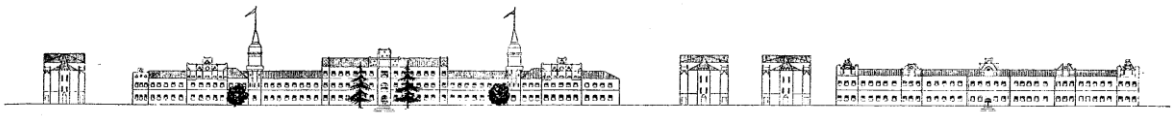


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

для студентів спеціальності

“Галузеве машинобудування”

(Спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв)

з дисципліни

“Розрахунок і конструювання типового обладнання – 1”.

Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв”

Київ-2017

Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності “Галузеве машинобудування” (Спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв) з дисципліни “Розрахунок і конструювання типового обладнання – 1. Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв”: [Електронний ресурс]: НТУУ „КПІ”; уклад. І. А. Андреєв. – Київ: НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. – 105 с.

Гриф надано Вченою радою
інженерно-хімічного факультету
НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”
(Протокол № 2 від 27 березня 2017 р.)

Для студентів інженерно-хімічного факультету.

Відповідальний редактор Корнієнко Ярослав Микитович, професор, д.т.н,

Рецензент:

Кульбачний Василь Гаврилович, старший науковий співробітник Інституту газу НАН України, к. т. н.

Навчальне видання

Андреєв Ігор Анатолійович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

для студентів спеціальності “Галузеве машинобудування” (Спеціалізація: Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв) з дисципліни “Розрахунок і конструювання типового обладнання – 1”. Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв”

Зміст

Вступ…….……5
Перелік позначень……...6
1. Вихідні дані до розрахунку апарата……..…..12
2. Практичне заняття 1. Матеріали та їх властивості. Розрахунковий, умовний, пробний тиск. Розрахункова температура. Допустиме напруження. Додаток до розрахункової товщини. Коефіцієнт міцності зварного шва. Теплофізичні властивості середовищ та їх визначення……..……15
3. Практичне заняття 2. Розрахунок товщини, допустимого тиску в циліндричній обичайці, яка навантажена внутрішнім тиском……....25
4. Практичне заняття 3. Еліптичне днище. Розрахунок товщини і допустимого тиску при умові навантаження внутрішнім тиском ……...…32
5. Практичне заняття 4. Еліптичне днище. Визначення радіусів кривизни, внутрішніх зусиль та напружень. Аналіз напруженого стану……..39
6. Практичне заняття 5. Конічні днища. Визначення товщини, допустимого тиску та напружень в перерізах, порівняння з опуклими днищами…...…..40
7. Практичне заняття 6. Плоскі днища. Визначення товщини і допустимого тиску, порівняння з опуклими днищами……...……..46
8. Практичне заняття 7. Розрахунок гладкої циліндричної обичайки навантаженої зовнішнім тиском, конструювання обичайки……..…..51
9. Практичне заняття 8. Розрахунок циліндричної обичайки підкріпленої кільцями жорсткості при дії внутрішнього тиску……..…56
10. Практичні заняття 9, 10. Розрахунок крайових навантажень: крайового моменту та крайової сили. Розрахунок міцності обичайки на краю……63

11. Практичне заняття 11. Розрахунок циліндричної обичайки, навантаженої осьовою силою, згинаючим моментом, поперечною силою, тиском……...…..64
12. Практичне заняття 12. Розрахунок геометричних розмірів деталей для укріплення одиночного отвору……69
13. Практичне заняття 13, 14. Фланцеві з'єднання. Вибір типу фланців, визначення геометричних розмірів. Розрахунок зусиль в болтах з'єднання. Розрахунок болтів. Розрахунок фланців на міцність та жорсткість. Перевірка міцності прокладки……....73
14. Практичне заняття 15. Сальникове ущільнення. Конструктивний розрахунок. Визначення сили затяжки болтів та потужності на подолання сил тертя……...…..75
15. Практичне заняття 16, 17. Опори апаратів, Розрахунок несучої спроможності вертикальної циліндричної обичайки від дії реакцій опорних лап…….……81
16. Практичне заняття 18. Розрахунок несучої спроможності вузла приварки стропувального вушка до циліндричної обичайки…… 82
Додаток А. Механічні характеристики сталей……...84
Додаток Б. Коефіцієнти міцності зварних швів…… 95
Додаток В. Сталевий листовий прокат……96
Додаток Г. Значення розрахункового діаметра $D_р$ і коефіцієнта K……..99
Додаток Д. Модуль пружності під час розтягу……...…....101
Додаток Е. Номограма для розрахунку на стійкість в границях пружності циліндричних обичайок, які працюють під зовнішнім тиском…….…102
Додаток Ж. Зведена розрахункова довжина $l_{пр}$…….……...…103
Додаток З. Коефіцієнт $К_1$, який враховує усадку набивки…….….104
Додаток И. Коефіцієнт кінетичного тертя між валом і набивкою $f_{\hat{e}\grave{e}\acute{i}}$ …..105

Вступ

Дисципліна “Розрахунок і конструювання типового устаткування – 1”. Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв” викладається на кафедрі МАХНВ НТУУ «КПІ» у 6 семестрі студентам, які навчаються за спеціальністю “Галузеве машинобудування”

Дисципліна має дати знання забезпечення міцності, стійкості, жорсткості, герметичності, корозійної тривкості, конструктивної довершеності та інших вимог до основного хімічного обладнання.

Метою практичних занять є набуття досвіду проведення розрахунків основних елементів обладнання хімічних виробництв, систематизація і закріплення лекційного матеріалу.

Теоретичні положення дисципліни викладені у навчально-методичних розробках викладачів кафедри, посилання на які подаються окремо у кожному розділі вказівок.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

$A_к$ – площа поперечного перерізу кільця, м^2;

$A_к^1$ – площа поперечного перерізу кільця у першому наближенні, м^2;

a – ширина зварного шва, м;

b – відстань між кільцями жорсткості, м;

$b_ê$ – ширина кільця, м;

C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;

C_1 – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації корозії та (або) ерозії, м;

C_2 – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації мінусового допуску, м;

C_3 – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації стоншення стінки елементу посудини або апарата при технологічних операціях, м;

C_e – додаток до розрахункової товщини стінки для компенсації ерозії, м;

C_o – додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа, м;

$C_ш$ – сума додатків до розрахункової товщини штуцера, м;

D – внутрішній діаметр посудини (обичайки, днища, сальникової камери), м;

D_R – розрахунковий діаметр обичайки, м;

D_o – внутрішній діаметр нижнього штуцера, м;

$D_к$ – розрахунковий діаметр конічного днища, м;

$D_р$ – розрахунковий діаметр плоского днища або кришки, м;

d – діаметр отвору, м;

$d_б$ – діаметр болтів (шпильок), м;

$d_в$ – діаметр вала, м;

d_o – найбільший діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення, м;

d_{oR} – розрахунковий діаметр поодинокого отвору, який не потребує укріплення при відсутності надлишкової товщини стінки днища, м;

d_p – внутрішній діаметр різьби болтів (шпильок), м;

d_R – розрахунковий діаметр отвору, м;

Σd_i – максимальна сума довжин хорд отворів в найбільш ослабленому діаметральному перерізі днища або кришки, м;

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

F – осьова стискуюча сила, Н;

$F_ç$ – зусилля затягування шпильок, Н;

f – відстань міжопорами, м;

$f_{êèí}$ – коефіцієнт кінетичного тертя;

f_c – коефіцієнт статичного тертя;

H – висота днища, м;

H_p – висота шару рідини, м;

H_c – повна глибина розточки сальникової камери з урахуванням встановлення фонарного кільця і забезпечення напрямку натискної втулки, м;

h – висота циліндричної частини (відбортовки) днища, м;

$h_н$ – висота фланця натискної втулки, м;

h_o – первісна висота набивки з урахуванням герметизації, м;

h_2 – висота перерізу кільця жорсткості, м;

$h_в$ – внутрішня висота днища без відбортовки або довжина циліндричної частини натискної втулки, м;

$h_р$ – висота набивки у робочому стані, м;

$h_ф$ – висота фонаря, м;

K, K_1, k_1, k_2, k_3, k_4, k_e – коефіцієнти;

$K_у$ – коефіцієнт усадки;

k – коефіцієнт бокового тиску;

l – розрахункова довжина обичайки, м;

l_1 – довжина циліндричної частини апарата, яка знаходиться під оболонкою, м;

l_2 – довжина відбортовки, м;

$l_з$ – розрахункова довжина елемента, що примикає до циліндричної обичайки, м;

l_{1R} – розрахункова довжина зовнішньої частини штуцера, яка приймає участь в укріпленні отвору, м;

$l_{пр}$ – зведена розрахункова довжина, м;

N_c – втрати потужності на подолання сил тертя у сальнику, Вт;

n – число обертів валу, об/с;

$n_б$ – кількість болтів (шпильок);

$n_т$ – коефіцієнт запасу міцності за границею плинності;

$n_у$ – коефіцієнт запасу стійкості;

p – розрахунковий внутрішній тиск, МПа;

$p_{абс}$ – абсолютний тиск, МПа;

$p_{атм}$ – атмосферний тиск, МПа;

$p_{г}$ – гідростатичний тиск, МПа;

$p_{герм}$ – тиск герметичності, МПа;

$p_{з}$ – розрахунковий зовнішній тиск, МПа;

$p_{и}$ – пробний тиск, МПа;

$p_{н}$ – надлишковий тиск, МПа;

p_{i}^{1} – робочий тиск натискної втулки, МПа;

$p_{роб}$ – робочий тиск, МПа;

$[p]$ – допустимий надлишковий тиск, МПа;

$[p_{ç}]$ – допустимий зовнішній тиск, МПа;

$[p_{ç}]_{E}$ – допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в границях пружності, МПа;

$[p_{ç}]_{\sigma}$ – допустимий зовнішній тиск з умов міцності, МПа;

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

$R_{0,2}^{20}$ – мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 ºС (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;

$R_{1,0}$ – мінімальне значення умовної границі плинності за розрахункової температури (напруження, за якого залишкове видовження становить 1 %), МПа;

$R_{1,0}^{20}$ – мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 ºС (напруження, за якого залишкове видовження становить 1 %), МПа;

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

$R_д$ – внутрішній радіус кривизни в вершині днища або кришки, м;

$R_е$ – внутрішній радіус кривизни у вершині еліптичного днища, м;

$R_т^{20}$ – границя плинності за температури 20 ºС, МПа;

S– виконавча товщина стінки обичайки (посудини), м;

S^1– виконавча товщина стінки обичайки (посудини) у першому наближенні, м;

S_R– розрахункова товщина стінки, м;

S_1– виконавча товщина стінки плоского круглого днища, м;

S_1^1– виконавча товщина стінки плоского круглого днища у першому наближенні, м;

S_{1R}– розрахункова товщина стінки плоского круглого днища, м;

$S_д$ – виконавча товщина стінки днища, м;

$S_д^1$ – виконавча товщина стінки днища у першому наближенні, м;

$S_{дR}$ – розрахункова товщина стінки днища, м;

$S_к$ – виконавча товщина конічного днища у безмоментній зоні, м;

$S_к^1$ – виконавча товщина конічного днища у безмоментній зоні у першому наближенні, м;

$S_{êR}$ – розрахункова товщина стінки днища, м;

$S_í$ – товщина набивки, м;

$S_ø$ – виконавча товщина штуцера, м;

$S_{øR}$ – розрахункова товщина штуцера, м;

t – розрахункова температура, ºС;

v – швидкість обертання вала, м/с;

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

x – коефіцієнт;

$\alpha_к$ – половини кута при вершині конічної оболонки (днища), град;

Δ – зазор між валом і натискною втулкою, м;

δ – мінімальна відстань між зовнішніми поверхнями штуцерів, коли їх можна вважати поодинокими, м;

η – поправковий коефіцієнт;

χ_1 – відношення допустимого напруження матеріалу штуцера до допустимого напруження матеріалу днища при розрахунковій температурі;

λ – гнучкість;

ρ – густина рідини, кг/м^3;

σ_N – осьове напруження, МПа;

σ_T – кільцеве напруження, МПа;

$[\sigma]$ – допустиме напруження за розрахункової температури, МПа;

$[\sigma]$ – допустиме напруження за розрахункової температури, МПа;

$[\sigma]_{20}$ – допустиме напруження за температури 20 ^{o}C, МПа;

$[\sigma]_к$ – допустиме напруження кілець жорсткості за розрахункової температури, МПа;

$[\sigma]_р$ – допустиме напруження різьби болтів (шпильок), МПа;

τ – строк служби апарата, рік;

φ, φ_T – коефіцієнти міцності зварних швів;

$\varphi_к$ – коефіцієнти міцності зварних швів кільця жорсткості;

$\varphi_р$ – розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва;

ω – кутова швидкість обертання валу, 1/с.

1. ВИХІДНІ ДАНІ ДО РОЗРАХУНКУ АПАРАТА

Апарат знаходиться під дією внутрішнього тиску p. З боку оболонки на корпус діє зовнішній тиск $p_з$. Елементи апарата зварені з листового прокату. Довжина зварних швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини. Конічне днище виконано без відбортовки. Схема апарата наведена на рисунку 1.1, а вихідні дані для розрахунку – у таблицях 1.1 і 1.2.

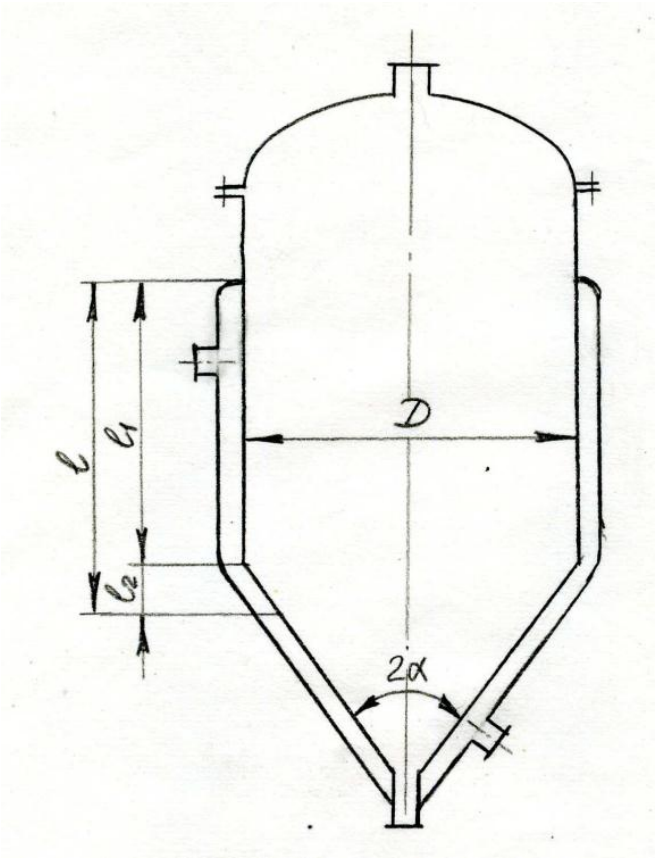


Рис. 1.1. Схема апарата

У прикладах подані розрахунки елементів цього апарата за робочих умов.

Тлумачення умовних позначень величин, які наведені у таблиці 1.2 можна отримати з переліку позначень.

Таблиця 1.1. Вид зварного шва

Варіант	Вид зварного шва
1, 2	Стиковий, що виконується вручну з одного боку
3, 4	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним зварюванням
5, 6,7	Стиковий, що доступний для зварювання з одного боку і що має у процесі зварювання металеву підкладку з боку кореня шва, яка прилягає по всій довжині шва до основного металу
8, 9, 10, 11	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну
12, 13	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним зварюванням
14, 15	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну
16, 17	Стиковий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним зварюванням
18, 19, 20	Стиковий з підварюванням кореня шва, що виконується вручну

Таблиця 1.2. Вихідні дані до розрахунку

Варіант	D, м	D_o, м	l_1, м	$\alpha_к$, град	p, МПа	$p_з$, МПа	t, ^{0}С	Марка сталі елементів апарата	$v_{кор}$, мм/рік	τ, рік
1	0,9	0,06	0,6	45	1,1	0,8	170	09Г2С	0,03	10
2	1	0,07	0,8	30	1,0	0,6	160	20К	0,08	15
3	1	0,07	0,9	45	1,1	0,7	165	16ГС	0,03	20
4	1,2	0,09	1,1	30	0,8	0,5	155	20	0,08	20
5	1,2	0,09	1,25	45	1,0	0,7	165	09Г2С	0,04	15
6	1,4	0,1	1,4	30	0,7	0,4	150	Ст3пс	0,05	20
7	1,4	0,1	1,6	45	0,9	0,6	160	16ГС	0,03	10
8	1,6	0,11	1,6	30	0.6	0,4	150	20	0,06	15
9	1,6	0,11	1,8	45	0,8	0,6	100	09Г2С	0,04	20
10	1,8	0,13	1,6	30	0,63	0,4	150	20	0,05	10
11	1,8	0,13	1,8	45	0,7	0,4	150	20К	0,06	15
12	2	0,14	2,2	30	0,54	0,3	140	Ст3пс	0,04	20
13	2	0,14	2,5	45	0,74	0,5	155	20К	0,07	10
14	2,2	0,16	1,6	30	0,54	0,4	150	10	0,08	15
15	2,2	0,16	1,8	45	0,64	0,5	155	Ст3пс	0,05	20
16	2,4	0,17	2,8	45	0,44	0,3	140	10	0,07	10
17	2,6	0,19	2,8	45	0,54	0,4	150	Ст3пс	0,05	15
18	2	0,14	2,5	30	0,50	0,4	170	09Г2С	0,07	20
19	2	0,14	2,5	45	0,45	6	175	16ГС	0,06	15
20	2	0,14	2,2	30	0,40	7	160	09Г2С	0,05	10

2. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1. МАТЕРІАЛИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ. РОЗРАХУНКОВИЙ, УМОВНИЙ, ПРОБНИЙ ТИСК; РОЗРАХУНКОВА ТЕМПЕРАТУРА; ДОПУСТИМЕ НАПРУЖЕННЯ; ПРИБАВКА ДО РОЗРАХУНКОВОЇ ТОВЩИНИ; КОЕФІЦІЄНТ МІЦНОСТІ ЗВАРНОГО ШВА. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕРЕДОВИЩ ТА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни.Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних іиробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 1 практичне заняття.

Визначити: 1) робочий, розрахунковий, умовний, пробний тиск всередині апарата; 2) розрахункову температуру для циліндричної обичайки апарата; 3) допустиме напруження для матеріалу циліндричної обичайки апарата; 4) додаток до розрахункової товщини стінки циліндричної обичайки апарата; 5) коефіцієнт міцності зварного шва для циліндричної обичайки апарата.

Таблиці для визначення допустимих напружень $[\sigma]$ і коефіцієнтів міцності зварних швів φ наведені у додатках А і Б.

Приклади до розділу

1. *Завдання.* Визначити робочий тиск $p_{роб}$ у посудині. Результат надати у МПа.

Вихідні дані. Абсолютний тиск у посудині становить $p_{абс} = 8$ ата.

Рішення. Надлишковий тиск $p_н = p_{абс} - p_{атм} = 8 - 1 = 7$ ати

Через те, що $1\,кгс/см^2 = 0{,}0981$МПа, а за визначенням робочий тиск є надлишковим тиском без врахування гідростатичного тиску, короткочасного підвищення тиску під час спрацювання запобіжних пристроїв і т. ін.

$p_{роб} = p_н = 7 \cdot 0{,}0981 = 0{,}6867$ МПа.

2. *Завдання.* Визначити розрахунковий тиск p у посудині.

Вихідні дані. Робочий тиск становить $p_{роб} = 0{,}5$ МПа, висота шару рідини в посудині $H_р = 3{,}2$ м, густина рідини $\rho = 1250$ кг/м^3.

Рішення. Гідростатичний тиск $p_г = \rho g H_р = 1250 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}2 = 39240$ Па

$p_г / p_{роб} = 0{,}039240/0{,}5 = 0{,}078 > 0{,}05$,

тому $p = p_{роб} + p_г = 0{,}5 + 0{,}039 = 0{,}539$ МПа.

3. *Завдання.* Визначити гідростатичний тиск $p_г$ у посудині.

Вихідні дані. Висота шару рідини становить $H_р = 3{,}2$ м, густина рідини $\rho = 1250$ кг/м^3.

Рішення. Гідростатичний тиск $p_г = \rho g H_р = 1250 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}2 = 39240$ Па $= 0{,}039$ МПа.

4. *Завдання.* Визначити розрахунковий тиск p (МПа) у посудині.

Вихідні дані. Робочий тиск становить $p_{роб}$= 1,1 МПа, висота шару рідини $H_р$ = 0,9 м, густина рідини ρ = 1400 кг/м^3.

Рішення. Гідростатичний тиск $p_г = \rho g H_р$ = 1400·9,81·0,9 = 12361 Па = 0,012361 МПа

$p_г / p_{роб}$ = 0,012361 /1,1 = 0,0112 < 0,05, тому $p = p_{роб}$ = 1,1 МПа.

5. *Завдання.* Визначити розрахунковий тиск p у посудині. Результат надати у МПа.

Вихідні дані. Абсолютний тиск становить $p_{абс}$ = 6,0 ата, висота шару рідини в посудині $H_р$ = 3,2 м, густина рідини ρ = 1250 кг/м^3.

Рішення. Надлишковий тиск

$p_н = p_{абс} - p_{атм}$ = 6 – 1 = 5 ати = 0,4905 МПа ($1\ кгс/см^2$ = 0,0981МПа).

Робочий тиск

$p_{роб} = p_н$ = 0,4905 МПа.

Гідростатичний тиск

$p_г = \rho g H_р$ = 1250·9,81·3,2 = 39240 Па = 0,03924 МПа

Відношення $p_г / p_{роб}$ = 0,03924/0,4905 = 0,08 > 0,05, тому

$p = p_{роб} + p_г$ = 0,4905 + 0,03924 = 0,52974 МПа.

6. *Завдання.* Визначити пробний тиск $p_и$ для зварної посудини.

Вихідні дані. Розрахунковий тиск становить p = 0,8 МПа, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі $[\sigma]$ = 140 МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°С $[\sigma]_{20}$ = 150 МПа.

Рішення. $p_и = 1{,}25 p \dfrac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 0{,}8 \dfrac{150}{140} = 1{,}07\ МПа$.

7. *Завдання.* Визначити пробний тиск p_u для литої посудини.

Вихідні дані. Розрахунковий тиск становить p = 0,8 МПа, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі $[\sigma]$ = 140 МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°С $[\sigma]_{20}$ = 150 МПа.

Рішення. $p_u = 1{,}5p\dfrac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}5 \cdot 0{,}8\dfrac{150}{140} = 1{,}286\ МПа$.

8. *Завдання.* Визначити пробний тиск p_u для кріогенної посудини при наявності вакууму в ізоляційному просторі.

Вихідні дані. Розрахунковий тиск становить p = 0,8 МПа.

Рішення. $p_u = 1{,}25p - 0{,}1\ МПа = 1{,}25 \cdot 0{,}8 - 0{,}1 = 0{,}9\ МПа$.

9. *Завдання.* Визначити пробний тиск p_u для зварної посудини.

Вихідні дані. Робочий тиск становить $p_{роб}$ = 0,5 МПа, висота шару рідини в посудині H_p = 3,2 м, густина рідини ρ = 1250 кг/м^3, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі $[\sigma]$ = 140 МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°С $[\sigma]_{20}$ = 150 МПа.

Рішення. Гідростатичний тиск $p_г = \rho g H_p$ = 1250·9,81·3,2 = 39240 Па

$p_г / p_{роб}$ = 0,039240/0,5 = 0,078 > 0,05, тому розрахунковий тиск $p = p_{роб} + p_г$ = 0,5 + 0,039 = 0,539 МПа

Пробний тиск $p_u = 1{,}25p\dfrac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 0{,}539\dfrac{150}{140} = 0{,}722\ МПа$

10. *Завдання.* Визначити пробний тиск p_u для литої посудини.

Вихідні дані. Робочий тиск становить $p_{роб}$ = 1,1 МПа, висота шару рідини в посудині H_p = 0,9 м, густина рідини ρ = 1400 кг/м^3, допустиме напруження матеріалу посудини при розрахунковій температурі $[\sigma]$ = 140 МПа і допустиме напруження матеріалу посудини при 20°С $[\sigma]_{20}$ = 150 МПа.

Рішення. Гідростатичний тиск $p_г = \rho g H_p$ = 1400·9,81·0,9 = 12361 Па = 0,012361 МПа

$p_г / p_{роб}$ = 0,012361/1,1 = 0,0112 < 0,05, тому розрахунковий тиск p= $p_{роб}$ = 1,1 МПа,

Пробний тиск $p_u = 1{,}5p\dfrac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}5 \cdot 1{,}1\dfrac{150}{140} = 1{,}768\ МПа$.

11. *Завдання.* Визначити розрахунковий тиск p для елемента, що розділяє простори з різними тисками, якщо забезпечується одночасна дія цих тисків.

Вихідні дані. Розрахункові тиски у просторах: p_1 = 0,7 МПа, p_2 = 0,2 МПа.

Рішення. Для випадку, коли забезпечується одночасна дія тисків, тоді допускається виконувати розрахунок на різницю цих тисків, тобто

$p = p_1 - p_2$ = 0,7 – 0,2 = 0,5 МПа.

12. *Завдання.* Визначити допустиме напруження матеріалу сталевої зварної посудини при гідравлічних випробуваннях [σ]

Вихідні дані. Границя плинності сталі при 20°С: R_T^{20} = 400 МПа.

Рішення. Для випадку гідравлічних випробувань коефіцієнт запасу міцності за границею плинності n_T = 1,1; поправочний коефіцієнт для зварної конструкції $\eta = 1$.

Тому допустиме напруження матеріалу сталевої посудини при гідравлічних випробуваннях можна визначити за формулою:

$$[\sigma] = \eta \frac{R_T^{20}}{n_T} = 1\frac{400}{1{,}1} = 363{,}64\ МПа\,.$$

13. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину *S* стінки посудини.

Вихідні дані. Розрахункова товщина стінки посудини S_R = 0,00695 м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем $v_{кор}$= 0,07 мм/рік, термін роботи посудини τ = 15 років,сума технологічного додатка C_3 і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск C_2менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Додаток на компенсацію ерозії C_e не враховується.

Рішення. Виконавча товщина стінки посудини$S = S_R + C + C_0$;

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що $v_{кор}$ >0,05 мм/рік додаток для компенсації корозії C_1 розраховується за формулою $C_1 = v_{кор} \cdot \tau$ = 0,07 · 15 = 1,05 мм = $1{,}05 \cdot 10^{-3}$ м.

Через те, що $C_2 + C_3 < 0{,}05\ S$, C_2 *і* C_3 не враховуються при розрахунку.

Тоді *S* = 0,00695 + $1{,}05 \cdot 10^{-3}$ + 0 = 0,008 м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа C_0 = 0 м).

14. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину *S* стінки обичайки, яка зварена з листового прокату.

Вихідні дані. Розрахункова товщина стінки посудини S_R = 0,0045 м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з корозійним середовищем $v_{кор}$= 0,07 мм/рік, термін роботи посудини τ = 15 років,сума технологічного додатка C_3і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск C_2менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Має місце двобічний контакт з корозійним середовищем. Додаток на компенсацію ерозії C_e не враховується.

Рішення. Виконавча товщина стінки посудини$S= S_R+ C + C_0$;

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1+ C_2+ C_3$

Через те, що $v_{кор}$> 0,05 мм/рік і корозійне середовище знаходиться з обох боків стінки, додаток для компенсації корозії C_1 розраховується за формулою $C_1 = 2v_{кор}\cdot\tau = 2 \cdot 0{,}07 \cdot 15 = 1{,}05$ мм = $2{,}1\cdot10^{-3}$ м.

$C_2 + C_3 < 0{,}05\ S$, томуC_2 *і* C_3 не враховуються при розрахунку.

Тоді $S = 4{,}5\cdot10^{-3} + 2{,}1\cdot10^{-3} + 0{,}4\cdot10^{-3} = 0{,}007$ м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа $C_0 = 0{,}4\cdot10^{-3}$ м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 7 мм).

15. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину *S* стінки обичайки, яка зварена з листового прокату.

Вихідні дані. Розрахункова товщина стінки посудини S_R = 0,0047 м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем $v_{кор}$= 0,04 мм/рік, термін роботи посудини τ = 15 років,сума технологічного додатка C_3 і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск C_2 менше 5% номінальної товщини стінки

посудини. Має місце двобічний контакт з корозійним середовищем. Додаток на компенсацію ерозії C_e не враховується.

Рішення. Виконавча товщина стінки посудини$S= S_R+ C + C_0$;

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1+ C_2+ C_3$

Через те, що $v_{кор}$ < 0,05 мм/рік, приймається додаток для компенсації корозії $C_1 = 10^{-3} м$.

$C_2 + C_3 < 0{,}05\ S$, томуC_2 *і* C_3 не враховуються при розрахунку.

Тоді $S = 4{,}7 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 0{,}3 \cdot 10^{-3} = 0{,}006$ м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчоїстандартної товщини листа$C_0 = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 6 мм).

16. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину S стінки обичайки із вуглецевої сталі.

Вихідні дані. Внутрішній діаметр обичайки D = 2 м. Розрахункова товщина стінки обичайки S_R = 0,0025 м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем $v_{кор}$ = 0,07 мм/рік, термін служби τ = 15 років,сума технологічного додатка C_3 і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск C_2менше 5% номінальної товщини стінки посудини. Додаток на компенсацію ерозії C_e не враховується.

Рішення. Виконавча товщина стінки обичайки $S= S_R+ C + C_0$;

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1+ C_2+ C_3$

Через те, що $v_{кор}$ >0,05 мм/рік додаток для компенсації корозії C_1 розраховується за формулою $C_1 = v_{кор} \cdot \tau$ = 0,07 · 15 = 1,05 мм = $1{,}05 \cdot 10^{-3}$ м.

Через те, що $C_2 + C_3 < 0,05\ S$, C_2 *і* C_3 не враховуються при розрахунку.

Тоді $S = 0,0025 + 1,05 \cdot 10^{-3} + C_0 = 3,55 \cdot 10^{-3} + C_0$, м.

Товщини обичайок, днищ, опор із вуглецевої сталі з урахуванням додатка для компенсації корозії повинні бути не менше $D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} м$.

$$D/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} \grave{i} = 2/1000 + 2,5 \cdot 10^{-3} \grave{i} = 4,5 \cdot 10^{-3} \grave{i}$$

Тобто приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки $S = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м.

17. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину S незнімного навантаженого елемента.

Вихідні дані. Розрахункова товщина незнімного навантаженого елемента $S_R = 0,0045$ м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з корозійним середовищем $v_{кор} = 0,06$ мм/рік, термін роботи посудини $\tau = 15$ років,додатки до розрахункової товщини $C_2 = 0$, $C_3 = 0$, $C_e = 0$. Додаток до розрахункової товщини незнімного навантаженого елемента $C_0 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Рішення. Виконавча товщина стінки посудини $S = S_R + C + C_0$.

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1 + C_2 + C_3$.

Через те, що $v_{кор} > 0,05$ мм/рік і розраховується незнімний навантажений елемент, додаток для компенсації корозії C_1 визначається за формулою

$$C_1 = 2 v_{кор} \cdot \tau = 2 \cdot 0,06 \cdot 15 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Тоді $S = 4,5 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,0065$ м.

18. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину S стінки обичайки із аустенітної сталі.

Вихідні дані. Розрахункова товщина стінки обичайки S_R = 0,0025 м, швидкість корозії матеріалу стінки через однобічний контакт з корозійним середовищем $v_{кор}$ = 0,07 мм/рік, термін служби τ = 15 років,сума технологічного додатка C_3 і додатка до розрахункової товщини, який враховує від'ємний допуск C_2менше 5% номінальної товщини стінки обичайки. Додаток на компенсацію ерозії C_e не враховується.

Рішення. Виконавча товщина стінки обичайки $S = S_R + C + C_0$;

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1 + C_2 + C_3$

Через те, що $v_{кор} > 0,05$ мм/рік додаток для компенсації корозії C_1 розраховується за формулою $C_1 = v_{кор} \cdot \tau = 0,07 \cdot 15 = 1,05$ мм $= 1,05 \cdot 10^{-3}$ м.

Через те, що $C_2 + C_3 < 0,05\ S$, C_2 *і* C_3 не враховуються при розрахунку.

Тоді $S = 0,0025 + 1,05 \cdot 10^{-3} + 0,45 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3}$м (додаток до розрахункової товщини стінки, що йде на округлення до найближчої стандартної товщини листа $C_0 = 0,45 \cdot 10^{-3}$ м через те, що найближча товщина листового прокату дорівнює 4 мм).

З урахуванням вимоги, що товщина обичайки з урахуванням додатка для компенсації корозії, яка виконана із сталі аустенітного класу,повинна бути не менше $2,5 \cdot 10^{-3}$ *м* остаточно приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки $S = 4,0 \cdot 10^{-3}$ м.

19. *Завдання.* Визначити виконавчу товщину S знімного навантаженого елемента.

Вихідні дані. Розрахункова товщина знімного навантаженого елемента S_R = 0,0045 м, швидкість корозії матеріалу стінки через контакт з

корозійним середовищем $v_{кор}$= 0,06 мм/рік, термін роботи посудини τ = 15 років,додатки до розрахункової товщини C_2= 0, C_3 = 0,C_e = 0, C_0 = 0.

Рішення. Виконавча товщина стінки посудини $S= S_R+ C + C_0$.

Сума додатків до розрахункової товщини $C = C_1+ C_2+ C_3$.

Через те, що $v_{кор}$ > 0,05 мм/рік і розраховується знімний навантажений елемент, додаток для компенсації корозії C_1 необхідно визначати за формулою $C_1 = max\{0,5 v_{кор} \cdot \tau ; 2 \cdot 10^{-3} м\}$.

$0,5 v_{кор} \cdot \tau = 2 \cdot 0,06 \cdot 15 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Тобто остаточно приймаємо $C_1 = 2 \cdot 10^{-3} м$.

Тоді $S = 4,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} = 0,0065$ м.

3. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2. РОЗРАХУНОК ТОВЩИНИ, ДОПУСТИМОГО ТИСКУ НАПРУЖЕНЬ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ОБИЧАЙЦІ, ЯКА НАВАНТАЖЕНА ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни,- К.: 1999.-148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 2 практичне заняття.

Розрахувати товщину циліндричної обичайки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском.

У прикладі наведені розрахунки за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 3.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини циліндричної обичайки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 –А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури t = 150 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва φ_p	φ_p визначають за таблицею Б.1 додатку Б залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини φ_p = 1,0
3.	Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки S_R	$S_R = \dfrac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p}$	$S_R = \dfrac{0{,}6 \cdot 1{,}6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0{,}6} = 0{,}0035\ м$
4.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e	Додаток C_e належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e$, якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$;	$v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$, тому $C_1 = v_{кор}\tau + C_e =$ $= 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4}\ м$

Продовження табл. 3.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		$C_1 = 0{,}001\,м + C_e$, якщо $v_{кор} \le 5 \cdot 10^{-5}\,м/рік$; $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}\,м$, якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$, але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує. Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	
6.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки у першому наближенні S^1	$S^1 = S_R + C_1 + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S^1 = 3{,}5 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 4{,}5 \cdot 10^{-3}\,м$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4}\,м$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $4{,}5 \cdot 10^{-3}\,м$
7.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $4{,}5 \cdot 10^{-3}\,м$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2{,}3 \cdot 10^{-4}\,м$, тобто $C_2 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\,м$

Продовження табл. 3.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3	Додаток C_3 враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
9.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини S^1	$\frac{C_2 + C_3}{S^1}$	$\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} + 0}{4{,}5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}051$
10.	Сума додатків до розрахункової товщини C	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} \le 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} > 0{,}05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S^1} > 0{,}05$, тому $C = 9 \cdot 10^{-4} + 2{,}3 \cdot 10^{-4} + 0 = 1{,}13 \cdot 10^{-3}\, м$
11.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки S	$S = S_R + C + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S = 3{,}5 \cdot 10^{-3} + 1{,}13 \cdot 10^{-3} + 0{,}37 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3}\, м$ Обираємо $C_0 = 3{,}7 \cdot 10^{-4}\, м$ з урахуванням можливих додаткових навантажень під час транспортування, монтажу і т. ін.

Продовження табл. 3.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2 (виконується коли $S \neq S^1$)	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 –В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5 \cdot 10^{-3}$ *м* нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 мм включно становить $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ *м*, тобто $C_2 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ *м*
13.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини S (виконується коли $S \neq S^1$)	$\frac{C_2 + C_3}{S}$	$\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}046$
14.	Перерахунок суми додатків до розрахункової товщини C (виконується коли $S \neq S^1$)	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S} \leq 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S} > 0{,}05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S} < 0{,}05$, тому $C = 9 \cdot 10^{-4}$ *м*
15.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$\frac{S - C}{D} \leq 0{,}1$ *для обичайок і труб при* $D \geq 0{,}2$ *м*	$\frac{S - C}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} - 0{,}9 \cdot 10^{-3}}{1{,}6} = 0{,}0026 < 0{,}1$

Продовження табл. 3.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		$\frac{S-C}{D} \le 0{,}3$ *для труб при* $D < 0{,}2$ *м.* $S \ge D/1000 + 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ *м* – для обичайок із вуглецевих і низьколегованих сталей; $S \ge 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ *м* – для обичайок із сталей аустенітного і аустенітно-феритного класів.	$D/1000 + 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ *м* = $= 1{,}6/1000 + 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 4{,}1 \cdot 10^{-3}$ *м*. $5 \cdot 10^{-3}$ *м* $> 4{,}1 \cdot 10^{-3}$ *м*. Умови застосування розрахункових формул виконуються
16.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p (S-C)}{D+S-C}$	$[p] = \frac{2 \cdot 139 \cdot 1\left(5 \cdot 10^{-3} - 0{,}9 \cdot 10^{-3}\right)}{1{,}6 + 5 \cdot 10^{-3} - 0{,}9 \cdot 10^{-3}} = 0{,}71$ *МПа*
17.	Перевірка умови міцності	$p \le [p]$	0,6 *МПа* $< 0{,}71$ *МПа*. Умова міцності виконується.
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p \le [p]$.			

4. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3.
ЕЛІПТИЧНЕ ДНИЩЕ. РОЗРАХУНОК ТОВЩИНИ І ДОПУСТИМОГО ТИСКУ ПРИ УМОВІ НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 3 практичне заняття.

Розрахувати товщину еліптичної кришки з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском. У прикладі наведено розрахунок за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 4.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини еліптичної кришки (або днища) з умови міцності у безмоментній зоні у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
У прикладі розраховується стандартне еліптичне днище з висотою $h_в = 0{,}25D$.			
1.	Внутрішній радіус кривизни у вершині кришки або днища R_e	$R_e = \dfrac{D^2}{4h_в}$	У випадку, що розглядається $h_в = 0{,}25D$, тому $R_e = D = 1{,}6\ м$
2.	Допустиме напруження матеріалу кришки або днища за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана кришка або днище і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що елемент, який розраховується, зварний)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури t = 150 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 139$ МПа
3.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва φ_p	φ_p визначають за таблицею Б.1 залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини φ_p = 1,0
4.	Розрахункова товщина стінки кришки або днища $S_{\partial R}$	$S_{\partial R} = \dfrac{pR_e}{2[\sigma]\varphi - 0{,}5p}$	$S_{\partial R} = \dfrac{0{,}6 \cdot 1{,}6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0{,}5 \cdot 0{,}6} = 0{,}0035\ м$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e	Додаток C_e належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
6.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e$, якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\, м/рік$; $C_1 = 0{,}001\, м + C_e$, якщо $v_{кор} \le 5 \cdot 10^{-5}\, м/рік$; $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}\, м$, якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$, але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує. Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e =$ $= 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4}\, м$ через те, що $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\, м/рік$
7.	Виконавча товщина стінки кришки або днища у першому наближенні $S_д^1$	$S_д^1 = S_{дR} + C_1 + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	$S_д^1 = 3{,}5 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} =$ $= 4{,}5 \cdot 10^{-3}\, м$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4}\, м$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $4{,}5 \cdot 10^{-3}\, м$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $4{,}5\cdot10^{-3}\,м$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2{,}3\cdot10^{-4}\,м$, тобто $C_2 = 2{,}3\cdot10^{-4}\,м$
9.	Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3	Додаток C_3 враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
10.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини $S_д^1$	$\dfrac{C_2 + C_3}{S_д^1}$	$\dfrac{2{,}3\cdot10^{-4} + 0}{4\cdot10^{-3}} = 0{,}0575$
11.	Сума додатків до розрахункової товщини C	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_д^1} \le 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_д^1} > 0{,}05. \end{cases}$	$\dfrac{C_2 + C_3}{S_д^1} > 0{,}05$, тому $C = 9\cdot10^{-4} + 2{,}3\cdot10^{-4} + 0 = 1{,}13\cdot10^{-3}\,м$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Виконавча товщина стінки кришки або днища S_∂	$S = S_R + C + C_0$ Якщо довжина циліндричної відбортованої частини днища $h > 0{,}8\sqrt{D(S_\partial - C)}$, тоді $S_\partial = \frac{pD}{2[\sigma] - p} + C + C_0 .$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1.	1) Якщо $h \le 0{,}8\sqrt{D(S_\partial - C)}$, тоді $S_\partial = 3{,}5\cdot10^{-3} + 1{,}13\cdot10^{-3} + 0{,}37\cdot10^{-3} = 5\cdot10^{-3}\,м$ Обираємо $C_0 = 3{,}7\cdot10^{-4}\,м$ з урахуванням можливих додаткових навантажень під час транспортування, монтажу і т. ін., а також того, що товщина обичайки, що стикується з кришкою (днищем) становить 5 мм. 2) Якщо $h > 0{,}8\sqrt{D(S_\partial - C)}$, тоді $S_\partial = \frac{0{,}6\cdot1{,}6}{2\cdot139 - 0{,}6} + 1{,}13\cdot10^{-3} + 0{,}37\cdot10^{-3} = 5\cdot10^{-3}\,м$ Як і у першому випадку обираємо $C_0 = 3{,}7\cdot10^{-4}\,м$
13.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2 (виконується коли $S_\partial \neq S_\partial^1$)	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5\cdot10^{-3}\,м$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2{,}3\cdot10^{-4}\,м$, тобто $C_2 = 2{,}3\cdot10^{-4}\,м$

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини $S_д$ (виконується коли $S_д \neq S_д^1$)	$\frac{C_2 + C_3}{S_д}$	$\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}046$
15.	Перерахунок суми додатків до розрахункової товщини C (виконується коли $S_д \neq S_д^1$)	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_д} \leq 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_д} > 0{,}05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S_д} < 0{,}05$, тому $C = 9 \cdot 10^{-4}$ *м*
16.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$\begin{cases} 0{,}002 \leq \frac{S_д - C}{D} \leq 0{,}1 \ , \\ 0{,}2 \leq \frac{h_в}{D} \leq 0{,}5 \ . \end{cases}$	$\frac{S_д - C}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} - 0{,}9 \cdot 10^{-3}}{1{,}6} = 0{,}0026$, $0{,}002 < 0{,}0026 < 0{,}1.$ За умовою задачі $\frac{h_в}{D} = 0{,}25$, $0{,}2 < 0{,}25 < 0{,}5.$ Умови застосування розрахункових формул виконуються

Продовження табл. 4.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
17.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p]=\frac{2[\sigma]\varphi(S_\partial - C)}{R_e + 0.5(S_\partial - C)}$	$[p]=\frac{2\cdot 139\cdot 1\left(5\cdot 10^{-3}-0{,}9\cdot 10^{-3}\right)}{1{,}6+0{,}5\left(5\cdot 10^{-3}-0{,}9\cdot 10^{-3}\right)}=0{,}71\ МПа$
18.	Перевірка умови міцності	$p \le [p]$	$0{,}6\ МПа < 0{,}71\ МПа$. Умова міцності виконується.
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p \le [p]$.			

5. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4.
ЕЛІПТИЧНЕ ДНИЩЕ. ВИЗНАЧЕННЯ РАДІУСІВ КРИВИЗНИ, ВНУТРІШНІХ ЗУСИЛЬ ТА НАПРУЖЕНЬ. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 4 практичне заняття.

Визначити радіуси кривизни, внутрішні зусилля та напруження за індивідуальними варіантами. Побудувати епюри напружень σ_N і σ_T, які виникають в еліптичному днищі від дії внутрішнього тиску. Зробити аналіз напруженого стану.

Розрахункові формули наведені в навчальному посібнику [1].

6. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5.
КОНІЧНІ ДНИЩА. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ, ДОПУСТИМОГО ТИСКУ ТА НАПРУЖЕНЬ В ПЕРЕРІЗАХ, ПОРІВНЯННЯ З ОПУКЛИМИ ДНИЩАМИ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 5 практичне заняття.

Розрахувати товщину конічного гладкого днища з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском. У прикладі наведено розрахунок за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 6.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини конічного днища з умови міцності у безмоментній зоні у випадку, коли днище навантажене внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
У прикладі розрахунковий діаметр конічного днища $D_к = D$.			
1.	Допустиме напруження матеріалу днища за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 додатка А залежно від марки сталі, з якої виконане днище і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що днище зварне)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури t = 150 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва φ_p	φ_p визначають за таблицею Б.1 додатка Б залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини φ_p = 1,0
3.	Розрахункова товщина стінки днища $S_{кR}$, м	$S_{кR} = \frac{pD_к}{2[\sigma]\varphi_p - p} \cdot \frac{1}{\cos\alpha_к}$	$S_{кR} = \frac{0{,}6 \cdot 1{,}6}{2 \cdot 139 \cdot 1 - 0{,}6} \cdot \frac{1}{\cos 30^o} = 0{,}004$ *м*
4.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e	Додаток C_e належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$

Продовження табл. 6.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1	Якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\, м/рік$, тоді $C_1 = v_{кор}\tau + C_e$; інакше $C_1 = 0{,}001\, м + C_e$. Якщо відсутні дані о величині $v_{кор}$, але відомо, що матеріал днища стійкий до оточуючого середовища, тоді $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}\, м$. Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4}\, м$, через те, що $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\, м/рік$
6.	Виконавча товщина стінки днища у першому наближенні $S_к^1$	$S_к^1 = S_{кR} + C_1 + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатка В.	$S_к^1 = 4 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-3}\, м$ Обираємо $C_0 = 1 \cdot 10^{-4}\, м$ через те, що найближча товщина листового прокату становить $5 \cdot 10^{-3}\, м$
7.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4 додатка В.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного $5 \cdot 10^{-3}\, м$ нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить $2{,}3 \cdot 10^{-4}\, м$, тобто $C_2 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}\, м$

Продовження табл. 6.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3	Додаток C_3 враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
9.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини $S_к^1$	$\frac{C_2 + C_3}{S_к^1}$	$\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4} + 0}{5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}046$
10.	Сума додатків до розрахункової товщини C	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_к^1} \le 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_к^1} > 0{,}05. \end{cases}$	$\frac{C_2 + C_3}{S_к^1} < 0{,}05$, тому $C = 9 \cdot 10^{-4}\, м$
11.	Виконавча товщина стінки днища $S_к$	$S_к = S_{кR} + C + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатка В.	$S_к = 4 \cdot 10^{-3} + 0{,}9 \cdot 10^{-3} + 0{,}1 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3}\, м$ Обираємо $C_0 = 0{,}1 \cdot 10^{-4}\, м$ через те, що найближча товщина листового прокату становить 5 мм.

Продовження табл. 6.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Перерахунок додатка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2 (виконується коли $S_к \neq S_к^1$)	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4 додатка В.	–
13.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини $S_к$ (виконується коли $S_к \neq S_к^1$)	$\frac{C_2 + C_3}{S_к}$	–
14.	Перерахунок суми додатків до розрахункової товщини C (виконується коли $S_к \neq S_к^1$)	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_к} \leq 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_к} > 0{,}05. \end{cases}$	–
15.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	$0{,}001 \leq \frac{S_к \cos\alpha_к}{D} \leq 0{,}05$	$\frac{S_к \cos\alpha_к}{D} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cos 30^o}{1{,}6} = 0{,}0027$, $0{,}001 < 0{,}0027 < 0{,}05$. Умова застосування розрахункових формул виконується

Продовження табл. 6.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
16.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p]=\dfrac{2[\sigma]\varphi_p(S_к-C)}{\dfrac{D_к}{\cos\alpha_к}+(S_к-C)}$	$[p]=\dfrac{2\cdot 139\cdot 1\left(5\cdot 10^{-3}-0{,}9\cdot 10^{-3}\right)}{\dfrac{1{,}6}{\cos 30^o}+\left(5\cdot 10^{-3}-0{,}9\cdot 10^{-3}\right)}=0{,}615\ МПа$
17.	Перевірка умови міцності	$p\le[p]$	$0{,}6\ МПа<0{,}615\ МПа$. Умова міцності виконується.
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p\le[p]$.			

7. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6.

ПЛОСКІ ДНИЩА. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ І ДОПУСТИМОГО ТИСКУ, ПОРІВНЯННЯ З ОПУКЛИМИ ДНИЩАМИ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2002. – 216 с.

4. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

Завдання на 6 практичне заняття.

Розрахувати товщину плоского круглого днища типу 2 (додаток Г) з умови міцності за безмоментною теорією у випадку, коли кришка навантажена внутрішнім тиском. У прикладі наведено розрахунок за 8 варіантом. Отворів в днище немає. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 7.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини плоского круглого днища з умови міцності у безмоментній зоні у випадку, коли днище навантажене внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу днища за розрахункової температури $[\sigma]$	$[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 – А.4 додатка А залежно від марки сталі, з якої виконане днище і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що днище зварне)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури t = 150 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва φ_p	φ_p визначають за таблицею Б.1 додатка Б залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини φ_p = 1,0
3.	Коефіцієнт ослаблення днища або кришки отворами K_o	Якщо один отвір: $K_o = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2}$; якщо декілька отворів: $K_o = \sqrt{\frac{1 - \Sigma\left(\frac{d_i}{D_p}\right)^2}{1 - \frac{\Sigma d_i}{D_p}}}$	K_o = 1 через те, що отворів в днищі немає
4.	Коефіцієнт K	K визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від типу днища або кришки	Для плоского круглого днища типу 2 K = 0,5
5.	Розрахунковий діаметр D_p	D_p визначають за таблицею Г.1 додатка Г залежно від типу днища або кришки	Для плоского круглого днища типу 2 $D_p = D$

Продовження табл. 7.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6.	Розрахункова товщина стінки плоского круглого днища або кришки S_{1R}, м	$S_{1R} = KK_o D_ð \sqrt{\frac{ð}{[\sigma]\varphi}}$	$S_{1R} = 0{,}5 \cdot 1 \cdot 1{,}6 \sqrt{\frac{0{,}6}{139 \cdot 1}} = 0{,}0526\ ì$
7.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e	Додаток C_e належить враховувати при переміщенні в апараті рідких середовищ зі швидкостями більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$
8.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1	Якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$, тоді $C_1 = v_{кор}\tau + C_e$; інакше $C_1 = 0{,}001\ м + C_e$. Якщо відсутні дані о величині $v_{кор}$, але відомо, що матеріал днища стійкий до оточуючого середовища, тоді $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}\ м$. Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4}\ м$, через те, що $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$

Продовження табл. 7.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Виконавча товщина стінки днища у першому наближенні S_1	$S_1^1 = S_{1R} + C_1 + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатка В.	$S_1^1 = 52{,}6 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 55 \cdot 10^{-3}$ м Обираємо $\tilde{N}_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м через те, що найближча товщина листового прокату становить $55 \cdot 10^{-3}$ м
10.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4 додатка В.	Граничне відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного $5 \cdot 10^{-3}$ м при його товщини від 50 до 60 мм включно становить $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м, тобто $C_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м
11.	Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3	Додаток C_3 враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
12.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини $S_к^1$	$\frac{C_2 + C_3}{S_к^1}$	$\frac{1{,}3 \cdot 10^{-3} + 0}{55 \cdot 10^{-3}} = 0{,}024$

Продовження табл. 7.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Сума додатків до розрахункової товщини C	$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_к^1} \le 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3 \text{ якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_к^1} > 0{,}05. \end{cases}$	$\dfrac{C_2 + C_3}{S_к^1} < 0{,}05$, тому $C = 9 \cdot 10^{-4}$ м
14.	Виконавча товщина стінки днища або кришки S_1	$S_1 = S_{1R} + C_1 + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Найближчу товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатка В.	$S_1 = 52{,}6 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-4} + 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 55 \cdot 10^{-3}$ ì
15.	Умова приєднання днища до обичайки	$S_1 \ge S$	$55 \cdot 10^{-3}$ ì $> 5 \cdot 10^{-3}$ ì Умова виконується
16.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \left(\dfrac{S_1 - C}{K K_o D_p} \right)^2 [\sigma]\varphi$	$[p] = \left(\dfrac{55 \cdot 10^{-3} - 0{,}9 \cdot 10^{-3}}{0{,}5 \cdot 1 \cdot 1{,}6} \right)^2 139 \cdot 1 = 0{,}635$ ÌÏà
17.	Перевірка умови міцності	$p \le [p]$	0,635 ÌÏà $< 0{,}5$ ÌÏà . Умова міцності виконується.

8. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7.
РОЗРАХУНОК ГЛАДКОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ НАВАНТАЖЕНОЇ ЗОВНІШНІМ ТИСКОМ, КОНСТРУЮВАННЯ ОБИЧАЙКИ

Література.

1. Зубрий О.Г. Методические указания к проведению практических занятий по курсу “РК МАХП” – К.: КПИ, 1982. – 19 с.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999. –148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

5. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

Завдання на практичне заняття.

Розрахувати товщину циліндричної обичайки з умови міцності і стійкості, коли обичайка навантажена зовнішнім тиском.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини С = 1 мм.

Таблиця 8.1. Алгоритм і приклад розрахунку товщини циліндричної обичайки з умови міцності і стійкості у випадку, коли обичайка навантажена зовнішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 –А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури t = 155 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 144$ МПа
2.	Модуль пружності в умовах розтягу E	Модуль пружності в умовах розтягу E визначають за таблицею додатку Д залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^0$С)	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 155^0$С модуль пружності в умовах розтягу $E = 1{,}85 \cdot 10^5$ МПа
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_{ó}$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_{ó} = 2{,}4$ для робочих умов; $n_{ó} = 1{,}8$ для умов випробувань	$n_{ó} = 2{,}4$
4.	Коефіцієнт k_1	$k_1 = \dfrac{n_{ó}\,ð_{ç}}{2{,}4 \cdot 10^{-6} Å}$	$k_1 = \dfrac{2{,}4 \cdot 0{,}5}{2{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}85 \cdot 10^5} = 2{,}7$

Продовження табл. 8.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Розрахункова довжина елемента, що примикає до циліндричної обичайки l_3	$l_3 = \frac{H}{3}$ – для випуклих днищ; $l_3 = \frac{D}{6tg\alpha}$ - для конічних днищ без відтбортовки, але не більше довжини конічного елемента; $l_3 = \max\left(r\ \sin\alpha;\ \frac{D}{6tg\alpha} \right)$ для конічних днищ з відтбортовкою, але не більше довжини конічного елемента	Для конічних днищ без відтбортовки $l_3 = \frac{2{,}2}{6 \cdot tg45^o} = 0{,}367$ м Ця величина не перевищує довжини конічного елемента
6.	Розрахункова довжина обичайки l	$l = l_1 + l_2 + \frac{H}{3}$ – для посудин з випуклими днищами; $l = l_1 + l_2 + l_3$ – для апаратів з конічними днищами	$l = 1{,}8 + 0 + 0{,}367 = 2{,}167$ м
7.	Коефіцієнт k_3	$k_3 = \frac{l}{D}$	$k_3 = \frac{2{,}167}{2{,}2} = 0{,}985$
8.	Коефіцієнт k_2	k_2 визначається за номограмою (див. додаток Е) залежно від коефіцієнтів k_1 і k_3	k_2 = 0,65

Продовження табл. 8.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки	$S_R = \max\left\{k_2 D \cdot 10^{-2}; \frac{1{,}1 p_c D}{2[\sigma]}\right\}$	$S_R = \max\left\{0{,}65 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-2}; \frac{1{,}1 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}2}{2 \cdot 144}\right\} =$ $= \max\left\{1{,}43 \cdot 10^{-2}; 4{,}2 \cdot 10^{-3}\right\} = 1{,}43 \cdot 10^{-2}$
10.	Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки у першому наближенні S	$S = S_R + C\ + C_0$ Додаток C_0 вибирається конструктивно для кожного окремого випадку. Товщину листового прокату обираємо за таблицею В.1 додатку В.	$S = 1{,}43 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-4} = 16 \cdot 10^{-3}$ ì Обираємо $\tilde{N}_0 = 7 \cdot 10^{-4}$ ì через те, що вибрана товщина листового прокату становить $16 \cdot 10^{-3}$ ì
11.	Допустимий зовнішній тиск з умов міцності $[p]_\sigma$	$[p]_\sigma = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+s-c}$	$[p]_\sigma = \frac{2 \cdot 144(16-1) \cdot 10^{-3}}{2{,}2 + (16-1) \cdot 10^{-3}} = 1{,}95$ МПа
12.	Коефіцієнт B_1	$B_1 = \min\left\{1{,}0; 9{,}45 \frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}\right\}$	$B_1 = \min\left\{1{,}0; 9{,}45 \frac{2{,}2}{2{,}167}\sqrt{\frac{2{,}2}{100(16-1)10^{-3}}}\right\} =$ $= \min\left\{1{,}0; 11{,}62\right\} = 1$

Продовження табл. 8.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в границях пружності $[p]_E$	$[p]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{n_y \cdot B_1} \frac{D}{l}\left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^{2{,}5}$	$[p]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}85 \cdot 10^{+5}}{2{,}4 \cdot 1} \cdot \frac{2{,}2}{2{,}167}\left[\frac{100(16-1)\cdot 10^{-3}}{2{,}2}\right]^{2{,}5} =$ $= 0{,}84\ ÌÏà$
14.	Допустимий зовнішній тиск	$[p] = \frac{[p]_\sigma}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_\sigma}{[p]_E}\right)^2}}$	$[p] = \frac{1{,}95}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}95}{0{,}84}\right)^2}} = 0{,}77$ МПа
15.	Перевірка умови стійкості	$p_ç \le [p]$	$0{,}5\ ÌÏà < 0{,}77 ÌÏà$ Умова стійкості виконується
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $p_ç \le [p]$.			

9. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8.

РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ ПІДКРІПЛЕНОЇ КІЛЬЦЯМИ ЖОРСТКОСТІ ПРИ ДІЇ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни.Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 8 практичне заняття.

Розрахувати товщину циліндричної обичайки, яка укріплена кільцями жорсткості,якщо обичайка навантажена внутрішнім тиском. Перевірити умову міцності.

У прикладі наведені розрахунки за 8 варіантом. Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Кільця жорсткості виконані зі сталі 20. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e в наведених розрахунках не враховуються.

Таблиця 9.1. Алгоритм і приклад розрахунку циліндричної обичайки з кільцями жорсткості у випадку, коли обичайка навантажена внутрішнім тиском

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
У наведеному прикладі розрахунку обичайка виконана з прокату листового холоднокатаного товщиною S = 4 мм, а кільця жорсткості розташовані рівномірно			
1.	Допустимі напруження матеріалів обичайки і кільця жорсткості за розрахункової температури $[\sigma]$, $[\sigma]_к$	$[\sigma]$ і $[\sigma]_к$ визначають за таблицями А.1 – А.4 залежно від марки сталі, з якої виконані елементи і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що елементи зварні)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури t = 150 ^{0}С допустимі напруження $[\sigma]$=139 МПа, $[\sigma]_к$ = 139 МПа.
2.	Коефіцієнти міцності зварних швів φ_p, φ_T	φ_p, φ_T визначають за таблицею В.1 залежно від виду зварних швів та довжини швів, що контролюються.	Для стикових швів з підварюванням кореня, які виконуються вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини φ_p = 1,0; φ_T = 1,0.
3.	Коефіцієнт міцності зварних швів кільця жорсткості $\varphi_к$.	$\varphi_к$ визначають за таблицею 3.1 залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються	Для швів з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним або напівавтоматичним зварюванням $\varphi_к$ = 1,0.
4.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e	Додаток C_e враховується при швидкості руху в апараті рідких середовищ більше 20 м/с, газоподібних – більше 100 м/с; при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок і при ударній дії середовища на деталь	$C_e = 0$

Продовження табл. 9.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e$, якщо $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$; $C_1 = 0{,}001\ м + C_e$, якщо $v_{кор} \le 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$; $C_1 = 2 \cdot 10^{-3}\ м$, якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$, але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує. Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.	$C_1 = v_{кор}\tau + C_e = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 15 + 0 = 9 \cdot 10^{-4}\ м$ через те, що $v_{кор} > 5 \cdot 10^{-5}\ м/рік$
6.	Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2	Додаток C_2 вибирається за таблицями В.2 – В.4.	Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного ($S = 4$ мм) нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 мм включно становить $2{,}2 \cdot 10^{-4}\ м$, тобто $C_2 = 2{,}2 \cdot 10^{-4}\ м$
7.	Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3	Додаток C_3 враховується у випадках, коли має місце стоншення стінки елемента посудини або апарата при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті труб і т. ін.	$C_3 = 0$
8.	Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини S	$\frac{C_2 + C_3}{S}$	$\frac{2{,}2 \cdot 10^{-4} + 0}{4 \cdot 10^{-3}} = 0{,}055$

Продовження табл. 9.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Сума додатків до розрахункової товщини C	$C=\begin{cases} C_1,\ якщо\ \dfrac{C_2+C_3}{S}\le 0{,}05; \\ C_1+C_2+C_3\ якщо\ \dfrac{C_2+C_3}{S}>0{,}05. \end{cases}$	$\dfrac{C_2+C_3}{S}>0{,}05$, тому $C=9\cdot10^{-4}+2{,}2\cdot10^{-4}+0=1{,}12\cdot10^{-3}\,м$
10.	Коефіцієнт K_4	$K_4=\dfrac{p(D+S-C)}{2\varphi_p[\sigma](S-C)}-1$	$K_4=\dfrac{0{,}6\left(1{,}6+4\cdot10^{-3}-1{,}12\cdot10^{-3}\right)}{2\cdot1\cdot139\left(4\cdot10^{-3}-1{,}12\cdot10^{-3}\right)}-1=0{,}2012$
11.	Умова укріплення обичайки кільцями жорсткості	Якщо $K_4\le 0$, тоді укріплення не треба. Якщо $K_4\ge 2\dfrac{\varphi_T}{\varphi_p}-1$, тоді товщину стінки S слід збільшити до такого розміру, щоб виконувалась умова: $0<K_4<2\dfrac{\varphi_T}{\varphi_p}-1$. Якщо $0<K_4<2\dfrac{\varphi_T}{\varphi_p}-1$, тоді слід переходити до наступного пункту.	$2\dfrac{\varphi_T}{\varphi_p}-1=2\dfrac{1{,}0}{1{,}0}-1=1$ $0<0{,}2012<1$. Обичайку необхідно укріплювати кільцями жорсткості.
12.	Відстань між двома кільцями жорсткості b	$b\le\sqrt{D(S-C)\left[\dfrac{2}{K_4}-\dfrac{\varphi_p}{\varphi_T}\left(1+\dfrac{1}{K_4}\right)\right]}$,	$b=$ $=\sqrt{1{,}6(4-1{,}12)\cdot10^{-3}\left[\dfrac{2}{0{,}2012}-\dfrac{1}{1}\left(1+\dfrac{1}{0{,}2012}\right)\right]}=$ $=0{,}135\,м$. Приймаємо $=0{,}12$ м.

Продовження табл. 9.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Відстань між центрами ваги поперечних перерізів сусідніх кілець жорсткості у першому наближенні l_1^1	$l_1^1 = b + b_к$	Для попереднього розрахунку приймаємо $b_к = 0{,}01\ м$. Тоді $l_1^1 = 0{,}12 + 0{,}01 = 0{,}13\ м$
14.	Площа поперечного перерізу кільця у першому наближенні A_K^1	$A_K^1 \geq l_1(S - C)\frac{[\sigma]\varphi_p}{[\sigma]_к \varphi_к} K_4$	$A_K^1 = 0{,}13\left(4 \cdot 10^{-3} - 1{,}12 \cdot 10^{-3}\right)\frac{139 \cdot 1{,}0}{139 \cdot 1{,}0} 0{,}2012 =$ $= 7{,}533 \cdot 10^{-5}\ м^2$
15.	Висота перерізу кільця жорсткості h_2	$h_2 \geq \sqrt{\frac{A_K^1}{0{,}225}}$	$h_2 = \sqrt{\frac{7{,}533 \cdot 10^{-5}}{0{,}225}} = 0{,}0183\ м$ Приймаємо $h_2 = 0{,}02\ м$
16.	Ширина перерізу кільця жорсткості $b_к$	$b_к = (0{,}2 \ldots 0{,}25)h_2$	$b_к = (0{,}2 \ldots 0{,}25)0{,}02 = 0{,}004 \ldots 0{,}005\ м$ Приймаємо $b_к = 0{,}005\ м$
17.	Остаточна відстань між центрами ваги поперечних перерізів сусідніх кілець жорсткості l_1	$l_1 = b + b_к$	$l_1 = 0{,}12 + 0{,}005 = 0{,}125\ м$
18.	Остаточна площа поперечного перерізу кільця A_K	$A_K = h_2 b_к$	$A_K = 0{,}02 \cdot 0{,}005 = 0{,}0001 м^2$

Продовження табл. 9.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
19.	Перевірка умов застосування розрахункових формул	При умові рівномірного розташування кілець жорсткості: $\begin{cases} \dfrac{S-C}{D} \le 0{,}1 \\ \textit{для обичайок і труб при } D \ge 0{,}2 \textit{ м}; \\ \dfrac{S-C}{D} \le 0{,}3 \\ \textit{для труб при } D < 0{,}2 \textit{ м}. \end{cases}$ $\dfrac{h_2}{D} \le 0{,}2$. У випадках, коли кільця жорсткості встановлені нерівномірно, значення b і l_1 необхідно підставляти для тієї ділянки, де відстань між двома сусідніми кільцями жорсткості найбільша.	$\dfrac{4\cdot10^{-3}-1{,}12\cdot10^{-3}}{1{,}6}=0{,}0018<0{,}1;$ $\dfrac{0{,}02}{1{,}6}=0{,}0125<0{,}2.$ Умови застосування розрахункових формул виконуються
20.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск з умов міцності всієї обичайки $[p]_1$	$[p]_1=\dfrac{2[\sigma]\varphi_p(S-C)+2\dfrac{A_K}{l_1}[\sigma]_к\varphi_к}{D+S-C}.$	$[p]_1=\dfrac{2\cdot139\cdot1\left(4\cdot10^{-3}-1{,}12\cdot10^{-3}\right)+2\dfrac{1\cdot10^{-4}}{0{,}125}139\cdot1}{1{,}6+4\cdot10^{-3}-1{,}12\cdot10^{-3}}=$ $=0{,}638$ *МПа.*

Продовження табл. 9.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
21.	Параметр $\lambda_{П}^2$	$\lambda_{П}^2 = \frac{b^2}{D(S-C)}$	$\lambda_{П}^2 = \frac{0{,}12^2}{1{,}6\left(4\cdot10^{-3} - 1{,}12\cdot10^{-3}\right)} = 3{,}125$
22.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск з умов міцності обичайки між двома сусідніми кільцями жорсткості $[p]_2$	$[p]_2 = \frac{2[\sigma]\varphi_T(S-C)}{D+S-C} \cdot \frac{2+\lambda_{П}^2}{1+\frac{\varphi_T\lambda_{П}^2}{\varphi_p}}$	$[p]_2 = \frac{2\cdot139\cdot1\left(4\cdot10^{-3} - 1{,}12\cdot10^{-3}\right)}{1{,}6+4\cdot10^{-3} - 1{,}12\cdot10^{-3}} \cdot \frac{2+3{,}125}{1+\frac{1\cdot3{,}125}{1}} =$ $= 0{,}62\ МПа$
23.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$	$[p] = \min\{[p]_1;[p]_2\}.$	$[p] = \min\{0{,}638;0{,}62\} = 0{,}62\ МПа$
24.	Перевірка умови міцності	$p \le [p]$	$0{,}6\ МПа < 0{,}62\ МПа$. Умова міцності виконується.
При $p>[p]$ необхідно збільшити площу поперечного перерізу кільця $A_К$ і зробити відповідні перерахунки, поки не буде виконуватися умова: $p \le [p]$.			

10. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 9, 10.
РОЗРАХУНОК КРАЙОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ: КРАЙОВОГО МОМЕНТУ ТА КРАЙОВОЇ СИЛИ. РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ОБИЧАЙКИ НА КРАЮ

Література.

1. Зубрий О.Г. Миргородский В.Т. Методические указания по применению вычислительной техники по курсу “РК МАХП” Алгоритмы расчета краевых напряжений в конструкциях сосудов и аппаратов., Киев: КПИ, 1984. – 28с.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

5. Михалев М.Ф., Третьяков Н.П., Мильченко А.И., Зобнин В.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Учеб. пособие. – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.

Завдання на 9 і 10 практичні заняття.

Розрахувати крайову силу і крайовий момент в місці з’єднання циліндричної обичайки і еліптичного днища у випадку, коли корпус апарата навантажений внутрішнім тиском. Перевірити умову міцності у крайовій зоні.

Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_eне враховувати.

Товщини обичайки і днища (з умови їх навантаження внутрішнім тиском), сума додатків до розрахункової товщини беруться з попередніх розрахунків. Коефіцієнт Пуассона для розрахунків приймаємо: $\mu = 0{,}3$.

Алгоритм і приклад розрахунку крайової сили і крайового моменту наведено у методичних вказівках [1]. Визначення напружень і перевірка умови міцності у крайовій зоні можна виконувати за алгоритмом, який наведено у методичних вказівках [1] або за методикою посібника [4].

11. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 11. РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ, НАВАНТАЖЕНОЇ ОСЬОВОЮ СИЛОЮ, ЗГИНАЮЧИМ МОМЕНТОМ, ПОПЕРЕЧНОЮ СИЛОЮ, ТИСКОМ

Література.

1. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

2. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

3. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

4. ГОСТ 14249 –89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

Завдання на 11 практичне заняття.

Перевірити умову стійкості циліндричної обичайки у випадку, коли вона знаходиться під сумісною дією зовнішнього тиску і осьової стискуючої сили.

У прикладі наведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі. Приймається, що додаток до розрахункової товщини C = 1 мм.

Товщину обичайки і її розрахункову довжину, допустимий зовнішній тиск беремо з попереднього розрахунку (з умови її навантаження зовнішнім тиском).

Таблиця 11.1. Алгоритм і приклад перевірки умови стійкості циліндричної обичайки у випадку, коли вона знаходиться під сумісною дією зовнішнього тиску і осьової стискуючої сили

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $[\sigma]$	Допустиме напруження матеріалу обичайки $[\sigma]$ визначають за таблицями А.1 –А.4 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури t = 155 ^{0}С допустиме напруження $[\sigma] = 144$ МПа
2.	Модуль пружності в умовах розтягу E	Модуль пружності в умовах розтягу E визначають за таблицею додатку Д залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається t = 20^{0}С)	З таблиці Д.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури t = 155^{0}С модуль пружності в умовах розтягу $E = 1{,}85 \cdot 10^5$ МПа
3.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_{ó}$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_{ó} = 2{,}4$ для робочих умов; $n_{ó} = 1{,}8$ для умов випробувань	$n_{ó} = 2{,}4$
4.	Осьова стискуюча сила F	$F = \dfrac{\pi(D + 2S)^2}{4} p_ç$	$F = \dfrac{3{,}14\left(2{,}2 + 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}\right)^2}{4} 0{,}5 = 1{,}96$ ÌÍ

Продовження табл. 11.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Допустима осьова стискуюча сила з умов міцності $[F]_\sigma$	$[F]_\sigma = \pi(D+S-C)(S-C)[\sigma]$	$[F]_\sigma = 3{,}14\left(2{,}2+16\cdot10^{-3}-1\cdot10^{-3}\right)\left(16\cdot10^{-3}-1\cdot10^{-3}\right)144 = 15{,}02\ ÌÍ$
6.	Допустима осьова стискуюча сила з умов місцевої стійкості в границях пружності $[F]_{E1}$	$[F]_{E1} = \frac{310\cdot10^{-6}E}{n_y}D^2\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2,5}$	$[F]_{E1} = \frac{310\cdot10^{-6}\cdot1{,}85\cdot10^{+5}}{2{,}4}\cdot2{,}2^2\left[\frac{100(16-1)\cdot10^{-3}}{2{,}2}\right]^{2,5} = 44{,}4\ ÌÍ$
7.	Зведена довжина обичайки l_{np}	l_{np} визначається за таблицею додатка Ж	$l = l_{ïð} = 2{,}167$ м
8.	Гнучкість λ	$\lambda = \frac{2{,}83l_{ïð}}{D+S-C}$	$\lambda = \frac{2{,}83\cdot2{,}167}{2{,}2+(16-1)\cdot10^{-3}} = 2{,}77$
9.	Допустима осьова стискуюча сила з умов загальної стійкості в границях пружності $[F]_{E2}$	$[F]_{E2} = \pi(D+S-C)(S-C)\frac{E}{n_y}\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2$	$[F]_{E2} = 3{,}14\left(2{,}2+16\cdot10^{-3}-1\cdot10^{-3}\right)\left(16\cdot10^{-3}-1\cdot10^{-3}\right)\cdot \frac{1{,}85\cdot10^{+5}}{2{,}4}\left(\frac{3{,}14}{2{,}77}\right)^2 = 10332\ ÌÍ$

Продовження табл. 11.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Допустима осьова стискуюча сила з умов стійкості в границях пружності $[F]_E$	$[F]_E = \min\{[F]_{E1}; [F]_{E2}\}$	$[F]_E = \min\{44{,}4; 10332\} = 44{,}4$ *ÌÍ*
11.	Допустима осьова стискуюча сила $[F]$	$[F] = \dfrac{[F]_\sigma}{\sqrt{1+\left(\dfrac{[F]_\sigma}{[F]_E}\right)^2}}$	$[F] = \dfrac{15{,}02}{\sqrt{1+\left(\dfrac{15{,}02}{44{,}4}\right)^2}} = 14{,}22$ *ÌÍ*
12.	Перевірка умови стійкості	$\dfrac{p_ç}{[p_ç]} + \dfrac{F}{[F]} \le 1$	$\dfrac{0{,}5}{0{,}77} + \dfrac{1{,}96}{14{,}22} = 0{,}787 < 1$ Умова стійкості виконується
Якщо умова міцності не виконується, необхідно вжити відповідних заходів (наприклад, збільшити товщину стінки елемента, змінити марку сталі і т. ін.) і зробити перерахунок за наведеним вище алгоритмом для забезпечення умови $\dfrac{p_ç}{[p_ç]} + \dfrac{F}{[F]} \le 1$.			

12. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 12.
РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ОДИНОЧНОГО ОТВОРУ

Література.

1. ГОСТ 24755-81. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни.Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 12 практичне заняття.

Завдання 1. Для циліндричної обичайки, яка навантажена внутрішнім тиском, визначити мінімальну відстань між зовнішніми поверхнями штуцерів, коли їх можна вважати поодинокими, а також найбільший діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення.

Завдання 2. Для конічного днища, яке навантажене внутрішнім тиском, перевірити виконання умови укріплення нормального поодинокого отвору зовнішнім штуцером без застосування накладного кільця.Виконавчу товщину штуцера $S_ш$ приймаємо таким, що дорівнює

товщині конічного днища, яке у свою чергу беремо з попередніх розрахунків.

Додаткові дані для другого завдання подані у таблиці12.1.

Таблиця 12.1. Додаткові данні для другого завдання

Варіант	Внутрішнійдіаметр конічного днища по центру отвору, що укріплюється $D_к$, м	Діаметр отвору d, м	Довжина зовнішнього штуцера l_1, м	Розрахункова товщина стінки зовнішнього штуцера$S_{шR}$, м
1	0,675	0,06	0,024	0,004
2	0,75	0,03	0,016	0,003
3	0,75	0,06	0,024	0,004
4	0,9	0,04	0,017	0,003
5	0,9	0,07	0,028	0,005
6	1,05	0,04	0,018	0,003
7	1,05	0,06	0,026	0,005
8	1,2	0,08	0,026	0,003
9	1,2	0,05	0,022	0,004
10	1,35	0,06	0,024	0,004
11	1,35	0,08	0,030	0,005
12	1,5	0,05	0,020	0,003
13	1,5	0,09	0,034	0,006
14	1,65	0,05	0,022	0,004
15	1,65	0,07	0,030	0,006
16	1,8	0,1	0,030	0,004
17	1,95	0,09	0,032	0,005
18	1,5	0,05	0,020	0,003
19	1,5	0,09	0,034	0,006
20	1,4	0,07	0,022	0,004

У прикладінаведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі.

Приймається, що додаткидо розрахункової товщиниобичайок і штуцера $C = C_ш$ =1 мм, а матеріали, з яких виконані штуцер і днище, однакові.

Товщину обичайки і її розрахункову довжину, допустимий зовнішній тиск беремо з попереднього розрахунку (з умови її навантаження внутрішнім тиском).

Приклад вирішення 1 завдання.

Розрахунковий діаметр обичайки:

$$D_R = D = 2{,}2\,\text{м}$$

Мінімальна відстань між зовнішніми поверхнями штуцерів, коли їх можна вважати поодинокими:

$$\delta \geq 2\sqrt{D_R(S-C)} = 2\sqrt{2{,}2(7-1)10^{-3}} = 0{,}23\,\text{м}$$

Найбільший діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення

$$d_o = 2\left(\frac{S-C}{S_R} - 0{,}8\right)\sqrt{D_R(S-C)} = 2\left(\frac{(7-1)10^{-3}}{5{,}4\cdot 10^{-3}} - 0{,}8\right)\sqrt{2{,}2(7-1)10^{-3}} = 0{,}0715\,\text{м}$$

Приклад вирішення 2 завдання.

Розрахунковий діаметр конічного днища по центру отвору, яке укріплюється:

$$D_R = \frac{D_{\hat{e}}}{\cos\alpha} = \frac{1{,}65}{\cos 45^o} = 2{,}33\,\text{м}$$

Найбільший діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення

$$d_o = 2\left(\frac{S-C}{S_R} - 0{,}8\right)\sqrt{D_R(S-C)} = 2\left(\frac{(9-1)10^{-3}}{7{,}6\cdot 10^{-3}} - 0{,}8\right)\sqrt{2{,}33(9-1)10^{-3}} = 0{,}069\,\text{м}$$

Через те, що внутрішній діаметр отвору *d*більше найбільшого діаметра поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення d_o, необхідне укріплення цього отвору.

Розрахункова довжина зовнішньої частини штуцера, яка приймає участь в укріпленні отвору:

$$l_{1R} = \min\left\{l_1; 1{,}25\sqrt{(d + 2C_ø)(S - C_ø)}\right\} =$$
$$= \min\left\{0{,}03; 1{,}25\sqrt{(0{,}07 + 2\cdot 0{,}001)(9-1)10^{-3}}\right\} =$$
$$= \min\{0{,}03; 0{,}03\} = 0{,}03\ м$$

Розрахунковий діаметр поодинокого отвору, який не потребує укріплення при відсутності надлишкової товщини стінки днища:

$$d_{oR} = 0{,}4\sqrt{D_R(S - C)} = 0{,}4\sqrt{2{,}33(9-1)10^{-3}} = 0{,}0546\ м$$

Розрахунковий діаметр отвору:

$$d_R = d + 2C_ø = 0{,}07 + 2\cdot 0{,}001 = 0{,}072\ м$$

Через те, що матеріали, з яких виконані штуцер і днище, однакові, відношення допустимого напруження матеріалу штуцера до допустимого напруження матеріалу днища при розрахунковій температурі $\chi_1 = 1$.

У випадку укріплення отвору тільки зовнішнім штуцером повинна виконуватись умова:

$$(l_{1R} + S - S_R - C)(S_ø - S_{øR} - C_ø)\chi_1 + \sqrt{D_R(S-C)}(S - S_R - C) \geq 0{,}5(d_R - d_{oR})S_R$$

$$(0{,}03 + 0{,}009 - 0{,}0076 - 0{,}001)(0{,}009 - 0{,}006 - 0{,}001)\cdot 1 +$$
$$+ \sqrt{2{,}33(0{,}009 - 0{,}001)}(0{,}009 - 0{,}0076 - 0{,}001) \geq 0{,}5(0{,}072 - 0{,}0546)0{,}0076$$

$$1{,}154\cdot 10^{-4} > 0{,}66\cdot 10^{-4}$$

Умова укріплення отвору виконується.

13. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 13, 14.

ФЛАНЦЕВІ З'ЄДНАННЯ. ВИБІР ТИПУ ФЛАНЦІВ, ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ. РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ В БОЛТАХ З'ЄДНАННЯ. РОЗРАХУНОК БОЛТІВ. РОЗРАХУНОК ФЛАНЦІВ НА МІЦНІСТЬ ТА ЖОРСТКІСТЬ. ПЕРЕВІРКА МІЦНОСТІ ПРОКЛАДКИ

Література.

1. Доброногов В.Г., Микуленок І.О. Конструювання та розрахунок фланцевих з'єднань. Навчальний посібник. – К.: НПК ВО, 1992. – 104 с.

2. Микуленок І.О.Конструювання фланцевих з'єднань сталевих посудин та апаратів. Навчальний посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 152 с.

3. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

4. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999. –148 с.

5. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2002. – 216 с.

Завдання на 13 і 14 практичні заняття.

Вибрати тип фланців у місці кріплення еліптичної кришки до циліндричної обичайки, визначити геометричні розміри фланцевого з'єднання. Розрахувати на міцність болти, фланці, прокладку. Перевірити умову герметичності фланцевого з'єднання. Розрахунок виконати для робочих умов.

Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_eне враховувати.

Товщина обичайки (з умови її навантаження зовнішнім тиском), сума додатків до розрахункової товщини беруться з попередніх розрахунків.

Матеріал болтів –

Матеріал фланців –

Допустимі напруження і модулі пружності під час розтягу для матеріалів, з яких виготовлені елементи фланцевого з'єднання, обираються за додатками А і Д.

Алгоритм і приклад розрахунку фланцевого з'єднання наведено у навчальному посібнику [1].

14. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 15. САЛЬНИКОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ. КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК. ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ЗАТЯЖКИ БОЛТІВ ТА ПОТУЖНОСТІ НА ПОДОЛАННЯ СИЛ ТЕРТЯ

Література.

1. Михалев М.Ф., Третьяков Н.П., Мильченко А.И., Зобнин В.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Учеб. пособие. – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни.Навч. посібник. – К.: 1999.- 148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 16 і 17 практичні заняття.

Вибрати тип набивки і розрахувати її розміри. Розрахувати розміри натискної втулки, сальникової камери, діаметр різьби шпильок, зусилля затягування шпильок і втрату потужності на подолання сил тертя у сальнику.

Вихідні дані до розрахунку.

Тиск середовища p = 4 МПа. Для розрахунку приймаємо азбестову просочену прокладку квадратного перерізу АП. Коефіцієнт статичного тертя набивки о поверхні сальникової камери і валу f_c = 0,014. Коефіцієнт бокового тиску для просоченої набивки k = 1. Кількість болтів (шпильок) $n_б$ = 8.

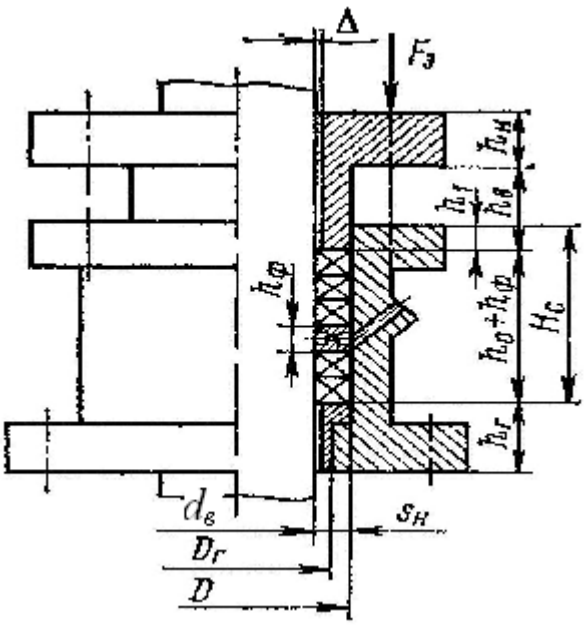


Рис. 14.1. Розрахункова схема

Таблиця 14.1. Вихідні дані до розрахунку

Варіант	$d_в$, м	n, об/хв	D, м
1	0,045	200	1,5
2	0,048	200	1,6
3	0,05	200	1,7
4	0,046	150	1,8
5	0,05	150	1,9
6	0,052	150	2
7	0,052	140	2,1
8	0,058	140	2,2
9	0,062	140	2,4
10	0,06	120	2,5
11	0,065	120	2,7
12	0,07	120	2,8
13	0,065	100	3
14	0,068	100	3,1
15	0,068	90	3,2
16	0,072	90	3,4
17	0,075	90	3,5
18	0,06	130	2,6
19	0,07	130	2,8
20	0,07	130	2,8

У прикладінаведено розрахунок за 15 варіантом. Умови експлуатації – робочі.

Таблиця 14.1. Алгоритм і приклад розрахунку сальника з м’якою набивкою

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Товщина набивки $S_í$	В машинобудуванні $S_í = (1{,}5\ldots2{,}5)\sqrt{d_â}$, мм $S_í$ округляють до найближчого стандартного значення з ряду: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 32, 35, 38, 42, 45, 50 мм	$S_н = (1{,}5\ldots2{,}5)\sqrt{68} = 12{,}37\ldots20{,}62$ *мм* Приймаємо $S_н =$ 0,019 м
2.	Первісна висота набивки з урахуванням герметизації h_o	$h_o = (6\ldots8)S_í$	$h_o = (6\ldots8)0{,}019 = 0{,}114\ldots0{,}152$ м Приймаємо $h_o = 0{,}133$ м
3.	Висота фонаря $h_ô$	$h_ô = (1{,}5\ldots2)S_í$	$h_ô = (1{,}5\ldots2)0{,}019 = 0{,}0285\ldots0{,}038$ м Приймаємо $h_ô = 0{,}033$ м
4.	Повна глибина розточки сальникової камери з урахуванням встановлення фонарного кільця і забезпечення напрямку натискної втулки	$H_c = h_o + h_ô + 2S_í$	$H_c = 0{,}133 + 0{,}033 + 2 \cdot 0{,}019 = 0{,}204$ м

Продовження табл. 14.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Довжина циліндричної частини натискної втулки $h_{â}$	$h_{â} = (0{,}4...0{,}5)h_o$	$h_{â} = (0{,}4...0{,}5)0{,}133 = 0{,}0532...0{,}0665$ м Приймаємо $h_{â} = 0{,}06$ м
6.	Величина зазору між валом і натискною втулкою Δ	$\Delta = \min\left\{\left(\frac{1}{200}...\frac{1}{250}\right)d_{â}; 8\cdot10^{-4}\,ì\right\}$	$\Delta = \min\left\{\left(\frac{1}{200}...\frac{1}{250}\right)0{,}068; 8\cdot10^{-4}\,ì\right\} =$ $= \min\left\{(0{,}000272...0{,}00034); 8\cdot10^{-4}\,ì\right\}$ Приймаємо $\Delta = 0{,}0003$ м
7.	Внутрішній діаметр сальникової камери D	$D = d_{â} + 2S_{í}$	$D = 0{,}068 + 2\cdot0{,}019 = 0{,}106$ м
8.	Допустиме напруження різьби болтів (шпильок) $[\sigma]_{ð}$	З умови тривалої експлуатації різьби болтів (шпильок) $[\sigma]_{ð}$ = 25-35 МПа. При $p \geq 3$ МПа приймається більше значення	Через те, що p = 4 МПа, приймаємо $[\sigma]_{ð}$ = 35 МПа

Продовження табл. 14.1

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Внутрішній діаметр різьби болтів (шпильок) d_p	$d_p = \sqrt{\frac{3\left(D^2 - d_â^2\right)p}{n_á[\sigma]_ð}}$	$d_p = \sqrt{\frac{3\left(0{,}106^2 - 0{,}068^2\right)4}{8 \cdot 35}} = 0{,}0168$ *ì* Вибираємо діаметр болтів (шпильок) $d_б = 0{,}018$ *м*
10.	Висота фланця натискної втулки	$h_н = 1{,}25 d_б$	$h_н = 1{,}25 \cdot 0{,}018 = 0{,}0225$ *м*
11.	Робочий тиск $p_í^1$ натискної втулки	Орієнтовно $p_í^1 = (2...2{,}5)p$	$p_í^1 = (2...2{,}5)4 = 8...10$ *ÌÏà* Приймаємо $p_н^1 = 9$ *МПа*
12.	Коефіцієнт K_1	$K1$ знаходиться за графіком (рис. З.1 додатка З) залежно від матеріалу набивки і тиску натискної втулки	Для азбестової просоченої прокладки АП і тиску $p_н^1 = 9$ *МПа*: $K_1 = 0{,}8$
13.	Коефіцієнт усадки K_y	$K_y = \min\{1; (1{,}1...1{,}2)K_1\}S_í$ для $S_í < 0{,}016$ *ì*; $K_y = K_1$ äëÿ $S_í = (0{,}016...0{,}019)$ *ì*; $K_y = (0{,}8...0{,}9)K_1$ äëÿ $S_í > 0{,}019$ *ì*;	Приймаємо $K_y = K_1 = 0{,}8$ для $S_í = 0{,}019$ м

Продовження табл. 14.1

14.	Висота набивки у робочому стані h_p	$h_p = K_y\, h_o$	$h_p = 0{,}8 \cdot 0{,}133 = 0{,}1064$ м
14.	Тиск герметичності $p_{ãåðì}$	$p_{ãåðì} = 0{,}3\,ÌÏà \quad äëÿ \quad ð < 0{,}3\,ÌÏà$; $p_{ãåðì} = p \quad äëÿ \quad ð \geq 0{,}3\,ÌÏà$	$p_{ãåðì} = p = 4\,ÌÏà$
15.	Зусилля затягування шпильок $F_ç$	$F_ç = \dfrac{\pi\left(D^2 - d_â^2\right)p_{ãåðì}}{4k} e^{\frac{2kf_c h_p}{2S_í}}$	$F_ç = \dfrac{3{,}14\left(0{,}106^2 - 0{,}068^2\right)4}{4 \cdot 1} e^{\frac{2 \cdot 1 \cdot 0{,}014 \cdot 0{,}1064}{2 \cdot 0{,}019}} = 0.02244\,ÌÍ$
16.	Коефіцієнт кінетичного тертя між валом і набивкою $f_{êèí}$	$f_{êèí}$ знаходиться за графіком (рис. И.1 додатка И) залежно від матеріалу набивки і тиску середовища	Для азбестової просоченої прокладки АП і тиску середовища $p = 4\,ÌÏà$: $f_{êèí} = 0{,}01$
17.	Сила тертя між набивкою і валом $F_{òð}$	$F_{òð} = \dfrac{\pi d_â S_í\, ð_{ãåðì}\, f_{êèí}}{2kf_c}\left(e^{\frac{2kf_c h_p}{S_í}} - 1\right)$	$F_{òð} = \dfrac{3{,}14 \cdot 0{,}068 \cdot 0{,}019 \cdot 4 \cdot 0{,}01}{2 \cdot 1 \cdot 0{,}014}\left(e^{\frac{2 \cdot 1 \cdot 0{,}014 \cdot 0{,}1064}{0{,}019}} - 1\right) = 9{,}81 \cdot 10^{-4}\,ÌÍ$
18.	Кутова швидкість обертання валу ω	$\omega = 2\pi n$	$\omega = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}5 = 9{,}42\,1/c$
18.	Втрати потужності на подолання сил тертя у сальнику N_c	$N_c = \dfrac{F_{òð}\,\omega d_d}{2}$	$N_c = \dfrac{981 \cdot 9{,}42 \cdot 0{,}068}{2} = 314\,Âò$

15. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 16, 17.

ОПОРИ АПАРАТІВ, РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ ВІД ДІЇ РЕАКЦІЙ ОПОРНИХ ЛАП

Література.

1. Доброногов В.Г., Микуленок І.О. Конструювання опорних вузлів хімічних апаратів і перевірка несучої спроможності обичайок на дію опорних навантажень. Навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 184 с.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999. –148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 16 і 17 практичні заняття.

Вибрати тип опори. Обґрунтувати необхідність застосування підкладного листа. Визначити зусилля, що діє на опорну лапу. Перевірити умову несучої спроможності опорного вузла. Розрахунок виконати для робочих умов.

Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e не враховувати.

Товщина обичайки (з умови її навантаження зовнішнім тиском), сума додатків до розрахункової товщини беруться з попередніх розрахунків.

Допустимі напруження для матеріалів, з яких виготовлені елементи опор, обираються за додатком А.

Алгоритм і приклад розрахунку опорного вузла наведено у навчальному посібнику [1].

16. ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 18.

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВУЗЛА ПРИВАРКИ СТРОПУВАЛЬНОГО ВУШКА ДО ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБИЧАЙКИ

Література.

1. Доброногов В.Г., Микуленок І.О. Конструювання опорних вузлів хімічних апаратів і перевірка несучої спроможності обичайок на дію опорних навантажень. Навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 184 с.

2. Андреєв І.А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском. Навч. посібник. – К.: «Видавництво «Політехніка», 2011. – 272 с.

3. Андреєв І.А., Зубрій О.Г., Мікуленок І.О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі і чавуни. Навч. посібник. – К.: 1999. –148 с.

4. Андреєв І.А., Мікульонок І.О. Розрахунок, конструювання та надійність обладнання хімічних виробництв: Термінологічний словник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. – 216 с.

Завдання на 18 практичне заняття.

Визначити зусилля, що діє на стропувальне вушко і допустиме зусилля у вузлі приварки стропувального вушка. Перевірити умову несучої

спроможності вузла приварки стропувального вушка. Розрахунок виконати для робочих умов.

Корозійне середовище знаходиться всередині апарата. Технологічний додаток C_3 і додаток для компенсації ерозії C_e не враховувати.

Товщина обичайки (з умови її навантаження зовнішнім тиском), сума додатків до розрахункової товщини беруться з попередніх розрахунків.

Допустимі напруження для матеріалів, з яких виготовлені елементи опор, обираються за додатком А.

Алгоритм і приклад розрахунку вузла приварки стропувального вушка наведено у навчальному посібнику [1].

Додаток А. Механічні характеристики сталей

Властивості сталей подані за ГОСТ 14249-89

Таблиця А.1. Допустимі напруження для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата	Допустиме напруження [σ], 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			
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	85	122	105	92	77	92	105
410	81	81	104	104	86	75	86	104
420	75	75	92	92	80	72	80	92
430	71*	71*	86	86	75	68	75	86
440	–	–	78	78	67	60	67	78
450	–	–	71	71	61	53	61	71
460	–	–	64	64	55	47	55	64
470	–	–	56	56	49	42	49	56
480	–	–	53	53	46*	37	46**	53

*Для розрахункової температури стінки 425 ºС.

** Для розрахункової температури стінки 475 ºС.

Примітки. 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 ºС, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 ºС 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 $R_{т}^{20} < 220$ МПа допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення $R_{т}^{20} / 220$.

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

Таблиця А.2. Допустимі напруження для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження [σ], МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147	147	155	146	240
100	146,5	146,5	153	141	235
150	146	146	152,5	138	230
200	145	145	152	134	225
250	145	145	152	127	220
300	141	141	147	120	210
350	137	137	142	114	200
375	135	135	140	110	180
400	132	132	137	105	170
410	130	130	136	103	160
420	129	129	135	101	150
430	127	127	134	99	140
440	126	126	132	96	135
450	124	124	131	94	130
460	122	122	127	91	126
470	117	117	122	89	122
480	114	114	117	86	118
490	105	105	107	83	114
500	96	96	99	79	108
510	82	82	84	72	97
520	69	69	74	66	85
530	60	57	67	60	72
540	50	47	57	54	58
550	41	–	49	47	52
560	33	–	41	40	45
570	–	–	–	35	40
580	–	–	–	30	34
590	–	–	–	28	30
600	–	–	–	25	25

Примітки до таблиці А.2. 1. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 °С, допустимі напруження беруть такими самими, як 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. Якщо розрахункові температури нижчі за 200 °С, сталь марок 12МХ, 12ХМ, 15ХМ застосовувати не рекомендується.

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Допустиме напруження [σ], МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	180	160	153	168	184
100	173	133	140	156	174
150	171	125	130	148	168
200	171	120	120	140	160
250	167	115	113	132	154
300	149	112	103	123	148
350	143	108	101	113	144
375	141	107	90	108	140
400	140	107	87	103	137
410	–	107	83	102	136
420	–	107	82	101	135
430	–	107	81	100,5	134
440	–	107	81	100	133
450	–	107	80	99	132
460	–	–	–	98	131
470	–	–	–	97,5	130
480	–	–	–	97	129
490	–	–	–	96	128
500	–	–	–	95	127
510	–	–	–	94	126
520	–	–	–	79	125
530	–	–	–	79	124
540	–	–	–	78	111
550	–	–	–	76	111
560	–	–	–	73	101
570	–	–	–	69	97
580	–	–	–	65	90
590	–	–	–	61	81
600	–	–	–	57	74
610	–	–	–	–	68
620	–	–	–	–	62
630	–	–	–	–	57
640	–	–	–	–	52
650	–	–	–	–	48
660	–	–	–	–	45
670	–	–	–	–	42
680	–	–	–	–	38
690	–	–	–	–	34
700	–	–	–	–	30

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

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

3. Для поковок зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 ºС, помножують на 0,83.

4. Для сортового прокату зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 ºС, помножують на відношення $R_{0.2}^{*}/240$, де $R_{0.2}^{*}$ – умовна границя плинності матеріалу сортового прокату, визначена за ГОСТ 5949; для сортового прокату зі сталі марки 03Х18Н11 допустиме напруження помножують на 0,8.

5. Для поковок і сортового прокату з сталі марки 08Х18Н10Т допустимі напруження, що зазначені в таблиці за температур до 550 ºС, помножують на 0,95.

6. Для поковок зі сталі марки 03Х17Н14М3 допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,9.

7. Для поковок зі сталі марки 03Х18Н11 допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,9; для сортового прокату з сталі марки 03Х18Н11 допустимі напруження помножують на 0,8.

8. Для труб зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на 0,88.

9. Для поковок зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) допустимі напруження, що зазначені в таблиці, помножують на відношення $R_{0.2}^{*}/250$, де $R_{0.2}^{*}$ – умовна границя плинності матеріалу поковок, визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

Таблиця А.4. Допустимі напруження для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження [σ], МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	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. Якщо розрахункові температури нижчі від 20 ºС, допустимі напруження беруть такими самими, як і за температури 20 ºС для допустимого застосування матеріалу за цієї температури.

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

Таблиця А.5. Розрахункові значення границі плинності для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення границі плинності $R_т$, 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			
20	250	210	300	280	220	195	270	280
100	230	201	165,5	240	213	188	240	240
150	224	197	156,5	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

Таблиця А.6. Розрахункові значення границі міцності для вуглецевих і низьколегованих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункове значення границі міцності R_B, МПа, для сталей марок						
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20, 20К	10	10Г2, 17ГС, 09Г2, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм						
	До 20	Понад 20	До 32	Понад 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

Таблиця А.7. Розрахункові значення умовної границі плинності для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункове значення умовної границі плинності $R_{0,2}$, МПа, для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	220	220	233	220	400
100	219	219	230	210	352,5
150	218	218	229	207	345
200	217,5	217,5	228	201	337,5
250	217,5	217,5	228	190	330
300	212	212	220	180	315
350	206	206	213	171	300
375	202	202	210	164	270
400	198	198	205	158	255
410	195	195	204	155	240
420	194	194	202	152	225

Таблиця А.8. Розрахункові значення границі міцності для теплотривких хромистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункові значення границі міцності $R_в$, МПа, для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	450	450	450	400	600
100	440	440	440	380	572
150	434	434	434	355	555
200	430	430	430	330	535
250	440	437	437	320	520
300	454	445	445	318	503
350	437	442	442	314	492
375	427	436	436	312	484
400	415	426	426	310	472
410	413	424	424	306	468
420	410	421	421	300	462

Таблиця А.9. Розрахункові значення умовної границі плинності $R_{0,2}$ для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункове значення умовної границі плинності $R_{0,2}$, МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	5Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ
20	350	350	200	350	350	220
100	328	260	160	330	300	207
150	314	230	150	310	290	195
200	300	200	135	300	283	186
250	287	190	125	280	250	175
300	274	180	115	270	240	165
350	–	170	–	–	–	160
375	–	165	–	–	–	157,5
400	–	160	–	–	–	155

Таблиця А.10. Розрахункові значення границі міцності R_B для жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункове значення границі міцності R_B, МПа, для сталей марок				
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ
20	600	670	550	700	550
100	535	550	500	640	527,5
150	495	520	480	610	512,5
200	455	490	468	580	500
250	415	485	450	570	490
300	375	480	440	570	482,5
350	–	465	–	–	478
375	–	458	–	–	474
400	–	450	–	–	470

Таблиця А.11. Розрахункові значення умовної границі плинності $R_{1,0}$ для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункове значення границі плинності $R_{1,0}$, МПа, для сталей марок				
	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3
20	276	252	270	240	230
100	261	234	260	200	210
150	252	222	257	187,5	195
200	240	210	257	180	180
250	231	198	250	173	170
300	222	184,5	223	168	155
350	216	169,5	215	162	152
375	210	162	212	160	135
400	205,5	154,5	210	160	130
410	204	153	–	160	125
420	202,5	151,5	–	160	123
430	201	150,75	–	160	122
440	199,5	150	–	160	121
450	198	148,5	–	160	120
460	196,5	147	–	–	–
470	195	146	–	–	–
480	193,5	145,5	–	–	–
490	192	144	–	–	–
500	190,5	142,5	–	–	–
510	189	141	–	–	–
520	187,5	139,5	–	–	–
530	186	138	–	–	–

Примітка. Границю плинності за температури 20 ºС належить брати:

– для поковок зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т – $R_{1,0}^{20}$ (листа) / 1,2;

– для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08Х18Н10Т – $R_{1,0}^{20}$ (листа) / 1,05;

– для сортового прокату зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т – 1,15 $R_{1,0}^{20}$ (сорту);

– для поковок зі сталі марок 03Х17Н14М3, 03Х18Н11 – $R_{1,0}^{20}$ (листа) / 1,11;

– для сортового прокату зі сталі марки 03Х18Н11 – $R_{1,0}^{20}$ (листа) / 1,25;

– для труб зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) – $R_{1,0}^{20}$ (листа)/1,14;

– для поковок зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) – 1,08 $R_{1,0}^{20}$, де $R_{1,0}^{20}$ – границя плинності матеріалу поковок визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

Таблиця А.12. Розрахункові значення границі умовної плинності $R_{0,2}$ для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункове значення границі плинності $R_{0,2}$, МПа, для сталей марок				
	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3
20	240	210*	250	200	200
100	228	195	240	160	180
150	219	180	235	150	165
200	210	173	235	140	150
250	204	165	232	135	140
300	195	150	205	130	126
350	190	137	199	127	115
375	186	133	195	125	108
400	181	129	191	122,5	100
410	180	128	–	121,5	98
420	180	128	–	121	97,5
430	179	127	–	120,5	97
440	177	126	–	120	96
450	176	125	–	120	95
460	174	125	–	–	–
470	173	124	–	–	–
480	173	123	–	–	–
490	171	122	–	–	–
500	170	122	–	–	–
510	168	120	–	–	–
520	168	119	–	–	–
530	167	119	–	–	–

* Для сталей 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т границя плинності за температури 20 ºС становить 200 МПа.

Примітки. 1. Для поковок із сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т границі плинності множать на 0,83.

2. Для сортового прокату із сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т границі плинності помножують на $R^*_{0,2}/240$, де $R^*_{0,2}$ – умовна границя плинності матеріалу сортового прокату, визначена за ГОСТ 5949.

3. Для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08Х18Н10Т границі плинності помножують на 0,95.

4. Для поковок зі сталі марки 03Х17Н14М3 границі плинності помножують на 0,9.

5. Для поковок зі сталі марки 03Х18Н11 границі плинності множать на 0,9; для сортового прокату зі сталі марки 03Х18Н11 границі плинності помножують на 0,8.

6. Для труб зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) границі плинності помножують на 0,88.

7. Для поковок зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) границі плинності помножують на відношення $R^*_{0,2}/240$, де $\sigma^*_{0,2}$ – умовна границя плинності матеріалу поковок, визначена за ГОСТ 25054 (за погодженням).

Таблиця А.13. Розрахункові значення границі міцності $R_в$ для жароміцних, жаростійких і корозійностійких сталей аустенітного класу

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункові значення границі міцності $R_в$, МПа, для сталей марок					
	03Х21Н21М4ГБ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	550	600	500	520	520	540
100	540	583	474	450	480	500
150	535	550	453	433	455	475
200	535	515	432	415	430	450
250	534	503	412	405	424	443
300	520	500	392	397	417	440
350	518	–	376	394	408	438
375	517	–	368	392	405	437
400	516	–	360	390	402	436
410	–	–	358	388	400	434
420	–	–	356	386	398	432
430	–	–	354	384	396	431
440	–	–	352	382	394	430
450	–	–	350	380	392	428
460	–	–	–	–	390	426
470	–	–	–	–	388	424
480	–	–	–	–	386	422
490	–	–	–	–	385	421

Продовження табл. А.13

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, ºС	Розрахункові значення границі міцності $R_в$, МПа, для сталей марок					
	03Х21Н21М4ГБ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
500	–	–	–	–	383	420
510	–	–	–	–	381	418
520	–	–	–	–	380	416
530	–	–	–	–	374*	412*

* Для розрахункової температури стінки 550 ºС.

Додаток Б. Коефіцієнти міцності зварних швів

Таблиця Б.1. Коефіцієнти міцності зварних швів за ГОСТ 14249-89

Вид зварного шва	Значення коефіцієнта міцності зварного шва	
	Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини	Довжина швів, що контролюються, становить 10–50 % від загальної довжини
Стиковий або тавровий з двобічним суцільним проваром, що виконується автоматичним або напівавтоматичним зварюванням	1,0	0,9
Стиковий з підварюванням кореня шва або тавровий з двобічним суцільним проваром, 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
Тавровий з конструктивним зазором зварюваних деталей	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 В. Сталевий листовий прокат

Таблиця В.1. Розміри сталевого листового прокату

Тип прокату	Розміри прокату, мм		
	товщина	ширина	довжина
Прокат листовий гарячекатаний (ГОСТ 19903–74):			
виготовлений у листах	Від 6 до 26 включно з кроком 0,5; від 27 до 32 включно з кроком 1,0; від 34 до 40 включно з кроком 2,0; 42; 45; 48; 50; 52; 55; 58; 60; 62; 65; 68; 70; 72; 75; 78; 80; 82; 85; 87; 90; 92; 95; від 100 до 160 включно з кроком 5,0	500 – 1800	1200 – 12000
виготовлений у рулонах	Від 1,2 до 1,6 включно з кроком 0,1; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0; 4,5; 5,0; 5,3; 5,5; 6,0; 6,3 Від 7,0 до 12 включно з кроком 0,5	500 – 2200	Розвернута довжина рулонів не регламентується
Прокат листовий холоднокатаний (ГОСТ 19904–90):			
виготовлений у листах	Від 0,35 до 0,80 включно з кроком 0,05; Від 0,90 до 1,80 включно з кроком 0,10; 2,00; 2,20; 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; 3,50; 3,80; 3,90; 4,00; 4,20; 4,50; 4,80; 5,00	500 – 2350	1000 – 6000
виготовлений у рулонах	—”—	—”—	Розвернута довжина рулонів не регламентується

Таблиця В.2. Граничні відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного [ГОСТ 19903–74]

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

Таблиця В.3. Граничні відхилення по товщині прокату листового гарячекатаного, мм [ГОСТ 19903–74]

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

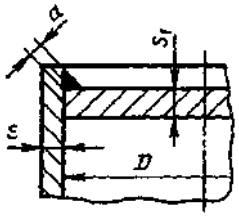
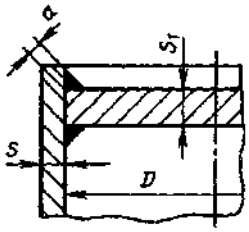
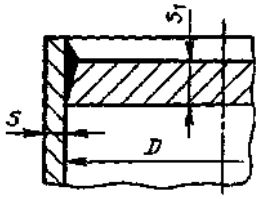
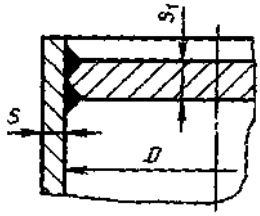
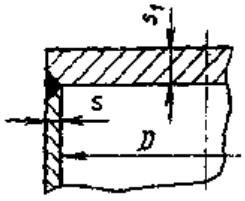
Таблиця В.4. Граничні відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного, мм [ГОСТ 19904–90]

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

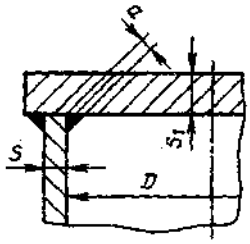
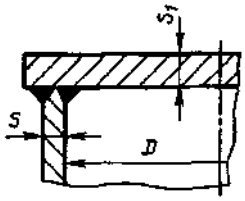
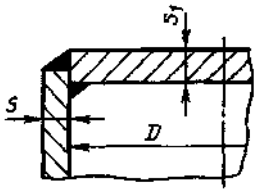
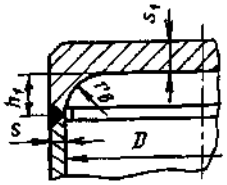
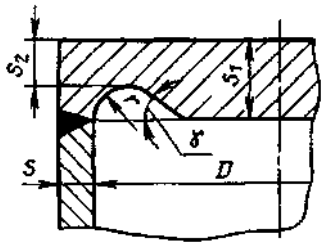
Примітки: 1) ВТ – висока точність; ПТ – підвищена точність; НТ – нормальна точність.

2) За вимогою споживача допускається виготовлення прокату з мінусовими допустимими граничними відхиленнями, які дорівнюють сумі граничних відхилень.

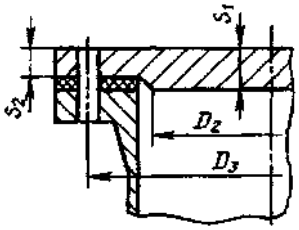
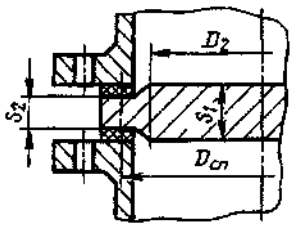
Додаток Г. Значення розрахункового діаметра $D_р$ і коефіцієнта K

Тип	Креслення	Умова закріплення днищ і кришок	K
1		$a \geq 1{,}7 \cdot s$ $D_р = D$	0,53
2		$a \geq 0{,}85 \cdot s$ $D_р = D$	0,50
3		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}25$ $D_р = D$	0,45 0,41
4		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_р = D$	0,41 0,38
5		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}25$ $D_р = D$	0,45 0,41

Додаток Г. Значення розрахункового діаметра $D_р$ і коефіцієнта K

Тип	Креслення	Умова закріплення днищ і кришок	K
6		$a > 0{,}85 \cdot s$ $D_р = D$	0,50
7		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_р = D$	0,41 0,38
8		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_р = D$	0,41 0,38
9		$\max\{s;\ 0{,}25 \cdot s_1\} \leq r \leq \min\{s_1;\ 0{,}1D\}$ $h_1 \geq r$ $D_р = D - 2r$	$K = \max\left\{0{,}41 \times \left(1 - 0{,}23\frac{s-c}{s_1-c}\right); 0{,}35\right\}$
10		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_р = D$ $0{,}25 \cdot s_1 \leq r \leq s_1 - s_2$ $30° \leq \gamma \leq 90°$	0,41 0,38

Додаток Г. Значення розрахункового діаметра $D_р$ і коефіцієнта K

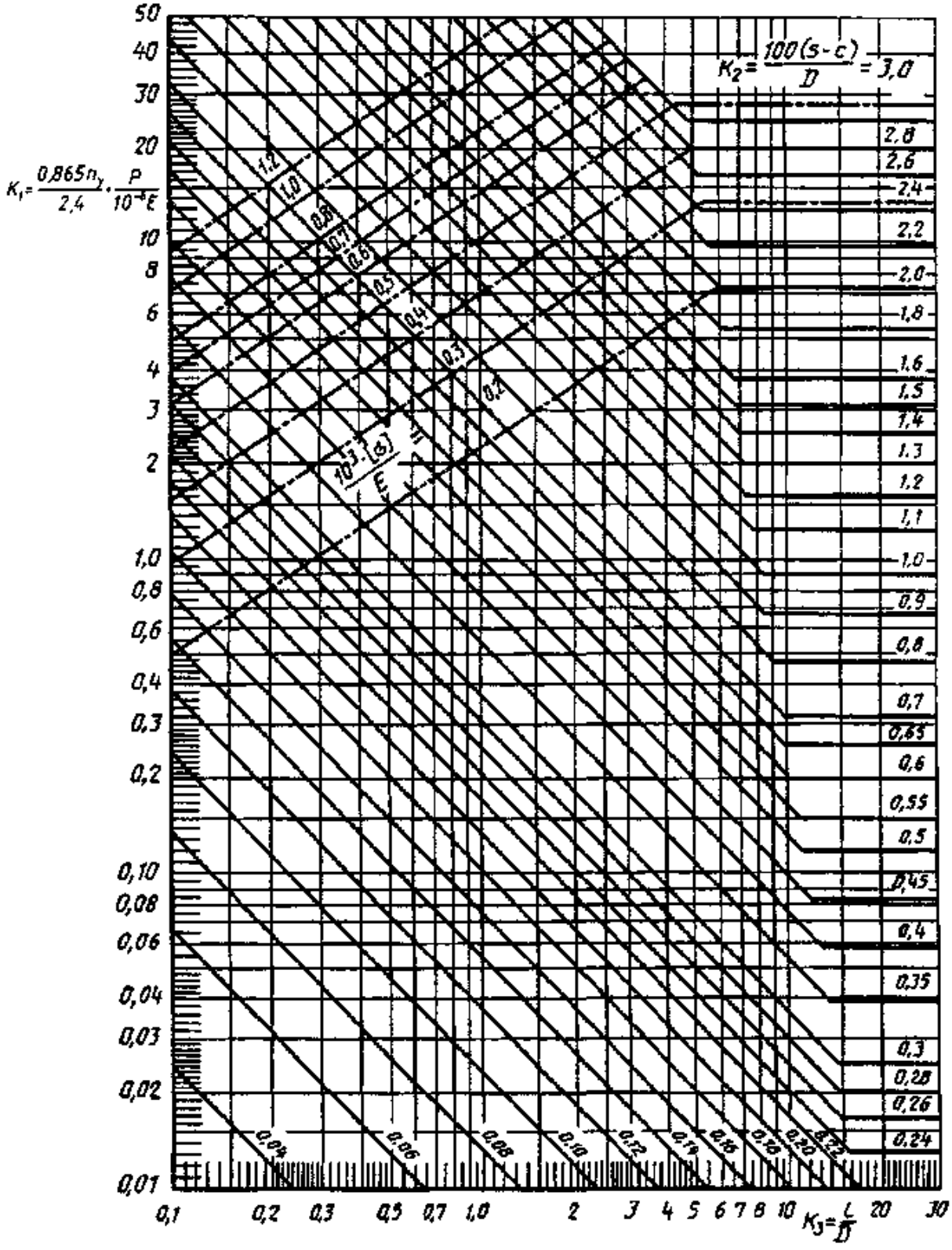
Тип	Креслення	Умова закріплення днищ і кришок	K
11		$D_р = D_З$	0,40
12		$D_р = D_{с.п}$	0,41

Додаток Д. Модуль пружності під час розтягу

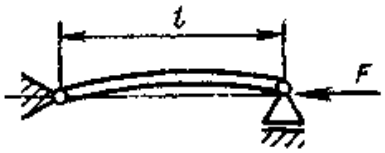
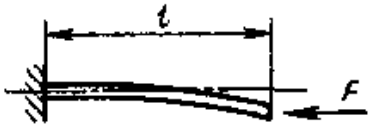
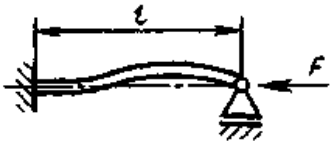
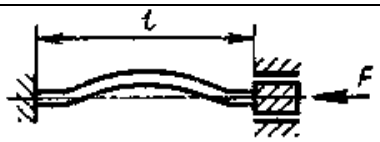
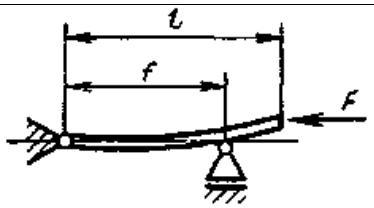
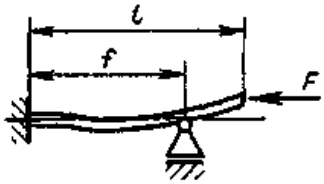
Таблиця Д.1. Значення модуля пружності під час розтягу за ГОСТ 14249-89

Сталь	Модуль пружності під час розтягу $E \cdot 10^{-5}$, 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	–	–	–	–	–
Теплостійкі 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, жаростійкі й корозієстійкі аустенітні сталі	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

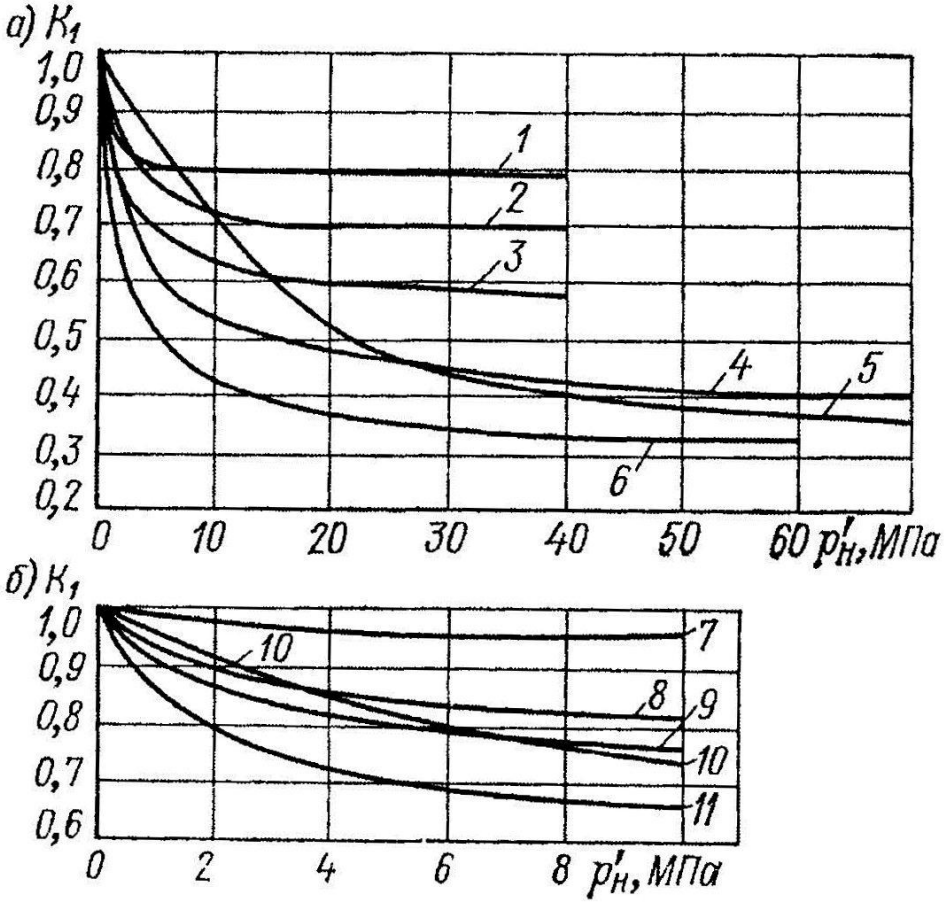
Додаток Е. **Номограма для розрахунку на стійкість в границях пружності циліндричних обичайок, які працюють під зовнішнім тиском**



Додаток Ж. Зведена розрахункова довжина $l_{пр}$

Розрахункова схема	$\frac{f}{l}$	$l_{пр}$
	-	l
	-	$2l$
	-	$0{,}7l$
	-	$0{,}5l$
	0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	$2{,}00l$ $1{,}73l$ $1{,}47l$ $1{,}23l$ $1{,}06l$ $1{,}00l$
	0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	$2{,}00l$ $1{,}70l$ $1{,}40l$ $1{,}11l$ $0{,}85l$ $0{,}70l$

Додаток З. Коефіцієнт K_1, який враховує усадку набивки

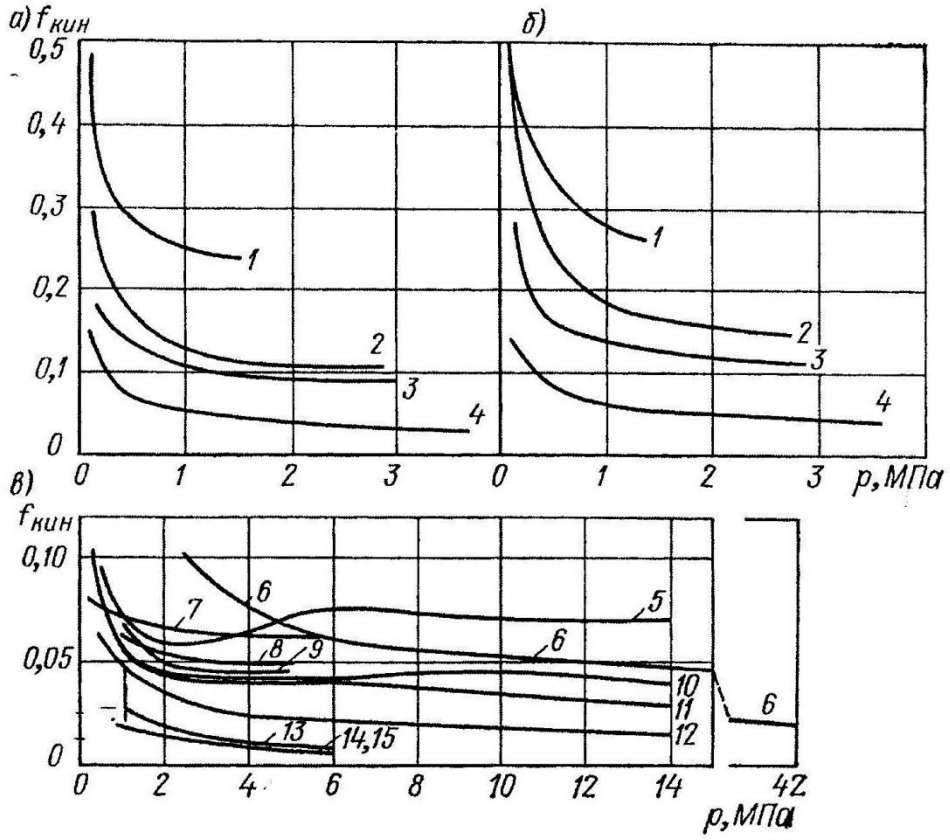


1 – азбестова просочена (АП) і азбестодротяна (АПР) набивки; 2 – бавовняна просочена набивка (ХБП); 3 – прядив'яна просочена набивка (ПП); 4 – бавовняна суха набивка (ХБС); 5 – вентильна набивка (АПРПС); 6 – азбестова суха набивка(АС); 7 – пластична набивка (ПН); 8 – набивка із стружки фторопласту-4 без змащення (Ф-4); 9 – фторопластографітова композиція (ФГ); 10 – азбестографітова композиція (АГ); 11 – азбестовий шнур (АШ)

Рис. З.1. Залежність коефіцієнта K_1 від тиску p_i^1 натискної втулки:

а – p_i^1 = 0…70 МПа; б – p_i^1 = 0…10 МПа

Додаток И. Коефіцієнт кінетичного тертя між валом і набивкою $f_{\hat{e}\grave{e}\acute{i}}$



1– азбестовий шнур (АШ); 2 –набивка із стружки фторопласту-4 без змащення (Ф-4); 3 — фторопластографітова композиція (ФГ); 4 –набивка із стружки фторопласту-4 зі змащенням (Ф-4с); 5 – бавовняна суха набивка (ХБС); 6 – вентильна (АПРПС) і азбестова суха набивка(АС); 7 –азбестографітова композиція (АГ); 8, 10 – прядив'яна просочена набивка (ПП); 9, 11– бавовняна просочена набивка (ХБП); 12, 13 – азбестова просочена набивка (АП); 14–азбестодротяна набивка (АПР); 15 – пластична набивка (ПН)

Рис. И.1. Залежність коефіцієнта $f_{\hat{e}\grave{e}\acute{i}}$ від тиску середовища p:

а – v= 0,05 м/с, $p \le 4$ *ÌÏà* ; *б* – v = 0,35 м/с, $p \le 4$ *ÌÏà* ;

в – v = 0,01 м/с (криві 5-7, 10-12, 15) і v = 2,76 м/с (криві 8, 9, 13, 14), $p \le 15$ *ÌÏà*