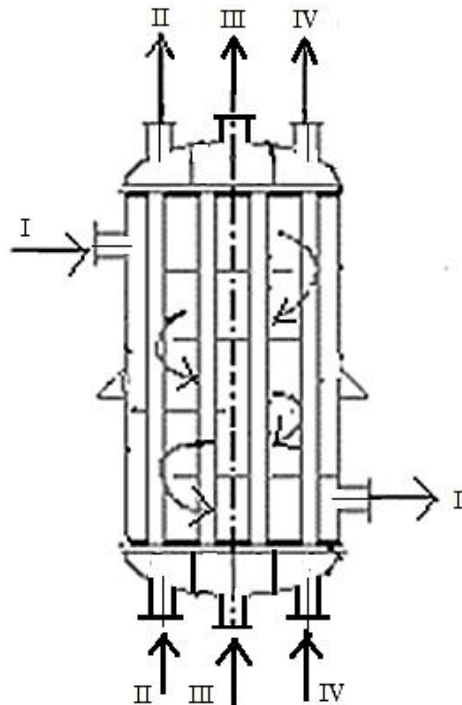
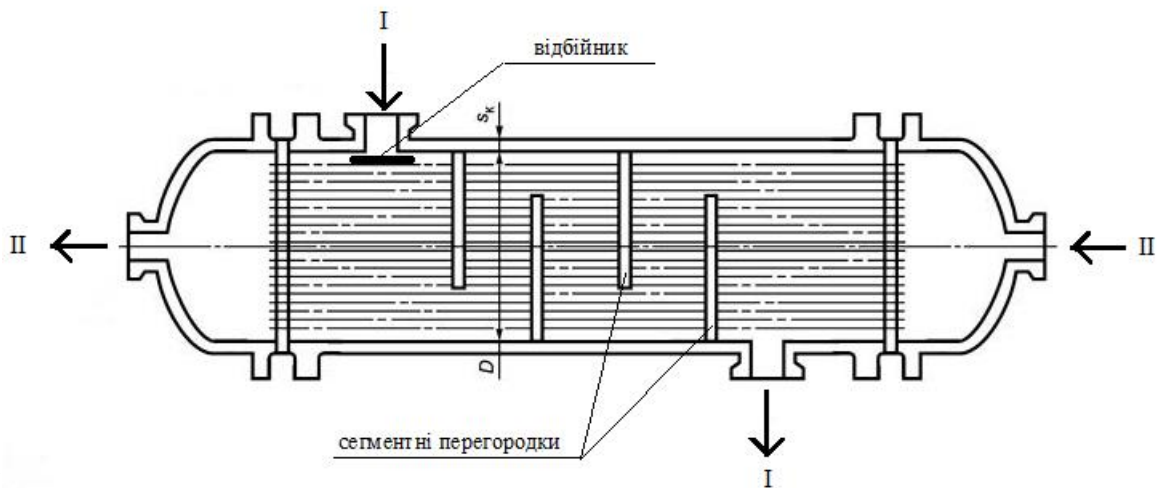


Рисунок 1.23 – Нагрівання (охолодження) кількох теплоносіїв в одному апараті



5

Рисунок 1.24 – Горизонтальний кожухотрубний теплообмінник з сегментними перегородками у міжтрубному просторі

Підвищення інтенсивності теплообміну у багатоходових теплообмінниках призводить до збільшення гідравлічного опору і ускладненню конструкції. Тому, звичайно, кількість ходів не перевищує шести.

Багатоходові теплообмінники працюють за принципом змішаного току, що призводить до деякого зменшення рухомої сили теплопередачі порівняно з чисто протиточним рухом.

У верхній частині кожуха теплообмінника встановлюються продувочні краники для періодичного видалення повітря і інших газів, що не конденсуються.

### **Питання для самоконтролю до розділу 1.6**

1. Коли застосовують багатоходові теплообмінники?
2. Яким чином здійснюється збільшення ходів в багатоходових теплообмінниках?
3. Як впливає підвищення інтенсивності теплообміну у багатоходових теплообмінниках на гідравлічний опір теплообмінника?

### **1.7 Поперечні перегородки в кожухотрубних теплообмінниках**

Внутрішні поперечні перегородки забезпечують поперечне обтікання труб, підвищення швидкості потоку і, відповідно, більшу ефективність теплообміну. Товщина перегородок складає 5...8 мм, діаметр отворів для труб в перегородках виконується, звичайно, на 1...2 мм більшим за номінальний діаметр труб.

Перегородки встановлюють на відстані одна від одної від 200 мм до  $50d_T$ , де  $d_T$  – зовнішній діаметр труб, м.

Кріплення перегородок здійснюється на 4...6 тягах, на які надіті розпірні дистанційні труби.

Між корпусом і перегородкою необхідно забезпечити можливо менший зазор.

Для чистих рідин застосовують суцільні перегородки без вирізів (рис. 1.25). Рідина перетікає через перегородки по кільцевим щілинам між трубами і перегородками (рис. 1.26). Для труб з зовнішнім діаметром 25 мм діаметр отворів у такій перегородці, звичайно становить 27...28 мм.

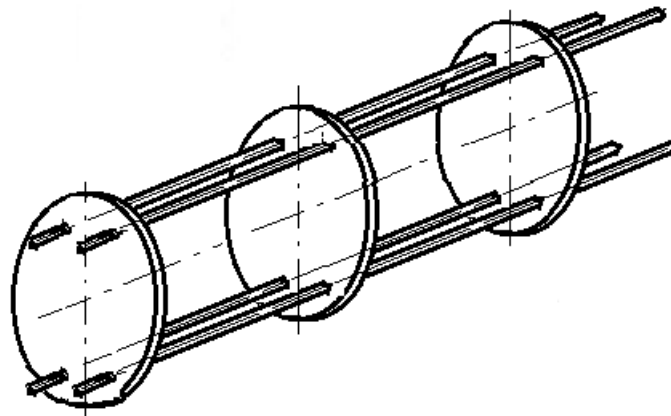


Рисунок 1.25 – Суцільні перегородки без вирізів

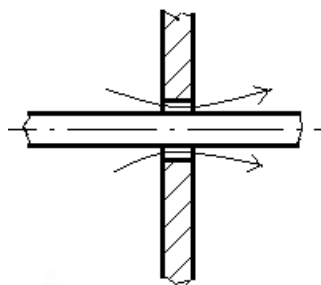


Рисунок 1.26 – Перетікання рідини через перегородку по кільцевим щілинам між трубами і перегородкою

Найчастіше застосовують поперечні перегородки з сегментним вирізом (рис. 1.27).

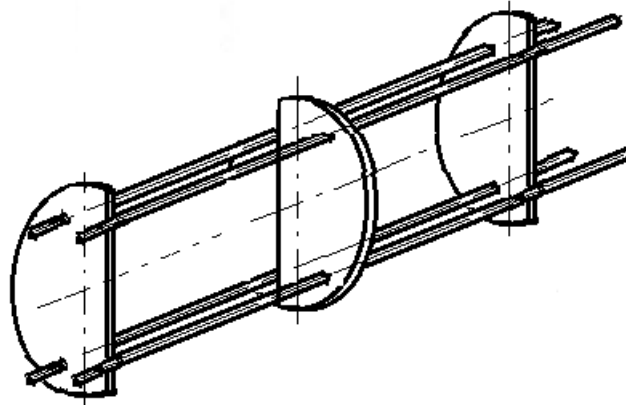


Рисунок 1.27 – Поперечні перегородки з сегментним вирізом

Наступна конструкція (рис. 1.28) має поперечні перегородки з секторними вирізами, які дорівнюють чверті кола і поздовжню перегородку з висотою, що дорівнює радіусу теплообмінника.

Виріз виконують по черзі праворуч і ліворуч. Через це середовище в корпусі здійснює обертальний рух поперемінно за годинниковою стрілкою і проти годинникової стрілки.

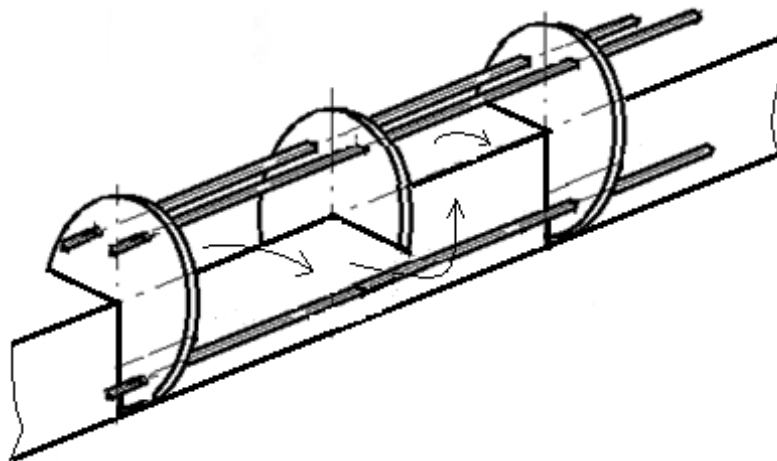


Рисунок 1.28 – Поперечні перегородки з секторними вирізами

На рисунку 1.29 наведені перегородки з щілинними вирізами.

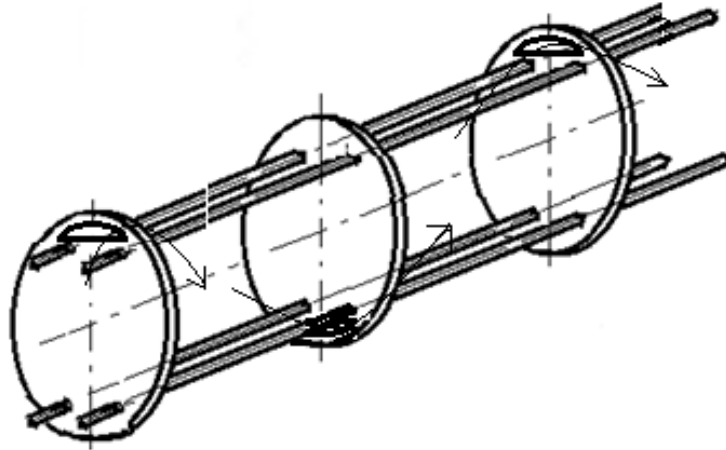


Рисунок 1.29 – Поперечні перегородки з щілинними вирізами

### Питання для самоконтролю до розділу 1.7

1. Навести конструкції поперечних перегородок кожухотрубних теплообмінників.
2. Обґрунтувати необхідність встановлення поперечних перегородок в теплообмінниках.
3. Навести вимоги до розміщення поперечних перегородок.

### 1.8 Елементи кожухотрубчатих теплообмінників

#### Кожух

Кожух діаметром менше 0,6 м найчастіше виготовляють з труб, кожух більшого діаметра вальцюють з листової сталі.

При великій довжині апарата кожух виконують зварним з декількох обичайок. При цьому довжина кінцевих обичайок  $l = \sqrt{D_3 S_K}$ , але не менше 0,1 м, де  $D_3$  – зовнішній діаметр кожуха, м;  $S_K$  – виконавча товщина стінки кожуха, м.

Товщина кінцевих обичайок виконується у 1,2...1,4 рази більше товщини центральної обичайки для компенсації напружень, які виникають у місці з'єднання кожуха з трубною решіткою.

Для теплообмінників типів У, П, ПК повинна бути забезпечена стійкість форми кожуха. Для чистки таких апаратів необхідно періодично вилучати трубний пучок з перегородками.

Через те, що зазор між кожухом і перегородкою незначний (декілька мм), поява овальності кожуха призводить до неможливості монтажу і демонтажу трубного пучка.

### **Розподільчі камери і кришки**

Розподільчі камери і кришки виготовляють звичайно з того ж матеріалу, що і кожух.

### **Теплообмінні труби**

Теплообмінні труби кожухотрубних сталевих апаратів серійно виготовляють з вуглецевих, корозійностійких сталей і латуні.

Труби малих діаметрів скоріше забиваються при роботі з забрудненими теплоносіями. Складності виникають і при механічній чистці і при закріпленні таких труб розвальцовкою. Тому найчастіше використовуються сталеві труби з зовнішніми діаметрами 20 і 25 мм.

Труби з зовнішніми діаметрами 38 мм і 57 мм застосовують при роботі з забрудненими середовищами і з в'язкими рідинами.

Зі збільшенням довжини труб і зі зменшенням діаметра апарата його вартість зменшується. найдешевші теплообмінники мають довжину 5...7 м.

## **Трубні решітки**

Трубні решітки виготовляють із суцільних сталевих листів або поковок.

Для апаратів великих діаметрів застосовують зварні трубні решітки. При цьому зварні шви не повинні пересікатися, а відстань від кромки зварного шва до отворів повинна бути не менше  $0,8d_0$ , де  $d_0$  – діаметр отвору, м.

## **Питання для самоконтролю до розділу 1.8**

1. Навести вимоги до виготовлення кожухів, розподільчих камер і кришок кожухотрубних теплообмінників.
2. Обґрунтувати особливості експлуатації теплообмінних труб.
3. Навести вимоги до трубних решіток кожухотрубних теплообмінників.

## **1.9 Шляхи інтенсифікації теплообміну в кожухотрубних теплообмінниках**

1. Збільшення поверхні теплообміну з боку теплоносія з меншим коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$ , наприклад за допомогою оребрення.
2. Збільшення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  підбором гідродинаміки теплоносія.

При цьому слід пам'ятати, що опір пограничного шару є головним фактором, що зменшує інтенсивність теплопередачі.

## **Інтенсифікація теплообміну у просторі між трубами**

Найбільший ефект теплопередачі буде при поперечному омивання пучка труб, що розташовані у шаховому порядку.



При значенні критерія Рейнольдса  $Re = 120 \dots 1000$  у міжтрубному просторі утворюється стійкий турбулентний режим плинину, а ламінарний пограничний шар теплоносія залишається лише на невеликій ділянці поверхні труб.

Покращується теплообмін при ліквідації застійних зон у міжтрубному просторі. Встановлення розподільчих камер на вході і виході теплоносія виключає застійні зони поблизу трубних решіток.

Використовують також турбулізатори – елементи, які турбулізують або руйнують пограничний шар теплоносія на зовнішній поверхні труб.

Для турбулізації потоку у пограничному шарі виконують кільцеві канавки (рис.1.30). В цьому випадку теплообмін інтенсифікується приблизно у два рази.



Рисунок 1.30 – Турбулізація потоку кільцевими канавками

Оребрення труб збільшує не тільки поверхню теплообміну, але і турбулізує потік. Оребрення виконується поздовжнє, поперечне, спіральне, у вигляді голок і т. ін. (рис. 1.31–1.34). При цьому збільшуються витрати на прокачку теплоносія.

Матеріал, з якого виготовляються ребристі труби, повинен мати великий коефіцієнт теплопровідності.

Для зменшення гідравлічного опору поверхня ребер повинна бути паралельна напрямку потоку теплоносія.

Найчастіше використовують ребра прямокутного і трапецієподібного перерізів (рис. 1.31).

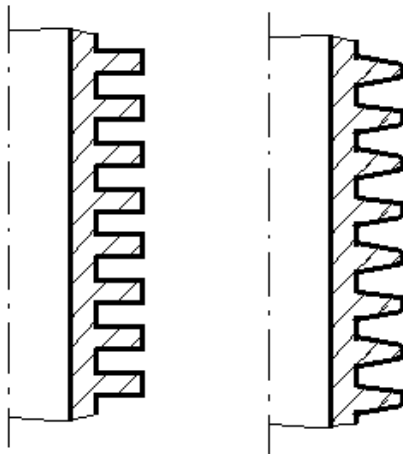


Рисунок 1.31 – Ребра прямокутного і трапецієподібного перерізів

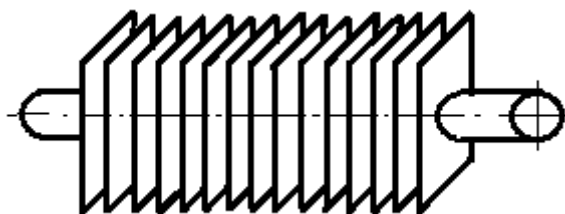


Рисунок 1.32 – Поперечні ребра

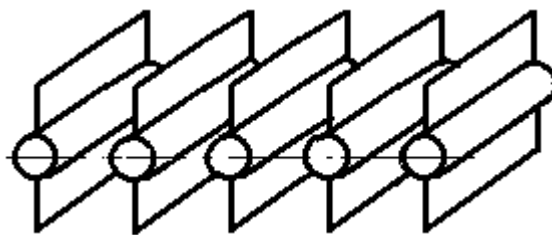


Рисунок 1.33 – Поздовжні «плавникові» ребра

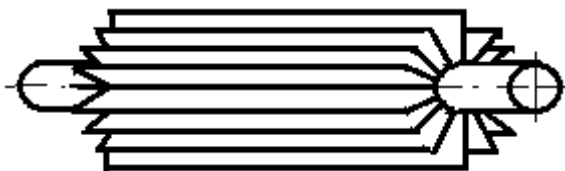


Рисунок 1.34 – Поздовжні ребра

## Інтенсифікація теплообміну у трубному просторі

У трубному просторі для інтенсифікації теплообміну використовують внутрішнє оребрення, турбулізуючі вставки та насадки (кільця, кульки), які розташовують у трубі (рис. 1.35–1.37) і т. ін.

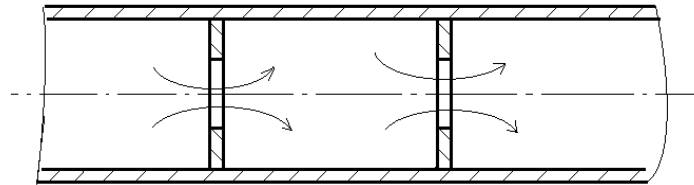


Рисунок 1.35 – Турбулізуюча вставка у вигляді діафрагми

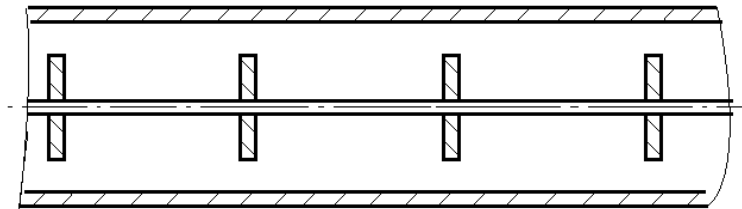


Рисунок 1.36 – Турбулізуюча вставка у вигляді дисків, які закріплені на тонкому стрижні

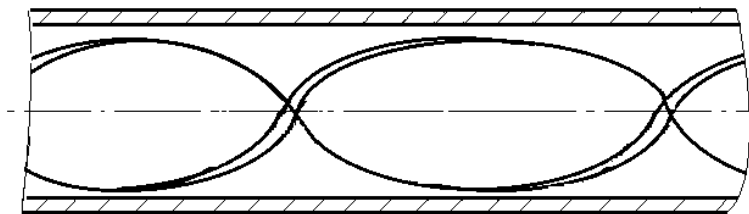


Рисунок 1.37 – Турбулізуюча спіральна вставка (виготовляється з тонких алюмінієвих або латунних стрічок)

### **Питання для самоконтролю до розділу 1.9**

1. Навести шляхи інтенсифікація теплообміну в кожухотрубних теплообмінниках.
2. Обґрунтувати особливості інтенсифікація теплообміну у міжтрубному просторі.
3. Обґрунтувати особливості інтенсифікація теплообміну у трубному просторі.

## 2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

Методика розрахунку відповідає ГОСТ 34233.7 і дійсна для кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками, компенсатором на кожусі, з плаваючою головкою, U-подібними трубами, а також для апаратів повітряного охолодження з камерами роз'ємної та нероз'ємної конструкцій [9].

В розділі докладно подано розрахунок теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками, компенсатором або розширювачем на кожусі. Розрахунок теплообмінників з плаваючою головкою, з U-подібними трубами, апаратів повітряного охолодження наведено у ГОСТ 34233.7 [9].

### 2.1 Розрахунок трубних решіток

Товщини трубних решіток теплообмінних апаратів із нерухомими трубними решітками, компенсатором або розширювачем на кожусі приймаються конструктивно з подальшою перевіркою за формулою (перевірка статичної міцності):

$$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} \leq 0,8[\sigma]_p,$$

де  $\tau_{p1}$  – дотичні напруження в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом, МПа;  $\tau_{p2}$  – дотичні напруження в перфорованій частині трубної решітки, МПа;  $[\sigma]_p$  – допустиме напруження для матеріалу решітки, МПа.

Використавши і спростивши залежність, яка була надана у довіднику [11], спочатку товщину трубної решітки можна визначити за формулою:

$$S_p = 0,5D \sqrt{\frac{p_p}{[\sigma]_p \varphi_0}},$$

де  $D$  – внутрішній діаметр кожуха, м;  $p_p$  – розрахунковий тиск, що діє на решітку кожухотрубного теплообмінного апарата, МПа;  $\varphi_0$  – коефіцієнт ослаблення решітки отворами.

Коефіцієнт ослаблення решітки отворами:

$$\varphi_0 = \frac{D - \sum d_0}{D},$$

де  $\sum d_0$  – сума діаметрів отворів в решітці на діаметрі  $D$ , м.

За наявності безтрубною зони (див. рис. 2.1) прийнята товщина трубної решітки повинна додатково задовольняти умові:

$$S_p \geq 0,5D_E \sqrt{\frac{p_p}{[\sigma]_p}} + C,$$

де  $D_E$  – діаметр кола, вписаного в максимальну безтрубну площу, м;  $C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м.

Діаметр  $D_E$  приймається за рисунком 2.1.

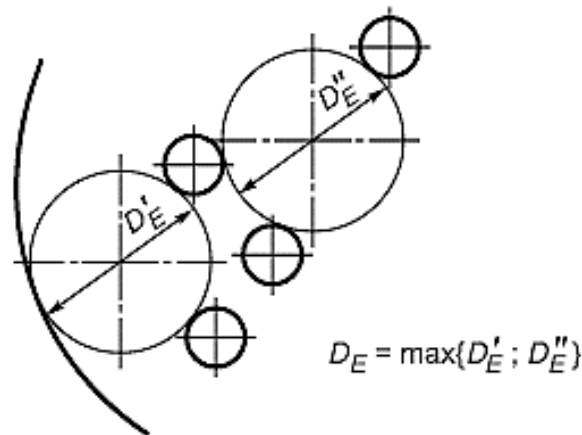


Рисунок 2.1 – Діаметр кола, вписаного в максимальну безтрубну площу

Розрахунковий тиск  $p_p$  приймається рівним максимально можливому перепаду тисків, що діють на решітку. При найбільш несприятливих умовах

за розрахунковий тиск  $p_p$  слід приймати найбільший з двох тисків, що діють у трубному і міжтрубному просторах.

Перевірку трубної решітки на малоциклову міцність проводять за ГОСТ 34233.6.

Дотичні напруження  $\tau_{p1}$  і  $\tau_{p2}$  розраховуються за формулами:

$$\tau_{p1} = \frac{|Q_{\Pi}|}{S_{1p} - C};$$

$$\tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_p(S_p - C)};$$

де  $Q_{\Pi}$  – розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує, МН/м;  $Q_a$  – розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує, МН/м;  $S_{1p}$  – товщина решітки у зоні кільцевої канавки, м;  $S_p$  – товщина трубної решітки, м;  $\varphi_p$  – коефіцієнт ослаблення решіток кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками та компенсатором на кожусі.

Розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує  $Q_{\Pi}$  розраховується за формулою:

$$Q_{\Pi} = a_1 \frac{p_0(T_3 + \rho_1) - p_1 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2},$$

де  $a_1$  – відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби, м;  $p_0$  – зведений тиск на решітку, МПа;  $p_1 = \frac{K_y}{\beta K_{\phi}} (m_1 p_M - m_2 p_T)$  – зведений тиск на фланці, МПа;  $m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2\beta_1^2}$  – коефіцієнт впливу тиску на вигин 1-го фланця, м<sup>2</sup>;  $m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2\beta_2^2}$  – коефіцієнт впливу тиску на вигин 2-го фланця, м<sup>2</sup>;  $T_1, T_2, T_3$  – коефіцієнти, що враховують вплив безтрубного краю та вплив труб;  $\rho$  – зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха;  $\rho_1$  – зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого

з'єднання;  $K_q$  – коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії осьової сили;  $K_y$  – модуль пружності основи (системи труб), МН/м<sup>3</sup>;  $K_\phi$  – коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при вигині МН·м;  $\beta$  – коефіцієнт системи решітка – труби, 1/м;  $p_M$  – розрахунковий тиск у міжтрубному просторі, МПа;  $p_T$  – розрахунковий тиск у трубному просторі, МПа;  $\beta_1$  – коефіцієнт системи кожух – решітка, 1/м;  $\beta_2$  – коефіцієнт системи обичайка – фланець камери, 1/м;  $h_1$  – товщина тарілки фланця кожуха, м;  $h_2$  – товщина тарілки фланця камери, м.

Розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує  $Q_a$ :

$$Q_a = m_n Q_{\Pi},$$

де  $m_n$  – відносна характеристика безтрубного краю трубної решітки.

Зведений тиск на решітку:

$$\begin{aligned} p_0 = & [\alpha_K(t_K - t_0) - \alpha_T(t_T - t_0)]K_y l + \\ & + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,5\rho K_q)]p_T - \\ & - [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,3\rho K_p)]p_M, \end{aligned}$$

де  $t_0$  – монтажна температура, 1/°С ( $t_0 = 20^\circ\text{C}$ );  $t_K$  – середня температура стінки кожуха, 1/°С;  $t_T$  – середня температура стінок труб, 1/°С;  $\alpha_K$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кожуха при температурі  $t_K$ , 1/°С;  $\alpha_T$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб при температурі  $t_T$ , 1/°С;  $l$  – половина довжини труби теплообмінного апарата або апарата повітряного охолодження, м;  $m_{cp}$  – коефіцієнт впливу тиску на поздовжню деформацію труб;  $\eta_T$  – коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору;  $\eta_M$  – коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору;  $K_p$  – коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії тиску.



Коефіцієнти лінійного розширення  $\alpha_K$  і  $\alpha_T$  необхідно визначати за ГОСТ 34233.1 [12] (Додаток А).

Модуль пружності основи (системи труб):

$$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l},$$

де  $E_T$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу труб, МПа.

Коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії осьової сили  $K_q$ :

$$K_q = 1 + K_q^*,$$

де  $K_q^*$  – відношення осьового переміщення компенсатора або розширювача при дії сили, що розтягує, до осьового переміщення країв корпусу міжтрубного простору без компенсатора і розширювача від дії тієї ж сили.

Для апаратів з нерухомими трубними решітками  $K_q^* = 0$ . Для апаратів з компенсатором на кожусі, розширювачем на кожусі і компенсатором на розширювачі  $K_q^*$  визначається за ГОСТ 34233.7 [9].

Коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії тиску  $K_p$ :

$$K_p = 1 + K_p^*,$$

де  $K_p^*$  – відношення осьового переміщення компенсатора або розширювача при дії тиску до осьового переміщення країв корпусу міжтрубного простору без компенсатора та розширювача від дії тиску.

Для апаратів з нерухомими трубними решітками  $K_p^* = 0$ . Для апаратів з компенсатором на кожусі, розширювачем на кожусі і компенсатором на розширювачі  $K_p^*$  визначається за ГОСТ 34233.7 [9].

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при вигині  $K_\phi$ :

$$K_\phi = K_{\phi 1} + K_{\phi 2},$$

де  $K_{\phi 1}$  – коефіцієнт жорсткості фланця кожуха при вигині, Н·м;  $K_{\phi 2}$  – коефіцієнт жорсткості фланця камери при вигині, Н·м.

Коефіцієнти  $K_{\phi 1}$  і  $K_{\phi 2}$  розраховуються за формулами:

$$K_{\phi 1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left( 1 + \frac{\beta_1 h_1}{2} \right),$$
$$K_{\phi 2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^2} + K_2 \left( 1 + \frac{\beta_2 h_2}{2} \right),$$

де  $b_1$  – ширина тарілки фланця кожуха, м;  $b_2$  – ширина тарілки фланця камери, м;  $E_1$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця кожуха, МПа;  $E_2$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця камери, МПа;  $K_1$  – коефіцієнт жорсткості втулки фланця кожуха при вигині, Н·м;  $K_2$  – коефіцієнт жорсткості втулки фланця камери при вигині, Н·м;  $R_1$  – радіус центру ваги тарілки фланця кожуха, м;  $R_2$  – радіус центру ваги тарілки фланця камери, м.

Коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_K S_1^3}{5,5 R_1},$$
$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5,5 R_2},$$

де  $a$  – внутрішній радіус кожуха, м;  $E_D$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу камери, МПа;  $S_1$  – товщина стінки кожуха в місці з'єднання з трубною решіткою або фланцем, м;  $S_2$  – товщина стінки камери в місці з'єднання з трубною решіткою або фланцем, м.

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору  $\eta_M$ :

$$\eta_M = 1 - \frac{i d_T^2}{4 a_1^2},$$

де  $i$  – кількість труб;  $d_T$  – зовнішній діаметр труби, м.

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору  $\eta_T$ :

$$\eta_T = 1 - \frac{i(d_T - 2S_T)^2}{4a_1^2},$$

де  $S_T$  – товщина стінки труби, м.

Відносна характеристика безтрубного краю трубної решітки  $m_n$ :

$$m_n = \frac{a}{a_1}.$$

Коефіцієнт впливу тиску на поздовжню деформацію труб  $m_{cp}$ :

$$m_{cp} = 0,15 \frac{i(d_T - S_T)^2}{a_1^2}.$$

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха  $\rho$ :

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_K S_K},$$

де  $E_K$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу кожуха, МПа;  $S_K$  – товщина стінки кожуха, м.

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання  $\rho_1$ :

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_\phi R_1},$$

де  $R_1$  – радіус центру ваги тарілки фланця кожуха, м.

Коефіцієнт системи решітка – труби  $\beta$ :

$$\beta = \frac{1,82}{S_p} \left( \frac{K_y S_p}{\psi_0 E_p} \right)^{0,25},$$

де  $\psi_0$  – коефіцієнт жорсткості перфорованої плити;  $E_p$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу решітки, МПа.

Для теплообмінних апаратів з двома решітками, які відрізняються товщиною або модулем пружності коефіцієнт  $\beta$  обчислюють за формулою:

$$\beta = 1,53 \left[ \frac{K_y}{\psi_0} \left( \frac{1}{E_{p1} S_{p1}^3} + \frac{1}{E_{p2} S_{p2}^3} \right) \right]^{0,25},$$

де  $E_{p1}$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу 1-ї решітки, якщо модулі пружності двох трубних решіток відрізняються один від одного, МПа;  $E_{p2}$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу 2-ї решітки, якщо модулі пружності двох трубних решіток відрізняються один від одного, МПа;  $S_{p1}$  – товщина 1-ї решітки, якщо дві трубні решітки відрізняються одна від одної, м;  $S_{p2}$  – товщина 2-ї решітки, якщо дві трубні решітки відрізняються одна від одної, м.

Значення коефіцієнтів жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  визначаються за ГОСТ 34233.7 [9] і наведені в Додатку Б.

Коефіцієнти  $\beta_1$  і  $\beta_2$  :

$$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_1}},$$

$$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_2}}.$$

Коефіцієнти  $T_1, T_2, T_3$ :

$$T_1 = \Phi_1 [m_n + 0,5(1 + m_n t)(t - 1)],$$

$$T_2 = \Phi_2 t,$$

$$T_3 = \Phi_3 m_n,$$

де  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  – коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб;  $t$  – безрозмірний параметр.

Коефіцієнти  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  визначаються за Додатком В залежно від безрозмірного параметра системи решітка – труби  $\omega$ .

Безрозмірний параметр системи решітка – труби  $\omega$ :

$$\omega = \beta a_1.$$

Безрозмірний параметр  $t$ :

$$t = 1 + 1,4\omega(m_n - 1).$$

Коефіцієнт ослаблення решіток кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками та компенсатором на кожусі:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{t_p},$$

де  $d_0$  – діаметр отворів в решітці, м;  $t_p$  – крок розташування отворів в решітці, м.

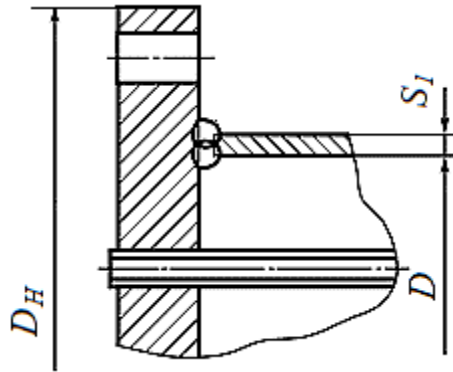
Перевірку жорсткості трубних решіток проводять за ГОСТ 34233.7 [9], коли до жорсткості трубних решіток пред'являються будь-які додаткові вимоги, наприклад для апаратів зі стікаючою плівкою, з перегородками по трубному простору, якщо неприпустимий перетік між ходами.

### **Питання для самоконтролю до розділу 2.1**

1. Як визначаються товщини трубних решіток і перевіряється їх статична міцність?
2. Як визначається розрахунковий тиск на трубну решітку?
3. Коли необхідно проводити перевірку жорсткості трубних решіток?

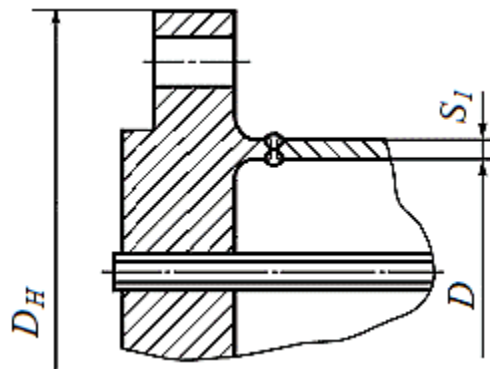
## 2.2 Розрахунок міцності і стійкості кожуха

На рисунках 2.2–2.5 подані розрахункові схеми з'єднання трубної решітки з кожухом і фланцем.



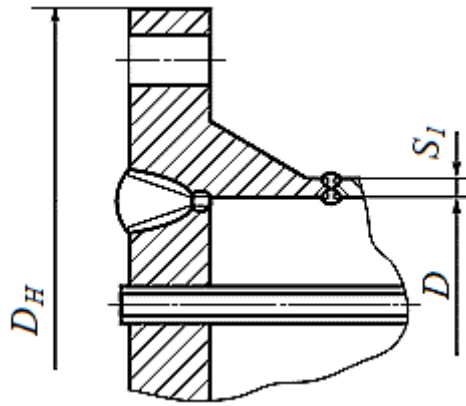
$$b_1 = \frac{D_H - D}{2}; R_1 = \frac{D_H + D}{4}; S_{1p} = S_p$$

Рисунок 2.2 – Таврове зварювання решітки з обичайною кожуха



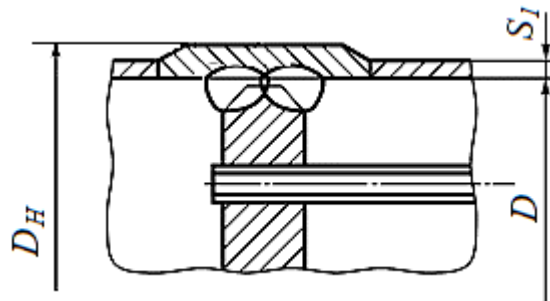
$$b_1 = \frac{D_H - D}{2}; R_1 = \frac{D_H + D}{4}$$

Рисунок 2.3 – Стикове зварювання решітки з обичайною кожуха



$$b_1 = \frac{D_H - D}{2}; R_1 = \frac{D_H + D}{4}; S_1 = S_Э$$

Рисунок 2.4 – Решітка, вварена у фланець



$$b_1 = \frac{D_H - D}{2}; R_1 = \frac{D_H + D}{4}; S_{1p} = S_p; h_1 = S_p; R_1 = R_2$$

Рисунок 2.5 – Решітка, вварена у кожух

Перевірку міцності кожуха в місці приєднання до решітки слід проводити тільки для конструкцій, наведених на рисунках 2.2, 2.3 і 2.5.

Умова статичної міцності кожуха в місці приєднання до решітки:

$$\sigma_{MX} \leq 1,3[\sigma]_K,$$

де  $\sigma_{MX}$  – мембранне напруження в кожусі в місці приєднання до решітки у меридіанному напрямку, МПа;  $[\sigma]_K$  – допустиме напруження для матеріалу кожуха теплообмінного апарата або кришки апарата повітряного охолодження, МПа.

Перевірку кожуха на малоциклову міцність у місці приєднання до решітки проводять за ГОСТ 34233.6.

Мембранне напруження в кожусі в місці приєднання до решітки у меридіанному напрямку:

$$\sigma_{MX} = \frac{|Q_K|}{S_1 - C_K},$$

де  $Q_K$  – розподілене зусилля по периметру кожуха, МН/м;  $C_K$  – розрахунковий додаток до товщини стінки кожуха, м.

Розподілене зусилля по периметру кожуха:

$$Q_K = \frac{a}{2} p_T - Q_{\Pi}.$$

Якщо умова міцності кожуха в місці з'єднання з решіткою не виконується, можна встановити перехідний пояс збільшеної товщини завдовжки не менше  $2\sqrt{DS_1}$ , де  $D$  – внутрішній діаметр кожуха або плаваючої голівки, м.

Якщо осьова сила в кожусі  $F < 0$ , слід провести перевірку кожуха на місцеву стійкість від дії стискаючої сили  $F$  за ГОСТ 34233.2.

## **Питання для самоконтролю до розділу 2.2**

1. Навести розрахункові схеми з'єднання трубної решітки з кожухом і фланцем.
2. Як визначається умова статичної міцності кожуха в місці приєднання до решітки?
3. В якому випадку слід проводити перевірку кожуха на місцеву стійкість від дії стискаючої сили?



### 2.3 Розрахунок труб на міцність, стійкість та жорсткість та розрахунок кріплення труб у решітці

Умова статичної міцності труб:

$$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} \leq [\sigma]_T,$$

де  $\sigma_{1T}$  – мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку, МПа;  $\sigma_{2T}$  – мембранне напруження в трубах в окружному напрямку, МПа;  $[\sigma]_T$  – допустиме напруження матеріалу труб, МПа.

Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi(d_T - S_T)S_T},$$

де  $N_T$  – осьова сила, яка діє на трубу, МН.

Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку:

$$\sigma_{2T} = \frac{(d_T - S_T)\max\{|p_T|; |p_M|; |p_T - p_M|\}}{2S_T}.$$

Осьова сила, яка діє на трубу:

$$N_T = \frac{\pi a_1}{i} [(\eta_M p_M - \eta_T p_T)a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 \beta M_a],$$

де  $M_a$  – згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої частини трубної решітки, Н·м/м.

Згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої частини трубної решітки розраховується за формулою:

$$M_a = M_{\Pi} + (a - a_1)Q_{\Pi},$$

де  $M_{\Pi}$  – згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки, МН·м/м;

Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки розраховується за формулою:

$$M_{\Pi} = \left(\frac{a_1}{\beta}\right) \frac{p_1(T_1 + \rho K_q) - p_0 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2}.$$

Перевірку труб на малоциклову міцність здійснюють за ГОСТ 34233.6.

Перевірку труб на стійкість проводять, якщо  $N_T < 0$ .

Умова стійкості:

$$\sigma_{1T} \leq \varphi_T [\sigma]_T,$$

де  $\varphi_T$  – коефіцієнт зменшення напруження при поздовжньому вигині.

Коефіцієнт  $\varphi_T$  визначається за графіком (рис. 2.5) або за формулою:

$$\varphi_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^4}},$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт.

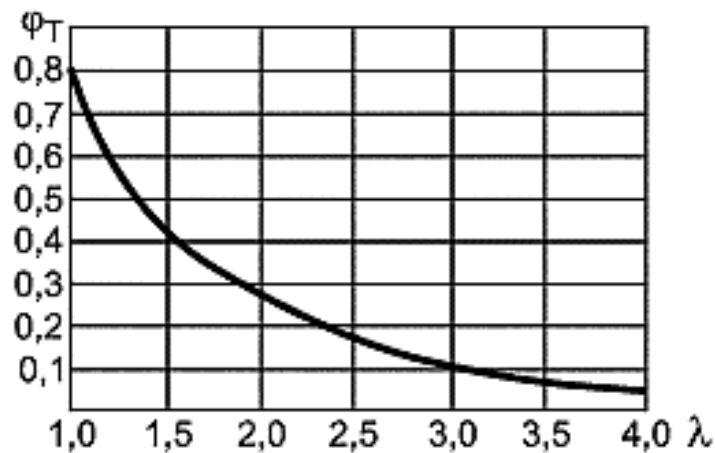


Рисунок 2.5 – Графік для визначення коефіцієнта зменшення напруження при поздовжньому вигині

Коефіцієнт  $\lambda$  розраховується за формулою:

$$\lambda = K_T \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T} \frac{l_R}{(d_T - S_T)'}}$$

де  $K_T$  – коефіцієнт умов роботи при розрахунку труб на стійкість;  $l_R$  – розрахункова довжина труб при поздовжньому вигині, м.

Для робочих умов  $K_T = 1,3$ ; для гідравлічних випробувань  $K_T = 1,126$ .

Для апаратів без перегородок  $l_R = l$ ; для апаратів з перегородками  $l_R = \max\{l_{2R}; 0,7l_{1R}\}$ .

Перевірку труб на жорсткість проводять, коли до жорсткості труб пред'являють будь-які додаткові вимоги, наприклад для апаратів зі плівкою, що стікає. Перевірку жорсткості труб проводять за ГОСТ 34233.7 [9] лише при  $N_T < 0$ .

Перевірка міцності кріплення труб в решітці здійснюється залежно від способу закріплення.

Якщо труби кріпляться у решітці за допомогою розвальцювання, має виконуватися умова:

$$|N_T| \leq [N]_{TP},$$

де  $[N]_{TP}$  – допустиме навантаження на з'єднання труби з решіткою способом розвальцювання, МН.

Допустиме навантаження на з'єднання труби з решіткою  $[N]_{TP}$  визначають на підставі випробувань або за нормативними документами. За відсутності даних про міцність вальцювального з'єднання допускається приймати  $[N]_{TP}$  за формулами:

– для гладкозавальцьованих труб

$$[N]_{TP} = 0,5\pi S_T(d_T - S_T) \min\left\{\frac{l_B}{d_T}; 1,6\right\} \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\};$$

– для труб, завальцьованих у пази за наявності одного паза

$$[N]_{TP} = 0,6\pi S_T(d_T - S_T) \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\},$$

але не менш, ніж для такого ж з'єднання гладкозавальцьованих труб;

– для труб, завальцьованих у пази з двома або більше пазами

$$[N]_{TP} = 0,8\pi S_T(d_T - S_T) \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\},$$

де  $l_B$  – глибина розвальцювання труб, м.

Якщо труби кріпляться до решітки способом приварювання або приварювання з підвальцюванням, повинна виконуватися умова:

$$\tau = \frac{[N_T]d_T + 4|M_T|}{\pi d_T^2 \delta} \leq \varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\},$$

де  $M_T$  – згинальний момент, що діє на трубу, МН·м;  $\delta$  – висота зварного шва в місці приварювання труби до решітки, м;  $\varphi_C$  – коефіцієнт міцності шва приварювання труби до решітки.

Згинальний момент, що діє на трубу:

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{\text{пр}}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 \beta M_a),$$

де  $J_T$  – момент інерції поперечного перерізу труби, м<sup>4</sup>;  $l_{\text{пр}}$  – зведена довжина труби, що використовується при розрахунку прогину труб і згинального моменту, що діє на трубу, м.

Момент інерції поперечного перерізу труби:

$$J_T = \frac{\pi [d_T^4 - (d_T - 2S_T)^4]}{64}.$$

Зведена довжина  $l_{\text{пр}} = l$  – для апаратів без перегородок в кожусі;

$l_{\text{пр}} = l_{1R}/3$  – для апаратів з перегородками, де  $l_{1R}$  – максимальний проліт труби між решіткою та перегородкою, м.

Коефіцієнт міцності шва приварювання труби до решітки:

$$\varphi_C = \min\{0,5; (0,95 - 0,2 \lg N)\},$$

де  $N$  – число циклів навантаження за розрахунковий термін служби (якщо число циклів не обумовлено, рекомендується приймати  $N = 2000$ ).

У разі кріплення труб до решітки способом розвальцювання з обваркою повинна виконуватися умова:

$$\max \left\{ \frac{\varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}}{\tau} + 0,6 \frac{[N]_{TP}}{|N_T|}; \frac{[N]_{TP}}{|N_T|} \right\} \geq 1,$$

де  $\tau$  – напруження зрізу в шві приварювання труби до решітки, МПа;  $[N]_{TP}$  – допустиме навантаження на з'єднання труби з решіткою способом розвальцювання, МН.

### Питання для самоконтролю до розділу 2.3

1. Навести умову статичної міцності труб.
2. Які навантаження діють на труби в робочих умовах?
3. Коли слід проводити перевірку труб на стійкість і жорсткість?

### 2.4 Алгоритм і приклад розрахунку елементів кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками, компенсатором або розширювачем на кожусі

#### Завдання.

Розрахувати одноходовий кожухотрубний теплообмінний апарат з нерухомими трубними решітками однакової конструкції.

Розрахунок виконати для робочих умов.

Розрахунковий тиск у міжтрубному просторі  $p_M = 0,67$  МПа.

Розрахунковий тиск у трубному просторі  $p_T = 0,82$  МПа.

Внутрішній діаметр кожуха  $D = 0,6$  м.

Зовнішній діаметр фланця  $D_H = 0,78$  м.

Матеріал кожуха – сталь Ст. 3.

Матеріал труб і трубних решіток – сталь 20.

Матеріал фланців – сталь 09Г2С.

Розрахункова температура кожуха  $t_K = 168$  °С.

Розрахункова температура труб  $t_T = 80$  °С.

Кількість труб  $i = 241$ .

Товщина стінки кожуха  $S_K = 0,005$  м.

Товщина стінки кожуха в місці з'єднання з фланцем  $S_I = 0,005$  м.

Товщина стінки камери в місці з'єднання з фланцем  $S_2 = 0,005$  м.

Товщина стінки труби  $S_T = 0,002$  м.

Зовнішній діаметр труб  $d_T = 0,025$  м.

Половина довжини труби теплообмінного апарата або апарата повітряного охолодження  $l = 2$  м.

Коефіцієнт ослаблення решітки отворами  $\varphi_0 = 0,29$ .

Сума діаметрів отворів в решітці на внутрішньому діаметрі кожуха  $\Sigma d_0 = 0,425$  м.

Крок між трубами  $t = 0,032$  м.

Внутрішній радіус кожуха  $a = 0,3$  м.

Відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби  $a_1 = 0,256$  м.

Радіус центру ваги тарілки фланця кожуха  $R_1 = 0,345$  м.

Радіус центру ваги тарілки фланця камери  $R_2 = 0,345$  м.

Ширина тарілки фланця кожуха  $b_1 = 0,09$  м.

Ширина тарілки фланця камери  $b_2 = 0,09$  м.

Товщина тарілки фланця кожуха  $h_1 = 0,031$  м.

Товщина тарілки фланця камери  $h_2 = 0,031$  м.

Решітка з'єднана з обичайкою кожуха за допомогою таврового зварювання.

Труби кріпляться у решітці за допомогою розвальцювання. Труби завальцовані у пази з двома пазами.

Сума додатків до розрахункової товщини стінки  $C = 0,001$  м.

Розрахунковий додаток до товщини стінки кожуха  $C_K = 0,001$  м

Таблиця 2.1. Алгоритм і приклад розрахунку елементів кожухотрубних теплообмінних апаратів з нерухомими трубними решітками, компенсатором або розширювачем на кожусі

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок трубної решітки			
1.	Допустиме напруження для матеріалу трубної решітки $[\sigma]_p$ , МПа	$[\sigma]_p$ визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Г.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80$ °С допустиме напруження $[\sigma]_p = 143$ МПа
2.	Допустиме напруження для матеріалу труб $[\sigma]_T$ , МПа	$[\sigma]_T$ визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Г.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80$ °С допустиме напруження $[\sigma]_T = 143$ МПа
3.	Допустиме напруження для матеріалу кожуха $[\sigma]_K$ , МПа	$[\sigma]_K$ визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С (для $S_1 < 20$ мм) допустиме напруження $[\sigma]_K = 144$ МПа
4.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу трубної решітки $E_p$ , МПа	$E_p$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80$ °С модуль поздовжньої пружності $E_p = 1,93 \cdot 10^5$ МПа
5.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу труб $E_T$ , МПа	$E_T$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80$ °С модуль поздовжньої пружності $E_T = 1,93 \cdot 10^5$ МПа
6.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу кожуха $E_K$ , МПа	$E_K$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С модуль поздовжньої пружності $E_K = 1,84 \cdot 10^5$ МПа

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу камери $E_D$ , МПа	$E_D$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80$ °С модуль поздовжньої пружності $E_D = 1,93 \cdot 10^5$ МПа
8.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця кожуха $E_1$ , МПа	$E_1$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки 09Г2С за температури $t = 20$ °С модуль поздовжньої пружності $E_1 = 1,99 \cdot 10^5$ МПа
9.	Модуль поздовжньої пружності матеріалу фланця камери $E_2$ , МПа	$E_2$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки 09Г2С за температури $t = 20$ °С модуль поздовжньої пружності $E_2 = 1,99 \cdot 10^5$ МПа
10.	Коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб при температурі $\alpha_T$ , $1/^\circ\text{C}$	$\alpha_T$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80$ °С модуль поздовжньої пружності $\alpha_T = 11,6 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$
11.	Коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кожуха при температурі $\alpha_K$ , $1/^\circ\text{C}$	$\alpha_K$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С модуль поздовжньої пружності $\alpha_K = 12,6 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$
12.	Розрахунковий тиск $p_p$ , МПа	$p_p$ приймається рівним максимально можливому перепаду тисків, що діють на решітку: $p_p = \max\{p_M; p_T\}$	$p_p = \max\{0,67; 0,82\} = 0,82$ МПа



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Коефіцієнт ослаблення решітки отворами $\varphi_0$	$\varphi_0 = \frac{D - \sum d_0}{D}$	$\varphi_0 = \frac{0,6 - 0,425}{0,6} = 0,292$
14.	Початкова товщина трубної решітки $S_p$ , м	$S_p = 0,5D \sqrt{\frac{p_p}{[\sigma]_p \varphi_0}}$	$S_p = 0,5 \cdot 0,6 \sqrt{\frac{0,82}{129 \cdot 0,292}} = 0,044 \text{ м}$
15.	Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору $\eta_M$	$\eta_M = 1 - \frac{id_T^2}{4a_1^2}$	$\eta_M = 1 - \frac{241 \cdot 0,025^2}{4 \cdot 0,256^2} = 0,4254$
16.	Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору $\eta_T$	$\eta_T = 1 - \frac{i(d_T - 2S_T)^2}{4a_1^2}$	$\eta_T = 1 - \frac{241(0,025 - 2 \cdot 0,002)^2}{4 \cdot 0,256^2} = 0,5946$
17.	Модуль пружності основи (системи труб) $K_y$ , МН/м <sup>3</sup>	$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l}$	$K_y = \frac{1,93 \cdot 10^5(0,5946 - 0,4254)}{2} = 16327,8 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
18.	Коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії тиску $K_p$	$K_p = 1 + K_p^*$ Для апаратів з нерухомими трубними решітками $K_p^* = 0$ . Для інших апаратів $K_p^*$ визначається за ГОСТ 34233.7 [1]	$K_p = 1 + 0 = 1$
19.	Коефіцієнт зміни жорсткості системи труби – кожух при дії осьової сили $K_q$	$K_q = 1 + K_q^*$ Для апаратів з нерухомими трубними решітками $K_q^* = 0$ . Для інших апаратів $K_q^*$ визначається за ГОСТ 34233.7 [1]	$K_q = 1 + 0 = 1$
20.	Коефіцієнт впливу тиску на поздовжню деформацію труб $m_{cp}$	$m_{cp} = 0,15 \frac{i(d_T - S_T)^2}{a_1^2}$	$m_{cp} = 0,15 \frac{241(0,025 - 0,002)^2}{0,256^2} = 0,292$
21.	Відносна характеристика безтрубного краю трубної решітки $m_n$	$m_n = \frac{a}{a_1}$	$m_n = \frac{0,3}{0,256} = 1,172$
22.	Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха $\rho$	$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_K S_K}$	$\rho = \frac{16327,8 \cdot 0,256 \cdot 2}{1,84 \cdot 10^5 \cdot 0,005} = 9,087$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
23.	Зведений тиск на решітку $p_0$ , МПа	$p_0 = [\alpha_K(t_K - t_0) - \alpha_T(t_T - t_0)]K_y l + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,5\rho K_q)]p_T -$ $- [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,3\rho K_p)]p_M$ $p_0 = [12,6 \cdot 10^{-6}(168 - 20) - 11,6 \cdot 10^{-6}(80 - 20)]16327,8 \cdot 2 +$ $+ [0,5946 - 1 + 0,292 + 1,172(1,172 + 0,5 \cdot 9,087 \cdot 1)]0,82 -$ $- [0,4254 - 1 + 0,292 + 1,172(1,172 + 0,3 \cdot 9,087 \cdot 1)]0,67 = 40,696 \text{ МПа}$	
24.	Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити $\psi_0$	$\psi_0$ визначаються за таблицею Б1 додатка Б залежно від коефіцієнта $\eta_T$	З таблиці Б1 для $\eta_T = 0,5946$ коефіцієнт жорсткості перфорованої плити $\psi_0 = 0,3$
25.	Коефіцієнт системи решітка – труби $\beta$ , 1/м	$\beta = \frac{1,82}{S_p} \left( \frac{K_y S_p}{\psi_0 E_p} \right)^{0,25}$ <p>Для теплообмінних апаратів з двома решітками, які відрізняються товщиною або модулем пружності:</p> $\beta = 1,53 \left[ \frac{K_y}{\psi_0} \left( \frac{1}{E_{p1} S_{p1}^3} + \frac{1}{E_{p2} S_{p2}^3} \right) \right]^{0,25}$	$\beta = \frac{1,82}{0,044} \left( \frac{16327,8 \cdot 0,044}{0,3 \cdot 1,93 \cdot 10^5} \right)^{0,25} =$ $= 13,805 \frac{1}{\text{м}}$
26.	Коефіцієнт системи кожух – решітка $\beta_1$ , 1/м	$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_1}}$	$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{0,3 \cdot 0,005}} = 33,566 \frac{1}{\text{м}}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
27.	Коефіцієнт системи обичайка – фланець камери $\beta_2$ , 1/м	$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_2}}$	$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{0,3 \cdot 0,005}} = 33,566 \frac{1}{\text{м}}$
28.	Коефіцієнт $K_1$ , Н·м	$K_1 = \frac{\beta_1 a E_K S_1^3}{5,5 R_1}$	$K_1 = \frac{33,566 \cdot 0,3 \cdot 1,84 \cdot 10^5 \cdot 0,005^3}{5,5 \cdot 0,345} = 0,122 \text{ Н} \cdot \text{м}$
29.	Коефіцієнт $K_2$ , Н·м	$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5,5 R_2}$	$K_2 = \frac{33,566 \cdot 0,3 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,005^3}{5,5 \cdot 0,345} = 0,128 \text{ Н} \cdot \text{м}$
30.	Коефіцієнт жорсткості фланця кожуха при вигині $K_{\phi 1}$ , Н·м	$K_{\phi 1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left( 1 + \frac{\beta_1 h_1}{2} \right)$	$K_{\phi 1} = \frac{1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,031^3 \cdot 0,09}{12 \cdot 0,345^2} + 0,122 \left( 1 + \frac{33,566 \cdot 0,031}{2} \right) = 0,559 \text{ Н} \cdot \text{м}$
31.	Коефіцієнт жорсткості фланця камери при вигині $K_{\phi 2}$ , Н·м	$K_{\phi 2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^2} + K_2 \left( 1 + \frac{\beta_2 h_2}{2} \right)$	$K_{\phi 2} = \frac{1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,031^3 \cdot 0,09}{12 \cdot 0,345^2} + 0,128 \left( 1 + \frac{33,566 \cdot 0,031}{2} \right) = 0,568 \text{ Н} \cdot \text{м}$
32.	Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при вигині $K_{\phi}$ , Н·м	$K_{\phi} = K_{\phi 1} + K_{\phi 2}$	$K_{\phi} = 0,559 + 0,568 = 1,127 \text{ Н} \cdot \text{м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
33.	Коефіцієнт впливу тиску на вигин 1-го фланця $m_1$ , м <sup>2</sup>	$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2\beta_1^2}$	$m_1 = \frac{1 + 33,566 \cdot 0,031}{2 \cdot 33,566^2} = 0,0009 \text{ м}^2$
34.	Коефіцієнт впливу тиску на вигин 2-го фланця $m_2$ , м <sup>2</sup>	$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2\beta_2^2}$	$m_2 = \frac{1 + 33,566 \cdot 0,031}{2 \cdot 33,566^2} = 0,0009 \text{ м}^2$
35.	Зведений тиск на фланці $p_1$ , МПа	$p_1 = \frac{K_y}{\beta K_\phi} (m_1 p_M - m_2 p_T)$	$p_1 = \frac{16327,8}{13,805 \cdot 1,127} \cdot (0,0009 \cdot 0,67 - 0,0009 \cdot 0,82) = -0,1417 \text{ МПа}$
36.	Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання $\rho_1$	$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_\phi R_1}$	$\rho_1 = \frac{16327,8 \cdot 0,3 \cdot 0,256}{13,805^2 \cdot 1,127 \cdot 0,345} = 16,92$
37.	Безрозмірний параметр системи решітка – труби $\omega$	$\omega = \beta a_1$	$\omega = 13,805 \cdot 0,256 = 3,534$
38.	Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$	Коефіцієнти $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ визначаються за таблицею В1 Додатка В залежно від безрозмірного параметра системи решітка – труби $\omega$	З таблиці В.1: $\Phi_1 = 5,44, \Phi_2 = 3,64, \Phi_3 = 5,40$
39.	Безрозмірний параметр $t$	$t = 1 + 1,4\omega(m_n - 1)$	$t = 1 + 1,4 \cdot 3,534(1,172 - 1) = 1,85$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
40.	Коефіцієнт $T_1$	$T_1 = \Phi_1[m_n + 0,5(1 + m_n t)(t - 1)]$	$T_1 = 5,44 \times$ $\times [1,172 + 0,5(1 + 1,172 \cdot 1,85)(1,85 - 1)] =$ $= 13,70$
41.	Коефіцієнт $T_2$	$T_2 = \Phi_2 t$	$T_2 = 3,64 \cdot 1,85 = 6,73$
42.	Коефіцієнт $T_3$	$T_3 = \Phi_3 m_n$	$T_3 = 5,4 \cdot 1,172 = 6,33$
43.	Розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує $Q_{\Pi}$ , МН/м	$Q_{\Pi} = a_1 \frac{p_0(T_3 + \rho_1) - p_1 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2}$	$Q_{\Pi} = 0,256 \cdot$ $\frac{40,696(6,33 + 16,92) + 0,1417 \cdot 6,73}{(13,70 + 9,087 \cdot 1)(6,33 + 16,92) - 6,73^2} =$ $= 0,5 \text{ МН/м}$
44.	Розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує $Q_a$ , МН/м	$Q_a = m_n Q_{\Pi}$	$Q_a = 1,172 \cdot 0,5 = 0,586 \text{ МН/м}$
45.	Дотичні напруження в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом $\tau_{p1}$ , МПа	$\tau_{p1} = \frac{ Q_{\Pi} }{S_{1p} - C}$	У випадку таврового зварювання решітки з обичайкою кожуха $S_{1p} = S_p$ . $\tau_{p1} = \frac{ 0,5 }{0,044 - 0,001} = 11,63 \text{ МПа}$
46.	Коефіцієнт ослаблення решітки $\varphi_p$	$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{t_p}$	$d_0 = d_T = 0,025 \text{ м}$ $\varphi_p = 1 - \frac{0,025}{0,032} = 0,219 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
47.	Дотичні напруження в перфорованій частині трубної решітки $\tau_{p2}$ , МПа	$\tau_{p2} = \frac{ Q_a }{\varphi_p(S_p - C)}$	$\tau_{p2} = \frac{ 0,586 }{0,219(0,044 - 0,001)} = 62,23 \text{ МПа}$
48.	Перевірка статичної міцності трубної решітки	$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} \leq 0,8[\sigma]_p,$	$\max\{11,63; 62,23\} = 62,23 \text{ МПа}$ $0,8[\sigma]_p = 0,8 \cdot 143 = 114,4 \text{ МПа}$ $62,23 \text{ МПа} < 114,4 \text{ МПа}$ <p>Умова статичної міцності виконується.</p>
Якщо умова статичної міцності не виконується, тоді треба збільшити товщину стінки трубної решітки і перерахувати за наведеним вище алгоритмом			
Розрахунок міцності і стійкості кожуха			
49.	Розподілене зусилля по периметру кожуха $Q_K$ , МН/м	$Q_K = \frac{a}{2} p_T - Q_{\text{П}}$	$Q_K = \frac{0,3}{2} 0,82 - 0,5 = -0,377 \text{ МН/м}$
50.	Мембранне напруження в кожусі в місці приєднання до решітки у меридіанному напрямку $\sigma_{MX}$ , МПа	$\sigma_{MX} = \frac{ Q_K }{S_1 - C_K}$	$\sigma_{MX} = \frac{ -0,377 }{0,005 - 0,001} = 94,25 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
51.	Умова статичної міцності кожуха в місці приєднання до решітки	$\sigma_{MX} \leq 1,3[\sigma]_K$	$\sigma_{MX} = 94,25$ МПа, $1,3[\sigma]_K = 1,3 \cdot 144 = 187,2$ МПа, $94,25$ МПа < $187,2$ МПа. Умова статичної міцності кожуха в місці приєднання до решітки виконується
Якщо умова міцності кожуха в місці з'єднання з решіткою не виконується, можна встановити перехідний пояс збільшеної товщини завдовжки не менше $2\sqrt{DS_1}$ . Якщо осьова сила в кожусі $F < 0$ , слід провести перевірку кожуха на місцеву стійкість від дії стискаючої сили $F$ за ГОСТ 34233.2			
Розрахунок труб на міцність, стійкість та жорсткість			
52.	Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки розраховується за формулою $M_{\Pi}$ , МН·м/м	$M_{\Pi} = \left(\frac{a_1}{\beta}\right) \frac{p_1(T_1 + \rho K_q) - p_0 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + \rho_1) - T_2^2}$ $M_{\Pi} = \left(\frac{0,256}{13,805}\right) \frac{-0,1417(13,7 + 9,087 \cdot 1) - 40,696 \cdot 6,73}{(13,7 + 9,087 \cdot 1)(6,33 + 16,92) - 6,73^2} = -0,0106 \frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$	
53.	Згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої частини трубної решітки $M_a$ , МН·м/м	$M_a = M_{\Pi} + (a - a_1)Q_{\Pi}$	$M_a = -0,0106 + (0,3 - 0,256)0,5 =$ $= 0,0114 \frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
54.	Осьова сила, яка діє на трубу $N_T$ , МН	$N_T = \frac{\pi a_1}{i} [(\eta_M p_M - \eta_T p_T) a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 \beta M_a]$ $N_T = \frac{3,14 \cdot 0,256}{241} \cdot [(0,4254 \cdot 0,67 - 0,5946 \cdot 0,82) 0,256 + 5,44 \cdot 0,586 + 3,64 \cdot 13,805 \cdot 0,0114] = 0,012 \text{ МН}$	
55.	Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку $\sigma_{1T}$ , МПа	$\sigma_{1T} = \frac{ N_T }{\pi(d_T - S_T)S_T}$	$\sigma_{1T} = \frac{ 0,012 }{3,14(0,025 - 0,002)0,002} = 83,08 \text{ МПа}$
56.	Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку $\sigma_{2T}$ , МПа	$\sigma_{2T} = \frac{(d_T - S_T) \max\{ p_T ;  p_M ;  p_T - p_M \}}{2S_T}$ $\sigma_{2T} = \frac{(0,025 - 0,002) \max\{ 0,82 ;  0,67 ;  0,82 - 0,67 \}}{2 \cdot 0,002} = 4,72 \text{ МПа}$	
57.	Умова статичної міцності труб	$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} \leq [\sigma]_T$	$\max\{83,08; 4,72\} = 83,08 \text{ МПа}$ $[\sigma]_T = 143 \text{ МПа}$ $83,08 \text{ МПа} < 143 \text{ МПа}$ <p>Умова статичної міцності труб виконується</p>
58.	Розрахункова довжина труб при поздовжньому вигині $l_R$ , м. Розраховується, якщо $N_T < 0$	Для апаратів без перегородок $l_R = l$ ; для апаратів з перегородками $l_R = \max\{l_{2R}; 0,7l_{1R}\}$	–

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
59.	Коефіцієнт умов роботи при розрахунку труб на стійкість $K_T$ . Розраховується, якщо $N_T < 0$	Для робочих умов $K_T = 1,3$ ; для гідравлічних випробувань $K_T = 1,126$	—
60.	Коефіцієнт $\lambda$ . Розраховується, якщо $N_T < 0$	$\lambda = K_T \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T} \frac{l_R}{(d_T - S_T)}}$	—
61.	Коефіцієнт зменшення напруження при поздовжньому вигині $\varphi_T$ . Розраховується, якщо $N_T < 0$	$\varphi_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^4}}$	—
62.	Перевірка труб на стійкість. Виконується, якщо $N_T < 0$	$\sigma_{1T} \leq \varphi_T [\sigma]_T$	—
Перевірку труб на жорсткість проводять, коли до жорсткості труб пред'являють будь-які додаткові вимоги, наприклад для апаратів зі плівкою, що стікає. Перевірку жорсткості труб проводять за ГОСТ 34233.7 [1] лише при $N_T < 0$ .			

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Перевірка міцності кріплення труб в решітці, якщо труби кріпляться у решітці за допомогою розвальцювання			
63.	Допустиме навантаження на з'єднання труби з решіткою способом розвальцювання, $[N]_{TP}$ , МН	$[N]_{TP}$ визначають на підставі випробувань або за нормативними документами. За відсутності даних про міцність вальцювального з'єднання допускається приймати $[N]_{TP}$ за формулами: – для гладкозавальцьованих труб $[N]_{TP} = 0,5\pi S_T (d_T - S_T) \min\left\{\frac{l_B}{d_T}; 1,6\right\} \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\};$ – для труб, завальцьованих у пази за наявності одного паза $[N]_{TP} = 0,6\pi S_T (d_T - S_T) \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\},$ але не менш, ніж для такого ж з'єднання гладкозавальцьованих труб; – для труб, завальцьованих у пази з двома або більше пазами $[N]_{TP} = 0,8\pi S_T (d_T - S_T) \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}$ $[N]_{TP} = 0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,002(0,025 - 0,002) \min\{143; 143\} = 0,0165 \text{ МН}$	
64.	Умова міцності кріплення труб в решітці	$ N_T  \leq [N]_{TP}$	0,0120 МН < 0,0165 МН Умова виконується
Перевірка міцності кріплення труб в решітці, якщо труби кріпляться до решітки способом приварювання або приварювання з підвальцюванням			
65.	Момент інерції поперечного перерізу труби $J_T$ , м <sup>4</sup>	$J_T = \frac{\pi[d_T^4 - (d_T - 2S_T)^4]}{64}$	–

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
66.	Зведена довжина $l_{пр}$ , м	$l_{пр} = l$ – для апаратів без перегородок в кожусі; $l_{пр} = l_{1R}/3$ – для апаратів з перегородками	–
67.	Число циклів навантаження за розрахунковий термін служби $N$	Якщо число циклів не обумовлено, рекомендується приймати $N = 2000$	–
68.	Коефіцієнт міцності шва приварювання труби до решітки $\varphi_C$	$\varphi_C = \min\{0,5; (0,95 - 0,2 \lg N)\}$	–
69.	Згинальний момент, що діє на трубу $M_T$ , МН·м	$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{пр}} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 \beta M_a)$	–
70.	Умова міцності кріплення труб в решітці	$\tau = \frac{[N_T] d_T + 4  M_T }{\pi d_T^2 \delta} \leq \varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}$	–
Перевірка міцності кріплення труб в решітці, якщо труби кріпляться до решітки способом розвальцювання з обваркою			
71.	Умова міцності кріплення труб в решітці	$\max \left\{ \frac{\varphi_C \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\}}{\tau} + 0,6 \frac{[N]_{TP}}{ N_T }; \frac{[N]_{TP}}{ N_T } \right\} \geq 1$	–

### **3 ТЕМПЕРАТУРНІ КОМПЕНСАТОРИ**

У робочих умовах внаслідок зміни температури в апаратах і трубопроводах жорстких конструкцій виникають додаткові температурні напруження, які разом з напруженнями від тиску і зовнішніх навантажень можуть перевищити допустимі. У таких випадках для захисту від руйнувань необхідно застосовувати компенсатори.

У хімічній промисловості набули застосування лінзові, сільфонні, мембранні (гнучкі) і сальникові компенсатори (останні забезпечують вільне переміщення частин апарата однієї відносно одної).

У посібнику розглянуто конструкції і розрахунок найбільш поширених лінзових і сільфонних (хвильових) компенсаторів. Лінзові компенсатори найчастіше застосовують у горизонтальних та вертикальних апаратах і трубопроводах, які мають діаметр 0,1 м і більше. За менших діаметрів використовують сільфони, які можна виготовляти з різноманітних матеріалів.

Метод розрахунку лінзових і сільфонних компенсаторів подано відповідно до ГОСТ 30780 [13].

#### **3.1 Конструкції хвильових компенсаторів**

До найпоширеніших хвильових компенсаторів належать лінзові й сільфонні компенсатори [14].

##### **3.1.1 Лінзові компенсатори**

Компенсатори використовують для часткової компенсації температурних деформацій.

Найчастіше в апаратах типу К використовують одно- і багатоеlementні лінзові компенсатори, які виготовляють обкатуванням з коротких циліндричних обичайок (рис. 3.1).

Компенсувальна здатність лінзового компенсатора приблизно пропорційна кількості лінзових елементів у ньому.

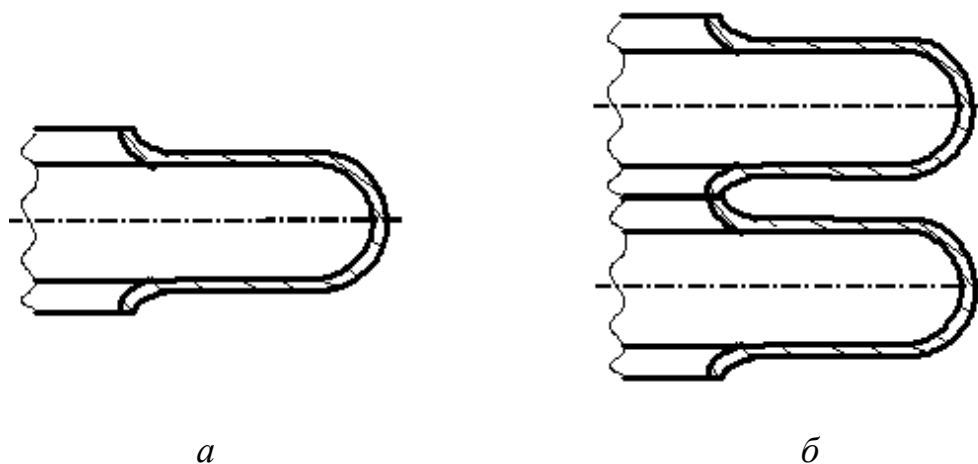


Рисунок 3.1 – Одноелементний (а) і багатоелементний (б) лінзові компенсатори

Лінзу можна виконувати зварною з двох півлінз, виготовлених з листа штампуванням (рис. 3.2).

Компенсатори, кількість лінз у яких більша від чотирьох, застосовувати не рекомендується, оскільки суттєво зменшується опір кожуха вигину.

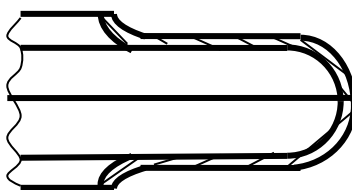


Рисунок 3.2 – Лінзовий компенсатор, зварений з двох півлінз

Для збільшення компенсувальної здатності лінзового компенсатора під час складання апарата компенсатор заздалегідь стискають, якщо він

призначений для роботи на розтягування або розтягується у разі подальшої його роботи на стиснення.

У горизонтальних апаратах у нижній частині кожної лінзи роблять дренажні отвори із заглушками для зливання води після гідравлічних випробувань.

Лінзові компенсатори, що застосовують у кожухотрубних теплообмінниках і теплообмінниках типу «труба в трубі», стандартизовані для умовних тисків  $p_y \leq 2,5$  МПа і розрахункових температур  $t_R$  від мінус 70 до +700 °С (рис. 3.3, табл. 3.1) [15].

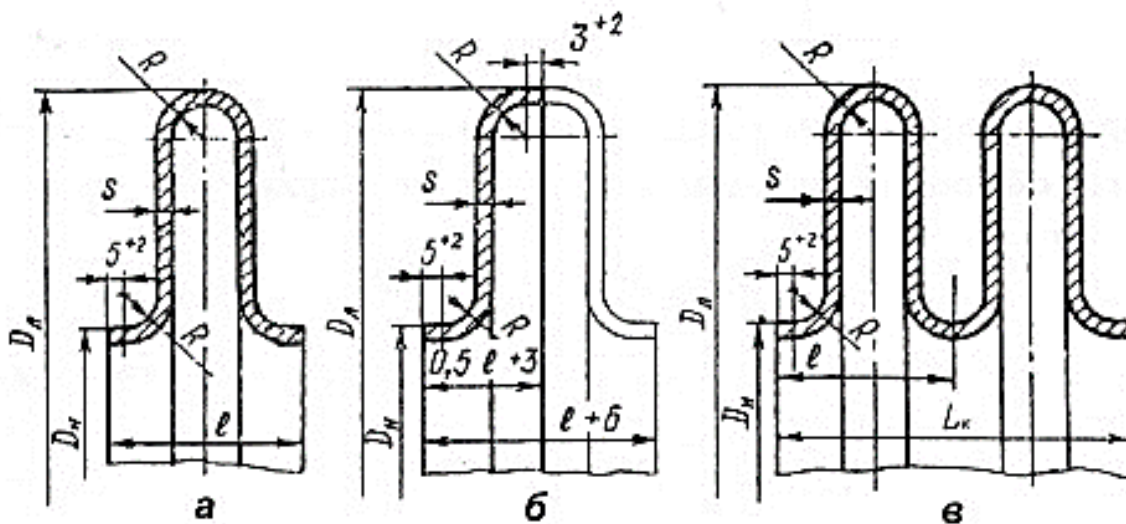


Рисунок 3.3 – Конструкції елементів лінзових компенсаторів: *a* – лінза; *б* – півлінза; *в* – багатолінзовий елемент

Границі застосування наведено в табл. 3.2, а компенсувальну здатність однієї лінзи  $\delta_l$  стандартних лінзових компенсаторів – у табл. 3.3.

Повну компенсувальну здатність компенсатора  $\delta_{ком}$ , який складається з декількох лінз, можна розрахувати за формулою

$$\delta_{ком} = 2\delta_l z_l,$$

де  $z_l$  – кількість лінз у компенсаторі.

Таблиця 3.1. Основні розміри стандартних лінзових компенсаторів [15]

Умовний тиск $p_y$ , МПа	Основні розміри лінзових компенсаторів, мм										
	$D_y$	$D_H$	$D_L$	$s$	$R$	$l$	$L_K$ для компенсаторів з кількістю лінз				
							1	2	3	4	
0,25	400–600	$D_y+12$	$D_H+250$	3	22	104	104	205	306	407	
	700–1400	$D_y+16$									
	1600–5000	$D_y+20$									
0,6	400–600	$D_y+8$		4		14	106	106	209	312	415
	700–1400	$D_y+16$									
	1600–3600	$D_y+20$									
1,0	400–600	$D_y+12$	$D_H+150$	3	72		72	141	210	279	
	700–1400	$D_y+16$									
	1600–1800	$D_y+20$									
	2000–3000	$D_y+24$									
1,6	400–600	$D_y+8$		4	74	74	145	216	287		
	700–1400	$D_y+16$									
	1600–1800	$D_y+20$									
	2000–2200	$D_y+24$									
2,5	400–500	$D_y+12$	$D_H+100$	3	10	51	–	102	148	240*	
	500–600	$D_y+16$									
	700–800	$D_y+20$									

\*Для компенсатора з п'ятьма елементами.

Границі застосування стандартних лінзових компенсаторів подано в табл. 3.2.



Таблиця 3.2. Границі застосування стандартних лінзових компенсаторів [14]

Марка сталі	Температура середовища, °С	Найбільший тиск, МПа, за умовного тиску $p_y$ , МПа				
		0,25	0,6	1,0	1,6	2,5
Ст3сп4, 20, 20К, 16ГС, 09Г2С	100	0,25	0,60	1,00	1,60	2,5
	200	0,24	0,56	0,94	1,50	2,4
	250	0,22	0,54	0,90	1,40	2,2
	300	0,20	0,48	0,80	1,30	2,0
	350	0,18	0,44	0,72	1,15	1,8
	400	0,16	0,38	0,64	1,00	1,6
	425	0,12	0,32	0,54	0,85	1,2
	450	0,10	0,25	0,42	0,68	1,0
08X22M6T, 08X21H6M2T, 12X18H10T, 10X17H13M3T	475	0,08	0,20	0,32	0,52	0,8
	100	0,25	0,60	1,00	1,60	2,5
	200	0,23	0,55	0,92	1,50	2,3
	250	0,22	0,54	0,90	1,40	2,2
	300	0,21	0,51	0,86	1,35	2,1
	350	0,20	0,50	0,82	1,30	2,0
	400	0,20	0,48	0,80	1,25	2,0
	425	0,20	0,47	0,78	1,25	2,0
	450	0,19	0,46	0,76	1,20	1,9
	475	0,19	0,45	0,75	1,20	1,9
	500	0,18	0,44	0,74	1,20	1,8
	540	0,18	0,44	0,72	1,15	1,8
	570	0,16	0,38	0,64	1,00	1,6
08X18H10T, 08X17H15M3T, 06X28МДТ	600	0,12	0,29	0,48	0,78	1,2
	610	0,11	0,27	0,44	0,70	1,1
	100	0,25	0,60	1,00	1,60	2,50
	200	0,22	0,53	0,88	1,40	2,20
08X18H10T, 08X17H15M3T, 06X28МДТ	250	0,20	0,50	0,84	1,30	2,00
	300	0,19	0,46	0,76	1,20	1,90
	350	0,18	0,42	0,70	1,10	1,80
	400	0,16	0,40	0,66	1,05	1,65
	425	0,16	0,40	0,66	1,00	1,60
	450	0,16	0,40	0,64	1,00	1,60
	475	0,16	0,38	0,64	1,00	1,60
	500	0,16	0,38	0,62	1,00	1,55
540	0,15	0,36	0,60	0,96	1,50	
570	0,13	0,32	0,54	0,85	1,30	
600	0,11	0,26	0,44	0,70	1,10	

Продовження табл. 3.2

Марка сталі	Температура середовища, °С	Найбільший тиск, МПа, за умовного тиску $p_y$ , МПа				
		0,25	0,6	1,0	1,6	2,5
10X17H13M20	100	0,25	0,66	1,00	1,60	2,5
	200	0,23	0,55	0,92	1,50	2,3
	300	0,21	0,51	0,86	1,35	2,1
	350	0,20	0,50	0,82	1,30	2,0
	400	0,20	0,48	0,80	1,25	2,0
	450	0,19	0,46	0,76	1,20	1,9
10X17H13M2T	500	0,18	0,44	0,74	1,20	1,8
	540	0,18	0,44	0,72	1,15	1,8
	570	0,16	0,38	0,64	1,00	1,6
	600	0,12	0,29	0,48	0,78	1,2
	625	0,10	0,23	0,38	0,62	1,0
	650	0,08	0,19	0,32	0,50	0,8
	675	0,06	0,16	0,26	0,42	0,6
	700	0,05	0,12	0,22	0,30	0,5

Таблиця 3.3. Компенсувальна здатність однієї лінзи  $\delta_l$  стандартних лінзових компенсаторів [14]

Умовний тиск $p_y$ , МПа	Умовний діаметр $D_y$ , мм	Компенсувальна здатність однієї лінзи $\pm\delta_l$ , мм, при загальній кількості циклів роботи компенсаторів за період експлуатації, год					
		300	600	1000	2000	5000	10000
0,25	400–450	$\pm 9$	$\pm 8$	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 4$
	500–5000	$\pm 10$	$\pm 9$	$\pm 8$	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 4,5$
0,6	400–450	$\pm 7$	$\pm 6,5$	$\pm 6$	$\pm 5$	$\pm 4$	$\pm 3,2$
	500–3600	$\pm 8$	$\pm 7,5$	$\pm 7$	$\pm 6$	$\pm 4,5$	$\pm 3,8$
1,0	400–1400	$\pm 4,5$	$\pm 4$	$\pm 3,7$	$\pm 3$	$\pm 2,4$	$\pm 2$
	1600–3000	$\pm 4$	$\pm 3,5$	$\pm 3,3$	$\pm 2,8$	$\pm 2,3$	$\pm 1,8$
1,6	400–1400	$\pm 3,5$	$\pm 3,3$	$\pm 2,9$	$\pm 2,4$	$\pm 1,9$	$\pm 1,5$
	1600–2200	$\pm 3$	$\pm 2,8$	$\pm 2,6$	$\pm 2,2$	$\pm 1,7$	$\pm 1,4$
2,5	400–800	$\pm 2,5$	$\pm 2,2$	$\pm 1,9$	$\pm 1,6$	$\pm 1,2$	$\pm 1,0$

Примітки. 1. Для компенсаторів, що не піддаються під час монтажу попередньому розтягуванню або стисненню, компенсувальну здатність беруть 75 % від загальної компенсувальної здатності  $2\delta_l$ .

2. Компенсувальну здатність компенсаторів з дренажними трубками і без них припускають однаковою.

### 3.1.2 Сильфонні компенсатори

Сильфонні компенсатори відрізняються від лінзових меншим діаметром, більшою кількістю хвиль і значно меншою товщиною стінки. Сильфони можуть бути одно- і багат шаровими з кількістю хвиль 20 і більше (рис. 3.4).

З'єднання сильфонів з деталями можуть бути розбірними (для роботи в умовах високих температур), зварними (сталеві сильфони) і виконаними паянням м'якими припоями (бронзові й латунні сильфони).

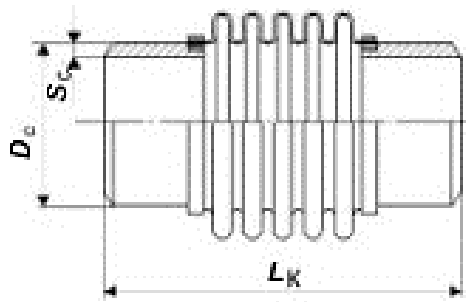


Рисунок 3.4 – Осьовий сильфонний компенсатор

У випадку, якщо сильфонний компенсатор експлуатуватиметься в зоні можливих механічних пошкоджень, над сильфоном необхідно встановити стаціонарний захисний кожух. Рекомендується установлення стаціонарного захисного кожуха обумовлювати під час замовлення сильфонного компенсатора.

Не допускається навантажувати компенсатор поперечними зусиллями, згинальними і крутними моментами, а також вагою приєднаних ділянок труб, машин і механізмів. Для цього під час монтажу

сильфонного компенсатора обов'язково установлюють ковзні опори (або охоплювальні опори).

### 3.1.3 Компенсатори інших типів

Конструкції компенсаторів показано на рис. 3.5.

Компенсатори можуть бути виконаними із плоских паралельних кілець, що з'єднані пластиною по зовнішньому краю (тип *a*), звареними з двох напівсферичних елементів (тип *б*) або тороїдними (тип *в*).

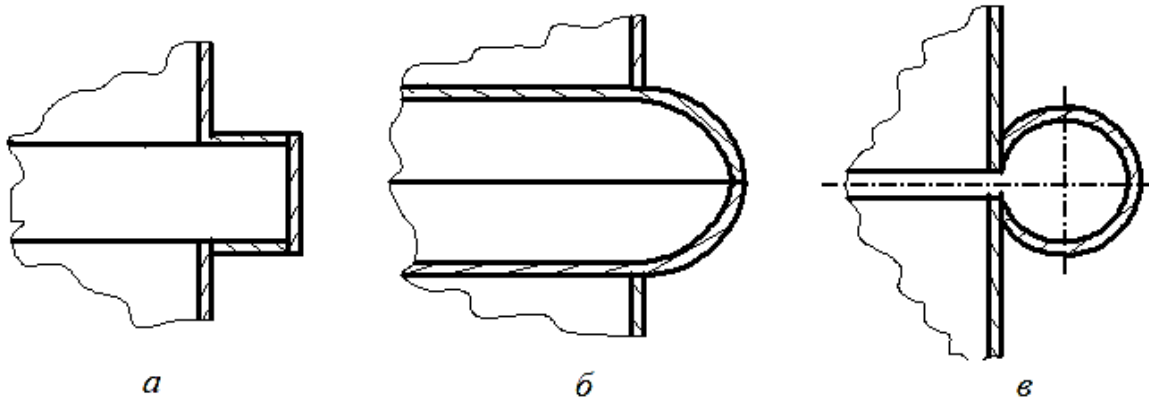


Рисунок 3.5 – Нестандартні компенсатори: компенсатори з плоских паралельних кілець, що з'єднані пластиною по зовнішньому краю (*a*); зварені з двох напівсферичних елементів (*б*) і тороїдні (*в*)

Тороїдні компенсатори виготовляють із труб, згинаючи у тор з подальшим різанням його по внутрішній поверхні. Компенсатори характеризуються невеликими порівняно з лінзовими напруженнями, які плавно змінюються по перерізу компенсатора. Тороїдні компенсатори дешеві і прості у виготовленні. Недоліком є важкі умови роботи зварного шва, що з'єднує компенсатор з кожухом.

### Питання для самоконтролю до розділу 3.1

1. Обґрунтувати вимоги до компенсаторів.
2. Класифікувати хвильові компенсатори.
3. Навести конструкції хвильових компенсаторів.
4. Навести способи збільшення компенсувальної здатності компенсаторів.
5. Пояснити відмінність сильфонних компенсаторів від сильфонних компенсаційних пристроїв.

### 3.2 Розрахунок лінзових і сильфонних компенсаторів

Методика розрахунку за ГОСТ 30780 [13] поширюється на одношарові сильфонні та лінзові компенсатори (далі – компенсатори) з паралельними або похилими (до 8°) пластинчастими ділянками хвилі, які використовують у посудинах і апаратах хімічної, нафтохімічної, нафтогазопереробної і суміжних галузей промисловості, навантажені внутрішнім або зовнішнім надлишковим тиском, а також навантаженням від осьових переміщень, і встановлює методи розрахунку на міцність, жорсткість і малоциклову міцність.

Моделі компенсаторів показано на рис. 3.6, види їх приєднання до стінки посудини – на рис. 3.7.

Розрахункові формули застосовні, якщо виконуються такі співвідношення:

$$3,0 \leq \frac{d}{h} \leq 100; \quad 0,1 \leq \frac{r_i}{h} \leq 0,5; \quad 0,018 \leq \frac{s}{h} \leq 0,1,$$

де  $d$  – розрахунковий діаметр западини хвилі компенсатора, м;  $h$  – висота хвилі компенсатора, м;  $r$  – радіус тороїдного переходу у верхній і нижній частинах компенсатора, м;  $s$  – виконавча товщина стінки компенсатора, м.

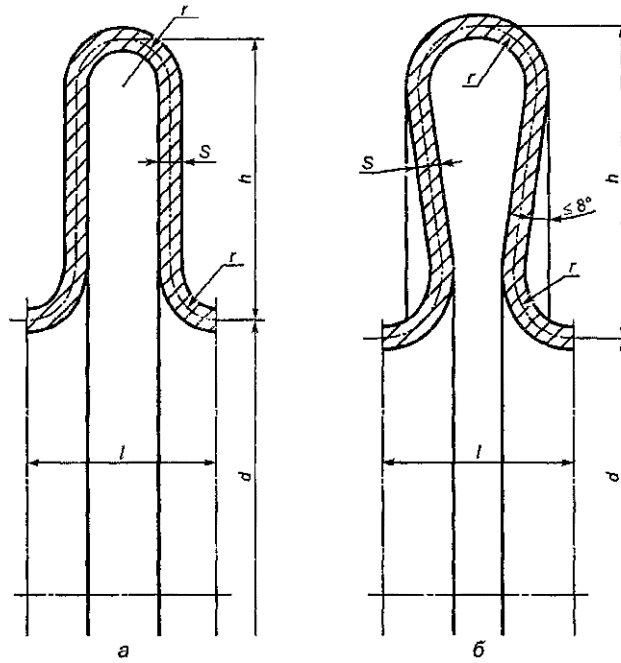


Рисунок 3.6 – Моделі компенсаторів

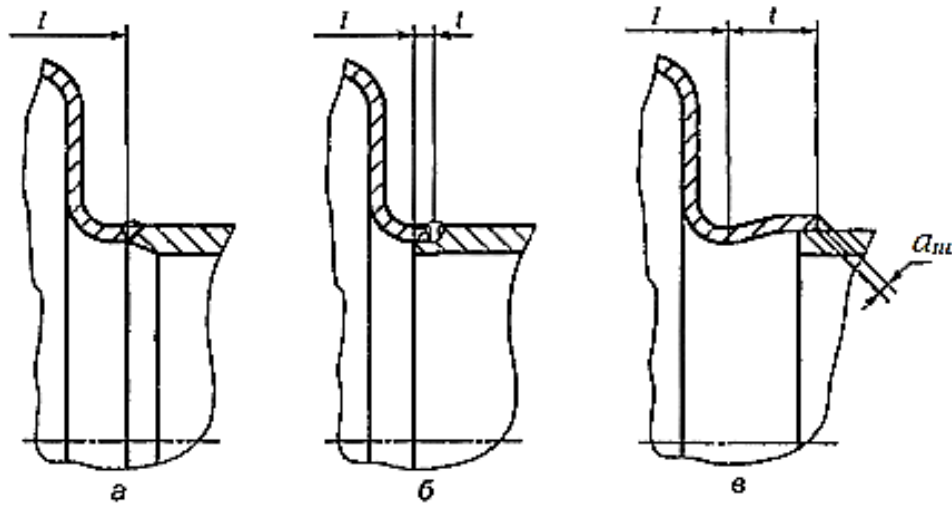


Рисунок 3.7 – Види приєднання компенсаторів до стінки посудини

Розрахунки на міцність компенсаторів дійсні тільки, якщо прилеглі до компенсатора елементи задовольняють умови міцності під час навантаження тиском.

Довжина сполучення  $t$  (рис. 3.7) має відповідати умові

$$t \leq \sqrt{D(s-c)},$$

де  $c$  – сума надбавок до розрахункової товщини компенсатора, м, інакше перевіряють несучу здатність елемента сполучення за формулою

$$p_R \leq \frac{2[\sigma](s-c)}{D+s} \left( 1 + \frac{1,45D(s-c)}{t_k^2} \right),$$

де  $p_R$  – внутрішній або зовнішній розрахунковий тиск, МПа;  $[\sigma]$  – допустиме напруження за розрахункової температури, МПа;  $t_k$  – приєднувальна довжина циліндрової частини компенсатора, м.

Розрахунки на міцність дійсні за умови повністю проварених окружних зварних швів (рис. 3.7). Розмір кутового зварного шва  $a_{ш}$  (рис. 3.7,в) має бути  $0,7s$ .

Розрахункові формули, наведені нижче, застосовні за умови, якщо розрахункова температура не перевищує значень, за яких виникає повзучість матеріалів, тобто за температури, коли допустиме напруження визначається відповідно до ГОСТ 34233.1 [12] тільки за границею плинності або тимчасового опору (границею міцності).

Якщо немає точних даних, то формули застосовні за умови, що розрахункова температура стінки компенсатора не перевищує, °С:

380 – з вуглецевої сталі;

420 – з низьколегованої сталі;

525 – з аустенітної сталі.

### 3.2.1 Розрахунок напружень у компенсаторі

Розраховуючи напруження в компенсаторі, зумовлене дією внутрішнього або зовнішнього надлишкового тиску, у формули підставляють товщину стінки компенсатора з урахуванням корозії і технологічних надбавок, а розраховуючи жорсткість компенсатора –

товщину стінки компенсатора без урахування корозії і технологічних надбавок.

### **Визначення еквівалентних напружень.**

Максимальні еквівалентні напруження у компенсаторі залежно від геометричних параметрів виникають у зоні тороїдного радіуса на боці більшого діаметра компенсатора або в зоні тороїдного радіуса на боці меншого діаметра компенсатора.

Максимальні еквівалентні напруження, зумовлені дією внутрішнього (зовнішнього) тиску  $\sigma_{V(P)}$  визначають за формулою

$$\sigma_{V(P)} = 10R_{(P)}p_R, \quad (3.1)$$

де  $R_{(P)}$  – розрахункові значення коефіцієнтів для визначення напруження, якщо навантаження тиском  $p_R = 0,1$  МПа.

Максимальні еквівалентні напруження під час осьового переміщення однієї хвилі компенсатора  $\sigma_{V(W)}$  визначають за формулою

$$\sigma_{V(W)} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{R_{(W)}}{h} EW, \quad (3.2.)$$

де  $R_{(W)}$  – розрахункові значення коефіцієнтів для визначення напружень під час навантаження осьовим переміщенням  $W = 1,0$  мм ( $10^{-3}$  м);  $E$  – модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури, МПа;  $W$  – осьове переміщення однієї хвилі компенсатора, м.

Середні колові напруження  $\sigma_{um}$  розраховують за формулою

$$\sigma_{um} = \frac{(d+h)lp_R}{4(s-c)(1,14r+h)\varphi}, \quad (3.3)$$

де  $l$  – ширина хвилі компенсатора, мм.

Потрібні для формул (3.1) і (3.2) значення коефіцієнтів  $R_{(P)}$  і  $R_{(W)}$  визначають за таблицями додатка А залежно від геометричних параметрів  $d/h$ ,  $r/h$  і  $s/h$ . Проміжні значення коефіцієнтів визначають лінійною



інтерполяцією. У табл. Е.1 і Е.2 додатка Е для кожного значення  $s/h$  перший рядок відповідає  $R_{(P)}$ , другий рядок –  $R_{(W)}$  і третій рядок –  $R_{(CW)}$ .

Коефіцієнти  $R_{(P)}$  і  $R_{(W)}$  для визначення максимального еквівалентного напруження на боці більшого діаметра компенсатора наведено в табл. Е.1.

Коефіцієнти  $R_{(P)}$  і  $R_{(W)}$ , вживані для визначення максимального еквівалентного напруження на боці меншого діаметра компенсатора, наведено в табл. Е.2.

### 3.2.2 Визначення коефіцієнтів жорсткості компенсатора

Коефіцієнт жорсткості однієї хвилі компенсатора під час осьового розтягування  $C_W$  визначають за формулою

$$C_W = 0,15 \cdot 10^{-4} R_{(CW)} (d + h) E. \quad (3.4)$$

Потрібні для формули (3.4) значення коефіцієнтів  $R_{(CW)}$  визначають за табл. Е.1 залежно від  $d/h$ ,  $r/h$  и  $s/h$ . Проміжні значення  $R_{(CW)}$  визначають лінійною інтерполяцією.

### 3.2.3 Розрахунок на міцність в умовах статичного навантаження внутрішнім (зовнішнім) тиском

В умовах дії внутрішнього (зовнішнього) надлишкового тиску міцність перевіряють за середнім коловим напруженням, яке визначають за формулою (3.3). При цьому має виконуватись умова

$$\sigma_{um} \leq [\sigma]. \quad (3.5)$$

Крім того, перевіряють міцність за еквівалентним напруженням від тиску за формулою (3.1). При цьому має виконуватися умова

$$\sigma_{V(P)} \leq 2[\sigma].$$

### 3.2.4 Розрахунок компенсатора на малоциклову міцність

Якщо компенсатор підданий циклам переміщень і циклам тиску, то має бути виконана умова:

$$\sigma_{AW} + \sigma_{AP} \leq 3[\sigma],$$

$$\frac{\sigma_{AW}}{[\sigma]_{AW}} + \frac{\sigma_{AP}}{[\sigma]_{AP}} \leq 1.$$

Амплітуду максимального еквівалентного напруження від переміщення однієї хвилі  $\sigma_{AW}$  розраховують за формулою

$$\sigma_{AW} = \frac{K_{\sigma}}{2} \sigma_{V(W)},$$

де  $K_{\sigma}$  – ефективний коефіцієнт концентрації.

Амплітуду максимального еквівалентного напруження від тиску визначають за формулою

$$\sigma_{AP} = \frac{K_{\sigma}}{2} \sigma_{V(P)}.$$

Ефективний коефіцієнт концентрації  $K_{\sigma}$  розраховують за формулою

$$K_{\sigma} = \rho_{ш} \xi / \phi,$$

де  $\rho_{ш}$  – коефіцієнт, що враховує обробку зварного шва;  $\xi$  – коефіцієнт, що враховує тип зварного шва;  $\rho_{ш} = 1,0$  для шліфованої поверхні зварного шва;  $\rho_{ш} = 1,1$  для необробленої поверхні зварного шва;  $\xi = 1,1$  для зварного шва по зовнішньому діаметрі компенсатора;  $\xi = 1,2$  для зварного шва по внутрішньому діаметрі компенсатора; коефіцієнт міцності зварного шва  $\phi$  визначають за табл. Ж.1 Додатка Ж.

Допустимі амплітуди напружень  $[\sigma]_{AW}$  (для кількості циклів переміщень  $N_W$ ) і  $[\sigma]_{AP}$  (для кількості циклів тиску  $N_P$ ) визначають за формулами:

$$[\sigma]_{AW} = \left( \frac{2300 - t_R}{2300} \right) \frac{A_a}{\sqrt{n_N N_W}} + \frac{B_a}{n_\sigma};$$

$$[\sigma]_{AP} = \left( \frac{2300 - t_R}{2300} \right) \frac{A_a}{\sqrt{n_N N_P}} + \frac{B_a}{n_\sigma}$$

для кількості циклів не більш  $0,5 \cdot 10^6$ ,

де  $t_R$  – розрахункова температура, °С;  $A_a, B_a$  – змінні величини, МПа;  $n_N$  – коефіцієнт запасу міцності за кількістю циклів;  $n_\sigma$  – коефіцієнт запасу міцності за напруженнями.

Змінні  $A_a, B_a$  і коефіцієнти  $n_N, n_\sigma$  визначають за ГОСТ 25859 [16].

Коефіцієнти запасу міцності за кількістю циклів  $n_N = 10$ , за напруженнями  $n_\sigma = 2$ .

Значення  $A_a$  і  $B_a$  наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Значення змінних  $A_a$  і  $B_a$

Сталі	$A_a$ , МПа	$B_a$ , МПа
Вуглецеві	$0,6 \cdot 10^5$	$1,43 \sigma_{c0} - 0,43 \sigma_T^{20}$ або $0,66 \sigma_B^{20} - 0,43$
Низьколеговані	$0,45 \cdot 10^5$	$\sigma_T^{20}$
Аустенітні корозійностійкі	$0,6 \cdot 10^5$	$\sigma_{c0}$ або 270

*Примітка.* У табл. 2.20:  $\sigma_{c0}$  – границя витривалості при вигині для  $10^6$  циклів, МПа;  $\sigma_B^{20}$  – мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за температури 20 °С, МПа;  $\sigma_T^{20}$  – границя плинності за температури 20 °С, МПа.

Допускається визначати напруження і жорсткість компенсаторів точнішими методами (наприклад, методом скінченних елементів) або експериментальними дослідженнями.

### **3.2.5 Алгоритм розрахунку лінзових і сильфонних компенсаторів на міцність, жорсткість і малоциклову міцність і приклад розрахунку**

*Вихідні дані.* Розрахувати одношаровий лінзовий компенсатор, який приварюється на кожусі кожухотрубного теплообмінника і складається з однієї лінзи. Зварний шов – стиковий, що виконується автоматичним зварюванням або вручну з одного боку по зовнішньому діаметру компенсатора і контролюється по всій довжині. Поверхня зварного шва не оброблюється. Загальна кількість циклів переміщень компенсатора за період експлуатації  $N_W = 1000$ , кількість циклів тиску  $N_P = 1000$ . Компенсатор виготовлено зі сталі СтЗсп. Матеріал кожуха теплообмінника – сталь СтЗсп. Матеріал труб теплообмінника – сталь 20. Внутрішній діаметр кожуха теплообмінника  $D = 0,6$  м. Відстань між трубними дошками  $L = 4$  м. Внутрішній розрахунковий тиск дорівнює розрахунковому тиску у міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника  $p_R = p_M = 0,67$  МПа. Сума додатків до розрахункової товщини  $c = 0,001$  м. Розрахункова температура компенсатора (кожуха теплообмінника)  $t_R = t_K = 168$  °С. Розрахункова температура труб теплообмінника  $t_{TP} = 80$  °С. Монтажна температура  $t_M = 20$  °С.

### **Питання для самоконтролю до розділу 3.2**

1. Проаналізувати особливості розрахунку максимальних еквівалентних напружень у компенсаторі.
2. Надати конструктивні й температурні умови застосування розрахункових формул, які є обов'язковими для виконання розрахунку за стандартною методикою.
3. Навести умови міцності компенсатора в умовах статичного навантаження внутрішнім (зовнішнім) тиском.
4. Надати алгоритм перевірки компенсатора щодо умови малоциклової міцності.

Таблиця 3.5. Алгоритм і приклад розрахунку лінзових компенсаторів на міцність, жорсткість і малоциклову міцність

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Визначення основних розмірів стандартних компенсаторів, допустимого напруження і модуля пружності в умовах розтягування матеріалу компенсатора			
1.	Умовний діаметр $D_y$ , м	$D_y$ визначають за табл. 3.1 залежно від внутрішнього діаметра $D$	$D_y = 0,6$ м
2.	Умовний тиск компенсатора $p_y$ , МПа	$p_y$ визначають за табл. 3.1 залежно від розрахункового тиску $p_M$	$p_y = 1$ МПа
3.	Виконавча товщина стінки компенсатора $s$ , м	$s$ визначають за табл. 3.1 залежно від умовного діаметра $D_y$ та умовного тиску $p_y$	$s = 3$ мм = 0,003 м
4.	Зовнішній діаметр западини хвилі компенсатора $D_H$ , м	$D_H$ визначають за табл. 3.1 для лінзових компенсаторів залежно від умовного діаметра $D_y$ та умовного тиску $p_y$	Для $D_y = 0,6$ і $p_y = 1$ МПа $D_H$ розраховують за формулою $D_H = D_y + 0,012$ , м $D_H = 0,6 + 0,012 = 0,612$ м
5.	Розрахунковий діаметр западини хвилі компенсатора $d$ , м	$d = D_H - s$	$d = 0,612 - 0,003 = 0,609$ м
6.	Висота хвилі компенсатора $h$ , м	$h$ визначають за табл. 3.1 залежно від умовного діаметра $D_y$ і умовного тиску $p_y$	Для $D_y = 0,6$ і $p_y = 1$ МПа, $h = 0,075$ м
7.	Радіус тороїдного переходу у верхній і нижній частинах компенсатора $r$ , м	$r$ визначають за табл. 3.1 залежно від умовного діаметра $D_y$ і умовного тиску $p_y$	Для $D_y = 0,6$ і $p_y = 1$ МПа, $r = 0,017$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Ширина хвилі компенсатора $l$ , м	$l$ визначають за табл. 3.1 залежно від умовного діаметра $D_y$ і умовного тиску $p_y$	Для $D_y = 0,6$ і $p_y = 1$ МПа, $l = 0,072$ м
9.	Допустимі напруження матеріалу компенсатора $[\sigma]$ для робочих умов, якщо $\eta=1$ , МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Г.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С (для $S_1 < 20$ мм) допустиме напруження $[\sigma] = 144$ МПа
10.	Модуль пружності в умовах розтягу матеріалу компенсатора при розрахунковій температурі $E$ , МПа	$E$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С модуль поздовжньої пружності $E = 1,84 \cdot 10^5$ МПа
Перевірка умов застосування розрахункових формул			
11.	Умови застосування розрахункових формул	$3,0 \leq \frac{d}{h} \leq 100; \quad 0,1 \leq \frac{r}{h} \leq 0,5;$ $0,018 \leq \frac{s}{h} \leq 0,1$	$\frac{d}{h} = \frac{0,609}{0,075} = 8,12; \quad 3,0 < 8,12 < 100;$ $\frac{r}{h} = \frac{0,017}{0,075} = 0,23; \quad 0,1 < 0,23 < 0,5;$ $\frac{s}{h} = \frac{0,003}{0,075} = 0,04; \quad 0,018 < 0,04 < 0,1.$ <p style="text-align: center;">Умови виконуються</p>

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Приєднувальна довжина циліндричної частини компенсатора $t$ , м	$t \leq \sqrt{D(s-c)},$ в іншому випадку необхідно перевірити несучу здатність з'єднувального елемента сполучення за формулою $p_R \leq \frac{2[\sigma](s-c)}{D+s} \left( 1 + \frac{1,45D(s-c)}{t^2} \right),$	$\sqrt{D(s-c)} = \sqrt{0,6(0,003 - 0,001)} = 0,035 \text{ м.}$ Приєднувальна довжина циліндричної частини компенсатора $t$ буде значно меншою за 0,035 м, оскільки ширина хвилі компенсатора $l = 0,072$ м (див. рис. 3.7), тобто умова виконується
13.	Температурна умова	Формули застосовні за умови, що розрахункова температура стінки компенсатора не перевищує, °С: 380 – з вуглецевої сталі; 420 – з низьколегованої сталі; 525 – з аустенітної сталі	$t_k = 168 \text{ °С} < 380 \text{ °С}$ Умова виконуються
<b>Розрахунок напружень у компенсаторі</b>			
14.	Розрахунковий коефіцієнт для визначення напруження, якщо навантаження тиском $p_R = 0,1$ МПа, $R_{(p)}$	$R_{(p)}$ визначають за табл. Е.1 додатка Е (коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці більшого діаметра компенсатора) і табл. Е.2 додатка Е (коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці меншого діаметра компенсатора) залежно від геометричних параметрів $d/h$ , $r/h$ і $s/h$ . Проміжні значення коефіцієнтів визначають лінійною інтерполяцією. Для розрахунку напружень беруть більше значення коефіцієнта $R_{(p)}$ з табл. Е.1 і Е.2	Коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці більшого діаметра компенсатора $R_{(p)} = 19,72.$ Коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці меншого діаметра компенсатора $R_{(p)} = 19,60.$ $R_{(p)} = 19,72$



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
15.	Розрахунковий коефіцієнт для визначення напруження, якщо навантаження осьовим переміщенням $W = 1,0$ мм ( $10^{-3}$ м), $R_{(W)}$	$R_{(W)}$ визначають за табл. Е.1 додатка Е (коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці більшого діаметра компенсатора) і табл. Е.2 додатка Е (коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці меншого діаметра компенсатора) залежно від геометричних параметрів $d/h$ , $r/h$ і $s/h$ . Проміжні значення коефіцієнтів визначають лінійною інтерполяцією. Для розрахунку напружень беруть більше значення коефіцієнта $R_{(W)}$ з табл. Е1 і Е2.	Коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці більшого діаметра компенсатора $R_{(W)} = 153,78$ . Коефіцієнт для визначення максимального еквівалентного напруження на боці меншого діаметра компенсатора $R_{(W)} = 153,78$ . $R_{(W)} = 153,78$
16.	Розрахунковий коефіцієнт для визначення жорсткості однієї хвилі компенсатора під час переміщення $W = 1,0$ мм, $R_{(CW)}$	$R_{(CW)}$ визначають за табл. Е.1 додатка Е залежно від геометричних параметрів $d/h$ , $r/h$ і $s/h$ . Проміжні значення коефіцієнта визначають лінійною інтерполяцією	$R_{(CW)} = 5,01$
17.	Максимальні еквівалентні напруження, зумовлені дією внутрішнього (зовнішнього) тиску $\sigma_{V(P)}$ , МПа	$\sigma_{V(P)} = 10R_{(P)}p_R$	$\sigma_{V(P)} = 10 \cdot 19,72 \cdot 0,67 = 132,124$ МПа

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
18.	Коефіцієнт лінійного розширення матеріалу труб при температурі $\alpha_T$ , $1/^\circ\text{C}$	$\alpha_T$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі 20 за розрахункової температури $t = 80^\circ\text{C}$ модуль поздовжньої пружності $\alpha_T = 11,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
19.	Коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кожуха при температурі $\alpha_K$ , $1/^\circ\text{C}$	$\alpha_K$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168^\circ\text{C}$ модуль поздовжньої пружності $\alpha_K = 12,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
20.	Осьове переміщення однієї хвилі компенсатора $W$ , м	$W$ визначають залежно від місця застосування компенсатора з урахуванням кількості хвильових елементів у компенсаторі	Для лінзового компенсатора, який приварюють на кожусі кожухотрубного теплообмінника і складається з однієї лінзи максимально можливе переміщення $W$ можна визначити як різницю в незалежних деформаціях кожуха і труб теплообмінника у робочих умовах, якби кожух і труби не були зв'язані між собою, за формулою $W = L[\alpha_K(t_K - t_M) - \alpha_T(t_{TP} - t_M)],$ $W = 4[12,6 \cdot 10^{-6}(168 - 20) - 11,6 \cdot 10^{-6}(80 - 20)] = 0,0047 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
21.	Модуль пружності в умовах розтягу за розрахункової температури $E$ , МПа	$E$ визначають за таблицею Д.1 додатка Д залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С модуль поздовжньої пружності $E = 1,84 \cdot 10^5$ МПа
22.	Максимальні еквівалентні напруження під час осьового переміщення однієї хвили компенсатора $\sigma_{V(W)}$ , МПа	$\sigma_{V(W)} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{R_{(W)}}{h} EW$	$\sigma_{V(W)} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{153,78}{0,075} 1,84 \cdot 10^5 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} = 425,57 \text{ МПа}$
23.	Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi$	$\varphi$ визначають за табл. Ж.1 Додатка Ж залежно від виду зварного шва і довжини швів, що контролюються	$\varphi = 0,9$
24.	Середні колові напруження $\sigma_{um}$ , МПа	$\sigma_{um} = \frac{(d+h)lp_R}{4(s-c)(1,14r+h)\varphi}$	$\sigma_{um} = \frac{(0,609+0,075)0,072 \cdot 0,67}{4(0,003-0,001) \cdot (1,14 \cdot 0,017+0,075)0,9} = 48,56 \text{ МПа}$
25.	Коефіцієнт жорсткості однієї хвили компенсатора при осьовому розтяганні $C_W$	$C_W = 0,15 \cdot 10^{-4} R_{(CW)}(d+h)E$	$C_W = 0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 5,01(0,609+0,075)1,84 \cdot 10^5 = 9,458 \text{ МН/м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок на міцність під час статичного навантаження внутрішнім (зовнішнім) тиском			
26.	Перевірка компенсатора на умову міцності за середнім коловим напруженням	$\sigma_{um} \leq [\sigma]$	48,56 МПа < 144 МПа Умова міцності виконується
27.	Перевірка компенсатора на умову міцності за еквівалентним напруженням від тиску	$\sigma_{V(P)} \leq 2[\sigma]$	132,124 МПа < 2·144 = 288 МПа Умова міцності виконується
Розрахунок компенсатора на малоциклову міцність			
28.	Коефіцієнт, що враховує обробку зварного шва	$\rho = 1,0$ для шліфованої поверхні зварного шва; $\rho = 1,1$ для необробленої поверхні зварного шва	$\rho = 1,1$
29.	Коефіцієнт, що враховує тип зварного шва	$\xi = 1,1$ для зварного шва по зовнішньому діаметру компенсатора; $\xi = 1,2$ для зварного шва по внутрішньому діаметру компенсатора	$\xi = 1,1$
30.	Ефективний коефіцієнт концентрації	$K_{\sigma} = \frac{\rho \xi}{\varphi}$	$K_{\sigma} = \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,9} = 1,34$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
31.	Амплітуда максимального еквівалентного напруження від переміщення однієї хвилі $\sigma_{AW}$ , МПа	$\sigma_{AW} = \frac{K_{\sigma}}{2} \sigma_{V(W)}$	$\sigma_{AW} = \frac{1,34}{2} \cdot 425,57 = 285,13$ МПа
32.	Амплітуда максимального еквівалентного напруження від тиску $\sigma_{AP}$ , МПа	$\sigma_{AP} = \frac{K_{\sigma}}{2} \sigma_{V(P)}$	$\sigma_{AP} = \frac{1,34}{2} \cdot 132,124 = 88,52$ МПа
33.	Коефіцієнти запасу міцності за кількістю циклів і напруженнями	$n_N = 10,$ $n_{\sigma} = 2$	$n_N = 10,$ $n_{\sigma} = 2$
34.	Величина $A_a$ , МПа	Для вуглецевих сталей $A_a = 0,6 \cdot 10^5$ МПа; для низьколегованих сталей $A_a = 0,45 \cdot 10^5$ МПа; для аустенітних корозійностійких сталей $A_a = 0,6 \cdot 10^5$ МПа	$A_a = 0,6 \cdot 10^5$ МПа
35.	Мінімальне значення тимчасового опору (границі міцності) за температури 20 °С, $\sigma_B^{20}$ , МПа	$\sigma_B^{20}$ визначають за табл. И1 Додатка И залежно від матеріалу компенсатора й розрахункової температури $t_R$	З таблиці И.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С $\sigma_B^{20} = 460$ МПа
36.	Границя плинності за температури 20 °С, $\sigma_T^{20}$ , МПа	$\sigma_T^{20}$ визначають за табл. К1 Додатка К залежно від матеріалу компенсатора й розрахункової температури $t_R$	З таблиці К.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 168$ °С $\sigma_T^{20} = 250$ МПа

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
37.	Величина $B_a$ , МПа	Для вуглецевих і низьколегованих сталей $B_a = 1,43 \sigma_{c0} - 0,43 \sigma_T^{20}$ або $B_a = 0,66 \sigma_B^{20} - 0,43 \sigma_T^{20}$ ; для аустенітних корозійностійких сталей $B_a = \sigma_{c0}$ або 270 МПа	$B_a = 0,66 \sigma_B^{20} - 0,43 \sigma_T^{20} =$ $= 0,66 \cdot 460 - 0,43 \cdot 250 = 196,1$ МПа
38.	Допустима амплітуда напружень $[\sigma]_{AW}$ для кількості циклів переміщень $N_W$ , МПа	$[\sigma]_{AW} = \left( \frac{2300 - t_R}{2300} \right) \frac{A_a}{\sqrt{n_N N_W}} + \frac{B_a}{n_\sigma}$	$[\sigma]_{AW} = \left( \frac{2300 - 168}{2300} \right) \frac{0,6 \cdot 10^5}{\sqrt{10 \cdot 1000}} + \frac{196,1}{2} =$ $= 654,22$ МПа
39.	Допустима амплітуда напружень $[\sigma]_{AP}$ для кількості циклів тиску $N_P$ , МПа	$[\sigma]_{AP} = \left( \frac{2300 - t_R}{2300} \right) \frac{A_a}{\sqrt{n_N N_P}} + \frac{B_a}{n_\sigma}$	$[\sigma]_{AP} = \left( \frac{2300 - 168}{2300} \right) \frac{0,6 \cdot 10^5}{\sqrt{10 \cdot 1000}} + \frac{196,1}{2} =$ $= 654,22$ МПа
40.	Перевірка компенсатора на умову малоциклової міцності	$\sigma_{AW} + \sigma_{AP} \leq 3[\sigma],$ $\frac{\sigma_{AW}}{[\sigma]_{AW}} + \frac{\sigma_{AP}}{[\sigma]_{AP}} \leq 1.$	$\sigma_{AW} + \sigma_{AP} = 285,13 + 88,52 = 373,65$ МПа $3[\sigma] = 3 \cdot 144 = 432$ МПа $373,65 \text{ МПа} < 432 \text{ МПа}$ $\frac{\sigma_{AW}}{[\sigma]_{AW}} + \frac{\sigma_{AP}}{[\sigma]_{AP}} = \frac{285,13}{654,22} + \frac{88,52}{654,22} = 0,571 < 1$ Умова малоциклової міцності виконується

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

#### Коефіцієнти лінійного розширення

*Таблиця А.1. Коефіцієнти лінійного розширення за ГОСТ 34233.1 [3]*

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	–	–

## ДОДАТОК Б

### Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити

Таблиця Б.1. Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити  $\psi_0$  [1]

$\eta_T$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_0$	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

## ДОДАТОК В

### Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб

Таблиця В.1. Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  [1]

$\omega$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Phi_1$	2	2,0	2,06	2,28	2,79	3,58	4,5	5,39
$\Phi_2$	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59
$\Phi_3$	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36

Продовження табл. В.1

$\omega$	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Phi_1$	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2}\omega$
$\Phi_2$	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,2	10,21	$\omega$
$\Phi_3$	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,5	$\sqrt{2}\omega$



## ДОДАТОК Г

### Допустимі напруження сталей

Властивості конструкційних матеріалів подані за ГОСТ 34233.1 [3].

Таблиця Г.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 Г.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 Г.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							
	03X21H21M4ГБ	03X18H11	03X17H14M3	08X18H10T, 08X18H12T, 08X17H13M2T, 08X17H15M3T		12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T		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 Г.4.* Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного і аустенітно-феритного класу і сплавів на залізонікелевій 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 Г.5. Допустимі напруження для алюмінію і його сплавів

Розрахункова температура, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для алюмінію і його сплавів марок				
	A85M, A8M	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 Г.6. Допустимі напруження для міді і її сплавів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$ , МПа для міді і її сплавів					
	M2	M3	M3p	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 Г.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 Д

### Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу

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

ГОСТ 34233.1 [3]

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 й низьколеговані сталі	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	–	–	–	–	–
Теплотривкі й корозієстійкі 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 залізонікелевій 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 Е

### Розрахункові значення коефіцієнтів для визначення напруження й жорсткості

*Таблиця Е.1.* Розрахункові значення коефіцієнтів  $R_{(P)}$ ,  $R_{(W)}$  для визначення напруження на боці більшого діаметра компенсатора і коефіцієнта  $R_{(CW)}$  для визначення жорсткості компенсатора

$d/h$	3,0	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	30,04	30,87	32,45	34,30	37,56	43,56	50,32	59,11	68,31	80,16	117,5	
		265,8	239,9	220,7	201,3	184,4	156,7	134,9	116,6	100,3	87,62	91,60	
		8,494	6,549	5,155	4,088	3,298	2,236	1,580	1,145	0,841	0,639	0,559	
	0,020	26,30	26,76	28,10	29,50	32,24	37,14	42,66	49,83	57,08	67,88	97,03	
		274,9	247,1	229,1	210,3	193,8	165,9	143,2	123,7	106,4	94,03	103,8	
		10,35	8,078	6,423	5,142	4,179	2,865	2,036	1,478	1,089	0,843	0,753	
	0,023	21,76	22,15	23,22	24,18	26,35	30,11	34,36	39,72	44,87	55,30	74,71	
		286,2	256,4	239,8	222,1	206,0	178,0	154,1	132,9	114,7	103,5	121,7	
		13,45	10,66	8,582	6,950	5,703	3,961	2,832	2,063	1,535	1,221	1,129	
	0,026	18,44	18,78	19,65	20,46	22,11	25,07	28,43	32,50	36,22	45,60	59,07	
		295,3	266,4	248,8	232,1	216,4	188,1	163,2	140,9	122,5	113,5	139,2	
		16,91	13,57	11,04	9,023	7,459	5,233	3,762	2,754	2,076	1,698	1,614	
	0,030	15,20	15,49	16,18	16,85	18,02	20,25	22,77	25,64	28,10	35,87	44,81	
		304,3	278,3	258,6	242,9	227,7	199,3	173,2	150,1	132,3	131,1	162,2	
		22,05	17,93	14,75	12,18	10,14	7,193	5,207	3,846	2,962	2,508	2,456	
	0,035	12,35	12,59	13,12	13,66	14,46	16,07	17,88	19,77	21,28	27,30	33,88	
		314,1	293,2	274,1	254,8	238,6	210,1	183,3	160,1	145,0	158,6	190,4	
		29,25	24,09	20,03	16,69	14,01	10,05	7,344	5,510	4,368	3,846	3,870	
	0,040	10,31	10,51	10,94	11,38	11,93	13,13	14,45	15,72	16,68	21,77	26,51	
		324,2	304,4	285,8	266,9	249,1	218,3	191,6	169,4	159,1	185,4	218,2	
		37,21	30,96	25,96	21,80	18,41	13,34	9,864	7,539	6,154	5,599	5,747	
	0,045	08,78	08,96	09,03	09,67	10,05	10,95	11,93	12,79	14,19	17,91	21,32	
		331,6	312,9	294,8	276,2	258,6	226,5	199,7	180,6	176,9	211,7	245,7	
		45,85	38,46	32,47	27,44	23,31	17,07	12,79	9,975	8,374	7,828	8,153	
	0,050	07,59	07,75	08,03	08,34	08,61	09,29	10,02	10,62	12,19	14,98	17,53	
		336,9	319,2	301,7	283,5	266,2	234,6	208,8	191,8	201,8	237,4	272,8	
		55,11	46,55	39,53	33,61	28,70	21,25	16,15	12,86	11,08	10,59	11,15	
	0,060	05,88	06,00	06,20	06,42	06,53	06,93	07,36	07,66	09,24	10,94		
		343,6	327,5	311,3	294,3	278,0	248,7	226,1	216,1	250,2	287,6		
		75,32	64,36	55,24	47,46	40,97	31,05	24,34	20,19	18,17	17,96		
	0,070	04,71	04,81	04,95	05,10	05,17	05,39	05,63	06,16	07,24	08,35		
		349,2	332,6	317,9	302,3	287,5	261,5	245,4	260,6	297,1	336,6		
		97,70	84,32	73,06	63,42	55,33	42,98	34,77	29,91	27,87	28,19		
	0,080	03,88	03,94	04,04	04,16	04,21	04,33	04,45	05,08	05,83			
		358,1	341,3	325,7	310,8	297,7	277,8	271,2	304,3	342,6			
		122,3	106,5	93,14	81,66	72,02	57,35	47,79	42,42	40,60			
	0,090	03,27	03,31	03,37	03,46	03,49	03,55	03,79	04,27	04,80			
		366,1	350,9	337,0	323,8	312,5	296,6	311,8	346,9	387,0			
		149,2	131,1	115,7	102,4	91,31	74,49	63,76	58,12	56,79			
	0,100	02,81	02,84	02,86	02,93	02,95	02,99	03,29	03,64		$R_{(P)}$		
		373,8	360,3	348,1	336,8	327,4	321,1	351,5	388,3		$R_{(W)}$		
		178,8	158,4	141,0	126,0	113,5	94,72	83,06	77,41		$R_{(CW)}$		



Продовження табл. Е.1

$d/h$	3,5	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	32,96	33,41	34,95	36,92	40,14	46,23	53,17	61,97	70,91	84,70	119,2
		246,2	219,0	202,3	185,8	171,2	146,5	126,3	108,8	93,29	82,57	92,30
		7,485	5,843	4,647	3,721	3,025	2,075	1,474	1,069	0,786	0,609	0,546
	0,020	28,59	28,95	30,28	31,79	34,49	39,47	45,11	52,24	59,16	72,51	97,86
		253,8	227,0	209,4	193,6	179,3	154,5	133,4	114,8	98,72	88,83	104,0
		9,123	7,203	5,784	4,672	3,826	2,649	1,891	1,374	1,018	0,805	0,741
	0,023	23,67	23,99	25,05	26,09	28,24	32,04	36,28	41,58	46,37	58,15	74,87
		263,2	237,4	218,4	203,5	189,7	164,6	142,4	122,6	106,3	98,55	121,2
		11,85	9,493	7,713	6,298	5,201	3,643	2,615	1,909	1,435	1,171	1,114
	0,026	20,07	20,35	21,21	22,01	23,71	26,70	30,01	33,96	37,32	47,34	58,95
		270,3	245,6	225,8	211,7	198,2	172,9	149,8	129,3	113,6	112,0	138,1
		14,89	2,06	9,897	8,149	6,776	4,788	3,455	2,541	1,944	1,635	1,596
	0,030	16,56	16,80	17,48	18,13	19,34	21,56	24,00	26,71	28,85	36,79	45,10
		277,1	254,3	237,2	220,3	207,1	181,7	158,0	137,4	123,1	133,6	160,3
		19,38	15,90	13,17	10,94	9,163	6,540	4,757	3,544	2,783	2,429	2,433
	0,035	13,46	13,66	14,18	14,69	15,51	17,08	18,79	20,52	21,75	27,85	33,95
		283,4	265,8	249,2	232,3	216,6	190,0	166,2	146,5	137,1	160,0	187,6
		25,63	21,27	17,80	14,92	12,58	9,078	6,684	5,083	4,128	3,744	3,840
	0,040	11,23	11,40	11,81	12,22	12,78	13,92	15,13	16,25	17,68	22,28	26,49
		290,6	273,9	257,9	241,3	225,7	197,3	173,7	157,1	156,4	185,7	214,6
		32,50	27,23	22,95	19,37	16,44	12,00	8,966	6,976	5,850	5,474	5,709
	0,045	09,55	09,70	10,03	10,36	10,74	11,58	12,45	13,18	14,88	18,22	21,26
		295,4	279,7	264,2	248,1	232,8	205,0	182,5	168,1	180,8	210,9	241,3
		39,92	33,70	28,60	24,29	20,73	15,32	11,63	9,269	8,005	7,678	8,105
	0,050	08,25	08,38	08,64	08,92	09,17	09,79	10,43	10,90	12,67	15,18	17,45
		298,7	283,8	269,0	253,5	238,6	211,9	191,1	179,2	204,7	235,7	267,8
		47,85	40,66	34,71	29,65	25,46	19,06	14,73	12,01	10,64	10,42	11,09
	0,060	06,37	06,47	06,64	06,82	06,93	07,27	07,62	08,01	09,49	11,01	
		302,3	289,1	275,7	261,6	248,2	224,6	208,4	220,8	251,2	284,3	
		65,16	55,99	48,32	41,76	36,28	27,92	22,35	19,03	17,60	17,73	
	0,070	05,08	05,16	05,27	05,40	05,44	05,62	05,81	06,41	07,38	08,37	
		310,7	295,7	281,8	268,6	257,0	239,4	236,6	264,2	296,3	331,8	
		84,40	73,27	63,88	55,84	49,09	38,86	32,19	28,44	27,15	27,89	
	0,080	04,16	04,22	04,29	04,39	04,41	04,49	04,64	05,25	05,91		
		318,3	304,9	292,7	281,3	271,4	257,8	276,8	306,2	340,2		
		105,7	92,67	81,62	72,13	64,19	52,21	44,61	40,64	39,72		
	0,090	03,50	03,52	03,57	03,64	03,65	03,68	03,95	04,38	04,85		
		330,1	316,7	305,2	295,0	288,4	290,5	316,0	347,1	383,1		
		129,3	114,4	101,8	90,92	81,85	68,31	59,98	56,01	55,75		
	0,100	02,99	03,01	03,02	03,07	03,08	03,15	03,41	03,72			$R_{(P)}$
		344,3	333,3	324,3	316,8	312,3	326,9	354,1	387,1			$R_{(W)}$
		155,5	138,8	124,6	112,5	102,4	87,51	78,67	74,97			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	4,0	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	35,49	35,98	37,37	39,44	42,64	48,80	55,88	64,62	73,18	89,62	120,1
		229,0	204,8	186,7	172,6	159,8	137,5	118,6	101,8	87,41	78,71	92,47
		6,680	5,270	4,229	3,414	2,795	1,934	1,379	1,001	0,740	0,584	0,538
	0,020	30,79	31,15	32,39	33,99	36,67	41,71	47,43	54,43	60,93	75,90	98,19
		235,4	212,0	192,8	179,3	166,8	144,3	124,6	107,0	92,44	84,92	103,8
		8,141	6,493	5,257	4,279	3,526	2,461	1,762	1,283	0,958	0,775	0,732
	0,023	25,52	25,77	26,81	27,93	30,06	33,88	38,13	43,24	47,61	60,11	74,81
		243,0	220,9	200,9	187,7	175,5	152,7	132,1	113,7	99,64	97,99	120,4
		10,57	8,542	6,994	5,749	4,773	3,365	2,423	1,777	1,353	1,133	1,103
	0,026	21,65	21,87	22,72	23,53	25,25	28,23	31,46	35,24	38,22	48,49	58,93
		248,5	227,2	208,2	194,3	182,4	159,5	138,3	119,7	106,7	114,0	136,9
		13,26	10,83	8,947	7,411	6,190	4,401	3,189	2,362	1,838	1,588	1,583
	0,030	17,87	18,06	18,73	19,35	20,59	22,77	25,10	27,62	29,45	37,34	45,26
		253,5	233,4	218,3	203,1	189,3	166,5	145,0	127,0	117,3	134,9	158,5
		17,22	14,23	11,86	9,903	8,326	5,978	4,374	3,296	2,644	2,370	2,417
	0,035	14,51	14,68	15,18	15,66	16,48	18,00	19,58	21,14	22,48	28,48	33,97
		257,1	242,0	227,5	212,5	198,5	173,0	152,1	136,9	135,3	160,4	185,2
		22,69	18,95	15,94	13,42	11,36	8,259	6,136	4,741	3,945	3,670	3,819
	0,040	12,10	12,24	12,62	13,00	13,55	14,62	15,71	16,69	18,45	22,65	26,45
		262,0	247,8	233,8	219,4	205,6	180,7	160,6	147,7	159,4	185,3	211,6
		28,68	24,16	20,47	17,35	14,79	10,89	8,237	6,535	5,623	5,384	5,682
	0,045	10,27	10,39	10,69	10,99	11,36	12,13	12,89	13,50	15,40	18,44	21,20
		265,0	251,7	238,4	224,5	211,2	187,4	169,0	158,7	183,0	209,8	237,7
		35,13	29,81	25,41	21,69	18,60	13,90	10,71	8,726	7,732	7,572	8,072
	0,050	08,86	08,96	09,19	09,43	09,68	10,22	10,76	11,15	13,03	15,31	17,39
		266,9	254,4	241,8	228,6	216,0	193,7	177,3	180,6	206,1	233,9	263,7
		42,01	35,88	30,78	26,43	22,81	17,30	13,61	11,36	10,33	10,29	11,05
	0,060	06,80	06,88	07,03	07,18	07,27	07,56	07,84	08,32	09,68	11,06	
		273,8	258,6	246,8	235,3	224,4	206,2	200,7	223,9	251,1	281,2	
		57,06	49,31	42,78	37,21	32,54	25,46	20,82	18,17	17,19	17,56	
	0,070	05,41	05,47	05,56	05,66	05,68	05,82	05,97	06,60	07,48	08,39	
		282,0	268,2	256,5	246,0	237,0	225,4	240,8	265,8	294,8	327,6	
		73,93	64,58	56,67	49,89	44,22	35,68	30,25	27,37	26,63	27,68	
	0,080	04,41	04,46	04,52	04,59	04,59	04,64	04,83	05,37	05,97		
		295,9	283,6	273,0	263,7	257,5	258,4	279,8	306,4	337,5		
		92,82	81,92	72,67	64,76	58,16	48,31	42,25	39,34	39,10		
	0,090	03,70	03,71	03,75	03,80	03,79	03,79	04,08	04,47	04,89		
		310,3	300,3	292,2	285,4	281,7	294,5	317,7	346,1	379,4		
		114,0	101,6	91,10	82,13	74,67	63,69	57,20	54,49	55,01		
	0,100	03,16	03,16	03,17	03,21	03,19	03,28	03,51	03,78			$R_{(P)}$
		328,8	320,0	314,2	310,9	310,7	329,8	354,7	384,9			$R_{(W)}$
		137,7	123,9	112,2	102,3	94,07	82,16	75,46	73,22			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	5,0	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	40,31	40,90	42,00	44,25	47,41	53,69	60,87	69,27	76,84	96,11	120,7
		200,2	181,3	164,7	151,0	140,8	122,0	105,1	90,14	78,35	75,17	92,14
		5,476	4,396	3,579	2,927	2,420	1,697	1,217	0,887	0,667	0,549	0,529
	0,020	35,01	35,44	36,44	38,19	40,82	45,91	51,62	58,19	63,72	80,18	98,19
		204,6	186,4	170,2	155,8	145,8	126,9	109,5	94,25	82,99	85,26	102,9
		6,666	5,402	4,433	3,651	3,035	2,143	1,544	1,133	0,866	0,733	0,721
	0,023	29,05	29,31	30,19	31,41	33,48	37,28	41,39	46,01	49,52	62,44	74,64
		209,4	192,1	176,4	161,5	151,8	132,7	115,0	99,83	90,06	100,8	118,9
		8,628	7,075	5,860	4,867	4,073	2,902	2,106	1,566	1,231	1,081	1,090
	0,026	24,65	24,80	25,58	26,45	28,11	31,00	33,99	37,30	39,57	49,75	59,41
		212,5	196,1	180,8	167,9	156,2	137,2	119,5	105,0	98,31	115,9	134,7
		10,78	8,924	7,448	6,226	5,238	3,764	2,757	2,084	1,684	1,526	1,567
	0,030	20,32	20,43	21,05	21,61	22,86	24,91	26,95	29,07	30,84	38,33	45,42
		214,7	199,4	186,7	174,5	162,9	142,0	124,8	113,0	115,9	135,7	155,5
		13,92	11,63	9,787	8,243	6,979	5,073	3,772	2,922	2,447	2,293	2,397
	0,035	16,46	16,56	17,01	17,42	18,22	19,57	20,87	22,10	24,14	29,30	33,96
		217,2	203,3	192,0	180,2	169,0	148,9	133,1	123,7	139,4	160,0	181,3
		18,22	15,37	13,04	11,07	9,442	6,974	5,300	4,241	3,693	3,574	3,793
	0,040	13,67	13,75	14,08	14,38	14,90	15,80	16,65	17,36	19,54	23,12	26,38
		221,3	206,1	195,5	184,4	173,8	155,1	141,3	142,5	162,2	183,8	206,9
		22,89	19,47	16,64	14,23	12,23	9,191	7,153	5,906	5,315	5,268	5,649
	0,045	11,56	11,63	11,87	12,09	12,43	13,03	13,59	14,00	16,12	18,72	21,11
		224,8	210,6	198,0	187,7	178,0	161,1	149,8	164,1	184,6	207,2	232,3
		27,92	23,92	20,58	17,73	15,36	11,76	9,374	7,966	7,368	7,435	8,030
	0,050	09,93	09,98	10,16	10,33	10,53	10,94	11,31	11,61	13,53	15,49	17,30
		228,1	215,0	203,1	192,0	182,3	168,5	167,3	185,2	206,5	230,3	257,5
		33,31	28,73	24,88	21,60	18,86	14,71	12,01	10,47	9,904	10,13	11,00
	0,060	07,57	07,60	07,70	07,79	07,86	08,04	08,19	08,79	09,95	11,13	
		237,2	225,9	216,1	207,5	200,3	192,4	206,6	226,3	249,4	276,0	
		45,23	39,51	34,69	30,56	27,12	21,95	18,70	17,02	16,64	17,36	
	0,070	05,98	06,01	06,06	06,11	06,11	06,17	06,23	06,89	07,64	08,42	
		250,8	241,1	233,1	227,0	222,4	227,8	244,8	266,1	291,3	320,9	
		58,88	52,07	46,31	41,39	37,30	31,25	27,59	25,94	25,96	27,41	
	0,080	04,86	04,88	04,91	04,94	04,90	04,91	05,13	05,57	06,08		
		267,9	260,2	254,4	250,6	250,1	263,1	281,8	304,9	332,4		
		74,52	66,68	60,04	54,40	49,73	42,94	39,07	37,64	38,30		
	0,090	04,06	04,06	04,07	04,09	04,05	04,06	04,31	04,62	04,97		
		288,1	282,7	280,3	279,1	282,2	297,6	317,9	342,9	372,8		
		92,43	83,63	76,20	69,91	64,74	57,40	53,48	52,50	54,06		
	0,100	03,47	03,44	03,44	03,45	03,42	03,52	03,69	03,90			$R_{(P)}$
		312,8	309,5	307,8	307,6	314,1	331,2	353,2	380,2			$R_{(W)}$
		112,9	103,2	95,09	88,23	82,66	74,94	71,21	70,93			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	7,0	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	49,27	49,95	50,62	53,08	56,13	62,34	69,16	76,31	81,70	102,1	120,3	
		157,9	145,4	133,8	122,5	112,3	98,09	84,92	73,95	68,75	78,08	90,85	
		3,966	3,259	2,704	2,248	1,883	1,343	0,975	0,727	0,576	0,511	0,520	
	0,020	42,80	43,28	43,92	45,80	48,29	53,18	58,37	63,68	67,33	83,84	98,29	
		159,7	147,7	136,5	125,4	115,4	100,7	87,66	77,30	75,28	87,85	101,1	
		4,802	3,976	3,319	2,775	2,335	1,677	1,228	0,929	0,755	0,688	0,711	
	0,023	35,46	35,73	36,31	37,58	39,47	42,93	46,41	49,87	52,75	64,17	75,47	
		161,0	149,8	139,2	128,7	119,2	103,8	91,44	83,47	88,43	102,2	116,3	
		6,160	5,147	4,329	3,646	3,086	2,242	1,667	1,294	1,089	1,026	1,077	
	0,026	30,01	30,12	30,65	31,50	32,96	35,44	37,80	40,11	42,41	51,56	59,79	
		162,9	151,0	141,0	131,0	122,5	107,8	96,28	91,34	102,1	116,4	131,4	
		7,629	6,423	5,437	4,607	3,922	2,886	2,184	1,740	1,511	1,461	1,551	
	0,030	24,61	24,58	25,04	25,53	26,58	28,20	29,61	30,98	33,69	39,90	45,53	
		166,0	154,5	144,2	134,5	126,0	112,5	103,1	106,3	119,9	135,0	151,4	
		9,745	8,274	7,058	6,028	5,173	3,876	3,009	2,480	2,232	2,215	2,377	
	0,035	19,77	19,73	20,03	20,26	20,96	21,91	22,68	23,38	26,08	30,17	33,94	
		169,0	158,7	149,3	140,5	132,9	120,8	116,0	127,3	141,7	157,8	176,3	
		12,63	10,82	9,317	8,035	6,967	5,351	4,290	3,674	3,427	3,478	3,767	
	0,040	16,28	16,23	16,42	16,56	16,98	17,53	17,95	18,29	20,79	23,64	26,31	
		171,9	162,7	154,3	146,5	140,3	131,8	135,0	147,7	162,9	180,4	201,0	
		15,79	13,65	11,85	10,32	9,047	7,126	5,891	5,214	4,996	5,154	5,616	
	0,045	13,66	13,62	13,73	13,80	14,05	14,37	14,58	14,96	16,98	19,06	21,03	
		177,2	168,8	161,5	155,1	149,8	144,6	154,2	167,7	183,9	202,8	225,8	
		19,23	16,77	14,69	12,92	11,45	9,242	7,859	7,148	6,995	7,300	7,990	
	0,050	11,65	11,61	11,67	11,70	11,84	12,00	12,10	12,64	14,15	15,71	17,22	
		183,8	176,1	169,6	164,4	160,9	162,0	173,0	187,3	204,5	224,9	251,9	
		23,01	20,22	17,87	15,87	14,21	11,74	10,24	9,528	9,477	9,976	10,95	
	0,060	08,80	08,76	08,77	08,76	08,77	08,78	08,75	09,42	10,31	11,26		
		200,3	194,6	190,8	188,6	188,5	197,1	209,7	225,7	245,2	268,8		
		31,65	28,27	25,41	22,98	20,98	18,08	16,42	15,82	16,10	17,15		
	0,070	06,93	06,89	06,87	06,85	06,81	06,75	06,85	07,33	07,89	08,51		
		222,3	219,6	218,1	217,5	220,5	231,0	245,3	263,2	285,2	314,5		
		42,02	38,08	34,76	31,97	29,68	26,47	24,82	24,49	25,31	27,15		
	0,080	05,64	05,60	05,57	05,54	05,48	05,39	05,60	05,90	06,27			
		248,8	246,7	245,9	247,5	252,0	264,1	280,1	300,0	324,6			
		54,40	49,96	46,25	43,15	40,66	37,28	35,79	35,92	37,51			
	0,090	04,70	04,67	04,64	04,60	04,53	04,56	04,69	04,88	05,13			
		274,9	273,5	273,5	277,4	282,7	296,4	314,2	336,2	366,5			
		69,10	64,23	60,19	56,85	54,22	50,84	49,70	50,52	53,14			
	0,100	04,03	03,98	03,95	03,91	03,92	03,94	04,02	04,13				$R_{(P)}$
		300,8	300,3	301,7	306,7	312,8	328,2	347,7	371,9				$R_{(W)}$
		86,42	81,18	76,89	73,39	70,70	67,50	66,91	68,67				$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	10	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	61,15	61,77	62,00	64,39	67,08	72,51	78,01	82,96	87,49	104,8	121,5
		117,5	109,2	101,9	94,54	87,78	76,16	67,78	63,96	69,46	79,08	89,20
		2,709	2,272	1,917	1,619	1,374	1,003	0,752	0,592	0,507	0,486	0,514
	0,020	52,93	53,29	53,49	55,27	57,38	61,40	65,30	68,70	72,18	86,23	99,32
		119,2	110,5	102,7	95,83	89,40	78,37	71,45	69,92	78,28	88,25	99,05
		3,250	2,742	2,326	1,975	1,685	1,246	0,950	0,766	0,675	0,659	0,704
	0,023	43,55	43,65	43,84	44,94	46,43	49,02	51,37	53,33	56,93	66,90	75,98
		121,0	113,1	105,8	99,02	93,03	83,51	78,01	81,85	91,25	101,8	113,8
		4,120	3,506	2,997	2,565	2,206	1,663	1,303	1,087	0,991	0,992	1,069
	0,026	36,57	36,49	36,67	37,33	38,40	40,08	41,48	42,62	46,26	53,44	60,05
		122,6	115,3	108,7	102,5	97,03	88,93	86,08	94,10	104,0	115,3	128,4
		5,060	4,338	3,735	3,222	2,796	2,151	1,731	1,489	1,395	1,421	1,542
	0,030	29,68	29,46	29,62	29,92	30,62	31,55	32,22	32,76	36,16	41,05	45,64
		124,7	118,3	112,5	107,5	103,4	98,01	101,4	110,1	120,7	133,0	147,8
		6,425	5,560	4,834	4,216	3,701	2,929	2,436	2,171	2,093	2,167	2,366
	0,035	23,57	23,34	23,41	23,45	23,88	24,29	24,50	24,65	27,63	30,87	33,97
		131,0	125,3	120,5	116,2	113,6	113,0	120,1	129,6	141,2	155,0	172,0
		8,329	7,290	6,415	5,671	5,052	4,133	3,568	3,292	3,257	3,420	3,752
	0,040	19,24	19,04	19,02	18,94	19,20	19,34	19,31	19,70	21,86	24,12	26,33
		138,2	133,7	130,1	127,5	126,3	130,5	138,4	148,7	161,4	176,8	196,7
		10,48	9,277	8,261	7,398	6,683	5,637	5,020	4,760	4,797	5,085	5,597
	0,045	16,05	15,88	15,82	15,70	15,83	15,82	15,68	16,23	17,77	19,41	21,04
		147,6	144,3	142,0	141,4	141,8	147,6	156,3	167,5	181,4	198,4	222,1
		12,92	11,56	10,41	9,437	8,636	7,484	6,840	6,622	6,765	7,220	7,966
	0,050	13,64	13,49	13,40	13,28	13,32	13,22	13,03	13,65	14,77	15,99	17,23
		159,3	157,4	156,4	156,1	157,8	164,4	173,9	186,1	201,2	219,9	247,6
		15,69	14,17	12,90	11,83	10,95	9,718	9,074	8,930	9,216	9,883	10,92
	0,060	10,30	10,18	10,08	09,95	09,91	09,73	09,61	10,12	10,75	11,47	
		186,1	184,9	184,6	186,0	189,0	197,3	208,4	222,6	240,3	264,2	
		22,34	20,55	19,07	17,83	16,84	15,52	14,97	15,08	15,78	17,03	
	0,070	08,15	08,05	07,95	07,84	07,75	07,55	07,61	07,88	08,25	08,68	
		212,5	212,0	212,8	215,7	219,5	229,3	242,3	258,6	279,0	310,5	
		30,73	28,73	27,08	25,73	24,68	23,40	23,07	23,60	24,91	27,00	
	0,080	06,68	06,59	06,49	06,39	06,29	06,17	06,24	0,37	06,58		
		238,8	239,0	241,0	244,7	249,3	260,7	275,5	294,1	320,7		
		41,18	39,01	37,25	35,85	34,80	33,68	33,74	34,88	37,04		
	0,090	05,62	05,55	05,46	05,37	05,31	05,25	05,25	05,29	05,41		
		265,0	266,0	268,8	273,3	278,6	291,7	308,3	330,0	363,4		
		53,97	51,69	49,88	48,49	47,52	46,73	47,36	49,31	52,58		
	0,100	04,88	04,82	04,75	04,69	04,64	04,56	04,51	04,50			$R_{(P)}$
		291,3	293,1	296,1	301,3	307,4	322,1	340,7	369,6			$R_{(W)}$
		69,40	67,07	65,29	63,98	63,16	62,87	64,27	67,30			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	15	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	77,05	77,18	76,80	78,56	80,36	83,86	87,01	89,13	94,50	109,2	122,7
		83,84	78,92	74,45	70,26	66,61	61,29	59,74	64,77	71,22	78,70	87,50
		1,669	1,430	1,231	1,062	0,922	0,709	0,571	0,492	0,462	0,471	0,511
	0,020	66,11	65,98	65,51	66,78	68,05	70,34	72,27	73,44	78,70	89,81	100,2
		84,74	80,28	76,23	72,49	69,61	65,67	67,15	72,65	79,45	87,46	97,10
		1,989	1,717	1,488	1,294	1,132	0,889	0,734	0,649	0,622	0,642	0,700
	0,023	53,73	53,37	52,99	53,63	54,38	55,55	56,40	56,77	61,57	69,23	76,51
		88,07	84,06	80,64	77,64	75,36	73,96	78,30	84,25	91,64	100,5	111,5
		2,514	2,191	1,920	1,689	1,497	1,211	1,034	0,945	0,928	0,971	1,064
	0,026	44,65	44,17	43,85	44,12	44,56	45,09	45,35	45,30	49,56	55,09	60,43
		91,78	88,45	85,91	83,84	82,67	84,43	89,21	95,66	103,7	113,5	125,8
		3,098	2,727	2,414	2,149	1,928	1,604	1,410	1,322	1,323	1,397	1,536
	0,030	35,87	35,33	35,08	35,07	35,26	35,32	35,17	34,89	38,44	42,20	45,92
		98,97	96,62	95,00	94,48	94,67	98,07	103,5	110,6	119,6	130,7	144,8
		3,983	3,550	3,185	2,876	2,622	2,254	2,046	1,971	2,007	2,139	2,359
	0,035	28,29	27,82	27,55	27,37	27,41	27,18	26,80	27,00	29,26	31,71	34,20
		111,1	109,9	109,4	109,3	110,5	114,7	120,9	129,1	139,3	152,0	169,3
		5,285	4,780	4,356	4,000	3,709	3,302	3,093	3,051	3,154	3,386	3,744
	0,040	23,04	22,65	22,37	22,11	22,07	21,72	21,24	21,64	23,12	24,79	26,53
		124,6	123,8	123,7	124,3	126,0	131,1	138,1	147,3	158,8	173,2	194,1
		6,841	6,271	5,796	5,399	5,081	4,651	4,461	4,478	4,677	5,044	5,586
	0,045	19,26	18,92	18,65	18,36	18,28	17,88	17,36	17,83	18,83	19,99	21,24
		138,0	137,6	137,8	139,2	141,3	147,2	155,1	165,3	178,1	194,4	219,0
		8,689	8,062	7,543	7,115	6,778	6,346	6,198	6,300	6,628	7,172	7,952
	0,050	16,43	16,14	15,89	15,59	15,49	15,06	14,54	15,02	15,69	16,51	17,43
		151,3	151,2	152,0	153,9	156,4	163,0	171,9	183,2	197,4	216,6	244,0
		10,87	10,19	9,637	9,187	8,841	8,428	8,349	8,567	9,060	9,829	10,91
	0,060	12,57	12,35	12,12	11,86	11,71	11,29	11,07	11,22	11,51	11,92	
		177,8	178,4	180,2	182,8	186,1	194,3	205,0	218,5	235,5	261,7	
		16,36	15,62	15,02	14,56	14,23	13,93	14,08	14,63	15,58	16,96	
	0,070	10,10	09,92	09,71	09,49	09,33	08,95	08,84	08,83	08,91	09,09	
		204,2	205,6	207,8	211,2	215,2	225,1	237,7	253,5	276,9	307,0	
		23,63	22,85	22,27	21,84	21,58	21,51	22,01	23,06	24,67	26,91	
	0,080	08,40	08,25	08,07	07,88	07,72	07,49	07,32	07,21	07,18		
		230,8	232,8	235,7	239,1	243,9	255,5	270,0	290,5	318,5		
		32,96	32,20	31,68	31,34	31,20	31,50	32,52	34,26	36,76		
	0,090	07,22	07,07	06,94	06,80	06,67	06,43	06,22	06,06	05,96		
		257,4	260,2	263,7	267,8	272,6	285,5	303,3	329,1	360,2		
		44,64	43,96	43,56	43,37	43,43	44,24	45,96	48,60	52,26		
	0,100	06,40	06,26	06,13	05,99	05,87	05,62	05,39	05,21			$R_{(P)}$
		284,1	287,6	291,9	296,8	302,4	316,0	339,4	367,9			$R_{(W)}$
		58,97	58,43	58,21	58,25	58,58	60,09	62,70	66,49			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

$d/h$	20	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	89,16	88,68	87,62	88,77	89,68	91,44	92,80	93,12	99,71	111,9	123,6
		67,37	64,44	61,94	59,77	58,42	58,02	61,25	65,72	71,31	78,08	86,53
		1,165	1,017	0,893	0,787	0,699	0,569	0,489	0,449	0,443	0,465	0,510
	0,020	76,03	75,36	74,32	75,05	75,56	76,42	76,94	76,71	82,66	91,91	100,9
		69,87	67,52	65,65	64,14	63,44	64,93	68,45	73,25	79,28	86,67	96,01
		1,395	1,228	1,088	0,969	0,870	0,725	0,639	0,600	0,601	0,636	0,699
	0,023	61,40	60,61	59,76	59,98	60,13	60,21	60,04	59,39	64,42	70,77	77,05
		75,43	73,76	72,67	72,41	72,62	75,09	79,07	84,41	91,14	99,50	110,2
		1,783	1,590	1,427	1,289	1,176	1,012	0,919	0,886	0,903	0,963	1,063
	0,026	50,84	50,02	49,32	49,25	49,21	48,89	48,37	47,58	51,77	56,31	60,89
		82,72	81,82	81,42	81,40	82,09	85,06	89,52	95,44	102,9	112,3	124,3
		2,231	2,012	1,829	1,674	1,548	1,370	1,277	1,255	1,295	1,388	1,534
0,030	40,81	40,01	39,45	39,19	39,01	38,43	37,69	37,47	40,17	43,19	46,31	
	93,64	93,03	92,93	93,34	94,52	98,11	103,3	110,0	118,5	129,2	143,7	
	2,935	2,686	2,477	2,304	2,164	1,974	1,888	1,892	1,974	2,128	2,356	
0,035	32,28	31,62	31,11	30,74	30,50	29,79	28,96	29,03	30,64	32,53	34,56	
	107,1	106,8	107,1	108,2	109,8	114,2	120,2	128,0	137,8	150,3	168,2	
	4,015	3,732	3,499	3,307	3,156	2,965	2,904	2,958	3,115	3,373	3,740	
0,040	26,44	25,90	25,42	25,02	24,75	24,01	23,16	23,36	24,32	25,52	26,86	
	120,4	120,5	121,3	122,8	124,8	130,0	136,9	145,8	157,0	171,3	192,7	
	5,353	5,042	4,790	4,587	4,433	4,258	4,242	4,370	4,631	5,029	5,582	
0,045	22,25	21,79	21,36	20,95	20,68	19,95	19,12	19,34	19,89	20,65	21,55	
	133,7	134,2	135,4	137,3	139,6	145,6	153,5	163,5	176,1	193,4	217,4	
	6,985	6,655	6,392	6,186	6,037	5,897	5,949	6,177	6,576	7,155	7,947	
0,050	19,13	18,74	18,34	17,94	17,68	16,97	16,30	16,38	16,66	17,12	17,72	
	146,9	147,8	149,3	151,6	154,3	161,1	169,9	181,1	195,1	215,6	242,1	
	8,949	8,607	8,342	8,142	8,008	7,925	8,069	8,428	9,002	9,808	10,90	
0,060	14,86	14,55	14,22	13,85	13,60	12,95	12,56	12,39	12,36	12,46		
	173,5	175,0	177,2	179,8	183,3	191,8	202,5	215,9	235,1	260,2		
	14,02	13,68	13,44	13,29	13,21	13,32	13,74	14,46	15,51	16,93		
0,070	12,10	11,85	11,56	11,26	11,00	10,51	10,15	09,67	09,67	09,59		
	200,1	202,4	205,2	208,5	212,3	222,1	234,7	252,3	276,0	305,0		
	20,87	20,58	20,40	20,34	20,38	20,79	21,61	22,86	24,59	26,87		
0,080	10,19	09,98	09,73	09,51	09,29	08,87	08,48	07,87	07,87			
	226,8	229,8	233,4	237,4	242,0	253,1	268,0	290,2	317,1			
	29,79	29,58	29,53	29,61	29,82	30,67	32,05	34,02	36,65			
0,090	08,91	08,71	08,49	08,28	08,07	07,66	07,27	06,60	06,60			
	253,7	257,4	261,6	266,4	271,8	284,7	303,5	328,4	358,5			
	41,06	41,00	41,13	41,42	41,87	43,30	45,43	48,33	52,13			
0,100	07,93	07,73	07,53	07,33	07,14	06,74	06,35	06,35			$R_{(P)}$	
	280,7	285,0	290,0	295,5	301,7	316,3	339,2	366,7			$R_{(W)}$	
	54,98	55,13	55,51	56,07	56,84	59,03	62,11	66,18			$R_{(CW)}$	

Продовження табл. Е.1

$d/h$	30	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	107,5	105,9	103,8	103,9	103,5	102,7	101,6	99,64	106,5	115,8	125,2
		57,01	56,47	56,27	56,32	56,80	58,77	61,75	65,74	70,80	77,19	85,46
		0,723	0,653	0,595	0,546	0,506	0,449	0,421	0,415	0,429	0,460	0,509
	0,020	91,40	89,87	87,98	87,84	87,21	86,02	84,61	82,49	88,29	95,19	102,3
		62,50	62,10	62,05	62,28	63,00	65,27	68,59	72,98	78,56	85,64	94,83
		0,885	0,808	0,744	0,691	0,647	0,589	0,562	0,561	0,585	0,631	0,698
	0,023	73,88	72,42	70,91	70,45	69,73	68,24	66,58	65,01	68,94	73,48	78,30
		70,61	70,44	70,61	71,20	72,15	74,89	78,74	83,77	90,15	98,27	109,0
		1,172	1,086	1,015	0,956	0,909	0,849	0,828	0,841	0,885	0,957	1,061
	0,026	61,46	60,12	58,87	58,26	57,51	55,92	54,18	53,13	55,63	58,67	62,02
		78,65	78,70	79,13	80,00	81,18	84,40	88,80	94,47	101,7	110,9	123,4
		1,521	1,427	1,350	1,287	1,239	1,182	1,172	1,203	1,273	1,381	1,533
	0,030	49,80	48,64	47,60	46,91	46,18	44,58	42,85	42,15	43,47	45,25	47,35
		89,30	89,65	90,42	91,59	93,08	96,96	102,1	108,7	117,0	127,6	142,8
		2,094	1,992	1,910	1,846	1,799	1,753	1,766	1,831	1,949	2,120	2,354
	0,035	39,96	39,03	38,13	37,42	36,74	35,21	33,55	33,04	33,51	34,36	35,50
		102,6	103,3	104,4	105,9	107,8	112,5	118,6	126,3	136,0	148,8	167,0
		3,013	2,905	2,823	2,761	2,722	2,703	2,759	2,887	3,086	3,364	3,738
	0,040	33,23	32,45	31,66	30,97	30,34	28,90	27,34	26,91	26,89	27,18	27,74
		115,8	116,9	118,3	120,1	122,4	127,9	134,9	143,8	154,9	170,7	191,3
		4,191	4,084	4,007	3,956	3,931	3,956	4,075	4,287	4,597	5,018	5,579
	0,045	28,37	27,71	27,00	26,34	25,76	24,42	23,10	22,56	22,25	22,19	22,38
		129,1	130,5	132,3	134,4	136,8	143,2	151,2	161,2	174,2	192,5	215,7
		5,665	5,565	5,502	5,468	5,466	5,554	5,759	6,083	6,537	7,142	7,943
	0,050	24,73	24,15	23,51	22,89	22,35	21,10	20,01	19,34	18,85	18,57	18,51
		142,4	144,2	146,3	148,8	151,6	158,5	167,4	178,5	194,2	214,5	240,2
		7,472	7,388	7,346	7,339	7,370	7,541	7,858	8,324	8,958	9,793	10,89
	0,060	19,65	19,19	18,66	18,10	17,64	16,58	15,73	14,95	14,28	13,76	
		169,2	171,6	174,5	177,6	181,2	189,8	200,5	214,8	234,5	258,6	
		12,24	12,21	12,24	12,31	12,44	12,86	13,48	14,33	15,46	16,91	
	0,070	16,29	15,91	15,46	15,01	14,59	13,75	12,92	12,13	11,40	10,77	
		196,0	199,1	202,7	206,6	211,0	221,3	234,0	252,2	274,9	303,0	
		18,77	18,84	18,99	19,20	19,47	20,24	21,31	22,71	24,52	26,85	
	0,080	14,04	13,67	13,29	12,91	12,52	11,74	10,96	10,18	09,44		
		223,1	226,8	231,1	235,7	240,9	252,9	268,4	289,7	315,6		
		27,38	27,60	27,91	28,30	28,78	30,04	31,71	33,85	36,58		
	0,090	12,35	12,01	11,67	11,32	10,96	10,24	09,50	08,76	08,04		
		250,2	254,6	259,6	265,0	270,9	284,7	303,5	327,5	356,5		
		38,35	38,76	39,30	39,94	40,70	42,59	45,04	48,13	52,04		
	0,100	11,02	10,71	10,39	10,07	09,75	09,07	08,38	07,68			$R_{(P)}$
		277,5	282,6	288,2	294,3	301,1	316,6	338,9	365,4			$R_{(W)}$
		51,97	52,64	53,48	54,43	55,53	58,24	61,67	65,96			$R_{(CW)}$



Продовження табл. Е.1

$d/h$	45	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	130,3	127,6	124,3	123,3	121,4	117,9	114,2	110,1	115,1	121,2	128,0
		54,27	54,36	54,69	55,29	56,09	58,29	61,30	65,19	70,13	76,45	84,71
		0,494	0,464	0,441	0,421	0,406	0,389	0,387	0,398	0,422	0,458	0,508
	0,020	111,6	109,1	106,4	105,2	103,3	99,82	96,14	92,80	95,90	100,0	104,8
		59,60	59,84	60,34	61,08	62,04	64,57	67,95	72,28	77,78	84,81	94,22
		0,625	0,594	0,569	0,549	0,535	0,521	0,524	0,543	0,577	0,628	0,697
	0,023	91,35	89,14	86,92	85,60	83,90	80,52	76,95	74,30	75,61	77,78	80,95
		67,57	68,03	68,73	69,70	70,89	73,91	77,86	82,88	89,22	97,32	108,6
		0,868	0,835	0,810	0,791	0,778	0,770	0,785	0,820	0,876	0,955	1,061
	0,026	77,02	75,08	73,20	71,86	70,29	67,08	63,68	61,42	61,66	62,60	64,14
		75,53	76,20	77,11	78,26	79,67	83,20	87,72	93,43	100,6	109,8	122,9
		1,172	1,139	1,115	1,098	1,089	1,092	1,122	1,179	1,263	1,378	1,532
	0,030	63,51	61,91	60,28	58,98	57,57	54,60	51,45	49,50	48,88	48,82	49,30
		86,14	87,09	88,29	89,67	91,31	95,51	100,8	107,4	115,8	126,9	142,1
		1,687	1,656	1,636	1,625	1,623	1,648	1,708	1,803	1,937	2,116	2,353
	0,035	51,98	50,67	49,27	48,05	46,80	44,13	41,26	39,53	38,35	37,59	37,29
		99,43	100,7	102,3	104,0	106,0	110,9	117,1	124,9	134,6	148,5	166,2
		2,533	2,509	2,499	2,501	2,515	2,579	2,691	2,853	3,072	3,359	3,737
	0,040	43,95	42,85	41,63	40,49	39,38	36,95	34,44	32,75	31,30	30,16	29,40
		112,7	114,4	116,3	118,4	120,8	126,5	133,7	142,5	154,3	170,2	190,3
		3,638	3,628	3,635	3,656	3,693	3,813	3,997	4,249	4,581	5,013	5,578
	0,045	38,06	37,1	36,03	34,98	33,97	31,75	29,62	27,89	26,31	24,96	23,94
		126,1	128,0	130,3	132,8	135,6	142,2	150,3	160,4	174,1	191,9	214,5
		5,040	5,050	5,082	5,130	5,197	5,393	5,671	6,040	6,519	7,136	7,941
	0,050	33,57	32,72	31,75	30,78	29,86	27,83	25,97	24,24	22,62	21,17	19,98
		139,5	141,6	144,4	147,2	150,4	157,8	167,0	178,2	194,0	213,7	238,8
		6,777	6,814	6,878	6,961	7,070	7,362	7,759	8,275	8,938	9,786	10,89
	0,060	27,17	26,48	25,68	24,84	24,06	22,43	20,81	19,18	17,58	16,07	14,74
		166,4	169,3	172,6	176,2	180,1	189,3	200,5	214,9	233,9	257,5	
		11,40	11,52	11,67	11,86	12,08	12,64	13,36	14,28	15,43	16,91	
	0,070	22,93	22,29	21,62	20,94	20,25	18,82	17,35	15,84	14,33	12,85	
		193,5	197,0	201,0	205,3	210,0	220,9	234,1	252,0	274,1	301,6	
		17,79	18,04	18,33	18,66	19,05	19,99	21,17	22,64	24,49	26,84	
	0,080	19,89	19,31	18,72	18,12	17,50	16,21	14,87	13,49	12,07		
		220,7	224,9	229,6	234,6	240,1	252,7	268,5	289,3	314,5		
		26,26	26,67	27,15	27,69	28,30	29,75	31,54	33,77	36,54		
	0,090	17,55	17,04	16,50	15,96	15,40	14,24	13,02	11,74	10,42		
		248,0	252,9	258,2	264,0	270,3	284,7	303,4	326,7	355,1		
		37,09	37,72	38,45	39,25	40,15	42,26	44,85	48,04	52,00		
	0,100	15,70	15,24	14,75	14,26	13,75	12,69	11,57	10,39			$R_{(P)}$
		275,5	281,0	287,1	293,5	300,6	316,8	338,5	364,4			$R_{(W)}$
		50,57	51,49	52,53	53,66	54,93	57,87	61,46	65,85			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

<i>d/h</i>	60	<i>r/h</i>										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
<i>s/h</i>	0,018	152,6	149,0	144,9	142,8	139,7	133,9	127,8	122,1	123,8	126,9	131,1
		52,69	53,09	53,67	54,43	55,37	57,74	60,83	64,74	69,70	76,03	84,55
		0,407	0,393	0,382	0,374	0,369	0,367	0,375	0,392	0,419	0,457	0,508
	0,020	131,9	128,6	125,2	123,0	120,1	114,6	108,7	103,8	103,9	105,3	107,7
		57,99	58,53	59,26	60,13	61,22	63,93	67,40	71,78	77,30	84,35	94,06
		0,528	0,514	0,504	0,497	0,493	0,495	0,510	0,536	0,575	0,627	0,697
	0,023	109,4	106,5	103,6	101,5	98,95	93,80	88,37	84,09	82,88	82,63	83,29
		65,95	66,69	67,63	68,71	69,98	73,17	77,23	82,30	88,68	96,81	108,3
		0,755	0,742	0,734	0,729	0,729	0,741	0,769	0,812	0,873	0,954	1,061
	0,026	93,26	90,83	88,30	86,25	83,94	79,19	74,14	70,31	68,32	67,09	66,65
		73,90	74,85	76,01	77,31	78,80	82,43	87,01	92,78	100,0	109,6	122,7
		1,043	1,033	1,028	1,028	1,033	1,059	1,104	1,170	1,260	1,377	1,532
	0,030	77,89	75,86	73,67	71,76	69,72	65,44	60,86	57,44	54,90	52,92	51,61
		84,53	85,75	87,18	88,77	90,58	94,88	100,2	106,9	115,2	126,8	141,8
		1,537	1,533	1,535	1,544	1,559	1,609	1,687	1,793	1,933	2,115	2,353
	0,035	64,56	62,88	61,01	59,28	57,50	53,70	49,62	46,56	43,75	41,32	39,42
		97,85	99,39	101,2	103,1	105,3	110,5	116,8	124,7	134,6	148,3	165,8
		2,358	2,365	2,382	2,406	2,440	2,534	2,666	2,841	3,067	3,357	3,736
	0,040	55,14	53,70	52,07	50,49	48,92	45,52	42,06	39,07	36,20	33,59	31,38
		111,2	113,1	115,2	117,5	120,1	126,1	133,5	142,5	154,3	169,9	189,8
		3,438	3,462	3,500	3,547	3,606	3,761	3,969	4,235	4,576	5,011	5,577
	0,045	48,13	46,87	45,43	43,99	42,58	39,50	36,48	33,61	30,79	28,13	25,78
		124,6	126,8	129,3	131,9	134,9	141,8	150,1	160,4	174,0	191,6	213,9
		4,814	4,864	4,929	5,007	5,100	5,335	5,639	6,025	6,512	7,133	7,940
	0,050	42,71	41,59	40,30	38,97	37,70	34,89	32,21	29,48	26,75	24,11	21,72
		138,1	140,6	143,4	146,4	149,7	157,5	166,9	178,3	193,9	213,3	238,1
		6,525	6,607	6,708	6,825	6,962	7,297	7,723	8,258	8,930	9,784	10,89
	0,060	34,92	33,97	32,90	31,80	30,71	28,45	26,09	23,65	21,14	18,65	
		165,1	168,2	171,7	175,4	179,6	189,0	200,4	214,9	233,7	257,0	
		11,09	11,27	11,47	11,69	11,95	12,56	13,32	14,25	15,42	16,90	
	0,070	29,66	28,79	27,88	26,95	26,00	24,01	21,92	19,73	17,46	15,15	
		192,2	196,0	200,2	204,6	209,5	220,7	234,2	251,9	273,7	300,9	
		17,44	17,74	18,09	18,47	18,90	19,89	21,12	22,62	24,48	26,83	
	0,080	25,78	25,01	24,21	23,39	22,54	20,77	18,91	16,93	14,87		
		219,5	223,9	228,8	234,0	239,7	252,6	268,5	289,0	314,0		
		25,86	26,34	26,88	27,47	28,12	29,64	31,49	33,74	36,53		
	0,090	22,79	22,10	21,38	20,65	19,89	18,30	16,62	14,83	12,94		
		247,0	252,0	257,6	263,5	269,9	284,6	303,3	326,3	354,4		
		36,64	37,35	38,15	39,01	39,95	42,14	44,79	48,01	51,99		
	0,100	20,42	19,79	19,15	18,48	17,80	16,36	14,82	13,19			$R_{(P)}$
		274,5	280,2	286,5	293,1	300,3	316,8	338,3	363,9			$R_{(W)}$
		50,06	51,07	52,19	53,39	54,71	57,74	61,39	65,81			$R_{(CW)}$

Продовження табл. Е.1

<i>d/h</i>	100	<i>r/h</i>										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
<i>s/h</i>	0,018	215,5	209,6	203,5	198,6	192,7	180,9	168,4	156,9	150,0	144,7	141,2
		50,69	51,42	52,29	53,24	54,33	56,92	60,13	64,12	69,13	75,49	84,38
		0,333	0,332	0,332	0,334	0,337	0,348	0,364	0,387	0,418	0,457	0,508
	0,020	189,4	184,3	178,7	174,1	168,8	157,9	146,3	135,8	128,3	122,0	117,2
		55,99	56,86	57,86	58,96	60,20	63,13	66,74	71,21	76,79	83,97	93,85
		0,445	0,445	0,448	0,452	0,457	0,474	0,498	0,531	0,572	0,627	0,697
	0,023	160,3	155,9	151,2	146,9	142,2	132,5	122,1	112,7	104,9	97,86	92,03
		63,96	65,02	66,23	67,54	69,01	72,45	76,66	81,84	88,31	96,74	108,1
		0,659	0,663	0,669	0,677	0,688	0,717	0,755	0,806	0,870	0,953	1,060
	0,026	139,0	135,2	131,0	127,1	122,9	114,2	104,8	96,26	88,46	81,16	74,81
		71,94	73,19	74,61	76,14	77,83	81,78	86,59	92,50	99,84	109,5	122,3
		0,934	0,943	0,955	0,969	0,986	1,031	1,089	1,163	1,257	1,376	1,532
	0,030	118,1	114,9	111,2	107,8	104,1	96,38	88,05	80,49	72,98	65,72	59,12
		82,61	84,11	85,80	87,61	89,62	94,25	99,86	106,7	115,3	126,6	141,4
		1,411	1,429	1,450	1,475	1,505	1,577	1,669	1,784	1,929	2,114	2,353
	0,035	99,48	96,77	93,67	90,59	87,45	80,72	73,62	66,77	59,78	52,83	46,27
		95,99	97,80	99,83	102,0	104,4	109,9	116,5	124,6	134,7	148,1	165,2
		2,210	2,243	2,282	2,326	2,376	2,496	2,646	2,831	3,063	3,356	3,736
	0,040	85,98	83,63	80,29	78,18	75,41	69,46	63,29	57,05	50,58	44,03	37,69
		109,4	111,5	113,9	116,4	119,2	125,5	133,2	142,4	154,3	169,6	189,2
		3,269	3,323	3,386	3,456	3,534	3,718	3,945	4,224	4,571	5,009	5,577
	0,045	75,73	73,65	71,25	68,78	66,32	60,99	55,51	49,80	43,82	37,69	31,64
		122,9	125,3	128,0	130,9	134,0	141,2	149,9	160,4	173,9	191,1	213,2
		4,624	4,707	4,801	4,904	5,019	5,286	5,612	6,011	6,507	7,132	7,940
	0,050	67,67	65,82	63,66	61,42	59,19	54,40	49,44	44,18	38,65	32,92	27,17
		136,4	139,1	142,2	145,4	148,9	157,0	166,7	178,4	193,7	212,8	237,3
		6,313	6,432	6,566	6,711	6,871	7,243	7,693	8,243	8,924	9,782	10,89
	0,060	55,96	54,29	52,50	50,64	48,75	44,79	40,57	36,07	31,28	26,25	
		163,5	166,9	170,6	174,5	178,8	188,6	200,3	214,9	233,3	256,3	
		10,84	11,06	11,30	11,56	11,84	12,49	13,28	14,24	15,42	16,90	
	0,070	47,70	46,23	44,70	43,12	41,50	38,07	34,40	30,47	26,27	21,81	
		190,8	194,8	199,2	203,8	208,9	220,4	234,2	251,7	273,2	300,0	
		17,15	17,50	17,89	18,31	18,77	19,82	21,07	22,60	24,47	26,83	
	0,080	41,57	40,27	38,93	37,55	36,11	33,10	29,86	26,39	22,65		
		218,2	222,8	227,9	233,3	239,1	252,4	268,5	288,7	313,3		
		25,52	26,06	26,65	27,29	27,98	29,55	31,44	33,71	36,52		
	0,090	36,82	35,67	34,47	33,24	31,96	29,27	26,38	23,26	19,91		
		245,7	251,0	256,8	262,9	269,5	284,6	303,2	325,8	353,6		
		36,26	37,03	37,89	38,80	39,79	42,05	44,73	47,98	51,97		
	0,100	33,04	32,00	30,93	29,82	28,67	26,24	23,62	20,80			$R_{(P)}$
		273,4	279,3	285,8	292,6	300,0	316,9	338,0	363,2			$R_{(W)}$
		49,64	50,72	51,90	53,16	54,52	57,63	61,32	65,78			$R_{(CW)}$

Таблиця Е.2. Розрахункові значення коефіцієнтів  $R_{(P)}$ ,  $R_{(W)}$  для визначення напруження на боці меншого діаметра компенсатора

$d/h$	3,0	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	3,834	4,164	4,680	5,433	6,450	9,555	15,05	25,21	44,77	78,15	117,5	
		33,75	31,85	31,85	32,49	33,54	37,60	41,62	42,78	42,85	62,79	91,60	
	0,020	3,232	3,547	4,042	4,766	5,741	8,724	13,97	23,53	40,80	67,83	97,03	
		43,39	41,45	41,10	41,12	41,45	45,74	48,23	47,99	51,30	74,21	103,8	
	0,023	2,438	2,768	3,280	4,010	5,056	8,019	12,81	21,34	35,47	55,30	74,71	
		58,54	55,89	54,57	53,43	54,61	57,10	57,24	55,42	65,09	91,46	121,7	
	0,026	2,286	2,702	3,291	4,043	4,988	7,593	11,89	19,37	30,84	45,60	59,07	
		73,27	69,58	67,11	66,61	67,23	67,36	65,35	62,82	79,76	108,6	139,2	
	0,030	2,590	2,972	3,488	4,138	4,954	7,206	10,82	16,98	25,66	35,87	44,81	
		91,30	86,13	84,19	83,31	82,36	79,45	75,27	78,42	100,1	131,1	162,2	
	0,035	2,871	3,218	3,669	4,228	4,925	6,836	9,699	14,37	20,57	27,30	33,88	
		110,9	106,5	104,2	101,4	98,64	92,61	87,19	100,1	125,9	158,6	190,4	
	0,040	3,054	3,368	3,767	4,256	4,858	6,489	8,872	12,24	16,68	21,77	26,51	
		129,7	125,1	121,2	116,8	112,6	104,5	104,9	122,8	151,5	185,4	218,2	
	0,045	3,154	3,439	3,793	4,221	4,743	6,132	8,110	10,80	14,19	17,91	21,32	
		147,0	141,1	135,8	130,2	124,9	116,0	124,7	146,1	176,9	211,7	245,7	
	0,050	3,192	3,448	3,762	4,136	4,588	5,769	7,408	9,568	12,19	14,98	17,53	
		162,0	155,0	148,6	142,1	136,3	132,5	145,2	169,4	201,8	237,4	272,8	
	0,060	3,140	3,344	3,586	3,870	4,206	5,058	6,188	7,606	9,243	10,94		
		187,0	178,6	171,2	164,2	162,3	169,0	187,4	215,6	250,2	287,6		
	0,070	2,99	3,150	3,335	3,549	3,797	4,412	5,203	6,163	7,242	8,346		
		208,4	199,8	195,3	193,8	195,3	207,1	229,6	260,6	297,1	336,6		
	0,080	2,802	2,924	3,063	3,224	3,407	3,854	4,417	5,087	5,831			
		231,0	226,5	224,9	225,8	229,6	245,5	271,2	304,3	342,6			
	0,090	2,601	2,694	2,799	2,919	3,055	3,383	3,790	4,271	4,803			
		257,3	254,9	255,5	258,5	264,3	283,6	311,8	346,9	387,0			
	0,100	2,406	2,476	2,555	2,644	2,746	2,988	3,288	3,641				$R_{(P)}$
		284,2	283,9	286,5	291,4	298,9	321,1	351,5	388,3				$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

<i>d/h</i>	3,5	<i>r/h</i>										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
<i>s/h</i>	0,018	3,580	4,017	4,705	5,693	7,007	10,96	17,81	30,09	51,75	84,70	119,2
		40,17	38,37	37,94	37,79	39,25	42,55	43,99	43,19	47,09	67,28	92,30
	0,020	2,880	3,350	4,066	5,065	6,435	10,29	16,74	27,95	46,49	72,51	97,86
		50,24	47,95	46,85	47,06	48,31	50,10	49,93	48,11	56,28	78,58	104,0
	0,023	2,729	3,292	4,069	5,049	6,268	9,595	15,41	25,01	39,60	58,15	74,87
		64,94	61,60	60,87	60,91	61,01	60,36	58,02	55,72	70,83	95,41	121,2
	0,026	3,066	3,575	4,260	5,119	6,190	9,126	14,22	22,34	33,82	47,34	58,95
		78,53	75,62	74,71	73,57	72,44	69,45	65,43	67,66	85,87	112,0	138,1
	0,030	3,413	3,869	4,466	5,207	6,129	8,654	12,74	19,17	27,59	36,79	45,10
		96,65	93,56	91,15	88,44	85,79	80,15	74,92	84,79	106,2	133,6	160,3
	0,035	3,699	4,102	4,616	5,247	6,025	8,129	11,21	15,85	21,69	27,85	33,95
		117,5	112,7	108,0	104,2	99,96	92,11	92,15	107,3	131,5	160,0	187,6
	0,040	3,849	4,207	4,653	5,194	5,853	7,606	10,09	13,47	17,68	22,28	26,49
		134,9	128,7	123,2	117,5	112,2	103,7	112,0	130,3	156,4	185,7	214,6
	0,045	3,898	4,214	4,600	5,064	5,622	7,079	9,089	11,72	14,88	18,22	21,26
		149,6	142,3	135,7	129,3	123,5	121,2	132,5	153,3	180,8	210,9	241,3
	0,050	3,876	4,153	4,486	4,882	5,353	6,562	8,189	10,26	12,67	15,18	17,45
		162,3	154,2	147,0	140,2	135,5	139,5	153,4	176,1	204,7	235,7	267,8
	0,060	3,702	3,911	4,156	4,442	4,776	5,611	6,690	8,008	9,492	11,01	
		184,1	175,5	169,9	167,9	168,5	177,3	195,8	220,8	251,2	284,3	
	0,070	3,446	3,600	3,779	3,984	4,221	4,802	5,534	6,409	7,379	8,369	
		206,5	202,0	200,0	200,2	202,9	215,5	236,6	264,2	296,3	331,8	
	0,080	3,169	3,282	3,410	3,558	3,727	4,135	4,644	5,246	5,911		
		233,6	231,0	231,0	233,1	237,6	253,4	276,8	306,2	340,2		
	0,090	2,900	2,982	3,074	3,180	3,301	3,591	3,952	4,379	4,852		
		261,3	260,6	262,4	266,2	272,2	290,5	316,0	347,1	383,1		
	0,100	2,652	2,710	2,776	2,852	2,938	3,147	3,408	3,718			$R_{(P)}$
		289,4	290,3	293,7	299,0	306,3	326,9	354,1	387,1			$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

$d/h$	4,0	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	3,231	3,881	4,846	6,177	7,952	12,76	20,98	34,98	57,89	89,62	120,1
		45,55	43,42	43,14	43,81	44,63	45,70	45,12	43,23	51,02	70,57	92,47
	0,020	3,105	3,859	4,884	6,164	7,740	12,08	19,73	32,18	51,31	75,90	98,19
		55,37	53,25	53,21	53,14	53,17	52,58	50,53	48,10	60,63	81,64	103,8
	0,023	3,586	4,243	5,120	6,214	7,569	11,29	18,03	28,34	42,94	60,11	74,81
		70,38	68,44	67,31	66,02	64,80	61,81	57,99	59,74	75,49	97,99	120,4
	0,026	3,966	4,555	5,328	6,288	7,478	10,73	16,45	24,91	36,13	48,49	58,93
		85,25	82,24	79,94	77,44	75,03	69,96	65,08	72,46	90,55	114,0	136,9
	0,030	4,327	4,848	5,517	6,342	7,359	10,12	14,49	20,98	29,01	37,34	45,26
		102,7	98,30	94,54	90,58	86,82	79,70	77,89	90,21	110,6	134,9	158,5
	0,035	4,580	5,033	5,600	6,291	7,134	9,385	12,59	17,01	22,48	28,48	33,97
		121,0	115,0	109,7	104,4	99,42	91,10	97,48	113,0	135,3	160,4	185,2
	0,040	4,669	5,061	5,543	6,122	6,822	8,651	11,18	14,48	18,45	22,65	26,45
		136,0	128,8	122,5	116,2	110,7	108,3	117,9	135,8	159,4	185,3	211,6
	0,045	4,645	4,982	5,390	5,875	6,453	7,937	9,931	12,46	15,40	18,44	21,20
		148,6	140,7	133,7	127,1	123,2	126,7	138,7	158,3	183,0	209,8	237,7
	0,050	4,547	4,835	5,178	5,583	6,060	7,265	8,847	10,80	13,03	15,31	17,39
		159,7	151,4	144,2	140,2	139,8	145,5	159,6	180,6	206,1	233,9	263,7
	0,060	4,235	4,441	4,681	4,961	5,285	6,085	7,102	8,322	9,678	11,06	
		180,5	175,6	173,1	172,4	174,0	183,5	200,7	223,9	251,1	281,2	
	0,070	3,867	4,011	4,178	4,371	4,592	5,131	5,804	6,602	7,484	8,387	
		208,1	205,0	204,3	205,4	208,7	221,3	240,8	265,8	294,8	327,6	
	0,080	3,504	3,604	3,719	3,852	4,004	4,372	4,830	5,373	5,975		
		236,2	234,9	235,8	238,5	243,3	258,4	279,8	306,4	337,5		
	0,090	3,170	3,239	3,318	3,409	3,514	3,768	4,087	4,468	4,895		
		264,6	264,8	267,2	271,3	277,3	294,5	317,7	346,1	379,4		
	0,100	2,874	2,920	2,973	3,035	3,107	3,285	3,511	3,784			$R_{(P)}$
		292,9	294,6	298,3	303,6	310,7	329,8	354,7	384,9			$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

<i>d/h</i>	5,0	<i>r/h</i>										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
<i>s/h</i>	0,018	4,559	5,621	7,016	8,737	10,84	17,20	27,69	44,00	67,65	96,11	120,7
		55,71	53,89	52,86	51,79	50,84	48,57	45,54	45,61	57,41	74,72	92,14
	0,020	5,056	6,000	7,235	8,763	10,64	16,36	25,72	39,63	58,64	80,18	98,19
		66,21	63,65	61,82	59,89	58,10	54,29	50,31	53,86	67,26	85,26	102,9
	0,023	5,637	6,458	7,519	8,830	10,45	15,15	22,94	33,84	47,72	62,44	74,64
		80,44	76,74	73,72	70,59	67,65	61,97	58,18	66,84	82,06	100,8	118,9
	0,026	6,034	6,764	7,695	8,837	10,24	14,03	20,38	28,96	39,28	49,75	59,41
		92,79	88,03	83,93	79,77	75,90	68,97	69,57	80,20	96,72	115,9	134,7
	0,030	6,327	6,959	7,748	8,708	9,876	12,97	17,37	23,66	30,84	38,33	45,42
		106,6	100,7	95,41	90,23	85,53	79,49	85,50	98,20	115,9	135,7	155,5
	0,035	6,419	6,944	7,588	8,360	9,288	11,69	14,97	19,18	24,14	29,30	33,96
		120,6	113,6	107,4	101,5	96,44	97,57	106,0	120,6	139,4	160,0	181,3
	0,040	6,313	6,747	7,269	7,889	8,624	10,49	12,96	16,03	19,54	23,12	26,38
		132,2	124,6	118,0	113,4	112,6	116,3	126,6	142,5	162,2	183,8	206,9
	0,045	6,095	6,449	6,870	7,366	7,947	9,401	11,28	13,57	16,12	18,72	21,11
		142,3	134,6	131,3	129,6	129,7	135,2	147,1	164,1	184,6	207,2	232,3
	0,050	5,816	6,104	6,442	6,838	7,298	8,435	9,882	11,61	13,53	15,49	17,30
		153,5	149,3	146,9	146,1	147,0	154,1	167,3	185,2	206,5	230,3	257,5
0,060	5,203	5,390	5,606	5,857	6,147	6,855	7,741	8,789	9,946	11,13		
	182,1	179,4	178,6	179,3	181,7	191,4	206,6	226,3	249,4	276,0		
0,070	4,614	4,732	4,869	5,029	5,214	5,663	6,228	6,898	7,643	8,421		
	210,8	209,6	210,2	212,3	215,9	227,8	244,8	266,1	291,3	320,9		
0,080	4,093	4,166	4,251	4,352	4,470	4,760	5,130	5,576	6,081			
	239,6	239,6	241,5	244,7	249,4	263,1	281,8	304,9	332,4			
0,090	3,646	3,689	3,741	3,803	3,878	4,066	4,313	4,619	4,972			
	268,0	269,3	272,3	276,5	282,2	297,6	317,9	342,9	372,8			
0,100	3,268	3,291	3,319	3,356	3,402	3,523	3,690	3,903			$R_{(P)}$	
	296,0	298,4	302,4	307,6	314,1	331,2	353,2	380,2			$R_{(W)}$	

Продовження табл. Е.2

$d/h$	7,0	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	9,597	11,03	12,85	15,10	17,85	26,99	39,98	57,70	79,57	102,1	120,3	-
		66,26	62,59	59,51	56,43	53,59	48,42	47,12	53,93	64,98	78,08	90,85	
	0,020	10,15	11,43	13,04	15,03	17,45	24,97	35,88	50,17	67,03	83,84	98,29	
		74,06	69,69	65,92	62,20	58,80	52,95	54,89	62,77	74,46	87,85	101,1	
	0,023	10,60	11,70	13,06	14,72	16,73	22,08	30,48	40,96	52,75	64,17	75,47	
		83,93	78,70	74,11	69,68	65,74	62,36	66,92	76,02	88,43	102,2	116,3	
	0,026	10,73	11,67	12,82	14,20	15,87	20,19	26,06	33,80	42,41	51,56	59,79	
		92,08	86,24	81,11	76,28	72,39	73,36	79,12	89,14	102,1	116,4	131,4	
	0,030	10,56	11,31	12,23	13,32	14,61	17,90	22,23	27,60	33,69	39,90	45,53	
		101,1	94,84	89,38	86,67	85,97	88,33	95,38	106,3	119,9	135,0	151,4	
	0,035	10,04	10,61	11,30	12,10	13,04	15,39	18,41	22,04	26,08	30,17	33,94	
		110,8	106,8	104,5	103,2	103,3	107,1	115,4	127,3	141,7	157,8	176,3	
	0,040	9,378	9,809	10,31	10,91	11,60	13,29	15,44	17,99	20,79	23,64	26,31	
		125,3	122,2	120,5	119,9	120,6	125,7	135,0	147,7	162,9	180,4	201,0	
	0,045	8,683	9,003	9,377	9,814	10,32	11,56	13,12	14,96	16,98	19,06	21,03	
		140,0	137,5	136,5	136,6	137,9	144,0	154,2	167,7	183,9	202,8	225,8	
	0,050	8,011	8,246	8,521	8,844	9,217	10,13	11,28	12,64	14,15	15,71	17,22	
		154,7	152,8	152,4	153,0	154,9	162,0	173,0	187,3	204,5	224,9	251,9	
	0,060	6,816	6,940	7,085	7,260	7,464	7,974	8,628	9,417	10,31	11,26		
		183,7	183,0	183,7	185,4	188,2	197,1	209,7	225,7	245,2	268,8		
0,070	5,846	5,904	5,976	6,067	6,177	6,465	6,850	7,331	7,893	8,507			
	212,2	212,6	214,2	216,8	220,5	231,0	245,3	263,2	285,2	314,5			
0,080	5,071	5,091	5,119	5,162	5,217	5,375	5,604	5,906	6,272				
	240,2	241,5	244,0	247,5	252,0	264,1	280,1	300,0	324,6				
0,090	4,451	4,448	4,450	4,463	4,485	4,564	4,697	4,887	5,131				
	267,6	269,8	273,2	277,4	282,7	296,4	314,2	336,2	366,5				
0,100	3,950	3,932	3,919	3,913	3,915	3,944	4,015	4,133			$R_{(P)}$		
	294,5	297,5	301,7	306,7	312,8	328,2	347,7	371,9			$R_{(W)}$		



Продовження табл. Е.2

$d/h$	10	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	19,18	21,07	23,40	26,22	29,61	39,38	52,93	69,41	87,49	104,8	121,5	
		65,73	61,32	57,46	53,82	50,67	50,58	54,22	60,81	69,46	79,08	89,20	
	0,020	19,18	20,81	22,79	25,18	28,03	35,36	45,74	58,49	72,18	86,23	99,32	
		70,57	65,85	61,74	57,96	57,07	58,03	62,28	69,32	78,28	88,25	99,05	
	0,023	18,67	19,97	21,53	23,39	25,58	31,10	38,29	47,08	56,93	66,90	75,98	
		76,78	71,84	69,23	67,88	67,47	69,26	74,26	81,85	91,25	101,8	113,8	
	0,026	17,83	18,86	20,08	21,52	23,20	27,39	32,75	39,17	46,26	53,44	60,05	
		83,47	80,69	78,94	77,96	77,91	80,43	86,03	94,10	104,0	115,3	128,4	
	0,030	16,49	17,24	18,11	19,14	20,33	23,27	26,97	31,35	36,16	41,05	45,64	
		95,52	93,17	91,87	91,35	91,75	95,10	101,4	110,1	120,7	133,0	147,8	
	0,035	14,79	15,28	15,85	16,52	17,31	19,23	21,64	24,49	27,63	30,87	33,97	
		110,4	108,6	107,9	107,9	108,8	113,0	120,1	129,6	141,2	155,0	172,0	
	0,040	13,21	13,53	13,90	14,35	14,86	16,14	17,76	19,70	21,86	24,12	26,33	
		125,1	123,8	123,6	124,1	125,4	130,5	138,4	148,7	161,4	176,8	196,7	
	0,045	11,83	12,03	12,27	12,56	12,90	13,76	14,88	16,23	17,77	19,41	21,04	
		139,6	138,8	139,0	140,0	141,8	147,6	156,3	167,5	181,4	198,4	222,1	
	0,050	10,65	10,76	10,91	11,09	11,32	11,90	12,68	13,65	14,77	15,99	17,23	
		153,8	153,5	154,2	155,6	157,8	164,4	173,9	186,1	201,2	219,9	247,6	
	0,060	8,760	8,782	8,820	8,882	8,968	9,224	9,608	10,12	10,75	11,47		
		181,7	182,3	183,9	186,0	189,0	197,3	208,4	222,6	240,3	264,2		
	0,070	7,370	7,345	7,329	7,329	7,345	7,434	7,612	7,885	8,249	8,688		
		209,0	210,4	212,8	215,7	219,5	229,3	242,3	258,6	279,0	310,5		
	0,080	6,324	6,275	6,231	6,200	6,178	6,176	6,238	6,372	6,580			
		235,7	237,9	241,0	244,7	249,3	260,7	275,5	294,1	320,7			
	0,090	5,518	5,457	5,399	5,350	5,308	5,254	5,248	5,298	5,407			
		262,0	264,9	268,8	273,3	278,6	291,7	308,3	330,0	363,4			
	0,100	4,882	4,815	4,751	4,693	4,640	4,556	4,508	4,504				$R_{(P)}$
		287,9	291,5	296,1	301,3	307,4	322,1	340,7	369,6				$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

<i>d/h</i>	15	<i>r/h</i>											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
<i>s/h</i>	0,018	35,91	38,04	40,56	43,54	47,03	55,69	66,74	79,94	94,50	109,2	122,7	
		58,54	56,57	55,32	54,58	54,47	55,99	59,56	64,77	71,22	78,70	87,50	
	0,020	33,95	35,63	37,60	39,94	42,65	49,33	57,76	67,74	78,70	89,81	100,2	
		64,67	62,89	61,83	61,28	61,37	63,27	67,15	72,65	79,45	87,46	97,10	
	0,023	30,90	32,07	33,44	35,05	36,92	41,52	47,28	54,09	61,57	69,23	76,51	
		73,73	72,24	71,47	71,21	71,57	73,96	78,30	84,25	91,64	100,5	111,5	
	0,026	28,01	28,81	29,75	30,87	32,17	35,38	39,43	44,23	49,56	55,09	60,43	
		82,63	81,43	80,94	80,94	81,56	84,43	89,21	95,66	103,7	113,5	125,8	
	0,030	24,59	25,06	25,62	26,31	27,12	29,14	31,75	34,89	38,44	42,20	45,92	
		94,28	93,45	93,30	93,65	94,59	98,07	103,5	110,6	119,6	130,7	144,8	
	0,035	21,06	21,28	21,56	21,92	22,36	23,51	25,06	27,00	29,26	31,71	34,20	
		108,5	108,1	108,4	109,2	110,5	114,7	120,9	129,1	139,3	152,0	169,3	
	0,040	18,26	18,33	18,44	18,61	18,83	19,47	20,41	21,64	23,12	24,79	26,53	
		122,5	122,5	123,2	124,3	126,0	131,1	138,1	147,3	158,8	173,2	194,1	
	0,045	16,02	16,00	16,01	16,07	16,16	16,49	17,04	17,83	18,83	19,99	21,24	
		136,2	136,6	137,7	139,2	141,3	147,2	155,1	165,3	178,1	194,4	219,0	
	0,050	14,21	14,15	14,10	14,08	14,09	14,22	14,52	15,02	15,69	16,51	17,43	
		149,7	150,5	152,0	153,9	156,4	163,0	171,9	183,2	197,4	216,6	244,0	
	0,060	11,52	11,40	11,29	11,20	11,12	11,04	11,07	11,22	11,51	11,92		
		176,4	177,9	180,2	182,8	186,1	194,3	205,0	218,5	235,5	261,7		
	0,070	9,640	9,501	9,367	9,244	9,133	8,952	8,846	8,831	8,913	9,093		
		202,5	204,8	207,8	211,2	215,2	225,1	237,7	253,5	276,9	307,0		
	0,080	8,262	8,120	7,979	7,846	7,720	7,496	7,322	7,214	7,180			
		228,3	231,3	235,0	239,1	243,9	255,5	270,0	290,5	318,5			
	0,090	7,217	7,077	6,937	6,803	6,673	6,430	6,223	6,063	5,960			
		253,8	257,5	261,9	266,7	272,3	285,5	303,3	329,1	360,2			
	0,100	6,399	6,264	6,129	5,997	5,868	5,620	5,397	5,208				$R_{(P)}$
		279,0	283,3	288,4	294,0	300,3	315,4	339,4	367,9				$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

$d/h$	20	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	50,86	52,72	54,89	57,46	60,44	67,76	76,94	87,78	99,71	111,9	123,6	
		57,96	56,81	56,21	56,00	56,25	58,02	61,25	65,72	71,31	78,08	86,53	
	0,020	46,65	47,98	49,55	51,42	53,59	58,95	65,72	73,75	82,66	91,91	100,9	
		63,89	62,92	62,49	62,45	62,86	64,93	68,45	73,25	79,28	86,67	96,01	
	0,023	41,03	41,82	42,77	43,92	45,28	48,69	53,09	58,41	64,42	70,77	77,05	
		72,60	71,90	71,73	71,93	72,58	75,09	79,07	84,41	91,14	99,50	110,2	
	0,026	36,29	36,74	37,28	37,98	38,82	41,02	43,94	47,58	51,77	56,31	60,89	
		81,14	80,70	80,77	81,21	82,09	85,06	89,52	95,44	102,9	112,3	124,3	
	0,030	31,17	31,32	31,54	31,87	32,29	33,49	35,21	37,47	40,17	43,19	46,31	
		92,32	92,20	92,59	93,34	94,52	98,11	103,3	110,0	118,5	129,2	143,7	
	0,035	26,26	26,22	26,22	26,28	26,41	26,91	27,78	29,03	30,64	32,53	34,56	
		106,0	106,3	107,1	108,2	109,8	114,2	120,2	128,0	137,8	150,3	168,2	
	0,040	22,56	22,41	22,29	22,22	22,19	22,30	22,68	23,36	24,32	25,52	26,86	
		119,5	120,2	121,3	122,8	124,8	130,0	136,9	145,8	157,0	171,3	192,7	
	0,045	19,70	19,50	19,31	19,16	19,05	18,94	19,02	19,34	19,89	20,65	21,55	
		132,8	133,9	135,4	137,3	139,6	145,6	153,5	163,5	176,1	193,4	217,4	
	0,050	17,44	17,21	16,99	16,80	16,64	16,39	16,30	16,38	16,66	17,12	17,72	
		146,0	147,4	149,3	151,6	154,3	161,1	169,9	181,1	195,1	215,6	242,1	
	0,060	14,13	13,89	13,65	13,43	13,21	12,84	12,56	12,39	12,36	12,46		
		172,1	174,2	176,8	179,8	183,3	191,8	202,5	215,9	235,1	260,2		
0,070	11,84	11,61	11,37	11,14	10,92	10,51	10,15	9,862	9,672	9,589			
	197,9	200,6	204,0	207,7	211,9	222,1	234,7	252,3	276,0	305,0			
0,080	10,18	9,954	9,729	9,508	9,290	8,869	8,481	8,143	7,873				
	223,3	226,8	230,8	235,2	240,2	252,0	268,0	290,2	317,1				
0,090	8,914	8,705	8,494	8,284	8,074	7,663	7,270	6,911	6,599				
	248,5	252,6	257,3	262,4	268,1	282,6	303,5	328,4	358,5				
0,100	7,925	7,730	7,532	7,334	7,136	6,740	6,354	5,989				$R_{(P)}$	
	273,4	278,1	283,5	289,3	296,5	316,1	339,2	366,7				$R_{(W)}$	

Продовження табл. Е.2

<i>d/h</i>	30	<i>r/h</i>											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
<i>s/h</i>	0,018	75,24	76,10	77,17	78,55	80,23	84,64	90,56	97,96	106,5	115,8	125,2	
		56,28	55,95	55,97	56,24	56,80	58,77	61,75	65,74	70,80	77,19	85,46	
	0,020	67,25	67,65	68,20	68,99	70,01	72,84	76,86	82,07	88,29	95,19	102,3	
		61,85	61,68	61,86	62,28	63,00	65,27	68,59	72,98	78,56	85,64	94,83	
	0,023	57,61	57,60	57,68	57,92	58,32	59,68	61,90	65,01	68,94	73,48	78,30	
		70,08	70,15	70,55	71,20	72,15	74,89	78,74	83,77	90,15	98,27	109,0	
	0,026	50,14	49,89	49,70	49,63	49,67	50,16	51,30	53,13	55,63	58,67	62,02	
		78,19	78,49	79,13	80,00	81,18	84,40	88,80	94,47	101,7	110,9	123,4	
	0,030	42,54	42,12	41,75	41,46	41,23	41,06	41,35	42,15	43,47	45,25	47,35	
		88,89	89,49	90,42	91,59	93,08	96,96	102,1	108,7	117,0	127,6	142,8	
	0,035	35,60	35,11	34,63	34,21	33,83	33,24	32,96	33,04	33,51	34,36	35,50	
		102,1	103,1	104,4	105,9	107,8	112,5	118,6	126,3	136,0	148,8	167,0	
	0,040	30,53	30,01	29,51	29,03	28,58	27,80	27,22	26,91	26,89	27,18	27,74	
		115,2	116,5	118,2	120,1	122,4	127,9	134,9	143,8	154,9	170,7	191,3	
	0,045	26,68	26,17	25,66	25,17	24,70	23,83	23,10	22,56	22,52	22,19	22,38	
		128,3	129,9	131,9	134,2	136,8	143,2	151,2	161,2	174,2	192,5	215,7	
	0,050	23,67	23,18	22,68	22,19	21,72	20,81	20,01	19,34	18,85	18,57	18,51	
		141,2	143,2	145,5	148,2	151,2	158,4	167,4	178,5	194,2	214,5	240,2	
	0,060	19,29	18,83	18,37	17,92	17,47	16,58	15,73	14,95	14,28	13,76		
		166,9	169,5	172,6	175,9	179,7	188,6	199,5	214,8	234,5	258,6		
	0,070	16,25	15,84	15,43	15,01	14,59	13,75	12,92	12,13	11,40	10,77		
		192,3	195,6	199,3	203,4	207,9	218,4	233,4	252,2	274,9	303,0		
	0,080	14,04	13,67	13,29	12,91	12,52	11,74	10,96	10,18	9,444			
		217,5	221,4	225,8	230,5	235,8	250,4	268,4	289,7	315,6			
	0,090	12,35	12,01	11,67	11,32	10,96	10,24	9,501	8,763	8,038			
		242,5	247,0	252,0	258,8	266,3	283,4	303,5	327,5	356,5			
	0,100	11,02	10,71	10,39	10,07	9,746	9,075	8,385	7,685				$R_{(P)}$
267,5		274,2	281,5	289,2	297,6	316,6	338,9	365,4				$R_{(W)}$	

Продовження табл. Е.2

$d/h$	45	$r/h$											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
$s/h$	0,018	105,0	104,4	103,9	103,7	103,6	104,4	106,5	110,1	115,1	121,2	128,0	
		54,05	54,26	54,69	55,29	56,09	58,29	61,30	65,19	70,13	76,45	84,71	
	0,020	93,04	92,17	91,39	90,79	90,35	90,09	90,86	92,80	95,90	100,0	104,8	
		59,40	59,75	60,34	61,08	62,04	64,57	67,95	72,28	77,78	84,81	94,22	
	0,023	79,20	78,14	77,14	76,25	75,47	74,32	73,88	74,30	75,61	77,78	80,59	
		67,36	67,93	68,73	69,70	70,89	73,91	77,86	82,88	89,22	97,32	108,6	
	0,026	68,78	67,66	66,57	65,56	64,61	63,00	61,90	61,42	61,66	62,60	64,14	
		75,26	76,05	77,07	78,26	79,67	83,20	87,72	93,43	100,6	109,8	122,9	
	0,030	58,40	57,28	56,17	55,11	54,08	52,19	50,63	49,50	48,88	48,82	49,30	
		85,75	86,80	88,11	89,59	91,31	95,51	100,8	107,4	115,8	126,9	142,1	
	0,035	49,04	47,98	46,92	45,87	44,84	42,86	41,06	39,53	38,35	37,59	37,29	
		98,77	100,2	101,8	103,7	105,8	110,8	117,1	124,9	134,6	148,5	166,2	
	0,040	42,23	41,24	40,24	39,24	38,25	36,30	34,44	32,75	31,30	30,16	29,40	
		111,7	113,4	115,4	117,6	120,1	126,0	133,2	142,2	154,3	170,2	190,3	
	0,045	37,06	36,14	35,21	34,27	33,33	31,46	29,62	27,89	26,31	24,96	23,94	
		124,6	126,7	129,0	131,6	134,4	141,1	149,3	159,7	174,1	191,9	214,5	
	0,050	33,01	32,16	31,29	30,41	29,53	27,74	25,97	24,24	22,62	21,17	19,98	
		137,5	139,8	142,5	145,4	148,6	156,2	165,4	178,1	194,0	213,7	238,8	
	0,060	27,07	26,33	25,58	24,81	24,03	22,43	20,81	19,18	17,58	16,07		
		163,0	165,9	169,3	172,9	176,8	186,0	199,2	214,9	233,9	257,5		
0,070	22,93	22,29	21,62	20,94	20,25	18,82	17,35	15,84	14,33	12,85			
	188,3	191,8	195,8	200,1	205,5	218,5	233,8	252,0	274,1	301,6			
0,080	19,89	19,31	18,72	18,12	17,50	16,21	14,87	13,49	12,07				
	213,3	217,9	223,6	229,7	236,3	251,1	268,5	289,3	314,5				
0,090	17,55	17,04	16,50	15,96	15,40	14,24	13,02	11,74	10,42				
	240,6	246,5	253,0	259,8	267,2	283,8	303,4	326,7	355,1				
0,100	15,70	15,24	14,75	14,26	13,75	12,69	11,57	10,39				$R_{(P)}$	
	268,8	275,4	282,5	290,1	298,3	315,8	338,5	364,4				$R_{(W)}$	

Продовження табл. Е.2

$d/h$	60	$r/h$										
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100
$s/h$	0,018	132,2	130,3	128,5	126,8	125,4	123,1	121,9	122,1	123,8	126,9	131,1
		52,56	53,02	53,66	54,43	55,37	57,74	60,83	64,74	69,70	76,03	84,55
	0,020	117,1	115,1	113,2	111,4	109,8	106,9	104,8	103,8	103,9	105,3	107,7
		57,83	58,43	59,22	60,13	61,22	63,93	67,40	71,78	77,30	84,35	94,06
	0,023	99,83	97,89	95,96	94,10	92,30	88,97	86,17	84,09	82,88	82,63	83,29
		65,70	66,51	67,51	68,65	69,96	73,17	77,23	82,30	88,68	96,81	108,3
	0,026	86,91	85,04	83,17	81,33	79,53	76,07	72,94	70,31	68,32	67,09	66,65
		73,54	74,55	75,76	77,11	78,66	82,37	87,01	92,78	100,0	109,6	122,7
	0,030	74,05	72,31	70,56	68,81	67,07	63,65	60,40	57,44	54,90	52,92	51,61
		83,96	85,23	86,72	88,35	90,20	94,59	100,0	106,7	115,1	126,8	141,8
	0,035	62,45	60,87	59,27	57,67	56,05	52,81	49,62	46,56	43,75	41,32	39,42
		96,92	98,51	100,3	102,3	104,6	109,8	116,2	124,1	134,6	148,3	165,8
	0,040	53,96	52,54	51,08	49,61	48,12	45,10	42,06	39,07	36,20	33,59	31,38
		109,8	111,7	113,9	116,2	118,8	124,9	132,3	141,7	154,3	169,9	189,8
	0,045	47,50	46,20	44,87	43,52	42,15	39,34	36,48	33,61	30,79	28,13	25,78
		122,7	124,9	127,4	130,1	133,1	139,9	148,3	159,9	174,0	191,6	213,9
	0,050	42,41	41,22	40,00	38,76	37,50	34,89	32,21	29,48	26,75	24,11	21,72
		135,5	138,0	140,8	143,9	147,2	154,9	165,3	178,2	193,9	213,3	238,1
	0,060	34,92	33,90	32,86	31,80	30,71	28,45	26,09	23,65	21,14	18,65	
		160,9	164,1	167,5	171,2	175,6	186,6	199,5	214,9	233,7	257,0	
	0,070	29,66	28,79	27,88	26,95	26,00	24,01	21,92	19,73	17,46	15,15	
		186,1	190,2	195,2	200,4	206,1	218,9	233,9	251,9	273,7	300,9	
	0,080	25,78	25,01	24,21	23,39	22,54	20,77	18,91	16,93	14,87		
		213,4	218,6	224,3	230,3	236,8	251,4	268,5	289,0	314,0		
	0,090	22,79	22,10	21,38	20,65	19,89	18,30	16,62	14,83	12,94		
		241,4	247,2	253,6	260,4	267,6	284,0	303,3	326,3	354,4		
	0,100	20,42	19,79	19,15	18,48	17,80	16,36	14,82	13,19			$R_{(P)}$
		269,4	276,0	283,1	290,6	298,6	316,8	338,3	363,9			$R_{(W)}$

Продовження табл. Е.2

<i>d/h</i>	100	<i>r/h</i>											
		0,500	0,475	0,450	0,425	0,400	0,350	0,300	0,250	0,200	0,150	0,100	
<i>s/h</i>	0,018	202,3	197,5	192,7	188,0	183,2	173,9	165,0	156,9	150,0	144,7	141,2	
		50,48	51,23	52,12	53,09	54,19	56,81	60,05	64,07	69,09	75,49	84,38	
	0,020	180,0	175,6	171,0	166,5	162,0	152,9	144,1	135,8	128,3	122,0	117,2	
		55,70	56,59	57,61	58,72	59,98	62,93	66,56	71,05	76,65	83,97	93,85	
	0,023	154,4	150,4	146,3	142,2	138,0	129,5	121,0	112,7	104,9	97,86	92,03	
		63,52	64,59	65,82	67,14	68,62	72,08	76,30	81,50	87,97	96,74	108,1	
	0,026	135,2	131,6	127,8	124,0	120,2	112,3	104,3	96,26	88,46	81,16	74,81	
		71,32	72,58	74,00	75,54	77,25	81,20	86,02	91,92	99,51	109,5	122,3	
	0,030	115,9	112,7	109,4	106,0	102,5	95,35	87,99	80,49	72,98	65,72	59,12	
		81,68	83,19	84,89	86,70	88,70	93,33	98,93	105,8	115,1	126,6	141,4	
	0,035	98,40	95,56	92,64	89,65	86,59	80,24	73,62	66,77	59,78	52,83	46,27	
		94,60	96,42	98,44	100,6	103,0	108,4	115,0	123,9	134,7	148,1	165,2	
	0,040	85,45	82,94	80,34	77,69	74,95	69,27	63,29	57,05	50,58	44,03	37,69	
		107,5	109,6	111,9	114,4	117,2	123,5	131,8	142,0	154,3	169,6	189,2	
	0,045	75,51	73,26	70,93	68,54	66,08	60,94	55,51	49,80	43,82	37,69	31,64	
		120,3	122,7	125,4	128,2	131,3	139,2	148,7	160,1	173,9	191,1	213,2	
	0,050	67,64	65,59	63,49	61,32	59,08	54,40	49,44	44,18	38,65	32,92	27,17	
		133,0	135,8	138,8	142,2	146,2	155,2	165,7	178,3	193,7	212,8	237,3	
	0,060	55,96	54,24	52,47	50,64	48,75	44,79	40,57	36,07	31,28	26,25		
		159,2	163,1	167,2	171,7	176,4	187,2	199,8	214,9	233,3	256,3		
	0,070	47,70	46,23	44,70	43,12	41,50	38,07	34,40	30,47	26,27	21,81		
		186,8	191,3	196,1	201,3	206,8	219,3	234,1	251,7	273,2	300,0		
	0,080	41,57	40,27	38,93	37,55	36,11	33,10	29,86	26,39	22,65			
		214,5	219,6	225,2	231,1	237,4	251,7	268,5	288,7	313,3			
	0,090	36,82	35,67	34,47	33,24	31,96	29,27	26,38	23,36	19,91			
		242,3	248,1	254,4	261,0	268,1	284,2	303,2	325,8	353,6			
	0,100	33,04	32,00	30,93	29,82	28,67	26,24	23,62	20,80				$R_{(P)}$
		270,3	276,8	283,7	291,1	299,0	316,9	338,0	363,2				$R_{(W)}$

## ДОДАТОК Ж

### Коефіцієнти міцності зварних швів

Таблиця Ж.1. Коефіцієнти міцності зварних швів за ГОСТ 34233.1 [14]

Вид зварного шва і спосіб зварювання	Значення коефіцієнта міцності зварного шва для посудин і апаратів із сталі і сплавів	
	Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини	Довжина швів, що контролюються, становить 10–50 % від загальної довжини
Стиковий двосторонній з повним проплавленням або кутовий двосторонній з повним проплавленням таврового з'єднання, що виконується автоматичним або напівавтоматичним зварюванням	1,0	0,9
Стиковий з підварюванням кореня шва з повним проплавленням або кутовий двосторонній з повним проплавленням таврового з'єднання, що виконується вручну	1,0	0,9
Стиковий, що доступний для зварювання тільки з одного боку і що має у процесі зварювання металеву підкладку з боку кореня шва, коли підкладка прилягає по всій довжині шва до основного металу	0,9	0,8
Кутовий двосторонній з неповним проплавленням таврового з'єднання	0,8	0,65
Стиковий, що виконується автоматичним і напівавтоматичним зварюванням з одного боку з флюсовою або керамічною підкладкою	0,9	0,8
Стиковий, що виконується вручну з одного боку	0,9	0,65



## ДОДАТОК И

### Розрахункові значення тимчасового опору (границі міцності)

Властивості сталей подані за ГОСТ 34233.1 [14]

*Таблиця И.1.* Розрахункові значення тимчасового опору (границі міцності)

$\sigma_s$  для вуглецевих і низьколегованих марганцевистих і

марганцевекрем'янистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення тимчасового опору (границі міцності) $\sigma_s$ , МПа, для сталей марок						
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20 і 20К	10	10Г2, 09Г2, 17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм						
	До 20	Більше 20	До 32	Більше 32	До 160		
20	460	380	470	440	410	340	440
100	435	360	425	385	380	310	385
150	460	390	430	430	425	340	430
200	505	420	439	439	460	382	439
250	510	435	444	444	460	400	444
300	520	440	445	445	460	374	445
350	480	420	441	441	430	360	441
375	450	402	425	425	410	330	425

## ДОДАТОК К

### Мінімальні значення умовної границі плинності

Властивості сталей подані за ГОСТ 34233.1 [14]

*Таблиця К.1.* Мінімальні значення умовної границі плинності  $\sigma_T$  для вуглецевих і низьколегованих марганцевистих і марганцевекрем'янистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункові значення умовної границі плинності $\sigma_T$ , МПа для сталей марок							
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20 і 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм							
	До 20	Більше 20	До 32	Більше 32	До 160			
20	250	210	300	280	220	195	270	280
100	230	201	265,5	240	213	188	240	240
150	224	197	256,5	231	209	183	231	231
200	223	189	247,5	222	204	177	222	222
250	197	180	243	218	198	168	218	218
300	173	162	226,5	201	179	150	201	201
350	167	147	210	185	159	132	185	185
375	164	140	199,5	174	147	123	162	174
400	-	-	183	158	-	-	-	158
410	-	-	-	156	-	-	-	156
420	-	-	-	138	-	-	-	138

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском: навч. посіб. Київ: “Видавництво «Політехніка»”, 2011. 272 с.

2. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання і надійність обладнання хімічних виробництв: термінологічний словник. Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 216 с.

3. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонок І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1999. 148 с.

4. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 121 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23885>.

5. Андреев І. А. Роз’ємні міцно-щільні з’єднання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 138 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35927>.

6. Андреев Ігор. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38716>.

7. Андреев Ігор. Укріплення отворів в посудинах та апаратах: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42254>.

8. Андреев Ігор. Конструювання і розрахунок опорних вузлів посудин і апаратів хімічних виробництв: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 94 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45669>.

9. ГОСТ 34233.7-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Теплообменные аппараты. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 54 с.

10. ГОСТ 31842-2012. Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2012-11-15]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2013. 38 с.

11. Лацинский А. А., Толчинский А. С. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: справочник. 2-е изд., перер. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1970. 752 с.

12. 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.

13. ГОСТ 30780–2002. Сосуды и аппараты стальные. Компенсаторы сильфонные и линзовые. Методы расчёта на прочность (Межгосударственный стандарт): [Чинний від 2003-07-01]. Вид. офіц. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 2002. 31 с.

14. Андреєв І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок лінзових і сильфонних компенсаторів: навч. посіб. Київ: НТУУ „КПІ”, 2008. 88 с.

15. Тимонин А. Ф. Основы конструирования и расчета химикотехнологического и природоохранного оборудования: справ.: в 3 т. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. Т. 1. 852 с.

16. ГОСТ 25859–83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчёта на прочность при малоцикловых нагрузках. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 1984-07-01]. Вид. офіц. М.: Изд-во стандартов, 1983. 30 с.