

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

Ігор АНДРЕЄВ

УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ В ПОСУДИНАХ ТА АПАРАТАХ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»,
освітньо-професійною програмою «Обладнання хімічних, нафтопереробних та
целюлозно-паперових виробництв»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент: Ігор Мікульонок, д-р техн. наук, проф., с.н.с.

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

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 24.06.2021 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 5 від 24.05.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Ігор Андреев, канд. техн. наук, доц.

УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ В ПОСУДИНАХ ТА АПАРАТАХ

Укріплення отворів в посудинах та апаратах [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньо-професійної програми «Обладнання хімічних, нафтопереробних та целюлозно-паперових виробництв» / І. А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 72 с.

© Ігор Андреев, 2021
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	5
1. ОТВОРИ В ПОСУДИНАХ І АПАРАТАХ	9
2. КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ ПОНАД ОТВОРОМ.....	18
3. СПОСОБИ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ	20
4. РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ.....	30
5. АЛГОРИТМИ І ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ.....	43
Додаток А. Розподіл посудин на групи залежно від розрахункового тиску температури стінки та характеру робочого середовища	59
Додаток Б. Допустимі напруження сталей.....	61
Додаток В. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	71

ВСТУП

У навчальному посібнику містяться теоретичні відомості основ конструювання і інженерних розрахунків обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв при наявності в них отворів, сучасні стандартні розрахункові формули, питання для самоконтролю, приклади розрахунку, а також довідковий матеріал для забезпечення проведення розрахунків на міцність укріплення отворів в корпусах і кришках посудин і апаратів, що працюють під дією внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску.

Розрахунок зміцнення отворів заснований на теорії граничних навантажень, яка припускає, що матеріал в умовах експлуатації пластичний і здійснюється методом заміщення площ.

Розроблені алгоритми розрахунків і наведені приклади допоможуть студентам при виконанні курсових і дипломних проектів.

Розглянутий у навчальному посібнику матеріал відповідає курсу "Розрахунок і конструювання типового обладнання", який відіграє важливу роль при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю "Галузеве машинобудування".

Основні стандартизовані терміни і визначення, вимоги до конструювання і виготовлення обладнання та окремих елементів, класифікація сталей і чавунів та їх застосування, методики визначення допустимих напружень і нормативних параметрів, основи безмоментної теорії розрахунку, а також розрахунки на міцність посудин та апаратів, які знаходяться під дією внутрішнього і зовнішнього тисків наведені у попередніх роботах [1–6].

ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

A – розрахункова площа вирізаного перерізу обичайки або днища, що підлягає компенсації, м;

A_1 – площа перерізу зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера), що укріплює отвір, м;

A_2 – площа поперечного перерізу накладного кільця, м;

A_3 – площа перерізу внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера), що укріплює отвір, м;

C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;

C_s – сума додатків до розрахункової товщини стінки штуцера, м;

C_{s1} – додаток для компенсації корозії стінки внутрішньої частини штуцера, м;

D – внутрішній діаметр обичайки, м;

D_k – внутрішній діаметр конічної обичайки по центру отвору, який укріплюється, м;

D_p – розрахунковий внутрішній діаметр, м;

d – діаметр отвору, м;

d_0 – найбільший допустимий діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення при наявності надлишкової товщини стінки посудини, м;

d_{max} – максимальний діаметр отвору, м;

d_{op} – розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, при відсутності надлишкової товщини стінки посудини, м;

d_p – розрахунковий діаметр отвору, м;

e – відстань від зовнішньої поверхні штуцера до зовнішнього краю днища, м;

H – висота опуклої частини еліптичного днища, м;

K_1 – допоміжний коефіцієнт;

L_0 – ширина зони укріплення отвору, м;

L_k – відстань від зовнішньої поверхні штуцера до найближчого конструктивного несучого елемента, м;

l – виконавча ширина тороподібної вставки або ввареного кільця, м;

l_1 – виконавча довжина зовнішньої частини патрубка штуцера (зовнішнього штуцера), м;

l_{1p} – розрахункова довжина зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера), м;

l_{2p} – розрахункова ширина накладного кільця, м;

l_{3p} – розрахункова довжина внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м;

l_2 – виконавча ширина накладного кільця, м;

l_3 – виконавча довжина внутрішньої частини патрубка штуцера (внутрішнього штуцера), м;

l_p – розрахункова ширина зони укріплення в стінці обичайки, переходу або днища біля штуцера або тороподібної вставки, м;

p – розрахунковий тиск, МПа;

p_{pn} – розрахунковий зовнішній тиск для визначення товщини стінки посудини або апарата з отвором, що не вимагає додаткового зміцнення, МПа;

$[p]$ – допустимий внутрішній надлишковий або зовнішній тиск, МПа;

$[p]_n$ – допустимий тиск в границях пластичності з умови міцності, МПа;

$[p]_E$ – допустимий тиск в границях пружності з умови стійкості, МПа;

R – найбільший внутрішній радіус кривизни опуклого днища, м;

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

R_T^{20} – мінімальне значення границі плинності за температури 20 °С, МПа;

r – радіус відбортовки, м;

S – виконавча товщина стінки обичайки, переходу, тороподібної вставки, ввареного кільця або днища в зоні розташування штуцера, м;

S_0 – виконавча товщина стінки обичайки, переходу або днища за межами тороподібної вставки або ввареного кільця, м;

S_1 – виконавча товщина стінки зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера), м;

S_{1p} – розрахункова товщина стінки зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера), м;

S_2 – виконавча товщина накладного кільця, м;

S_3 – виконавча товщина стінки внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м;

S_{3p} – розрахункова товщина стінки внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м;

S_p – розрахункова товщина стінки обичайки, переходу, тороподібної вставки, ввареного кільця або днища, м;

S_{pn} – розрахункова товщина стінки обичайки, переходу або днища для визначення діаметра отвору, що не потребує додаткового зміцнення, м;

t – розрахункова температура, $^{\circ}\text{C}$;

V – розрахунковий коефіцієнт зниження міцності стінки циліндричної і конічної обичайок або опуклих днищ, які ослаблені отворами, при дії внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску;

x – відстань від центру отвору, який укріплюється до осі еліптичного днища, м;

α – половина кута при вершині конічної обичайки, град;

γ – кут між віссю похилого штуцера і нормаллю до поверхні обичайки або днища в точці пересічення осі штуцера з зовнішньою поверхнею обичайки або днища, град.;

η – поправочний коефіцієнт для допустимих напружень;

σ_{max} – максимальні напруження біля краю отвору, МПа;

σ_T – кільцеве напруження в суцільній стінці обичайки, МПа;

$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу обичайки, конічного переходу або опуклого днища при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_1$ – допустиме напруження для матеріалу зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_2$ – допустиме напруження для матеріалу накладного кільця при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_3$ – допустиме напруження для матеріалу внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_4$ – допустиме напруження для матеріалу тороподібної вставки або ввареного кільця при розрахунковій температурі, МПа;

φ – коефіцієнт міцності зварного шва;

φ_1 – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва штуцера;

χ_1 – χ_4 – відношення допустимих напружень;

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

1. ОТВОРИ В ПОСУДИНАХ І АПАРАТАХ

За призначенням отвори поділяються на технологічні і експлуатаційні.

Технологічні отвори виконуються для завантаження сировини в апарат (посудину) і для розвантаження продуктів переробки з апарата (посудини). Для приєднання трубопроводів технологічні отвори обладнуються штуцерами, бобишками, вводами і виводами.

Експлуатаційні отвори слугують для огляду, монтажу, ремонту, контролю роботи, чистки обладнання і забезпечуються оглядовими вікнами, люками, лазами.

За загальними технічними умовами СОУ МПП 71.120-217:2009 [7] розташування отворів в еліптичних і півсферичних днищах не регламентується.

Розташування отворів на торосферичних днищах допускається у межах центрального сферичного сегмента. При цьому відстань від зовнішньої кромки отвору до центра днища, яке вимірюється по хорді, повинна бути не більше 0,4 зовнішнього діаметра днища.

Отвори для люків, лючків і штуцерів у посудинах 1, 2, 3, 4 груп (додаток А) повинні розташовуватися поза зварних швів.

Розташування отворів допускається:

на поздовжніх швах циліндричних і конічних обичайок посудин, якщо діаметр отворів не більше 150 мм;

на кільцевих швах циліндричних і конічних обичайок посудин без обмеження діаметра отворів;

на швах випуклих днищ без обмеження діаметра отворів при умові 100-відсоткової перевірки зварних швів днищ радіографічним або ультразвуковим методом;

на швах плоских днищ;

на поздовжніх швах корпусів без обмеження діаметра отворів для посудин, які працюють під налив або під вакуумом.

Отвори не дозволяється розташовувати у місцях перетину зварних швів посудин 1, 2, 3, 4 груп, крім випадку конструкції випуклих днищ зі штампованих пелюстків та сферичного сегмента (рис. 1.1).

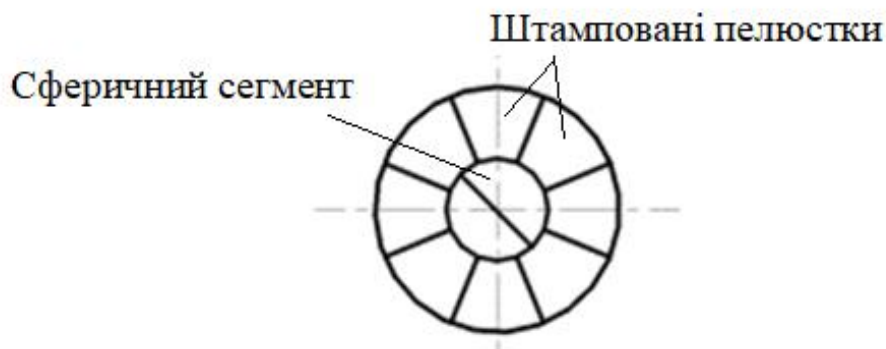


Рис. 1.1. Конструкція випуклого днища, в якому дозволяється розташовувати отвори у місцях перетину зварних швів

Отвори для люків, лючків, штуцерів в посудинах 5 групи дозволяється розташовувати на зварних швах без обмежень за діаметром.

Штуцер – елемент призначений для приєднання до посудини трубопроводів, арматури, контрольно-вимірювальних приладів та ін. (рис.1.2).

Штуцер складається з патрубка і фланця, які з'єднані між собою зваркою. У свою чергу штуцер приварюється до посудини.

Виліт штуцера – це відстань між привальною поверхнею фланця штуцера і зовнішньою поверхнею найближчого елемента посудини. Необхідно передбачити достатню величину вильоту для зручності зборки-

розборки фланцевого з'єднання. Для нормалізованих штуцерів величину вильоту і інші розміри вибирають за відповідними нормами.

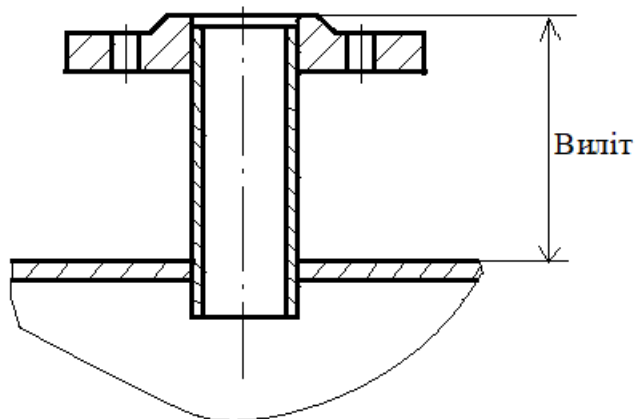


Рис. 1.2. Штуцер

Бобишка – це фланець, який приварений до стінки апарата (посудини) або відлитий разом з корпусом або кришкою (рис. 1.3).

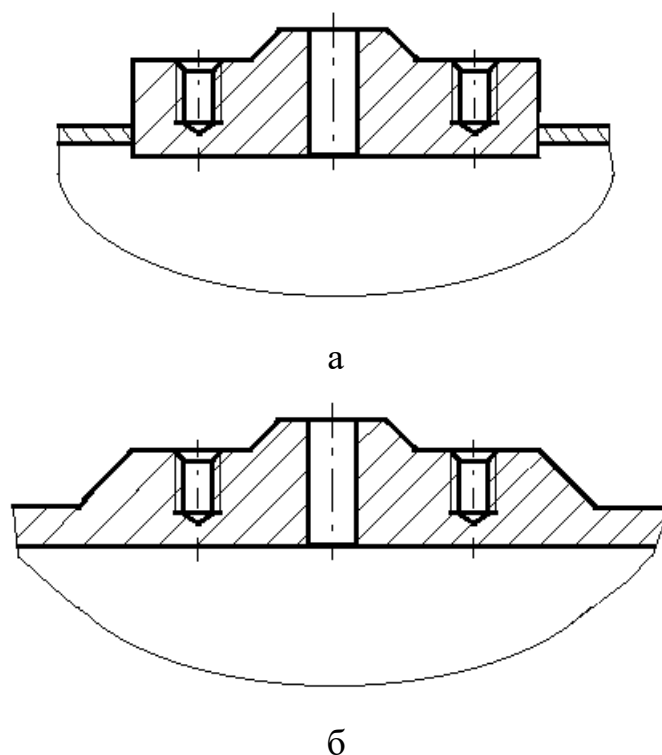


Рис. 1.3. Бобишки: а) приварна, б) відлита

Кожна посудина повинна мати бобишки або штуцери для наповнення водою та зливу, видалення повітря при гідравлічному випробуванні.

Штуцери та бобишки на вертикальних посудинах повинні бути розташовані з урахуванням можливого проведення гідравлічного випробування як у вертикальному, так і в горизонтальному положенні. З цією метою дозволено використовувати технологічні бобишки та штуцери.

Ввід (вивід) – елемент, який призначений для приєднання до посудини трубопроводів.

Ввід (вивід) складається із патрубків і двох фланців, які з'єднані між собою зваркою. Один фланець (верхній) призначений для з'єднання з трубопроводом, інший – для з'єднання зі штуцером або бобишкою посудини або апарата (рис. 1.4). Штуцер або бобика посудини в цьому випадку захищені від зносу вводом (виводом), заміна якого при ремонті обладнання не складна.

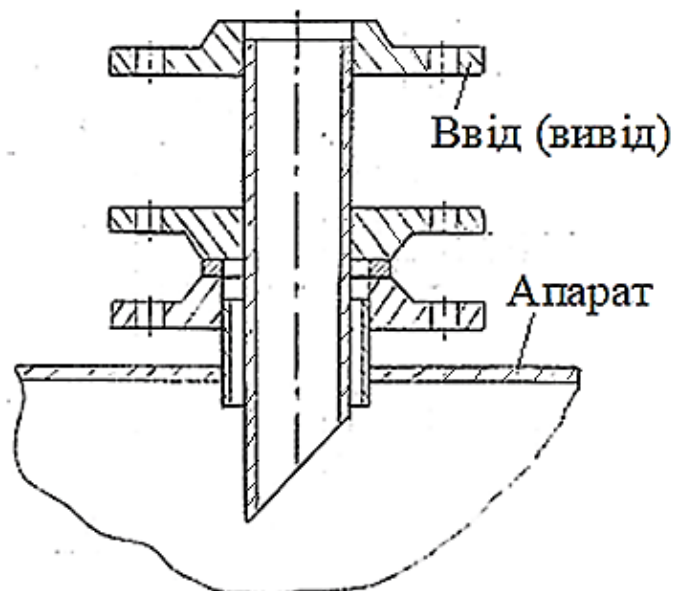


Рис. 1.4. Ввід (вивід)

Штуцери бобишки, вводи, виводи наділяються після виготовлення парними фланцями або заглушками.

Фланець – з'єднувальна частина труб, арматури, резервуарів, валів тощо, що являє собою, звичайно, плоске кільце або диск з рівномірно розташованими отворами для проходу болтів або шпильок (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Фланець

Фланцеве з'єднання – роз'ємне з'єднання складових частин виробу із застосуванням фланців, герметичність якого забезпечується шляхом стискання ущільнювальних поверхонь безпосередньо одна з одною, або за допомогою розміщених між ними прокладок із більш м'якого матеріалу, що стиснені деталями кріплення (рис. 1.6).

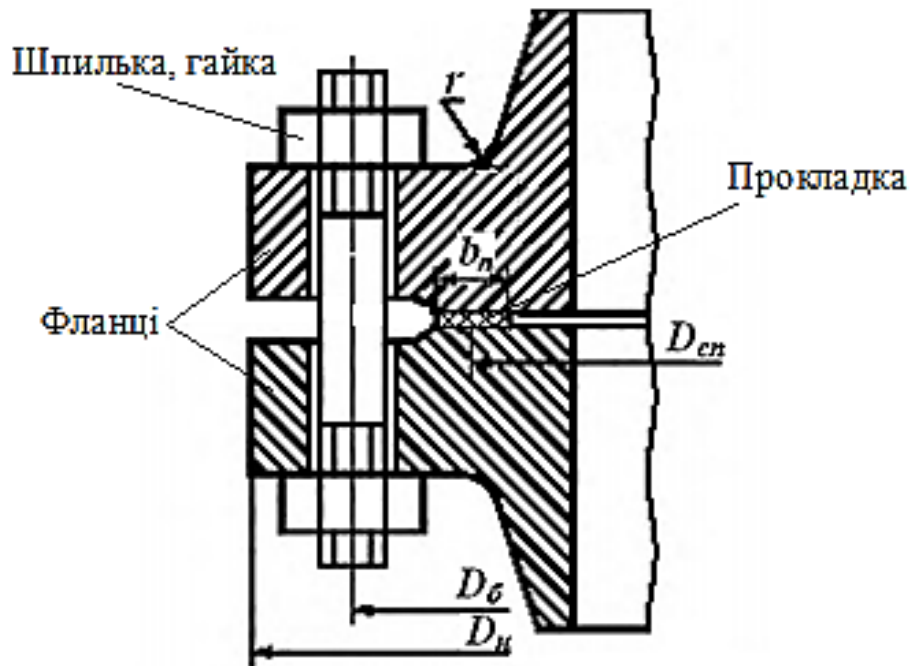


Рис. 1.6. Фланцеве з'єднання

Заглушка – від'ємна деталь, яка дозволяє герметично закривати отвори штуцера або бобишки (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Заглушка

Вікно оглядове – пристрій, який дозволяє вести спостереження за робочим середовищем.

Вікно оглядове складається з бобишки, скла, притискного кільця, прокладок, шпильок, гайок (рис. 1.8). Оглядові вікна виконують круглими або овальними і розташовують в корпусах і кришках.

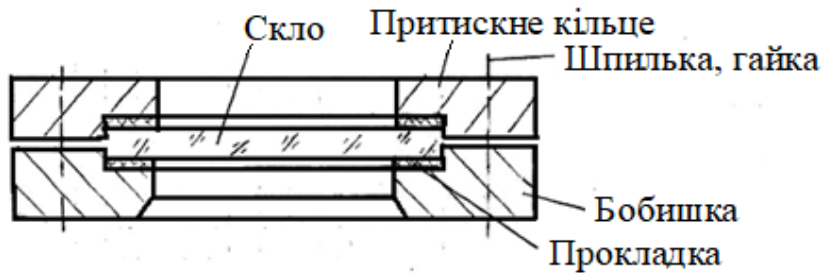


Рис. 1.8. Вікно оглядове

Люк – пристрій, який забезпечує доступ у внутрішню порожнину посудини або апарата (рис. 1.9).

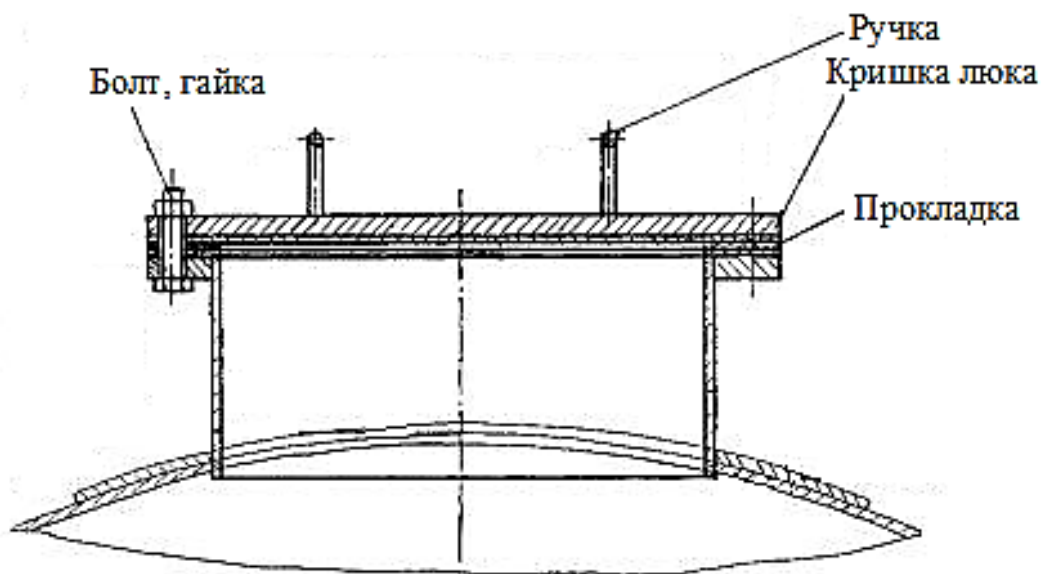


Рис. 1.9. Люк з кришкою

Посудини повинні бути забезпечені люками або оглядовими лючками для огляду, очистки, безпеки антикорозійних робіт, монтажу та демонтажу розбірних внутрішніх пристроїв, ремонту і контролю посудин. Кількість люків і лючків визначає розробник проекту посудини.

Люки і лючки необхідно розташовувати у доступних для користування місцях.

Посудини (апарати) з внутрішнім діаметром, більшим за 800 мм повинні мати люки, а з внутрішнім діаметром 800 мм і менше – лючки.

Внутрішній діаметр круглих люків для посудин, що установлюють на відкритому повітрі, мусить бути не менше ніж 450 мм, а для посудин, розташованих в приміщеннях – не менше ніж 400 мм. Розміри овальних люків за найменшою та найбільшою осями на просвіту повинні бути не менше 325 x 400 мм.

В суцільнозварних посудинах, що підлягають внутрішньому антикорозійному захисті неметалевими матеріалами, внутрішній діаметр люку повинен бути не менше ніж 800 мм (крім емальованих посудин).

Внутрішній діаметр круглих лючків або розмір за найменшою віссю овальних лючків повинен бути не менше 80 мм.

Люки і лючки необхідно розташовувати в місцях, доступних для обслуговування.

Кришки люків повинні бути знімними. Для кришок люків масою більше ніж 20 кг повинні бути передбачені пристрої для полегшення їх відкриття і закриття. Шарнірно-відкидні або вставні болти, які закладають у прорізи, хомути та інші затискні пристрої повинні бути захищені від зсуву або ослаблення.

Дозволено проектувати без люків:

– посудини, призначені для роботи з речовинами 1 та 2 класів небезпеки згідно ГОСТ 12.1.007, які не викликають корозії та накипу,

незалежно від їх діаметра (при цьому треба передбачити необхідну кількість оглядових лючків);

– посудини з приварними оболонками та кожухотрубні теплообмінні апарати незалежно від їх діаметра;

– посудини з кришками, а також ті, що забезпечують можливість проведення внутрішнього огляду без демонтажу трубопроводів, горловини або штуцера.

Питання для самоконтролю до розділу 1

1. Надати класифікацію отворів за призначенням.
2. Проаналізувати елементи конструктивного облаштування отворів в посудинах та апаратах.
3. Обґрунтувати відмінність люків від лючків, їх розміри і вимоги до виготовлення.

2. КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ ПОНАД ОТВОРОМ

За результатами проведених досліджень [8] було встановлено, що при наявності отвору в стінці біля краю отвору виникають напруження які у 5 і більше разів перевищують середні напруження у суцільній стінці. Максимальні кільцеві напруження біля краю круглого отвору в стінці циліндричної обичайки, яка навантажена тиском (рис. 2.1), розраховуються за формулою [9]:

$$\sigma_{max} = \sigma_T(3+3,45d^2/(DS)),$$

де σ_T – кільцеве напруження в суцільній стінці обичайки, МПа; d – діаметр отвору, м; D – внутрішній діаметр обичайки, м; S – виконавча товщина стінки обичайки, м.

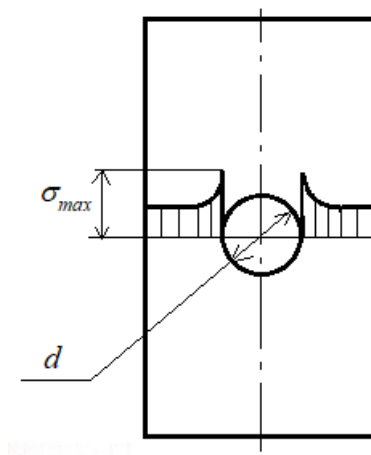


Рис. 2.1. Розподіл кільцевих напружень понад отвором в циліндричній обичайці

Коефіцієнт концентрації напружень $k_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_T$, а для випадку круглого отвору в циліндричній обичайці: $k_\sigma = 3 + 3,45d^2/(DS)$.

Розподіл місцевих напружень у стінці понад отвором має нерівномірний характер. Найбільші значення напружень виникають у

нормальному і меридіанному перерізах, які походять через центр отвору (рис.2.2).

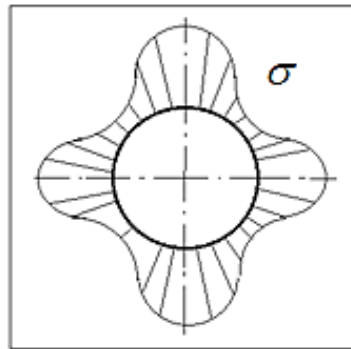


Рис. 2.2. Характер розподілу місцевих напружень понад отвором

Місцеві напруження швидко зменшуються в міру відділення від краю отвору і мають затухаючий хвилеподібний характер. Таким чином, концентрація напружень має локальний характер.

За умов укріплення краю отвору патрубками або кільцями місцеві напруження знижуються і більш рівномірно розподіляються понад отвором, причому ці зміни пропорційні масі доданого металу.

Крім отворів є інші концентратори напружень, які поділяють на 2 види:

- 1) геометричні – отвори проточки різні переходи;
- 2) технологічні – ті, що пов'язані зі способом виробництва: зварка, неоднорідні властивості металу через лиття або прокатку.

Питання для самоконтролю до розділу 2

1. Охарактеризувати напруження, які виникають в стінці біля краю отвору.
2. Дати визначення коефіцієнту концентрації напружень k_{σ} .
3. Надати класифікацію концентраторів напружень.

3. СПОСОБИ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ

Укріплювати отвори можна збільшенням товщини всієї оболонки або збільшенням товщини оболонки у краю отвору.

Вадою збільшення товщини всієї оболонки є висока матеріалоемність оболонки. У більшості випадків цей спосіб не доцільний, тому що концентрація напружень має місцевий характер. Використовують тільки при великій кількості отворів.

Укріплення товщини оболонки у краю отвору додатковим матеріалом для литих посудин і апаратів забезпечується розрахунковим стовщенням краю отвору.

Для зварних посудин і апаратів застосовується декілька варіантів укріплення отворів, які наведені нижче.

а) Укріплення отвору при наявності стовщеного штуцера.

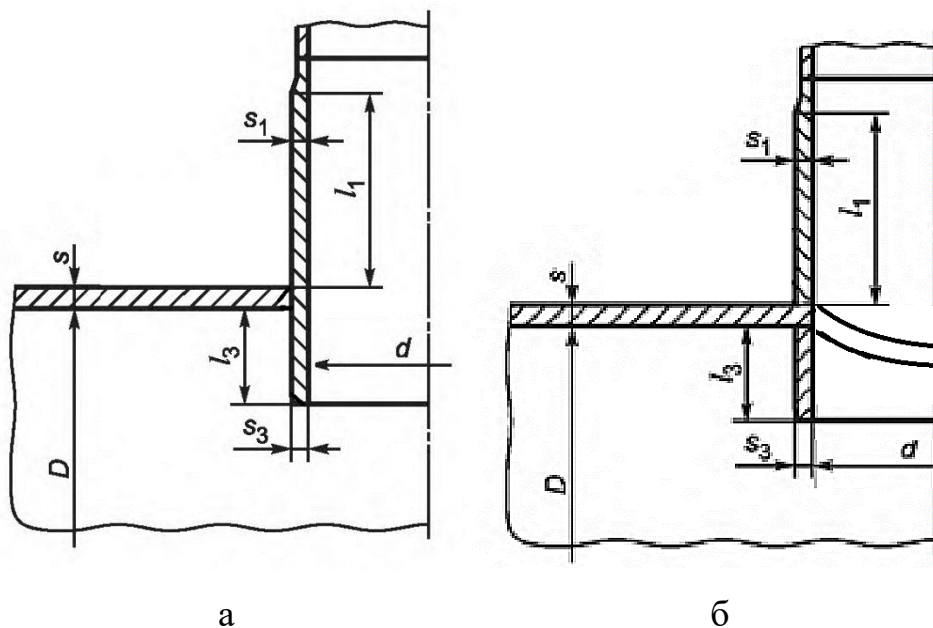


Рис. 3.1. Укріплення отвору при наявності стовщеного штуцера:
а) застосування прохідного штуцера; б) застосування зовнішнього і внутрішнього штуцерів

б) Укріплення отвору накладним кільцем.

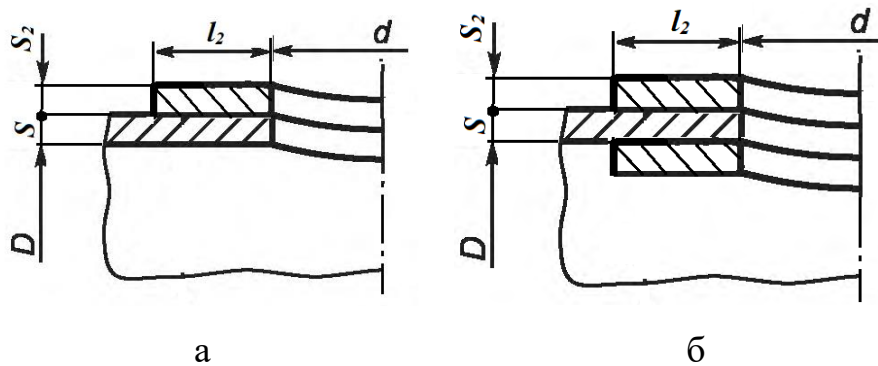


Рис. 3.2. Укріплення отвору накладним кільцем зовні (а) і з обох боків отвору (б)

в) Укріплення отвору через стовщення оболонки ввареним кільцем.

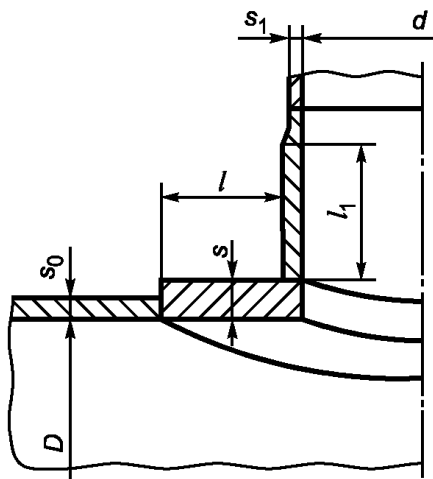


Рис. 3.3. Укріплення отвору через стовщення оболонки ввареним кільцем

г) Укріплення отвору через стовщення оболонки ввареною обичайкою.

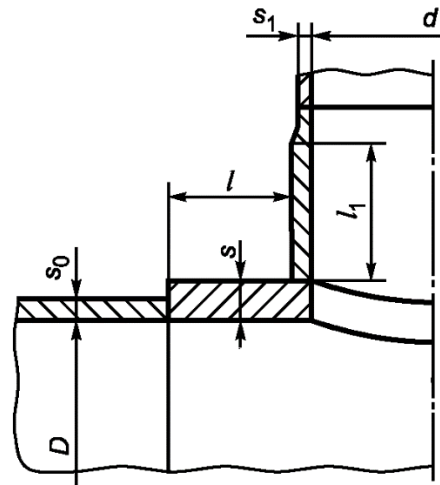


Рис. 3.4. Укріплення отвору через стовщення оболонки ввареною обичайкою

д) Укріплення отвору за допомогою бобишки.

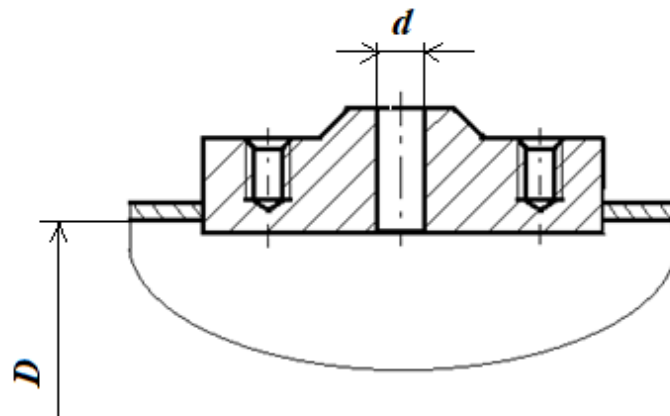


Рис. 3.5. Укріплення отвору за допомогою врізаної бобишки

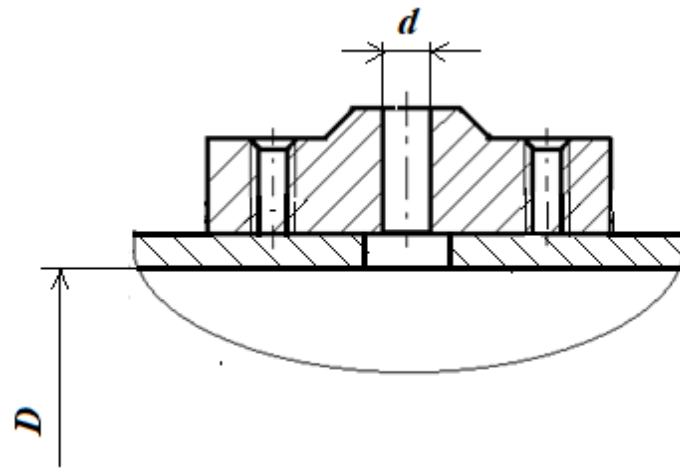


Рис. 3.6. Укріплення отвору за допомогою накладної бобишки

е) Укріплення отвору відбортовкою.

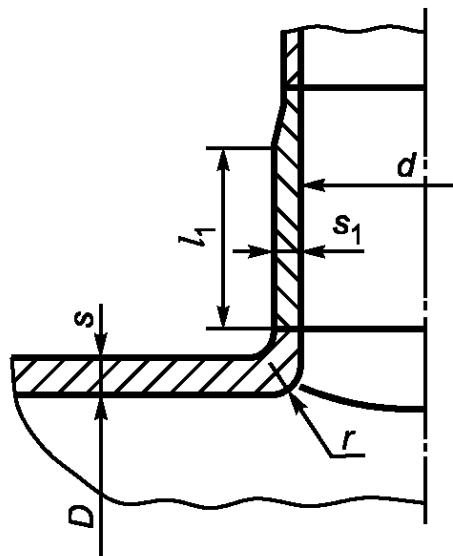


Рис. 3.7. Укріплення отвору відбортовкою

є) Укріплення отвору тороподібною вставкою.

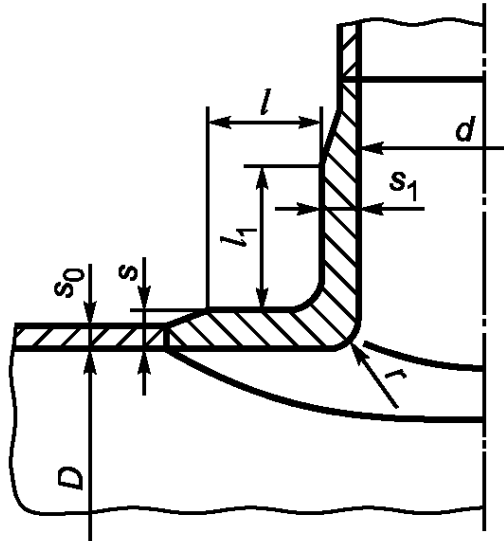


Рис. 3.8. Укріплення отвору тороподібною вставкою

ж) Укріплення отвору близько розташованими конструктивними елементами.

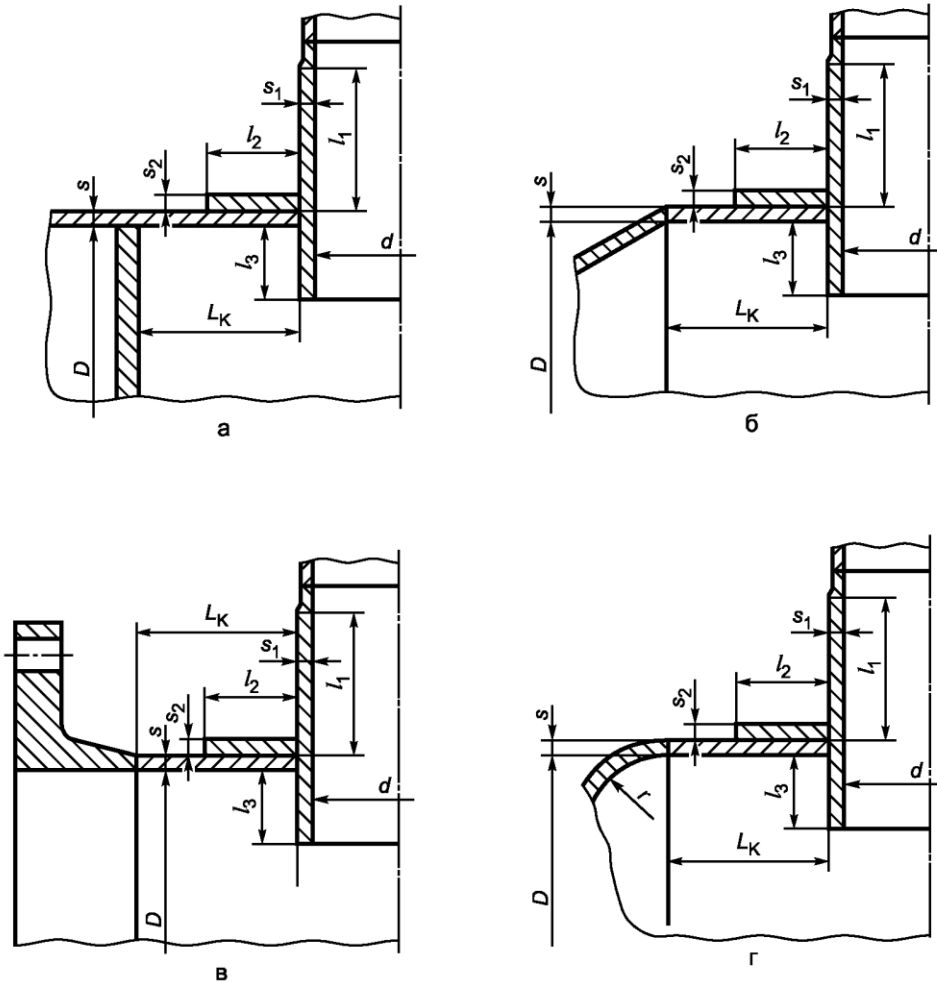


Рис. 3.9. Укріплення отвору близько розташованими конструктивними елементами: а) кільцем жорсткості або трубною решіткою; б) конічним днищем; в) фланцем; г) випуклим днищем

з) Комбіноване укріплення отвору – одночасне укріплення отвору штуцером, накладним кільцем і т. ін.

Вимоги до установлення штуцерів, люків, бобишок, зміцнювальних кілець

Отвори та оброблення крайок при установленні бобишок, штуцерів та люків на поздовжніх швах циліндричних та конічних частин корпусів та зварних швів опуклих днищ посудин із хромомолібденових сталей треба виконувати лише механічним способом.

При приварюванні до корпусу посудини зміцнювальних кілець, бобишок, штуцерів та люків відстань N між краєм шва корпусу та краєм шва приварювання деталі (рис. 3.10) приймають відповідно до вимог СОУ МПП 71.120-217:2009 [7]:

відстань між краєм шва приварювання внутрішніх і зовнішніх пристроїв та деталей і краєм найближчого шва корпусу повинна бути не менше товщини стінки корпусу, але не менше ніж 20 мм, а для посудин із вуглецевих та низьколегованих марганцевистих та марганцевистокремністих сталей, які підлягають після зварювання термообробленню, відстань між краєм шва приварювання деталей і краєм найближчого шва корпусу повинна бути не менше ніж 20 мм незалежно від товщини стінки корпусу;

дозволено перетин стикових швів корпусу кутовими швами приварювання внутрішніх і зовнішніх пристроїв за умови контролювання перекриваної ділянки шва корпусу цими елементами (включаючи шви приварювання) радіографічним методом або ультразвуковою дефектоскопією.

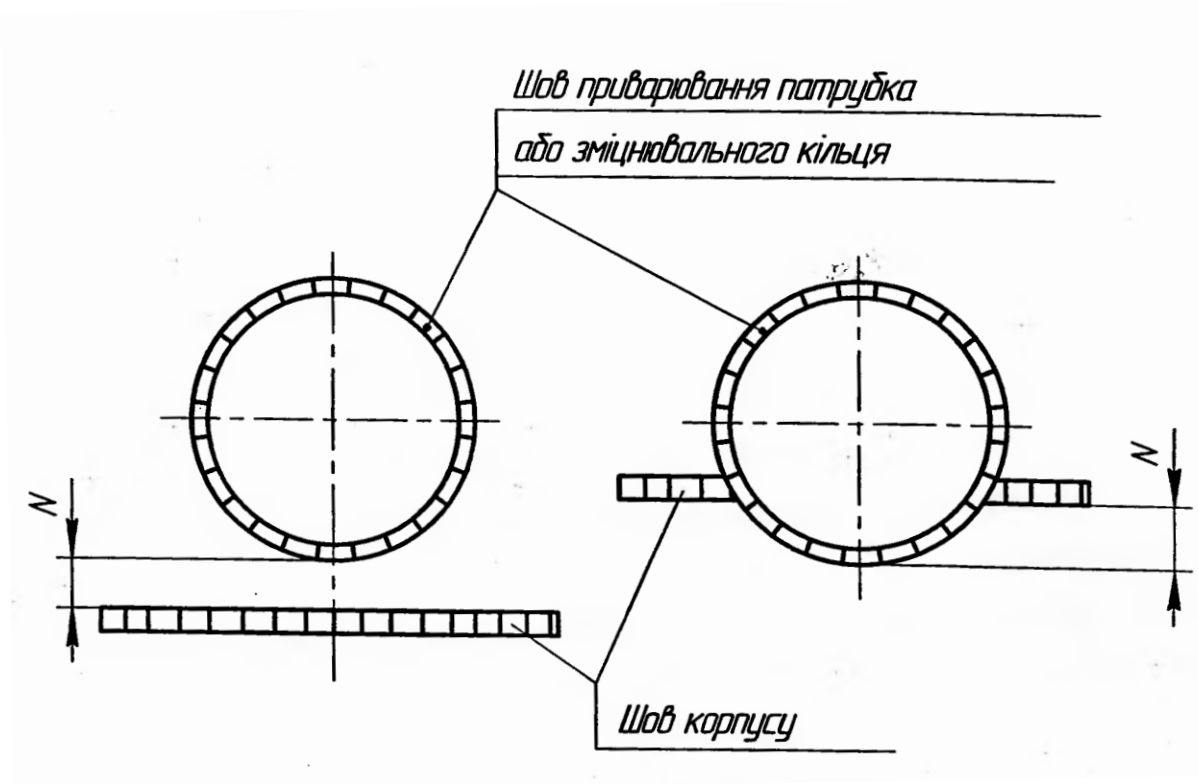


Рис. 3.10. Схема визначення відстані між краєм шва корпусу та краєм шва приварювання деталі

У випадку приварювання бобишок до патрубків штуцера відстань між їх швами не регламентується.

У випадку віссиметричного розташування приварювальної деталі (патрубка, бобишки тощо) на зварному шві корпусу відстань між швами не регламентують.

При установленні штуцерів та люків із двошарової сталі у корпус посудини треба забезпечити захист торців патрубків штуцерів, а також швів приварення штуцерів до корпусу від корозійної дії середовища.

Захист від корозії треба здійснити наплавленням електродами відповідного типу, товщина якого повинна відповідати вимогам СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. [7] або накладками товщиною не менше ніж 3 мм.

При установці штуцерів та люків:

- позиційне відхилення (у радіальному вимірюванні) осей штуцерів та люків ± 10 мм;

- відхилення діаметрів отворів під штуцери та люки повинні бути у межах зазорів, дозволених для зварних з'єднань згідно з чинними нормативними документами;

- осі отворів для болтів та шпильок фланців не повинні збігатися із головними осями посудин та мають бути розташовані симетрично відносно цих осей, при цьому відхилення від симетричності не повинно бути більше ніж $\pm 5^\circ$;

- відхилення за висотою (вильотом) штуцерів не повинно бути більше ніж ± 5 мм;

- після приварення штуцерів, люків, бобишок відхилення від площинності ущільнювальної поверхні фланця штуцера, люка, бобишки повинно бути не більш 1 мм на 100 мм зовнішнього діаметра фланця.

Зміцнювальне кільце повинно прилягати до поверхні елемента, який укріплюється. Зазор не повинен бути більше ніж 3 мм. Зазор контролюють щупом за зовнішнім діаметром зміцнювального кільця.

Зміцнювальні кільця дозволено виготовляти із частин, але не більше ніж із чотирьох. При цьому зварні шви треба виконувати з проплавленням на повну товщину кільця.

У кожному зміцнювальному кільці або кожній його частині, якщо зварювання частин проводять після установлення їх на посудину, повинно бути не менше одного контрольного отвору з нарізкою М10. Контрольний отвір треба розташовувати у нижній частині кільця або півкільця по відношенню до посудини, яку установлюють у експлуатаційне положення, та залишають відкритим.

Питання для самоконтролю до розділу 3

1. Навести способи укріплення отворів.
2. Проаналізувати варіанти укріплення отворів в зварних посудинах і апаратах.
3. Визначити особливості укріплення отвору близько розташованими конструктивними елементами.
4. Проаналізувати вимоги до установлення штуцерів, люків, бобишок, зміцнювальних кілець.

4. РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ

Є 2 методи розрахунку: за аналітичними формулами і геометричний метод.

Перший метод розрахунку ґрунтується на отриманих з теорії пружності і пластичності аналітичних вирішень для вирізів визначеної форми [10].

На основі геометричного методу розроблений ГОСТ 34233.3 на розрахунок укріплення отворів в посудинах и апаратах, які працюють під дією внутрішнього або зовнішнього тиску [11]. Цей метод передбачає компенсацію у зоні укріплення площі вирізу додатковими елементами. Порівнюються площі вилученого і доданого матеріалу у меридіанному (першому головному) перерізі, де напруження максимальні. Метод не враховує напружено-деформованого стану матеріалу біля отвору.

За результатами проведених в ряді науково-дослідних інститутів випробувань були виявлені у деяких випадках локальні пластичні деформації біля отворів, які були розраховані за геометричним методом. Але ці деформації не завжди небезпечні і не впливають на тривалість роботи обладнання [12].

Розрахунок укріплення отворів за ГОСТ 34233.3

Стандарт встановлює норми і методи розрахунку на міцність укріплення отворів в циліндричних і конічних обичайках, конічних переходах, випуклих днищах і кришках посудин і апаратів, що працюють під дією внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску і застосовуються у хімічній, нафтогазопереробній і інших галузях промисловості.

Застосування розрахункових формул обмежуються умовами, наведеними в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Умови застосування формул для розрахунку укріплення отворів

Найменування параметру	Умови застосування формул			
	в циліндричних обичайках	в кінчних обичайках, переходах або днищах (кришках)	в еліптичних днищах (кришках)	в сферичних і торосферичних днищах (кришках)
Відношення діаметрів ¹⁾	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 1$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_k} \leq 1$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$
Відношення товщини стінки обичайки або днища до діаметру ²⁾	$\frac{s-c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s-c}{D_k} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha}$	$\frac{s-c}{D} \leq 0,1$	$\frac{s-c}{D} \leq 0,1$
<p>¹⁾ При розрахунку на міцність обичайок і днищ при зовнішніх статичних навантаженнях на штуцер для циліндричних обичайок:</p> $\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,8$ <p>для опуклих днищ і кришок:</p> $\frac{d_p - 2c_s}{D} \leq 0,6$ <p>²⁾ Допускається виконувати розрахунок зміцнення отворів в трубах діаметром $D < 200$ мм при</p> $\frac{s-c}{D} \leq 0,3$				

В табл. 4.1: d_p – розрахунковий діаметр отвору, м; D_k – внутрішній діаметр конічної обичайки по центру отвору, який укріплюється, м; α – половина кута при вершині конічної обичайки, град; C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м; C_s – сума додатків до розрахункової товщини стінки штуцера, м.

Додаткові обмеження на використання похилих штуцерів наведені у ГОСТ 34233.3.

Відстань від краю штуцера до краю зовнішньої поверхні сферичного невідбортованого і торосферичного днища, що вимірюється по проекції твірної днища на площину його основи (див. рис. 4.1), має бути не менше

$$e = \max \{0,1(D + 2s); 0,09D + s\}.$$

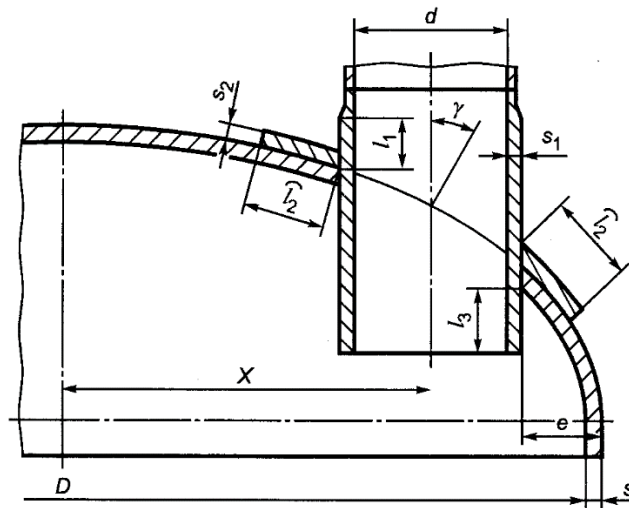


Рис. 4.1. Зміщений штуцер на опуклому днищі

Допускається розміщувати в крайовій зоні опуклих днищ без спеціальних розрахункових або експериментальних обґрунтувань малі отвори, діаметр яких задовольняє умові:

$$d_p \leq \max \left\{ (s - c); 0,2\sqrt{D(s - c)} \right\}.$$

Розрахункові діаметри елементів, які укріплюються

Розрахунковий діаметр циліндричної обичайки:

$$D_p = D.$$

Розрахунковий діаметр конічної обичайки, переходу або днища:

$$D_p = \frac{D_k}{\cos \alpha}$$

Розрахунковий діаметр еліптичних днищ і кришок:

$$D_p = \frac{D^2}{2H} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} x^2},$$

де H – висота опуклої частини еліптичного днища, м; x – відстань від центру отвору, який укріплюється до осі еліптичного днища, м.

Розрахунковий діаметр сферичних і торосферичних днищ поза зоною відбортовки:

$$D_p = 2R,$$

де R – найбільший внутрішній радіус кривизни опуклого днища, м.

Розрахунковий діаметр отвору в стінці циліндричної обичайки, конічного переходу або опуклого днища при наявності штуцера з круглим поперечним перерізом, вісь якого збігається з нормаллю до поверхні в центрі отвору або кругового отвору без штуцера:

$$d_p = d + 2c_s$$

Розрахункові діаметри отворів для інших випадків наведені у ГОСТ 34233.3 [11].

Поодинокі отвори в посудинах і апаратах

Отвір вважається поодиноким, якщо розташовані поруч отвори не впливають на нього, що має місце, коли мінімальна відстань між зовнішніми поверхнями відповідних штуцерів b (рис. 4.2) задовольняє умові:

$$b \geq \sqrt{D'_p(s-c)} + \sqrt{D''_p(s-c)},$$

де D'_p, D''_p – розрахункові внутрішні діаметри елемента, що укріплюється у місці розташування першого і другого штуцерів, м.

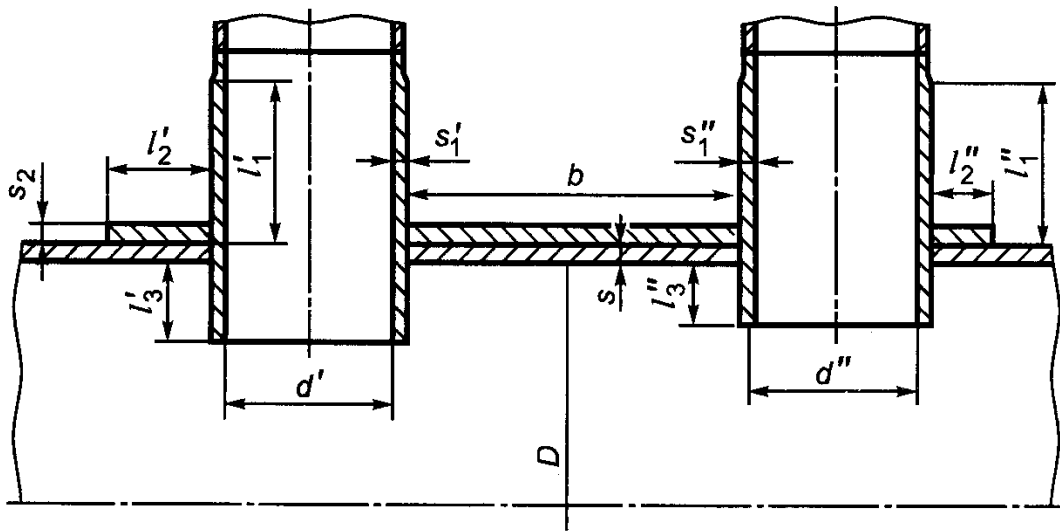


Рис. 4.2. Спільне укріплення отворів, які взаємо впливають один на одного

Найбільший допустимий діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення при наявності надлишкової товщини стінки посудини, обчислюють за формулою:

$$d_0 = \min \left\{ 2 \left(\frac{s-c}{s_{pn}} - 0,8 \right) \sqrt{D_p(s-c)}; (d_{\max} + 2c_s) \right\},$$

де S_{pn} – розрахункова товщина стінки обичайки, переходу або днища для визначення діаметра отвору, що не потребує додаткового зміцнення, м;
 d_{max} – максимальний діаметр отвору, м.

Значення максимального діаметру отвору приймається для отворів в циліндричних обичайках: $d_{max} = D$; для отворів в конічних обичайках: $d_{max} = D_k$; для отворів в опуклих днищах: $d_{max} = 0,6D$.

Розрахункова товщина у випадку внутрішнього тиску: $S_{pn} = S_p$ і у випадку зовнішнього тиску:

$$S_{pn} = \frac{p_{pn} \cdot D_p}{2K_1[\sigma] - p_{pn}},$$

де допоміжний коефіцієнт $K_1 = 1$ для циліндричних і конічних обичайок, $K_1 = 2$ для опуклих днищ; p_{pn} – розрахунковий зовнішній тиск для визначення товщини стінки посудини або апарата з отвором, що не вимагає додаткового зміцнення, МПа; $[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу обичайки, конічного переходу або опуклого днища при розрахунковій температурі, МПа.

Розрахунковий зовнішній тиск:

$$p_{pn} = \frac{p}{\sqrt{1 - \left(\frac{p}{[p]_E}\right)^2}},$$

де p – розрахунковий тиск, МПа; $[p]_E$ – допустимий тиск в границях пружності з умови стійкості, МПа.

Значення $[p]_E$ визначається для відповідних обичайки і днища без отворів за ГОСТ 34233.2 [13].

Якщо $d_p < d_0$ і на вузол не діють ніякі навантаження, крім тиску, тоді подальших розрахунків укріплення отвору виконувати не треба.

Укріплення поодиноких отворів в посудинах і апаратах, які навантажені внутрішнім надлишковим або зовнішнім тиском

Допустимий внутрішній надлишковий тиск елемента посудини з урахуванням ослаблення стінки отвором обчислюють за формулою:

$$[p] = \frac{2K_1 \cdot \varphi[\sigma](s-c)V}{D_p + (s-c)V},$$

де V – розрахунковий коефіцієнт зниження міцності стінки циліндричної і конічної обичайок або опуклих днищ, які ослаблені отворами, при дії внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску; φ – коефіцієнт міцності зварного шва.

Коефіцієнт зниження міцності стінки посудини, яка ослаблена поодиноким отвором, обчислюють за формулою:

$$V = \min \left\{ \frac{(s_0 - c)}{(s - c)}; \frac{\chi_4 + \frac{l_{1p}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})\chi_3}{l_p(s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \frac{d + 2c_s}{D_p} \left(\frac{\varphi}{\varphi_1} \right) \left(\frac{l_{1p}}{l_p} \right)} \right\},$$

де $\chi_1 - \chi_4$ – відношення допустимих напружень; l_p – розрахункова ширина зони укріплення в стінці обичайки, переходу або днища біля штуцера або тороподібної вставки, м; l_{1p} – розрахункова довжина зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера), м; l_{2p} – розрахункова ширина накладного кільця, м; l_{3p} – розрахункова довжина внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м; d_{0p} – розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, при відсутності надлишкової товщини стінки посудини, м; S_0 – виконавча товщина стінки обичайки, переходу або днища за межами тороподібної вставки або ввареного кільця, м; S_1 – виконавча товщина стінки зовнішнього штуцера (зовнішньої частини

штуцера), м; S_2 – виконавча товщина накладного кільця, м; S_3 – виконавча товщина стінки внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м; φ_1 – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва штуцера.

При відсутності ввареного кільця або тороподібної вставки у вищенаведеній формулі слід приймати $S_0 = S$, $\chi_4 = 1$.

При відсутності накладного кільця і при зміцненні отвору штуцером розрахунок слід проводити при $S_2 = 0$, $S_0 = S$, $\chi_4 = 1$.

При відсутності штуцера і при зміцненні отвору накладним кільцем розрахунок слід проводити при $l_{1p} = l_{3p} = 0$, $S_0 = S$, $\chi_4 = 1$.

Застосування різних матеріалів при розрахунку укріплення отворів враховують параметрами χ_1 – χ_4 .

Для зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера):

$$\chi_1 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\},$$

де $[\sigma]_1$ – допустиме напруження для матеріалу зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) при розрахунковій температурі, МПа.

Для накладного кільця:

$$\chi_2 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\},$$

де $[\sigma]_2$ – допустиме напруження для матеріалу накладного кільця при розрахунковій температурі, МПа.

Для внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера):

$$\chi_3 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]} \right\},$$

де $[\sigma]_3$ – допустиме напруження для матеріалу внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) при розрахунковій температурі, МПа.

Для тороподібної вставки або ввареного кільця:

$$\chi_4 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_4}{[\sigma]} \right\},$$

де $[\sigma]_4$ – допустиме напруження для матеріалу тороподібної вставки або ввареного кільця при розрахунковій температурі, МПа.

Ширину зони укріплення отвору в обичайках, переходах і днищах (рис. 4.3) обчислюють за формулою:

$$L_0 = \sqrt{D_p(s-c)}$$

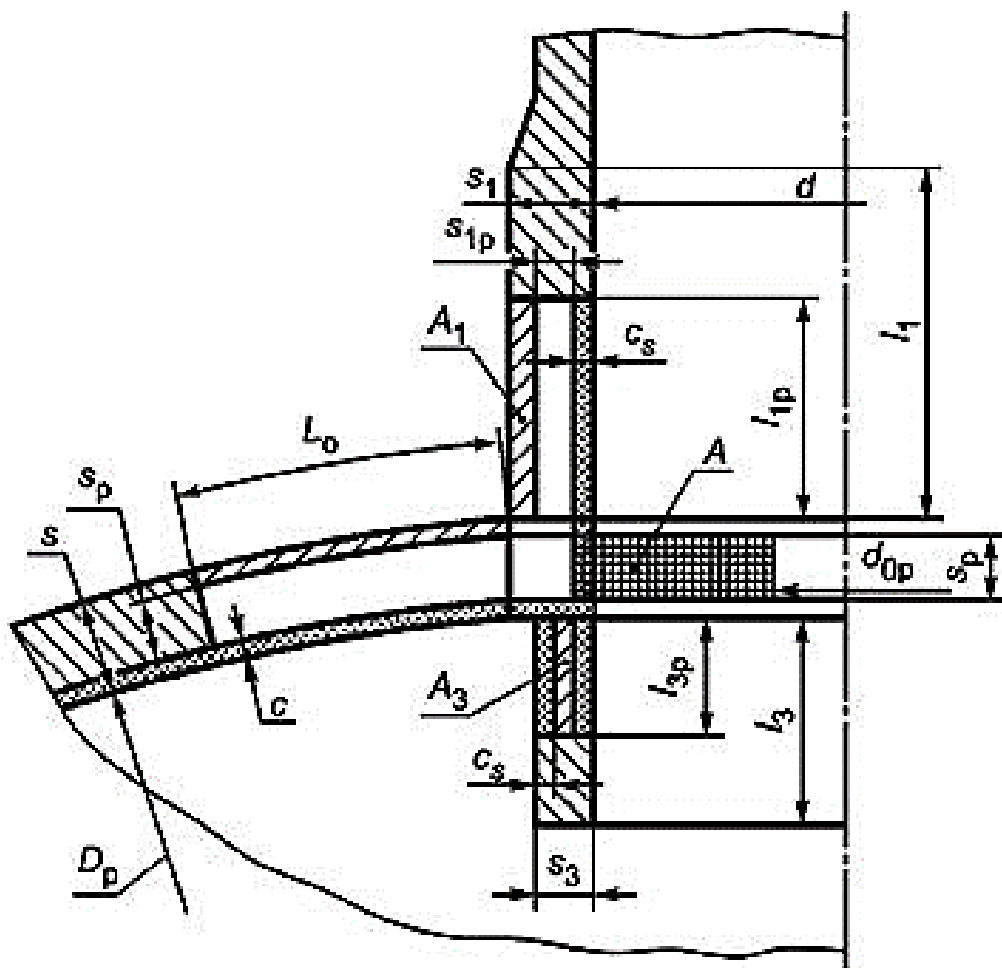


Рис. 4.3. Компенсація вирізаного перерізу зовнішнім і внутрішнім штуцерами

Розрахункову ширину зони укріплення отвору в стінці обичайки, переходу або днища біля штуцера з відбортовкою, а також при відсутності тороподібної вставки або ввареного кільця обчислюють за формулою:

$$l_p = L_0.$$

Розрахункова ширина зони укріплення отвору в стінці обичайки, переходу або днища біля штуцера при наявності тороподібної вставки або ввареного кільця:

$$l_p = \min \{l; L_0\},$$

де l – виконавча ширина тороподібної вставки або ввареного кільця, м.

Розрахункові довжини зовнішньої l_{1p} і внутрішньої l_{3p} частин штуцера (зовнішнього і внутрішнього штуцерів) з круглим поперечним перерізом, які беруть участь в укріпленні отворів і враховуються при розрахунку:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\},$$

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \sqrt{(d + 2c_s)(s_3 - c_s - c_{s1})} \right\},$$

де l_1 – виконавча довжина зовнішньої частини патрубку штуцера (зовнішнього штуцера), м; l_3 – виконавча довжина внутрішньої частини патрубку штуцера (внутрішнього штуцера), м; C_{s1} – додаток для компенсації корозії стінки внутрішньої частини штуцера, м.

Розрахункова ширина накладного кільця:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p(s_2 + s - c)} \right\},$$

де l_2 – виконавча ширина накладного кільця, м.

Розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, при відсутності надлишкової товщини стінки посудини:

$$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)}$$

Допустимий зовнішній тиск:

$$[p] = \frac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}},$$

де $[p]_{\Pi}$ – допустимий тиск в границях пластичності з умови міцності, МПа.

Значення $[p]_{\Pi}$ розраховується за формулою:

$$[p]_{\Pi} = \frac{2K_1 [\sigma] (s - c)V}{D_p + (s - c)V}$$

У випадку укріплення поодинокого отвору за рахунок штуцерів площа перерізів зміцнювальних елементів повинна дорівнювати сумі площ поперечних перерізів зовнішньої і внутрішньої частини штуцера (зовнішнього і внутрішнього штуцерів). При цьому повинна виконуватися умова (рис. 4.3):

$$A_1 + A_3 \geq A,$$

де A – розрахункова площа вирізаного перерізу обичайки або днища, що підлягає компенсації, м; A_1 – площа перерізу зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера), що укріплює отвір, м; A_3 – площа перерізу внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера), що укріплює отвір, м.

Площі A , A_1 , A_3 розраховується як площі відповідних прямокутників за рис. 4.3. Враховуючи параметри χ_1 , χ_3 , отримаємо умову укріплення отвору у вигляді:

$$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3 \geq 0,5(d_p - d_{0p}) S_p,$$

де S_p – розрахункова товщина стінки обичайки, переходу, тороподібної вставки, ввареного кільця або днища, м; S_{1p} – розрахункова товщина стінки зовнішнього штуцера (зовнішньої частини штуцера), м; S_{3p} – розрахункова товщина стінки внутрішнього штуцера (внутрішньої частини штуцера), м.

Якщо з конструктивних міркувань виконання попередньої умови укріплення отвору неможливо, тоді використовують накладні кільця, відбортовки або місцеві потовщення стінки обичайок або днищ. При збільшенні товщини стінки елемента, який укріплюється, змінюється d_{0p} і зменшується площа вирізаного перерізу, що підлягає компенсації.

У разі укріплення отвору потовщенням стінки посудини або штуцера, або накладним кільцем, або ввареним кільцем, або тороподібною вставкою, або відбортовкою розрахунок проводять за формулою:

$$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 + l_{2p} S_2 \chi_2 + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3 + l_p(S - S_p - C) \chi_4 \geq 0,5(d_p - d_{0p}) S_p.$$

При відсутності ввареного кільця або тороподібною вставки в попередній формулі слід приймати $\chi_4 = 1$.

Розрахунок укріплення отвору за допомогою накладного кільця при необхідності визначення площі цього кільця A_2 проводять за формулою:

$$A_2 \geq \frac{1}{\chi_2} \left\{ 0,5(d_p - d_{0p}) S_p - l_p(s - s_p - c) - l_{1p}(s_1 - s_{1p} - c_s) \chi_1 - l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1}) \chi_3 \right\},$$

де площа накладного кільця $A_2 = l_{2p} S_2$.

Якщо $S_2 > 2 S$, тоді накладні кільця рекомендується встановлювати зовні і зсередини посудини або апарата, причому товщина зовнішнього кільця приймається $0,5 S_2$, а товщина внутрішнього кільця – $0,5 S_2 + C$.

Врахування взаємного впливу отворів в посудинах і апаратах і розрахунок на міцність при зовнішніх статичних навантаженнях на штуцер треба здійснювати за ГОСТ 34233.3 [11].

Питання для самоконтролю до розділу 4

1. Навести методи розрахунку на міцність укріплення отворів.
2. Проаналізувати геометричний метод укріплення отворів отворів в посудинах і апаратах.
3. Дати визначення поодинокому отвору.
4. Як визначається найбільший допустимий діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення?
5. Надати алгоритм розрахунку укріплення поодинокого отвору в посудинах і апаратах, які навантажені внутрішнім надлишковим або зовнішнім тиском.

5. АЛГОРИТМИ І ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ УКРІПЛЕННЯ ОТВОРІВ

Завдання. Для конічного днища, яке навантажене внутрішнім тиском треба: 1) розрахувати найбільший допустимий діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення при наявності надлишкової товщини стінки;

2) перевірити виконання умови укріплення нормального поодинокого отвору зовнішньою і внутрішньою частинами штуцера без застосування накладного кільця. Днище і штуцер виконані зі сталі однієї марки.

Вихідні дані для розрахунків по варіантам подано у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Вихідні данні для розрахунку

Варіант	D_k , м	α , град.	S , м	S_p , м	S_l , м	S_{lp} , м	Марка сталі	d , м	t , °C
1	0,675	45	0,007	0,006	0,007	0,004	09Г2С	0,06	170
2	0,75	30	0,006	0,005	0,006	0,003	20К	0,03	160
3	0,75	45	0,007	0,006	0,007	0,004	16ГС	0,06	165
4	0,9	30	0,006	0,005	0,006	0,003	20	0,04	155
5	0,9	45	0,008	0,007	0,008	0,005	09Г2С	0,07	165
6	1,05	30	0,006	0,005	0,006	0,003	Ст3пс	0,04	150
7	1,05	45	0,008	0,007	0,008	0,005	16ГС	0,06	160
8	1,2	30	0,006	0,005	0,006	0,003	20	0,08	150
9	1,2	45	0,007	0,006	0,007	0,004	09Г2С	0,05	100
10	1,35	30	0,007	0,006	0,007	0,004	20	0,06	150
11	1,35	45	0,008	0,007	0,008	0,005	20К	0,08	150
12	1,5	30	0,006	0,005	0,006	0,003	Ст3пс	0,05	140
13	1,5	45	0,009	0,008	0,009	0,006	20К	0,09	155
14	1,65	30	0,007	0,006	0,007	0,004	10	0,05	150
15	1,65	45	0,009	0,008	0,009	0,006	Ст3пс	0,07	155
16	1,8	30	0,007	0,006	0,007	0,004	10	0,1	140
17	1,95	45	0,008	0,007	0,008	0,005	Ст3пс	0,09	150
18	1,5	30	0,007	0,006	0,007	0,003	09Г2С	0,05	170
19	1,5	45	0,008	0,007	0,008	0,006	16ГС	0,09	175
20	1,4	30	0,007	0,006	0,007	0,004	09Г2С	0,07	160
Приклад розрахунку	1,75	45	0,008	0,007	0,008	0,006	Ст3пс	0,06	150

Продовження табл. 5.1

Варіант	p , МПа	C , м	l_1 , м	l_3 , м	C_s , м	S_3 , м	S_{3p} , м
1	0,8	0,001	0,024	0,02	0,001	0,007	0,004
2	0,6	0,0012	0,016	0,01	0,0012	0,006	0,003
3	0,7	0,001	0,024	0,02	0,001	0,007	0,004
4	0,5	0,0016	0,017	0,01	0,0016	0,006	0,003
5	0,7	0,001	0,028	0,02	0,001	0,008	0,005
6	0,4	0,001	0,018	0,01	0,001	0,006	0,003
7	0,6	0,001	0,026	0,02	0,001	0,008	0,005
8	0,4	0,0009	0,026	0,02	0,0009	0,006	0,003
9	0,6	0,001	0,022	0,02	0,001	0,007	0,004
10	0,4	0,001	0,024	0,02	0,001	0,007	0,004
11	0,4	0,0009	0,030	0,02	0,0009	0,008	0,005
12	0,3	0,001	0,020	0,02	0,001	0,006	0,003
13	0,5	0,0007	0,034	0,03	0,0007	0,009	0,006
14	0,4	0,0012	0,022	0,02	0,0012	0,007	0,004
15	0,5	0,001	0,030	0,03	0,001	0,009	0,006
16	0,3	0,0007	0,030	0,03	0,0007	0,007	0,004
17	0,4	0,001	0,032	0,03	0,001	0,008	0,005
18	0,4	0,0014	0,020	0,02	0,0014	0,007	0,003
19	0,6	0,0009	0,034	0,03	0,0009	0,008	0,006
20	0,7	0,001	0,022	0,02	0,001	0,007	0,004
Приклад розрахунку	0,5	0,001	0,025	0,02	0,001	0,008	0,006

Розрахунки виконати для робочих умов

Таблиця 5.2. Алгоритм і приклад розрахунку найбільшого допустимого діаметра поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення при наявності надлишкової товщини стінки посудини

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження для матеріалу обичайки, конічного переходу або опуклого днища за розрахункової температури, $[\sigma]$ МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею додатка Б залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ для зварених елементів)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3пс за розрахункової температури $t = 150$ °С допустиме напруження $[\sigma] = 145$ МПа,

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
2.	Розрахунковий внутрішній діаметр елемента, який укріплюються D_p , м	<p>Розрахунковий діаметр циліндричної обичайки: $D_p = D$.</p> <p>Розрахунковий діаметр конічної обичайки, переходу або днища: $D_p = D_k / \cos\alpha$.</p> <p>Розрахунковий діаметр еліптичних днищ і кришок:</p> $D_p = \frac{D^2}{2H} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} x^2}$ <p>Розрахунковий діаметр сферичних і торосферичних днищ поза зоною відбортовки:</p> $D_p = 2R.$	<p>Для конічного днища:</p> $D_p = 1,75 / \cos 45^\circ = 2,48 \text{ м}$

Продовження табл. 5.2

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
3.	Максимальний діаметр отвору d_{max} , м.	Для отворів в циліндричних обичайках: $d_{max} = D$; для отворів в конічних обичайках: $d_{max} = D_k$; для отворів в опуклих днищах: $d_{max} = 0,6D$.	Для конічного днища: $d_{max} = D_k = 1,75$ м
4.	Допоміжний коефіцієнт K_I (визначається у випадку навантаження зовнішнім тиском)	$K_I = 1$ для циліндричних і конічних обичайок, $K_I = 2$ для опуклих днищ.	—

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Розрахунковий зовнішній тиск для визначення товщини стінки посудини або апарата з отвором, що не вимагає додаткового зміцнення p_{pn} , МПа (визначається у випадку навантаження зовнішнім тиском)	$p_{pn} = \frac{p}{\sqrt{1 - \left(\frac{p}{[p]_E}\right)^2}}$	—
6.	Розрахункова товщина стінки обичайки, переходу або днища для визначення діаметра отвору, що не потребує додаткового зміцнення S_{pn} , м;	<p>У випадку дії внутрішнього тиску:</p> $S_{pn} = S_p;$ <p>для зовнішнього тиску:</p> $S_{pn} = \frac{p_{pn} \cdot D_p}{2K_1[\sigma] - p_{pn}}$	$S_{pn} = S_p = 0,007$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула і приклад розрахунку
7.	Найбільший допустимий діаметр поодинокого отвору, який не потребує додаткового укріплення при наявності надлишкової товщини стінки посудини d_0 , м	$d_0 = \min \left\{ 2 \left(\frac{s-c}{s_{pn}} - 0,8 \right) \sqrt{D_p(s-c)}; (d_{\max} + 2c_s) \right\}$ $d_0 = \min \left\{ 2 \left(\frac{0,008 - 0,001}{0,007} - 0,8 \right) \sqrt{2,48(0,008 - 0,001)}; \right.$ $\left. (1,75 + 2 \cdot 0,001) \right\} =$ $= \min\{0,053; 1,752\} = 0,053 \text{ м}$

Таблиця 5.3. Алгоритм і приклад розрахунку геометричних розмірів деталей для укріплення поодинокого отвору

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустимі напруження для матеріалу обичайки, кінчного переходу або опуклого днища $[\sigma]$, матеріалу зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) $[\sigma]_1$, матеріалу внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) $[\sigma]_3$ за розрахункової температури, МПа	$[\sigma]$, $[\sigma]_1$ і $[\sigma]_3$ визначають за таблицею додатка Б залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ для зварених елементів)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3пс за розрахункової температури $t = 150$ °С допустимі напруження $[\sigma] = [\sigma]_1 = [\sigma]_3 = 145$ МПа,

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
2.	Відношення допустимих напружень χ_1, χ_3	$\chi_1 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\}, \quad \chi_3 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]} \right\}$	$\chi_1 = \min\{1; 145/145\} = 1;$ $\chi_3 = \min\{1; 145/145\} = 1.$
3.	Розрахунковий внутрішній діаметр елемента, який укріплюються D_p , м	<p>Розрахунковий діаметр циліндричної обичайки: $D_p = D$.</p> <p>Розрахунковий діаметр конічної обичайки, переходу або днища: $D_p = D_k / \cos \alpha$.</p> <p>Розрахунковий діаметр еліптичних днищ і кришок:</p> $D_p = \frac{D^2}{2H} \sqrt{1 - 4 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4} x^2}$ <p>Розрахунковий діаметр сферичних і торосферичних днищ поза зоною відбортки:</p> $D_p = 2R.$	<p>Для конічного днища:</p> $D_p = 1,75 / \cos 45^\circ = 2,48 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4.	Розрахунковий діаметр отвору в стінці циліндричної обичайки, конічного переходу або опуклого днища при наявності штуцера з круглим поперечним перерізом, вісь якого збігається з нормаллю до поверхні в центрі отвору d_p , м	$d_p = d + 2 C_s$ Розрахункові діаметри отворів для інших випадків наведені у ГОСТ 34233.3 [10]	$d_p = 0,06 + 2 \cdot 0,001 = 0,062$ м
5.	Розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, при відсутності надлишкової товщини стінки посудини d_{0p} , м	$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)}$	$d_{0p} = 0,4 \sqrt{2,48(0,008 - 0,001)} =$ $= 0,053$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6.	Розрахункова довжина зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку, l_{1p} , м	$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\}$	$l_{1p} = \min \{ 0,02; 1,25 \sqrt{(0,06 + 2 \cdot 0,001)(0,008 - 0,001)} \} =$ $= \min \{ 0,02; 0,026 \} = 0,02 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Розрахункова довжина внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку, l_{3p} , м	$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \sqrt{(d + 2c_s)(s_3 - c_s - c_{s1})} \right\}$	$l_{3p} = \min \{0,02; 0,5 \sqrt{(0,06 + 2 \cdot 0,001)(0,008 - 0,001 - 0,001)}\} =$ $= \min \{0,02; 0,0096\} = 0,0096 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Умова укріплення отвору	$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3 \geq 0,5(d_p - d_{0p}) S_p,$ $0,02(0,008 - 0,006 - 0,001)1 + 0,0096(0,008 - 0,006 - 0,001)1$ $0,5(0,062 - 0,053)0,007$ $0,0000296 \text{ м}^2 < 0,0000315 \text{ м}^2$ <p>Умова укріплення отвору не виконується</p>	порівнюють з
<p>Якщо умова укріплення отвору не виконується, тоді використовують накладні кільця, відбортовки або місцеві потовщення стінки обичайок або днищ. При збільшенні товщини стінки елемента, який укріплюється, змінюється d_{0p} і зменшується площа вирізаного перерізу, що підлягає компенсації.</p>			
Розглянемо додаткове укріплення отвору за допомогою накладного кільця зі сталі СтЗпс			
9.	Допустимі напруження для матеріалу накладного кільця $[\sigma]_2$ за розрахункової температури, МПа	$[\sigma]_2$ визначають за таблицею додатка Б залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$)	З таблиці Б.1 для сталі марки СтЗпс за розрахункової температури $t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ допустимі напруження $[\sigma]_2 = 145 \text{ МПа}$,

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Відношення допустимих напружень χ_2	$\chi_2 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\}$	$\chi_2 = \min\{1; 145/145\} = 1$
11.	Площа накладного кільця A_2 , м^2	$A_2 = \{0,5(d_p - d_{0p}) S_p - l_{1p} (S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 -$ $- l_{3p} (S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3\} / \chi_2$	$A_2 = \{0,5(0,062 - 0,053)0,007 -$ $- 0,02(0,008 - 0,006 - 0,001)1 -$ $- 0,0096(0,008 - 0,006 - 0,001)1\} / 1 =$ $= 0,0000019 \text{ м}^2$
12.	Ширина накладного кільця l_2 , м	Ширина накладного кільця l_2 приймається конструктивно	Прийmemo: $l_2 = 0,02$ м
13.	Товщина накладного кільця у першому наближенні S_2^I , м	$S_2^I = A_2 / l_2$	$S_2^I = 0,0000019 / 0,02 = 0,000095$ м Прийmemo: $S_2^I = 0,002$ м

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Розрахункова ширина наклад- ного кільця, l_{2p} , м	$l_{2p} = \min \{l_2; \sqrt{D_p (S_2^I + S - C)}\}$	$l_{2p} = \min \{0,02; \sqrt{(2,48(0,002 + 0,008 - 0,001))}\} =$ $= \min\{0,02; 0,149\} = 0,02$ м
15.	Виконавча то- вщина наклад- ного кільця S_2 , м	$S_2 = A_2 / l_{2p}$	$S_2 = 0,0000019 / 0,02 = 0,000095$ м Приймаємо: $S_2 = S_2^I = 0,002$ м
16.	Умова укріп- лення отвору зо- внішньою і вну- трішньою час- тинами штуцера, а також наклад- ним кільцем	$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 + l_{2p} S_2 \chi_2 + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3 \geq 0,5(d_p - d_{0p}) S_p.$ $0,02(0,008 - 0,006 - 0,001)1 + 0,02 \cdot 0,002 \cdot 1 + 0,0096(0,008 - 0,006 - 0,001)1$ <p style="text-align: center;">порівнюють з $0,5(0,062 - 0,053)0,007$</p> $0,0000696 \text{ м}^2 > 0,0000315 \text{ м}^2$ <p style="text-align: center;">Умова укріплення отвору виконується</p>	

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула
Якщо умова укріплення отвору не виконується, тоді можна потовщити стінку посудини або штуцера, або накладного кільця, або застосувати вварене кільце, тороподібну вставку або відбортовку		
17.	Умова комбінованого кріплення отвору	$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s) \chi_1 + l_{2p} S_2 \chi_2 + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s) \chi_3 + l_p(S - S_p - C) \chi_4 \geq \geq 0,5(d_p - d_{0p}) S_p.$

Додаток А. Розподіл посудин на групи залежно від розрахункового тиску температури стінки та характеру робочого середовища

Таблиця А.1. Група посудин [7]

Група посудин	Розрахунковий тиск p , МПа	Розрахункова температура t , °С	Характер робочого середовища
1	Понад 0,07	Незалежно	Вибухонебезпечне або пожежонебезпечне, або 1, 2 класів небезпеки за ГОСТ 12.1.007
2	Понад 0,07 до 2,5	Понад 400	Будь-яке, за винятком вказаного для 1 групи посудин
	Понад 2,5 до 5	Понад 200	
	Понад 4 до 5	Нижче -40	
	Понад 5	Незалежно	
3	Понад 0,07 до 1,6	Нижче -20, понад 200 до 400	
	Понад 1,6 до 2,5	До 400	
	Понад 2,5 до 4	До 200	
	Понад 4 до 5	Понад -40 до 200	
4	Вище 0,07 до 16	Понад -20 до 200	
5а	До 0,07	Незалежно	Вибухонебезпечне або пожежонебезпечне або 1, 2, 3 класів небезпеки за ГОСТ 12.1.007
5б			Вибухонебезпечне, пожежонебезпечне, 4 класу небезпеки за ГОСТ 12.1.007

Групу для посудин із порожнинами, які мають різні параметри та характер середовища, дозволено визначати для кожної порожнини окремо.

Посудини, що працюють під вакуумом або під налив треба відносити до груп 5а або 5б.

Посудини з параметрами відповідними граничним лініям відносять до групи з менш жорсткими вимогами.

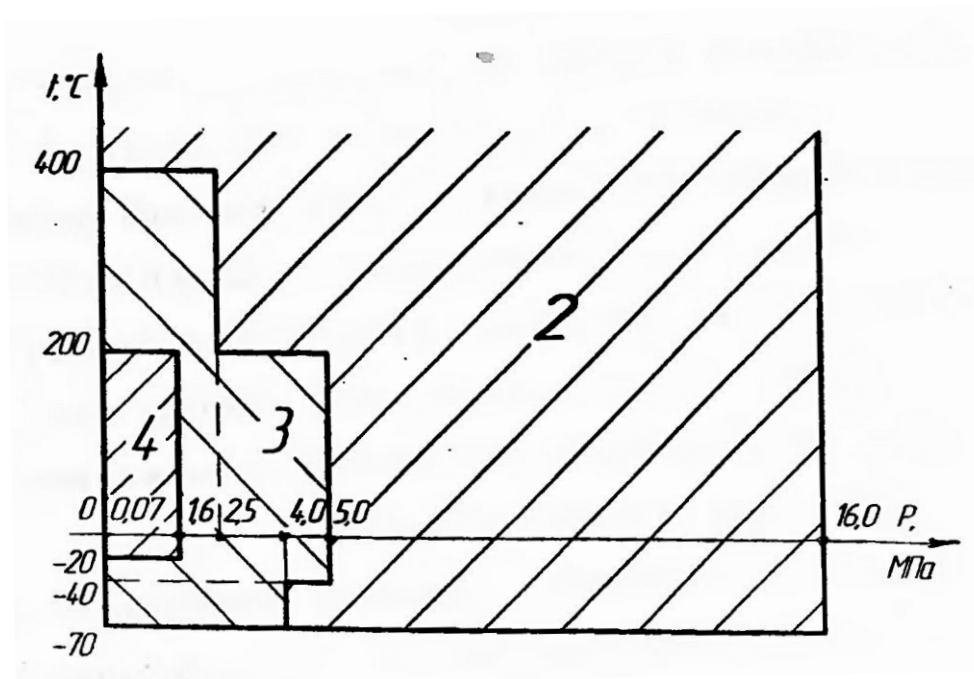


Рис. А.1. Розподіл посудин на групи залежно від розрахункового тиску та температури стінки

Додаток Б. Допустимі напруження сталей

Властивості сталей подані за ГОСТ 34233.1–2017.

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	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											
	Розрахунковий ресурс, год.															
10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵	10 ⁵	2 · 10 ⁵			
20	154	140	196	183	147	130	180	183								
100	149	134	177	160	142	125	160	160								
150	145	131	171	154	139	122	154	154								
200	142	126	165	148	136	118	148	148								
250	131	120	162	145	132	112	145	145								
300	115	108	151	134	119	100	134	134								
350	105	98	140	123	106	88	123	123								
375	93	93	133	116	98	82	108	116								
400	85	68	85	68	122	105	92	74	77	61	92	78	105			
410	81	65	81	65	104	104	86	69	75	60	86	73	104			
420	75	60	75	60	92	92	80	64	72	57	80	68	92			
430	71*	57*	71*	57*	86	73	86	73	75	60	68	54	75	64	86	73
440	–	–	–	–	78	66	78	66	67	53	60	48	67	57	78	66
450	–	–	–	–	71	53	71	53	61	49	53	42	61	46	71	53
460	–	–	–	–	64	48	64	48	55	44	47	37	55	41	64	48
470	–	–	–	–	56	42	56	42	49	39	42	33	49	37	56	42
475	–	–	–	–	53	40	53	40	46	36	37	29	46	34	53	40

*Для розрахункової температури стінки 425 °С.

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

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

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

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

Таблиця Б.2. Допустимі напруження для теплостійких хромомолібденових сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа, для сталей марок											
	12ХМ		12МХ		15ХМ		15Х5М		15Х5М-У		10Х2М1А-А	
	Розрахунковий ресурс, год.											
	10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵
20	147		147		155		146		240		204	
100	146,5		146,5		153		141		235		190	
150	146		146		152,5		138		230		180	
200	145		145		152		134		225		175	
250	145		145		152		127		220		170	
300	141		141		147		120		210		168	
350	137		137		142		114		200		165	
375	135		135		140		110		180		163	
400	132		132		137		105		170		160	
410	130		130		136		103		160		159	
420	129		129		135		101		150		158	
430	127		127		134		99		140	119	156	
440	126		126		132		96		135	115	155	
450	126		126		132		96		130	110	154	
460	126		126		132		96		126	107	140	
470	117		117		122		89	75	122	104	130	
480	114		114		117		86	73	118	100	120	107
490	105	89	105	89	107	91	83	70	114	97	104	93
500	96	72	96	72	99	74	79	59	108	81	88	78
510	82	61	82	61	84	63	72	54	97	73	80	71
520	69	52	69	52	74	55	66	50	85	64	70	62
530	60	45	57	43	67	50	60	45	72	54	60	53
540	50	37	47	35	57	43	54	40	58	43	52	45
550	41	31	—	—	49	37	47	35	52	39	45	38
560	33	25	—	—	41	31	40	30	45	34	38	33
570	—	—	—	—	—	—	35	26	40	30	32	27
580	—	—	—	—	—	—	30	22	34	25	27	23
590	—	—	—	—	—	—	28	21	30	22	24	20
600	—	—	—	—	—	—	25	19	25	19	19	16
610	—	—	—	—	—	—	20	15	20	15	17	—
620	—	—	—	—	—	—	18	13	18	13	14	—
630	—	—	—	—	—	—	17	12	17	12	11	—
640	—	—	—	—	—	—	16	11	16	11	10	—
650	—	—	—	—	—	—	14	10	14	10	9	—

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

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

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

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

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа, для сталей марок							
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т		12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т		10Х14Г14Н4Т
				Розрахунковий ресурс, год.				
				10 ⁵	2·10 ⁵	10 ⁵	2·10 ⁵	
20	180	160	153	168		184		167
100	173	133	140	156		174		153
150	171	125	130	148		168		146
200	171	120	120	140		160		137
250	167	115	113	132		154		130
300	149	112	103	123		148		123
350	143	108	101	113		144		118
375	141	107	90	108		140		115
400	140	107	87	103		137		113
410	—	107	83	102		136		112
420	—	107	82	101		135		111
430	—	107	81	100,5		134		110
440	—	107	81	100		133		109
450	—	107	80	99		132		108
460	—	—	—	98		131		—
470	—	—	—	97,5		130		—
480	—	—	—	97		129		—
490	—	—	—	96		128		—
500	—	—	—	95		127		—
510	—	—	—	94		126		—
520	—	—	—	79		125		—
530	—	—	—	79	71	124	111	—
540	—	—	—	78	70	111	100	—
550	—	—	—	76	68	111	99	—
560	—	—	—	73	66	101	91	—
570	—	—	—	69	62	97	87	—
580	—	—	—	65	58	90	81	—
590	—	—	—	61	55	81	73	—
600	—	—	—	57	46	74	59	—
610	—	—	—	—	—	68	54	—
620	—	—	—	—	—	62	50	—
630	—	—	—	—	—	57	45	—
640	—	—	—	—	—	52	41	—
650	—	—	—	—	—	48	38	—
660	—	—	—	—	—	45	36	—
670	—	—	—	—	—	42	33	—
680	—	—	—	—	—	38	30	—
690	—	—	—	—	—	34	27	—
700	—	—	—	—	—	30	24	—

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

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

3. Для поковок зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на 0,83.

4. Для сортового прокату зі сталі марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на відношення $R_{0,2}^{20}/240$.

5. Для поковок і сортового прокату зі сталі марки 08Х18Н10Т допустимі напруження, наведені в цій таблиці, при температурах не вище 550°C множать на 0,95.

6. Для поковок зі сталі марки 03Х17Н14М3 допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,9.

7. Для поковок зі сталі марки 03Х18Н11 допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,9; для сортового прокату зі сталі марки 03Х18Н11 допустимі напруження множать на 0,8.

8. Для труб зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на 0,88.

9. Для поковок зі сталі марки 03Х21Н21М4ГБ допустимі напруження, наведені в цій таблиці, множать на відношення $R_{0,2}^{20}/250$.

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

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

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа, для сталей і сплавів марок					
	06Х18Г8Н2Т	07Х13АГ20	02Х8Н22С6	15Х18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т
20	230	233	133	233	147	233
100	206	173	106,5	220	138	200
150	190	153	100	206,5	130	193
200	175	133	90	200	124	188,5
250	160	127	83	186,5	117	166,5
300	144	120	76,5	180	110	160
350	—	113	—	—	107	—
375	—	110	—	—	105	—
400	—	107	—	—	103	—

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

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

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

Розрахункова температура, °С	Допустиме напруження [σ], МПа, для алюмінію і його сплавів марок				
	А85М, А8М	АДМ, АД0М, АД1М	АМцМ, АМцСМ	АМг2М, АМг3М	АМг5М, АМг6М
20	16	20	33	47	73
50	15	19	31	47	69
100	14	17	28	45	61
120	13	14	25	44	58
130	12	13	24	40	52
140	11	12	19	34	46
150	11	11	16	31	40

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

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

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

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження [σ], МПа, для міді і її сплавів					
	М2	М3	М3р	Л63, ЛС59-1	ЛО62-1	ЛЖМц 59-1-1
20	51	54	54	70	108	136
50	49	50	51	67	106	134
100	48	45	46	63	100	124
150	43	42	42	60	95	120
200	38	39	38	57	90	106
210	—	38	37	55	80	97
220	—	37	36	52	70	85
230	—	36	35	42	60	69
240	—	34	34	34	50	51
250	—	33	33	33	40	30

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

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

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

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

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

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

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

Додаток В. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу

Таблиця В.1. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском: навч. посіб. Київ: “Видавництво «Політехніка»”, 2011. 272 с.
2. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання і надійність обладнання хімічних виробництв: термінологічний словник. Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 216 с.
3. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонок І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1999. 148 с.
4. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 121 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23885>.
5. Андреев І. А. Роз’ємні міцно-щільні з’єднання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 138 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35927>.
6. Андреев Ігор. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38716>.
7. СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. (стандарт Міністерства промислової політики України). [Чинний від 2009-07-07]. Вид. офіц. К.: Міністерство промислової політики України, 2009. 339 с.

8. Канторович З. Б. Машины химической промышленности: уч. пособ. М.: Машиностроение, 1965. 415 с.

9. Миргородский В. Т. Методические указания, задачи и контрольные задания по курсу “Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств”. Киев: КПИ, 1979. 68 с.

10. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справ. пособ. / В. Т. Троценко и др.; отв. ред. В. Т. Троценко. Киев: Наукова думка, 1993. Ч. 1. 243 с.

11. ГОСТ 34233.3–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчёт на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2017-07-14]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 40 с.

12. Топтуненко Е.Т. Основы конструирования и расчета химических аппаратов и машин: уч. пособие для вузов. Киев: Вища школа, 1974. Ч. 2. 220 с.

13. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 54 с.