

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

Ігор АНДРЕЄВ

**КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК
ОПОРНИХ ВУЗЛІВ ПОСУДИН І АПАРАТІВ
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ**

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

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент: Олександр Сокольський, д-р техн. наук, доц.,
кафедра хімічного, полімерного і силікатного
машинобудування “КПІ ім. Ігоря Сікорського”
Відповідальний редактор Ярослав Корнієнко, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 2 від 9 грудня 2021 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 8 від 27 вересня 2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Ігор Андреев, канд. техн. наук, доц.

КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ОПОРНИХ ВУЗЛІВ ПОСУДИН І АПАРАТІВ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Конструювання і розрахунок опорних вузлів посудин і апаратів хімічних виробництв [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 94 с.

Посібник містить конструкції опорних вузлів, теорію, алгоритми і приклади розрахунків лап, стійок, сідлових опор і стропувальних вушок. Наведені необхідні довідкові дані для визначення несучої спроможності оболонок в місці розташування опорних вузлів.

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	5
ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	10
1. ОПОРНІ ЛАПИ.....	12
1.1. Конструкції опорних лап.....	12
1.2. Розрахунок несучої спроможності обичайки в місці приварювання опорної лапи.....	14
1.3. Алгоритм і приклад розрахунку несучої здатності обичайки в місці приварювання опорної лапи.....	20
2. ОПОРНІ СТІЙКИ.....	34
2.1. Конструкції і застосування опорних стійок.....	34
2.2. Перевірка несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки.....	36
2.3. Перевірка несучої спроможності випуклого днища при застосуванні пластинчастої опорної стійки.....	39
2.4. Алгоритм і приклад розрахунку несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки.....	44
3. СІДЛОВІ ОПОРИ.....	51
3.1. Конструкції і застосування сідлових опор.....	51
3.2. Перевірка несучої спроможності обичайки при застосуванні сідлових опор.....	53
4. СТРОПУВАЛЬНІ ВУШКА.....	58
4.1. Конструкції стропувальних вушок.....	58
4.2. Перевірка несучої спроможності обичайки в місці приварки стропувального вушка.....	60

4.3. Алгоритм і приклад розрахунку несучої спроможності обичайки в місці приварки стропувального вушка.....	67
5. ОПОРНІ ОБИЧАЙКИ.....	78
ДОДАТКИ.....	82
Додаток А. Допустимі напруження сталей.....	82
Додаток Б. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу.....	91
Додаток В. Коефіцієнти міцності зварних швів.....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	93

ВСТУП

У навчальному посібнику містяться теоретичні відомості основ конструювання і інженерних розрахунків, сучасні стандартні розрахункові формули, питання для самоконтролю, приклади розрахунку, а також довідковий матеріал для забезпечення проведення розрахунків і проектування опор, а також несучих вушок посудин та апаратів хімічної, нафтохімічної, нафтопереробної та інших галузей промисловості. Розроблені алгоритми розрахунків і наведені приклади допоможуть студентам при виконанні курсових і дипломних проектів.

Розглянутий у навчальному посібнику матеріал відповідає освітньому компоненту "Розрахунок і конструювання типового обладнання-3. Розрахунок та конструювання опор та стропових пристроїв", який відіграє важливу роль при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю "Галузеве машинобудування".

Основні стандартизовані терміни і визначення, вимоги до конструювання і виготовлення обладнання та окремих елементів, класифікація сталей і чавунів та їх застосування, методики визначення допустимих напружень і нормативних параметрів, основи теорії розрахунку, а також розрахунки на міцність і стійкість елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під дією внутрішнього і зовнішнього тисків наведені у попередніх роботах [1–7].

ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

A_k – площа поперечного перерізу кільця жорсткості, м²;

a – довжина виступаючої циліндричної частини посудини разом з відбортовкою днища, м;

b_0 – довжина плити основи опорної стійки, довжина несучого вушка, м;

b_1 – довжина стропувального вушка в основі, м;
 b_2 – ширина підкладного листа, м;
 b_3 – довжина підкладного листа, м;
 b_4 – ширина плити основи опорної лапи, а також ширина кільця жорсткості, м;
 $b_{1\max}$ – максимальна довжина ребра опори, м;
 C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;
 D – внутрішній діаметр циліндричної обичайки або випуклого днища, м;
 D_3 – зовнішній діаметр випуклого днища, м;
 D_k – внутрішній діаметр конічної обичайки в перерізі, відповідному половині лінії контакту опорного вузла, м;
 D_p – розрахунковий діаметр, м;
 d – діаметр окружності фундаментних болтів, м;
 d_1 – діаметр окружності опорних стійок, м;
 d_2 – зовнішній діаметр опорної стійки, м;
 d_4 – діаметр опорного кола (діаметр перерізу, що проходить через середину лінії контакту опори з днищем), м;
 d_e – ефективний діаметр опорної стійки, м;
 e – довжина вільно виступаючої частини еквівалентної посудини, м;
 e_1 – відстань між точкою докладання зусиль і обичайкою (днищем) або підкладним листом, м;
 e_{13} – еквівалентне плече навантаження, м;
 e_2 – відстань між віссю отвору і середньої лінією вушка, м;
 e_3 – відстань між точкою докладання зусиль і нейтральної віссю кільця жорсткості, м;
 F – розрахункова осьова розтягуються або стискаюча сила (стискаюча сила зі знаком мінус), що діє на повну площу перерізу обичайки в напрямку

осі циліндричної або конічної обичайки (без урахування навантаження, що виникає від внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску) в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н;

F_l – розрахункова сила, яка діє на опорну лапу (стійку), Н;

F_i – розрахункова сила, що діє на i -у сідлову опору, Н;

$[F]_1$ – допустиме опорне зусилля на стропувальне вушко, допустиме вертикальне зусилля на опорну лапу і опорну циліндричну стійку, а також допустиме нормальне зусилля на опорну пластинчасту стійку, Н;

G – власна вага з вмістом в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н;

g – відстань між середніми лініями ребер, м;

H – висота опуклої частини днища по внутрішній поверхні без урахування циліндричної відбортовки, м;

h – відстань від центра ваги опорної лапи, привареної до стійки, до верхнього обрізу фундаменту, м;

h_l – висота опорної лапи, м;

K – скіс ребра опорної пластинчастої стійки, м;

K_1 – K_6 – коефіцієнти;

L – довжина циліндричної частини посудини включно з довжиною циліндричної відбортовки днища, м;

l – довжина лінії контакту опори з днищем, м;

l_l – відстань між двома сідловими опорами, м;

M – розрахунковий згинальний момент, що діє на обичайку в перерізі, де розташовані опорні вузли, в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н·м;

M_0 – розрахунковий згинальний момент, що діє на консольну частину обичайки, Н·м;

M_l – згинальний момент, що передається опорою на днище, Н·м;

$[M]_1$ – допустимий згинаючий момент для опорної стійки, Н·м;
 m – маса апарата, кг;
 n – кількість опор;
 p – розрахунковий тиск, МПа;
 $[p]$ – допустимий внутрішній надлишковий або зовнішній тиск, МПа;
 R – радіус у вершині днища, м;
 r – радіус нейтрального волокна кільця жорсткості, м;
 r_m – радіус кривизни серединної поверхні днища у опорного кола, м;
 Q – розрахункова поперечна сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в напрямку, перпендикулярному до осі циліндричної або конічної обичайки (без урахування навантаження, яке виникає від внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску), в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н;
 q – розподілене вагове навантаження для балки, Н/м;
 S – виконавча товщина стінки обичайки, м;
 S_1 – виконавча товщина стінки випуклого днища, м;
 S_2 – виконавча товщина підкладного листа, м;
 t – ширина ділянки кільця жорсткості в місці приварювання до стінки обичайки, м;
 W_1 – момент пружного опору кільця жорсткості при згині, м³;
 W_k – момент пружного опору кільця жорсткості при крученні, м³;
 x – відстань між віссю еліптичного днища і серединою опорного вузла, м, а також параметр для визначення коефіцієнтів K_5 , K_7 і K_8 ;
 z – параметр для визначення коефіцієнта K_5 ;
 α – половина кута при вершині конічної обичайки, град.;
 α_1 – кут між напрямком зусилля і нормаллю до стінки обичайки, град.;
 α_2 – кут нахилу меридіанної дотичної у опорного кола, град.;
 β – кут між віссю опорної стійки і вертикаллю, град.;

$\bar{\sigma}_m$ – загальне мембранне напруження, МПа;

$\bar{\sigma}_{mx}$ – загальне мембранне меридіанне напруження, МПа;

$\bar{\sigma}_{my}$ – загальне мембранне кільцеве напруження, МПа;

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

$[\sigma_i]$ – граничне напруження вигину, МПа;

$[\sigma_i]_o$ – граничне напруження вигину в місці кріплення для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку, МПа;

$[\sigma_i]_n$ – граничне напруження вигину в місці кріплення для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку, МПа;

$[\sigma]_k$ – допустиме напруження для матеріалу кільця жорсткості, МПа;

φ – коефіцієнт міцності зварних швів обичайки, розташованих в області опорного вузла;

ν_l – коефіцієнт, який являє собою відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напруженням вигину;

ν_{lo} – коефіцієнт, який являє собою відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напруженням вигину для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку;

ν_{ln} – коефіцієнт, який являє собою відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напруженням вигину для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку;

ν_2 – коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними мембранними напруженнями;

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

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Опори призначені для установки апаратів на фундамент або несучі конструкції. При цьому навантаження передається від апарата до опорної конструкції.

Конструкція опор залежить від конструкції апарата, його маси, робочого положення і місця установлення.

При розрахунку посудин і апаратів на міцність в місцях кріплення опорних вузлів перевірки підлягають міцність корпусу в місці кріплення опорних вузлів і міцність зварних швів приварки опорних вузлів до корпусу.

Для обичайки, яка навантажена опорними реакціями в місцях кріплення несучих вушок, опорних лап або сідлових опор, визначають місцеві допустимі зусилля. В основу розрахунку оболонок, навантажених локальними зусиллями, покладено максимальне напруження вигину, яке визначається з умови досягнення граничного стану умовної балки-смужки прямокутного перерізу, що має одиничну ширину і вирізана з оболонки двома паралельними перерізами.

Для днищ, які встановлені на опорні стійки, використовують рішення щодо визначення граничної навантаження цього вузла [8].

При розрахунках несучої спроможності оболонок в якості визначального розміру застосовується розрахунковий діаметр D_p , який обчислюють за формулами:

– для циліндричної обичайки:

$$D_p = D,$$

де D – внутрішній діаметр циліндричної обичайки;

– для конічної обичайки:

$$D_p = D_k / \cos \alpha,$$

де D_k – внутрішній діаметр конічної обичайки в перерізі, відповідному половині лінії контакту опорного вузла, м; α – половина кута при вершині конічної обичайки, град.

– для сферичної оболонки і сферичного сегмента торосферичних днищ:

$$D_p = R,$$

де R – радіус сферичної оболонки або сферичного сегмента торосферичного днища;

– для еліптичного днища:

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

де H – висота опуклої частини днища по внутрішній поверхні без урахування циліндричної відбортовки, м; x – відстань між віссю еліптичного днища і серединою опорного вузла, м.

1. ОПОРНІ ЛАПИ

1.1. Конструкції опорних лап

Матеріал деталей опор вибирається за умовами експлуатації. Підкладний лист (рис. 1.1) застосовується для місцевого підсилення стінки і приварюється до корпусу суцільним швом. Підкладний лист виконується з того ж матеріалу, що і корпус апарата.

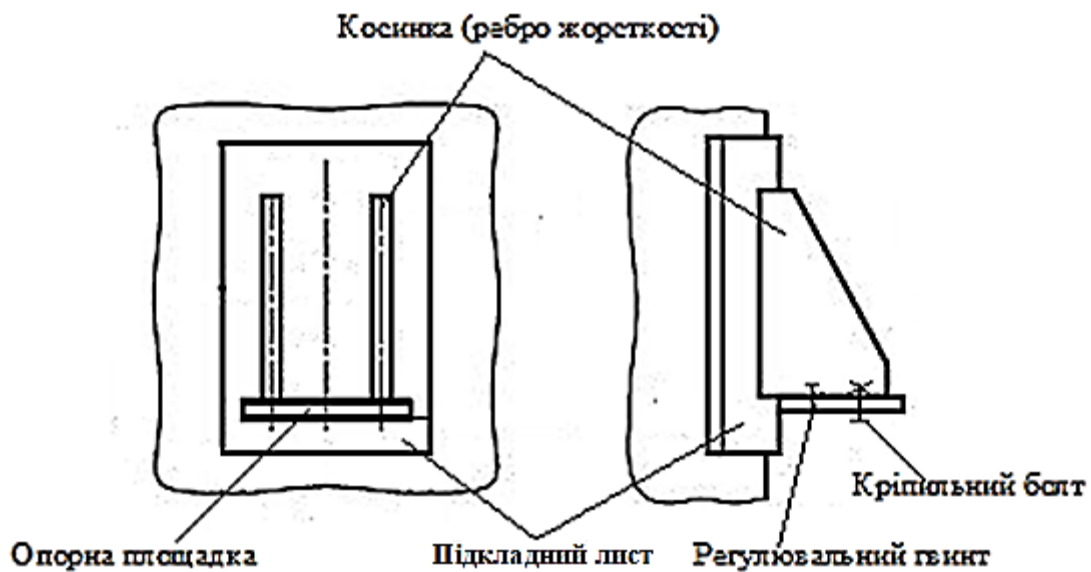


Рис. 1.1. Опорна лапа

Кількість опорних лап може бути 2, 3 або 4.

Якщо апарат містить 4 лапи, тоді одна може бути незавантаженою, тому конструкція опори передбачає наявність регулювального гвинта.

Основні стандартизовані типи опорних лап подані на рис. 1.2.

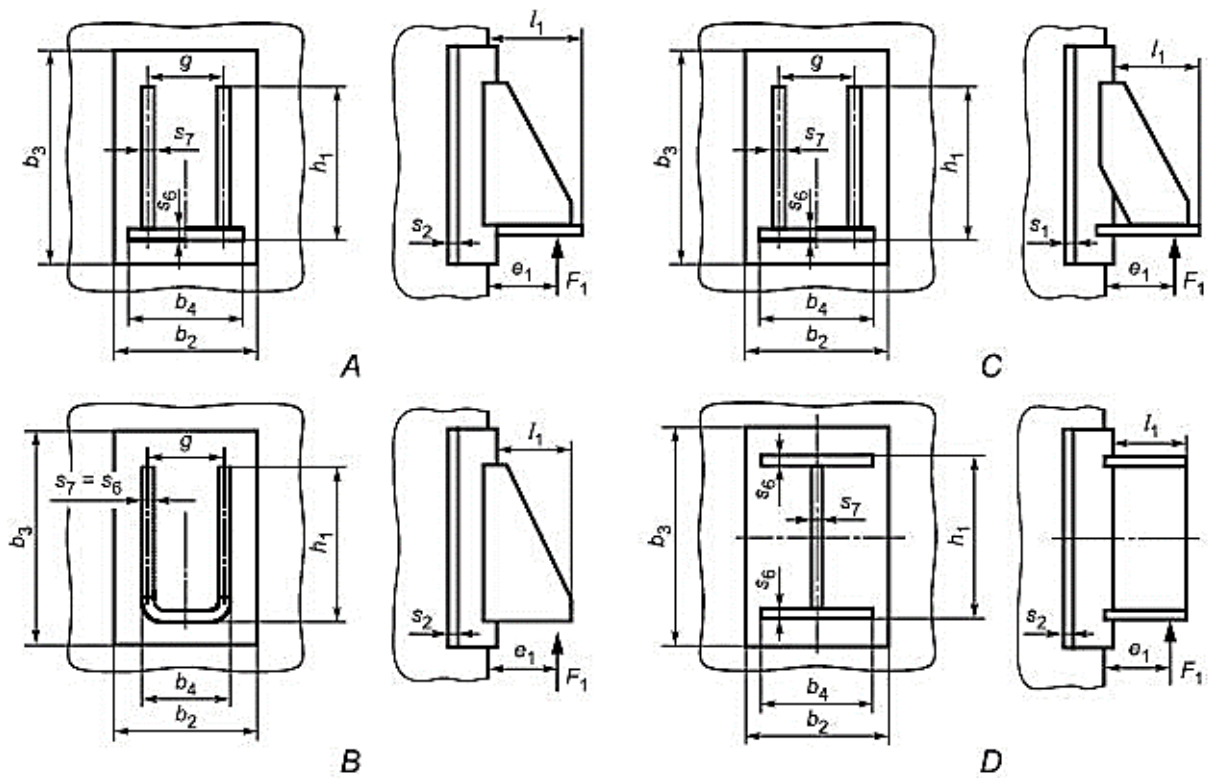


Рис. 1.2. Типи опорних лап

Якщо в апараті передбачається ізоляція, тоді опорна лапа може виконуватися зі збільшеним вильотом (рис. 1.3).

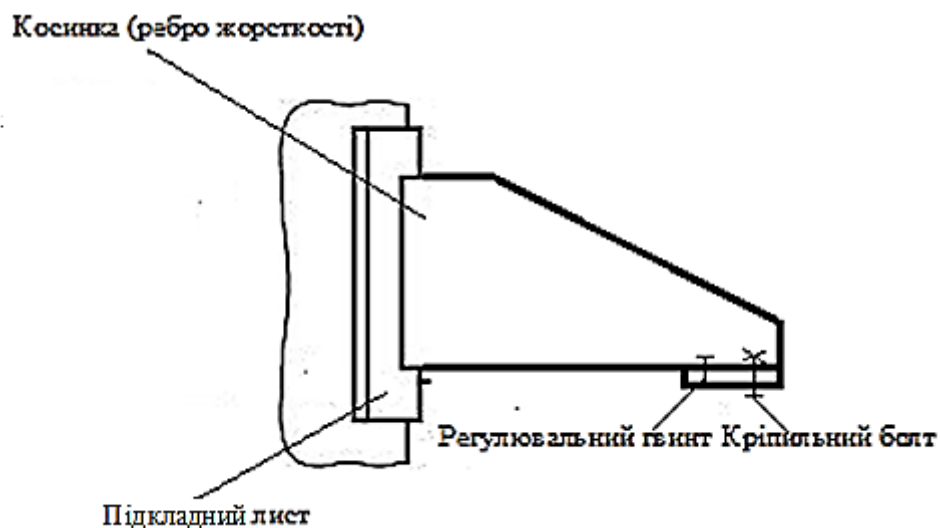


Рис. 1.3. Опорна лапа зі збільшеним вильотом

Всі опори повинні розташовуватися в одній площині.

Питання для самоконтролю до розділу 1.1

1. Навести конструкції опорних лап.
2. Коли виникає необхідність в регульовальному гвинті для опорної лапи?
3. Коли застосовується опорна лапа зі збільшеним вильотом?

1.2. Розрахунок несучої спроможності обичайки в місці приварювання опорної лапи

Методика розрахунку відповідає ГОСТ 34233.5 [8].

Умови застосування розрахункових формул:

- 1) Опорні лапи приєднані до циліндричних або конічних обичайок.

Напрямок дії зусилля приймають паралельно осі обичайки.

- 2) Розрахункові формули застосовують при умовах:

$$\frac{S - C}{D_p} \leq 0,05,$$

$$g \geq 0,2h_1,$$

$$0,04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0,5,$$

$$0,04 \leq \frac{b_4}{D_p} \leq 0,5,$$

$$0,04 \leq \frac{b_3}{D_p} \leq 0,8,$$

$$b_2 \geq 0,6b_3,$$

$$b_3 \leq 1,5h_1,$$

$$S_2 \geq S,$$

де b_2 – ширина підкладного листа, м; b_3 – довжина підкладного листа, м; b_4 – ширина плити основи опорної лапи, м; C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м; g – відстань між середніми лініями ребер, м; h_1 – висота опорної лапи, м; S – виконавча товщина стінки обичайки, м; S_2 – виконавча товщина підкладного листа, м (рис. 1. 2).

Вертикальна сила, яка діє на опорну лапу:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{2} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)} - \text{для } n = 2 \text{ і } n = 4, \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0,75[D_p + 2(e_1 + S + S_2)]} - \text{для } n = 3. \end{cases}$$

де G – власна вага з вмістом в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н; e_1 – відстань між точкою докладання зусиль і обичайкою або підкладним листом, м; M – розрахунковий згинальний момент, що діє на обичайку в перерізі, де розташовані опорні вузли, в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н·м; n – кількість опор.

Якщо невідомо точне значення відстані між точкою докладання зусиль і обичайкою або підкладним листом, тоді e_1 приймають рівним $5/6 l_1$.

Якщо при $n = 4$ забезпечується рівномірний розподіл навантаження між усіма опорними лапами (точний монтаж, установка прокладок, підливка бетону і т. ін.), тоді вертикальне зусилля обчислюють за формулою:

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)}.$$

Горизонтальне зусилля, що діє в основі опорної лапи або в основі стійки, в разі приварювання до неї опорної лапи обчислюють за формулою:

$$Q_1 = \frac{Q}{n},$$

де Q – розрахункова поперечна сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в напрямку, перпендикулярному до осі циліндричної або конічної

обичайки (без урахування навантаження, яке виникає від внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску), в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н.

Еквівалентне плече навантаження e_{13} в разі приварювання опорної лапи до стійки обчислюють за формулою:

$$e_{13} = e_1 + \frac{Q_1 h}{F_1},$$

де h – відстань від центра ваги опорної лапи, привареної до стійки, до верхнього обрізу фундаменту, м.

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи без підкладного листа повинна задовольняти умові:

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i] h_1 (S - C)^2}{K_7 e_{13}},$$

де $[F]_1$ – допустиме вертикальне зусилля на опорну лапу, Н; $[\sigma_i]$ – граничне напруження вигину, МПа; K_7 – коефіцієнт.

При $g/h_1 < 0,5$ значення $[F]_1$, яке розраховується за останньою формулою, необхідно помножити на $(0,5 + g/h_1)$.

Коефіцієнт K_7 обчислюють за формулами:

– для конструкції опорних лап типу A і C (рис. 1.2):

$$K_7 = \exp \left[\left(\begin{array}{l} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - \\ -2,042y^2 + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + \\ +1,428y^3 \end{array} \right) \cdot 10^{-2} \right];$$

– для конструкції опорної лапи типу B (рис. 1.2):

$$K_7 = \min \left\{ \exp \left[\left(\begin{array}{l} -26,791 - 6,936x - 36,330y - 3,503x^2 - \\ -3,357xy + 2,786y^2 + 0,2267x^3 + \\ +0,2831x^2y + 0,3851xy^2 + 1,370y^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right]; \right. \\ \left. \exp \left[\left(\begin{array}{l} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - \\ -7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + \\ +0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right] \right\}$$

– для конструкції опорної лапи типу D (рис. 1.2):

$$K_7 = \exp \left[\left(\begin{array}{c} -29,523 - 45,958x - 91,759z - 1,801x^2 - \\ -12,062xz - 18,872z^2 + 1,1551x^3 + 1,617x^2z + \\ + 3,736xz^2 + 1,425z^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right],$$

де $x = \ln \left(\frac{D_p}{2(S-C)} \right)$; $y = \ln \frac{h_1}{D_p}$; $z = \ln \frac{b_4}{D_p}$.

Граничне напруження вигину в місці кріплення опор:

$$[\sigma_i] = K_1 K_2 [\sigma],$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти, які дорівнюють:

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2 \right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \vartheta_1^2}}$$

$K_2 = 1,25$ для робочих умов,

$K_2 = 1,05$ для умов випробувань і монтажу.

Коефіцієнт, який являє собою відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напруженням вигину $\vartheta_1 = 0,3$.

Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними мембранними напруженнями ϑ_2 :

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2 [\sigma] \varphi},$$

де $\bar{\sigma}_m$ – загальне мембранне напруження, МПа; $[\sigma]$ – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа; φ – коефіцієнт міцності зварних швів обичайки, розташованих в області опорного вузла.

Якщо відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом більша за $\sqrt{D_p S}$, тоді приймають $\varphi = 1$.

При $\vartheta_2 < 0$ приймають $\vartheta_2 = |\vartheta_2|$, а знак коефіцієнта ϑ_1 змінюють на зворотній.

Для конструкцій опорних лап типів А, В і С:

$$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{m\varphi},$$

де $\bar{\sigma}_{my}$ – загальне мембранне кільцеве напруження, МПа.

Для конструкцій опорних лап типу D :

$$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx},$$

де $\bar{\sigma}_{mx}$ – загальне мембранне меридіанне напруження, МПа.

Загальне мембранне кільцеве напруження в циліндричній і конічній обичайках:

$$\bar{\sigma}_{my} = \frac{pD_p}{2(S - C)},$$

де p – розрахунковий тиск, МПа.

Загальне мембранне меридіанне напруження в циліндричній обичайці:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S - C)} + \frac{1}{\pi D_p(S - C)} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right),$$

де F – розрахункова осьова розтягуються або стискаюча сила (стискаюча сила зі знаком мінус), що діє на повну площу перерізу обичайки в напрямку осі циліндричної або конічної обичайки (без урахування навантаження, що виникає від внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску) в умовах монтажу, експлуатації або випробування, Н.

Загальне мембранне меридіанне напруження в конічній обичайці:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S - C)} + \frac{1}{\pi D_k(S - C) \cos \alpha} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right),$$

де D_k – внутрішній діаметр конічної обичайки в перерізі, відповідному половині лінії контакту опорного вузла, м; α – половина кута при вершині конічної обичайки, град.

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи з підкладним листом повинна задовольняти умові:

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i] b_3 (S - C)^2}{K_8 (e_{13} + S_2)}$$

де K_8 – коефіцієнт.

Якщо $b_2/b_3 < 0,6$, тоді значення $[F]_1$, яке було отримано за попередньою формулою необхідно помножити на $(0,4 + b_2/b_3)$.

Коефіцієнт K_8 обчислюють за формулою:

$$K_8 = \min \left\{ \exp \left[\left(\begin{array}{l} -49,919 - 39,119x - 107,01y_1 - 1,693x^2 - \\ -11,920xy_1 - 39,276y_1^2 + 0,237x^3 + \\ +1,608x^2y_1 + 2,761xy_1^2 - 3,854y_1^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right]; \right. \\ \left. \exp \left[\left(\begin{array}{l} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - \\ -7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + \\ +0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right], \right.$$

де $x = \ln \left(\frac{D_p}{2(S-C)} \right)$; $y = \ln \frac{h_1}{D_p}$; $y_1 = \ln \frac{b_3}{D_p}$.

Граничне напруження вигину:

$$[\sigma_i] = K_1 K_2 [\sigma].$$

При цьому коефіцієнт K_1 обчислюють при $\vartheta_1 = 0,4$.

Коефіцієнт v_2 розраховують за формулою:

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2 [\sigma] \varphi},$$

де загальне мембранне напруження:

$$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{my} = \frac{p D_p}{2(S - C)}.$$

Питання для самоконтролю до розділу 1.2

1. Обґрунтувати визначення вертикальної сили, яка діє на опорну лапу.
2. Навести умову несучої здатності обичайки в місці приварювання опорної лапи.

3. Обґрунтувати застосування підкладного листа.
4. Надати алгоритм розрахунку несучої здатності обичайки в місці приварювання опорної лапи.

1.3. Алгоритм і приклад розрахунку несучої здатності обичайки в місці приварювання опорної лапи

Завдання. Для циліндричної обичайки апарата, яка навантажена внутрішнім тиском, треба перевірити несучу спроможність в місці приварювання опорної лапи типу *A*. Установка апарата у робочому положенні здійснюється закріпленням опорної площадки лапи кріпильними болтами. Кількість опорних лап $n = 2$.

Згинальний момент M в перерізі, де розташовані опорні вузли відсутній.

Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини.

Відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом менша за $\sqrt{D_p S}$.

Розрахунок виконати для робочих умов.

Вихідні дані для розрахунків по варіантам подано у таблицях 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1. Вихідні данні для розрахунку

Варіант	D , м	p , МПа	S , м	Марка сталі	t , °С	C , м	G , кН	h_1 , м	g , м	b_4 , м	l_1 , м
1	0,9	1,1	0,009	09Г2С	170	0,0010	3,3	0,5	0,2	0,26	0,25
2	1,0	1,0	0,010	20К	160	0,0012	4,4	0,5	0,2	0,26	0,25
3	1,0	1,1	0,010	16ГС	165	0,0010	4,4	0,5	0,2	0,26	0,25
4	1,2	0,8	0,011	20	155	0,0016	7,2	0,5	0,2	0,26	0,25
5	1,2	1,0	0,012	09Г2С	165	0,0010	7,2	0,5	0,2	0,26	0,25
6	1,4	0,7	0,012	Ст3пс	150	0,0010	10,3	0,5	0,2	0,26	0,25
7	1,4	0,9	0,013	16ГС	160	0,0010	10,3	0,5	0,2	0,26	0,25
8	1,6	0,6	0,013	20	150	0,0009	13,3	0,5	0,2	0,26	0,25
9	1,6	0,8	0,014	09Г2С	100	0,0010	13,3	0,5	0,2	0,26	0,25
10	1,8	0,63	0,014	20	150	0,0010	16,0	0,5	0,2	0,26	0,25
11	1,8	0,7	0,014	20К	150	0,0009	16,0	0,5	0,2	0,26	0,25
12	2,0	0,54	0,015	Ст3пс	140	0,0010	22,0	0,5	0,2	0,26	0,25
13	2,0	0,74	0,017	20К	155	0,0007	22,0	0,5	0,2	0,26	0,25
14	2,2	0,54	0,016	10	150	0,0012	22,0	0,5	0,2	0,26	0,25
15	2,2	0,64	0,017	Ст3пс	155	0,0010	22,0	0,5	0,2	0,26	0,25
16	2,4	0,44	0,017	10	140	0,0007	30,5	0,5	0,2	0,26	0,25
17	2,6	0,54	0,020	Ст3пс	150	0,0010	34,0	0,5	0,2	0,26	0,25
18	2,0	0,5	0,022	09Г2С	170	0,0014	21,0	0,5	0,2	0,26	0,25
19	2,0	0,45	0,026	16ГС	175	0,0009	22,0	0,5	0,2	0,26	0,25
20	2,0	0,4	0,028	09Г2С	160	0,0010	23,0	0,5	0,2	0,26	0,25
Приклад розрахунку	1,4	0,8	0,008	20	150	0,0010	55,0	0,5	0,2	0,26	0,25

Таблиця 1.2. Вид зварного шва

Варіант	Вид зварного шва
1, 2	Стиковий, що виконується вручну з одного боку
3, 4	Стиковий двобічний з повним проплавленням, що виконується автоматичним зварюванням
5, 6,7	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
8, 9, 10, 11	Стиковий з підварюванням кореня шва з повним проплавленням, що виконується вручну
12, 13	Стиковий двобічний з повним проплавленням, що виконується автоматичним зварюванням
14, 15	Стиковий з підварюванням кореня шва з повним проплавленням, що виконується вручну
16, 17	Стиковий двобічний з повним проплавленням, що виконується автоматичним зварюванням
18, 19, 20	Стиковий з підварюванням кореня шва з повним проплавленням, що виконується вручну
Приклад розрахунку	Стиковий, що виконується вручну з одного боку

Таблиця 1.3. Алгоритм розрахунку несучої здатності циліндричної і конічної обичайок в місці приварювання опорної лапи і приклад розрахунку для випадку застосування циліндричної обичайки

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустимі напруження для матеріалу обичайки $[\sigma]$, МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ для зварених елементів)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150$ °С допустимі напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу E , МПа	E визначають за таблицею Б.1 додатка Б залежно від марки сталі і розрахункової температури	З таблиці Б.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150$ °С модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу $E = 1,86 \cdot 10^5$ МПа
3.	Розрахунковий діаметр D_p , м	Для циліндричної обичайки: $D_p = D$. Для конічної обичайки: $D_p = D_{\kappa} / \cos \alpha$	$D_p = 1,4$ м
4.	Умови застосування розрахункових формул	$\frac{s-c}{D_p} \leq 0,05$, $g \geq 0,2h_1$, $0,04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0,5$, $0,04 \leq \frac{b_4}{D_p} \leq 0,5$	$\frac{0,008 - 0,001}{1,4} = 0,005 < 0,05$; $0,2 > 0,2 \cdot 0,5 = 0,1$; $\frac{0,5}{1,4} = 0,357$; $0,04 < 0,357 < 0,5$; $\frac{0,26}{1,4} = 0,186$; $0,04 < 0,186 < 0,5$ Умови застосування розрахункових формул виконуються

Продовження табл. 1.3

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Відстань між точкою докладання зусиль і обичайкою e_1 , м	Якщо невідомо точне значення відстані між точкою докладання зусиль і обичайкою, тоді $e_1 = 5 l_1/6$	$e_1 = 5 \cdot 0,25/6 = 0,208$ м
6.	Розрахункова осьова розтягуються або стискаюча сила (стискаюча сила зі знаком мінус) F , МН	$F = G$	$F = 0,055$ МН
7.	Вертикальна сила, яка діє на опорну лапу F_1	$F_1 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{G}{2} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)} - \text{для } n = 2 \text{ і } n = 4, \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0,75[D_p + 2(e_1 + S + S_2)]} - \text{для } n = 3. \end{array} \right.$ <p>Якщо при $n = 4$ забезпечується рівномірний розподіл навантаження між усіма опорними лапами (точний монтаж, установка прокладок, підливка бетону і т. ін.), тоді:</p> $F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)}$	Через те, що $M = 0$: $F_1 = G/2 = 0,055/2 = 0,0275$ МН

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
8.	Горизонтальне зусилля, що діє в основі опорної лапи або в основі стійки, в разі приварювання до неї опорної лапи Q_1 , МН	$Q_1 = \frac{Q}{n}$	–
9.	Еквівалентне плече навантаження $e_{1э}$, м	В разі приварювання опорної лапи до стійки: $e_{1э} = e_1 + \frac{Q_1 h}{F_1},$ інакше $e_{1э} = e_1$	$e_{1э} = 0,208$ м
10.	Параметр x	$x = \ln \left(\frac{D_p}{2(S - C)} \right)$	$x = \ln \left(\frac{1,4}{2(0,008 - 0,001)} \right) = 4,61$
11.	Параметр y (визначається для опор типів A, B і C)	$y = \ln \frac{h_1}{D_p}$	$y = \ln \left(\frac{0,5}{1,4} \right) = -1,03$
12.	Параметр z (визначається для опор типу D)	$z = \ln \frac{b_4}{D_p}$	–

№ п/п	Розрахунковий Параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Коефіцієнт K_7	<p>Для конструкції опорних лап типу A і C:</p> $K_7 = \exp \left[\left(\begin{array}{l} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - \\ -2,042y^2 + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + \\ + 1,428y^3 \end{array} \right) \cdot 10^{-2} \right]$ <p>Для конструкції опорної лапи типу B:</p> $K_7 = \min \left\{ \exp \left[\left(\begin{array}{l} -26,791 - 6,936x - 36,330y - 3,503x^2 - \\ -3,357xy + 2,786y^2 + 0,2267x^3 + \\ + 0,2831x^2y + 0,3851xy^2 + 1,370y^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right]; \right.$ $\left. \exp \left[\left(\begin{array}{l} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - \\ -7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + \\ + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right] \right\}$ <p>Для конструкції опорної лапи типу D:</p> $K_7 = \exp \left[\left(\begin{array}{l} -29,523 - 45,958x - 91,759z - 1,801x^2 - \\ -12,062xz - 18,872z^2 + 1,1551x^3 + 1,617x^2z + \\ + 3,736xz^2 + 1,425z^3 \end{array} \right) 10^{-2} \right]$	$K_7 = \exp[(-5,964 - 11,395 \cdot 4,61 - 18,984(-1,03) - 2,413 \cdot 4,61^2 - 7,286 \cdot 4,61(-1,03) - \\ - 2,042(-1,03)^2 + 0,1322 \cdot 4,61^3 + 0,4833 \cdot 4,61^2(-1,03) + 0,8469 \cdot 4,61(-1,03)^2 + \\ + 1,428(-1,03)^3)10^{-2}] = 0,59$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Загальне мембранне напруження $\bar{\sigma}_m$, МПа	<p>Для конструкцій опорних лап типів <i>A</i>, <i>B</i> і <i>C</i>:</p> $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{my} = \frac{pD_p}{2(S-C)}$ <p>Для конструкцій опорних лап типу <i>D</i> для циліндричної обичайки:</p> $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S-C)} + \frac{1}{\pi D_p(S-C)} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right)$ <p>Для конструкцій опорних лап типу <i>D</i> для конічної обичайки:</p> $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S-C)} + \frac{1}{\pi D_k(S-C)\cos\alpha} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right)$	$\bar{\sigma}_m = \frac{0,8 \cdot 1,4}{2(0,008 - 0,001)} = 80 \text{ МПа}$
15.	Коефіцієнт міцності зварних швів обичайки в області опорного вузла φ	<p>φ визначають за таблицею В.1 додатка В залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються.</p> <p>Якщо відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом більша за $\sqrt{D_p S}$, тоді приймають $\varphi = 1$.</p>	<p>Для стикового шва, що виконується вручну з одного боку, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини $\varphi = 0,9$</p>
16.	Коефіцієнт K_2	$K_2 = 1,25$ для робочих умов, $K_2 = 1,05$ для умов випробувань і монтажу	$K_2 = 1,25$
17.	Коефіцієнт ϑ_1	$\vartheta_1 = 0,3$	$\vartheta_1 = 0,3$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
18.	Коефіцієнт ϑ_2	$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2[\sigma]\varphi}$ При $\vartheta_2 < 0$ приймають $\vartheta_2 = \vartheta_2 $, а знак коефіцієнта ϑ_1 змінюють на зворотній	$\vartheta_2 = \frac{80}{1,25 \cdot 139 \cdot 0,9} = 0,512$
19.	Коефіцієнт K_1	$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2)\vartheta_1^2}}$	$K_1 = \frac{1 - 0,512^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,512\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,512\right)^2 + (1 - 0,512^2)0,3^2}} = 0,711$
20.	Граничне напруження вигину в місці кріплення опор $[\sigma_i]$, МПа	$[\sigma_i] = K_1 K_2 [\sigma]$	$[\sigma_i] = 0,711 \cdot 1,25 \cdot 139 = 123,54 \text{ МПа}$
21.	Допустиме зусилля на опорну лапу $[F]_1$, МПа	$[F]_1 = \frac{[\sigma_i] h_1 (S - C)^2}{K_7 e_{13}}$	$[F]_1 = \frac{123,54 \cdot 0,5 (0,008 - 0,001)^2}{0,59 \cdot 0,208} = 0,024 \text{ МН}$

Продовження табл. 1.3

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
22.	Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи без підкладного листа	$F_1 \leq [F]_1$	0,0275 МН > 0,024 МН Умова не виконується
Якщо не виконується умова несучої здатності обичайки, тоді необхідно застосовувати підкладний лист			
Розрахунок несучої здатності обичайок в місці приварювання опорної лапи при наявності підкладного листа			
23.	Ширина b_2 і довжина b_3 підкладного листа	b_2 і b_3 обираються з умов: $0,04 \leq \frac{b_3}{D_p} \leq 0,8,$ $b_2 \geq 0,6b_3,$ $b_3 \leq 1,5h_1$	Обираємо: $b_2 = 0,4$ м; $b_3 = 0,6$ м $0,04 < 0,6/1,4 = 0,43 < 0,84$ $0,4$ м > $0,6 \cdot 0,6 = 0,36$ м $0,6$ м < $1,5 \cdot 0,5 = 0,75$ м Умова застосування підкладного листа виконується
24.	Виконавча товщина підкладного листа S_2 , м	S_2 обирається з умови: $S_2 \geq S$	Приймаємо $S_2 = 8$ мм

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
25.	Вертикальна сила, яка діє на опорну лапу F_1	$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{2} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)} & \text{для } n = 2 \text{ і } n = 4, \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0,75[D_p + 2(e_1 + S + S_2)]} & \text{для } n = 3. \end{cases}$ <p>Якщо при $n = 4$ забезпечується рівномірний розподіл навантаження між усіма опорними лапами (точний монтаж, установка прокладок, підливка бетону і т. ін.), тоді:</p> $F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{D_p + 2(e_1 + S + S_2)}$	<p>Для спрощення розрахунку вагу підкладних листів не враховуємо через їх малість.</p> <p>Через те, що $M = 0$:</p> $F_1 = G/2 = 0,055/2 = 0,0275 \text{ МН}$
26.	Параметр y_1	$y_1 = \ln \frac{b_3}{D_p}$	$y_1 = \ln(0,6/1,4) = -0,847$
27.	Коефіцієнт K_8	$K_8 = \min \left\{ \exp \left[\begin{pmatrix} -49,919 - 39,119x - 107,01y_1 - 1,693x^2 - \\ -11,920xy_1 - 39,276y_1^2 + 0,237x^3 + \\ +1,608x^2y_1 + 2,761xy_1^2 - 3,854y_1^3 \end{pmatrix} 10^{-2} \right]; \right.$ $\left. \exp \left[\begin{pmatrix} -5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - \\ -7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + \\ +0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3 \end{pmatrix} 10^{-2} \right] \right\}$	

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		$K_8 = \min\{ \exp[(-49,919 - 39,119 \cdot 4,61 - 107,01(-0,847) - 1,693 \cdot 4,61^2 - 11,920 \cdot 4,61(-0,847) - 39,276(-0,847)^2 + 0,237 \cdot 4,61^3 + 1,608 \cdot 4,61^2(-0,847) + 2,761 \cdot 4,61(-0,847)^2 - 3,854(-0,847)^3)10^{-2}];$ $\exp[(-5,964 - 11,395 \cdot 4,61 - 18,984(-1,03) - 2,413 \cdot 4,61^2 - 7,286 \cdot 4,61(-1,03) - 2,042(-1,03)^2 + 0,1322 \cdot 4,61^3 + 0,4833 \cdot 4,61^2(-1,03) + 0,8469 \cdot 4,61(-1,03)^2 + 1,428(-1,03)^3)10^{-2}]\} =$ $= \min\{0,22; 0,59\} = 0,22$	
28.	Загальне мембранне напруження у випадку застосування підкладного листа $\bar{\sigma}_m$, МПа	$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{my} = \frac{pD_p}{2(S - C)}$	$\bar{\sigma}_m = \frac{0,8 \cdot 1,4}{2(0,008 - 0,001)} = 80 \text{ МПа}$
29.	Коефіцієнт ϑ_1 у випадку застосування підкладного листа	$\vartheta_1 = 0,4$	$\vartheta_1 = 0,4$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
30.	Коефіцієнт ϑ_2 у випадку застосування підкладного листа	$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2[\sigma]\varphi}$	$\vartheta_2 = \frac{80}{1,25 \cdot 139 \cdot 0,9} = 0,512$
31.	Коефіцієнт K_1 у випадку застосування підкладного листа	$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \vartheta_1 \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2)\vartheta_1^2}}$	$K_1 = \frac{1 - 0,512^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,4 \cdot 0,512\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + 0,4 \cdot 0,512\right)^2 + (1 - 0,512^2)0,4^2}} = 0,627$
32.	Граничне напруження вигину $[\sigma_i]$, МПа	$[\sigma_i] = K_1 K_2 [\sigma]$	$[\sigma_i] = 0,627 \cdot 1,25 \cdot 139 = 108,94 \text{ МПа}$
33.	Допустиме вертикальне зусилля на опорну лапу у випадку застосування підкладного листа $[F]_1$, МПа	$[F]_1 = \frac{[\sigma_i] b_3 (S - C)^2}{K_8 (e_{13} + S_2)}$	$[F]_1 = \frac{108,94 \cdot 0,6 (0,008 - 0,001)^2}{0,22 \cdot (0,208 + 0,008)} = 0,067 \text{ МН}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
34.	Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи з підкладним листом	$F_1 \leq [F]_1$	0,0275 МН < 0,067 МН Умова несучої здатності обичайки в місці приварювання опорної лапи з підкладним листом виконується
Якщо умова несучої здатності не виконується, тоді треба підібрати підкладний лист більшого розміру			

2. ОПОРНІ СТІЙКИ

2.1. Конструкції і застосування опорних стійок

Опорні стійки кріпляться до днища посудин та апаратів, які встановлюються на підлозі.

Кількість опорних стійок може бути 3 або 4.

Опорні стійки і лапи застосовуються для легких апаратів. Максимально допустиме навантаження на одну опору такої конструкції може досягати 0,25 МН. При більших навантаженнях використовують суцільну циліндричну або конічну опорну обичайку.

Опорні стійки за конструкцією поділяються на циліндричні і пластинчасті. На рисунках 2.1 і 2.2 наведені конструкції і основні розміри опорних стійок.

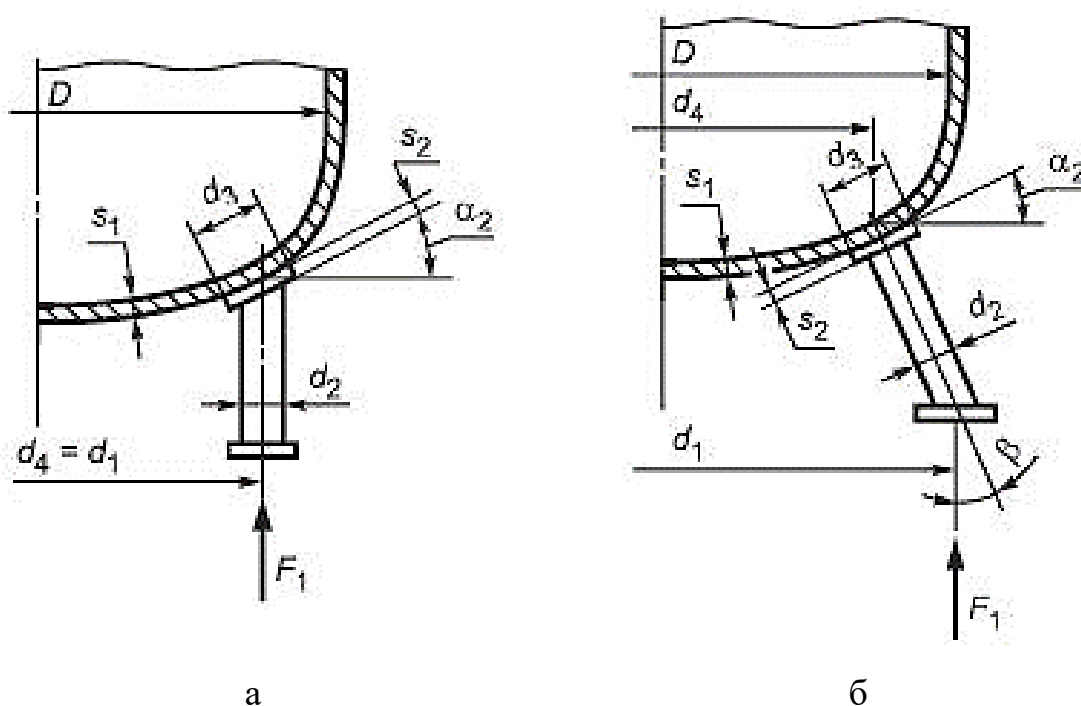


Рис. 2.1. Конструкції циліндричних стійок: а) вертикальна, б) похила

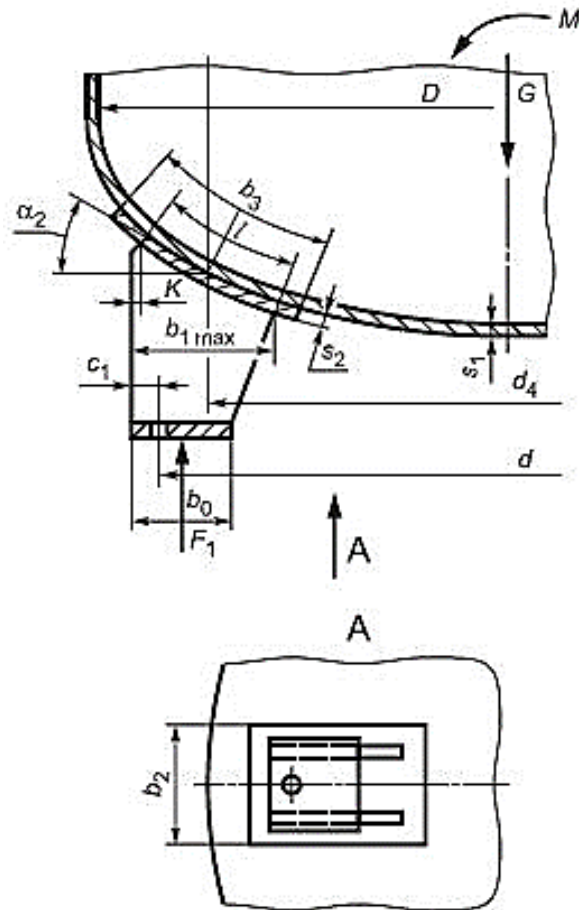


Рис. 2.2. Пластинчаста опорна стійка

Питання для самоконтролю до розділу 2.1

1. В якому випадку застосовуються опорні стійки?
2. Навести відмінність циліндричних від пластинчастих опорних стійок.
3. Навести величину максимально допустимого навантаження на одну опорну стійку.

2.2. Перевірка несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки

Методика розрахунку відповідає ГОСТ 34233.5 [8].

Умови застосування розрахункових формул:

Метод розрахунку днищ, встановлених на похилих опорних стійках, застосовують, якщо їх взаємне переміщення виключено.

Розрахунок застосовують тільки для посудин і апаратів, які працюють під внутрішнім надлишковим тиском.

Формули застосовуються при виконанні умови: $d_3 \leq 1,6 d_2$.

До торосферичних днищ опорні стійки повинні бути приєднані в області сферичного сегмента, а до еліптичних днищ – в області $0 < x < 0,4D$, де x – відстань між віссю еліптичного днища і серединою опорного вузла, м.

Вертикальне зусилля на опорну стійку обчислюють за формулою:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{3} + \frac{M}{0,75d_4} & \text{для } n = 3, \\ \frac{G}{2} + \frac{M}{d_4} & \text{для } n = 4. \end{cases}$$

В наведеній формулі d_4 – діаметр опорної окружності (діаметр перерізу, що проходить через середину лінії контакту опори з днищем), м.

При $n = 4$, в разі забезпечення рівномірного розподілу навантаження між усіма опорними стійками (точний монтаж, установка прокладок, підлив бетону і т. ін.), зусилля обчислюють за формулою:

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{d_4}.$$

Дія моменту M допускається тільки в тому випадку, якщо опорні стійки пов'язані між собою жорсткою рамою, що перешкоджає взаємному переміщенню стійок. При цьому слід виконати умову:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{G}{4} > \frac{M}{d_4} \text{ для } n = 3, \\ \frac{G}{3} > \frac{M}{0,75d_4} \text{ для } n = 3 \end{array} \right\}$$

Несуча здатність опуклого днища повинна задовольняти умовам:

$$\frac{F_1 - p \frac{\pi d_e^2}{4}}{[F]_1} + \frac{p}{[p]} \leq 1,$$

$$\frac{F_1}{[F]_1} \leq 1.$$

де d_e – ефективний діаметр опорної стійки, м; $[p]$ – допустимий внутрішній надлишковий тиск, МПа (визначається за ГОСТ 34233.2).

Для опорних стійок без підкладного листа $d_e = d_2$, де d_2 – зовнішній діаметр опорної стійки, м.

Для опорних стійок з підкладним листом $d_e = d_3$, де d_3 – діаметр підкладного листа, м.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$ розраховується за ГОСТ 34233.2 [9] залежно від конфігурації випуклого днища.

Допустиме осьове зусилля:

$$[F]_1 = 1,57[\sigma](S_1 - C)^2 \frac{\cos\beta}{\cos(\alpha_2 - \beta)} \sqrt{1 + 5 \frac{d_e^2}{r_m(S_1 - C)}},$$

де S_1 – виконавча товщина стінки випуклого днища, м; α_2 – кут нахилу меридіанної дотичної у опорного кола, град; β – кут між віссю опорної стійки і вертикаллю, град; r_m – радіус кривизни серединної поверхні днища у опорного кола, м.

Радіус r_m і кут α_2 визначають за таблицею 2.1.

Таблиця 2.1. Визначення значень r_m і α_2

Форма днища	Еліптичне днище ($H = 0,25D$)	Торосферичне днище типу		
		A	B	C
r_m	$\frac{2D\sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$	D	$0,9D$	$0,8D$
$\sin\alpha_2$	$\frac{d_4}{2D\sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$	$\frac{d_4}{2D}$	$\frac{d_4}{1,8D}$	$\frac{d_4}{1,6D}$

В таблиці 2.1: D – внутрішній діаметр циліндричної обичайки або випуклого днища, м; H – висота опуклої частини днища по внутрішній поверхні без урахування циліндричної відбортовки, м.

Питання для самоконтролю до розділу 2.2

1. Навести умови здійснення перевірки несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки.
2. Навести допустимі області приєднання опорних стійок до сферичного сегмента і до еліптичного днища.
3. Які навантаження впливають на величину вертикального зусилля на опорну стійку?
4. Як визначається несуча здатність опуклого днища під опорною стійкою?

2.3. Перевірка несучої спроможності випуклого днища при застосуванні пластинчастої опорної стійки

Методика розрахунку відповідає ГОСТ 34233.5 [8].

Умови застосування розрахункових формул:

Метод розрахунку застосовують тільки для еліптичних днищ, що працюють під внутрішнім надлишковим тиском.

Формули застосовують при дотриманні умов для еліптичних днищ:

$$0,003 \leq \frac{S_1 - C}{D} \leq 0,02,$$

$$\frac{d_4}{D} \geq 0,7,$$

$$0,1 \leq \frac{l}{D} \leq 0,35,$$

$$b_3 \geq 1,2l,$$

$$b_2 \geq 0,6b_3,$$

$$S_2 \geq S_1,$$

де l – довжина лінії контакту опори з днищем, м.

Вертикальне зусилля на опорну стійку F_1 обчислюють за тими самими формулами, що і для циліндричної опорної стійки.

Згинальний момент, що передається опорою на днище, обчислюють за формулою:

$$M_1 = \frac{F_1(b_{1max} - b_o + K)}{2},$$

де b_{1max} – максимальна довжина ребра опори, м; b_o – довжина плити основи опорної стійки, м; K – скіс ребра опорної пластинчастої стійки, м.

Несуча спроможність днища в місці приварювання опорної стійки перевіряється за формулою:

$$\frac{F_1 \cos \alpha_2}{[F]_1} + \frac{M_1}{[M]_1} + \frac{p}{[p]} \leq 1,$$

де $[M]_1$ – допустимий згинаючий момент для опорної стійки, Н·м.

Кут α_2 визначається за табл. 2.1.

Допустиме нормальне зусилля, що діє по нормалі до непідкріпленого еліптичного днища, обчислюють за формулою:

$$[F]_1 = 0,25K_{20}[\sigma](S_1 - C)^2 \left(0,2 + \frac{d_4}{D}\right),$$

де K_{20} – коефіцієнт.

Діаметр опорного кола:

$$d_4 = d + 2C - K - b_{1max},$$

де d – діаметр кола фундаментних болтів, м.

Допустимий згинаючий момент для непідкріпленого еліптичного днища:

$$[M]_1 = 0,25K_{21}[\sigma](S_1 - C)^2 D \left(0,2 + \frac{d_4}{D}\right),$$

де K_{21} – коефіцієнт.

Коефіцієнти K_{20} і K_{21} визначають за графіками (рис. 2.3, 2.4) залежно від відносної товщини днища $(S_1 - C)/D$ і відносної довжини лінії контакту опори з днищем l/D .

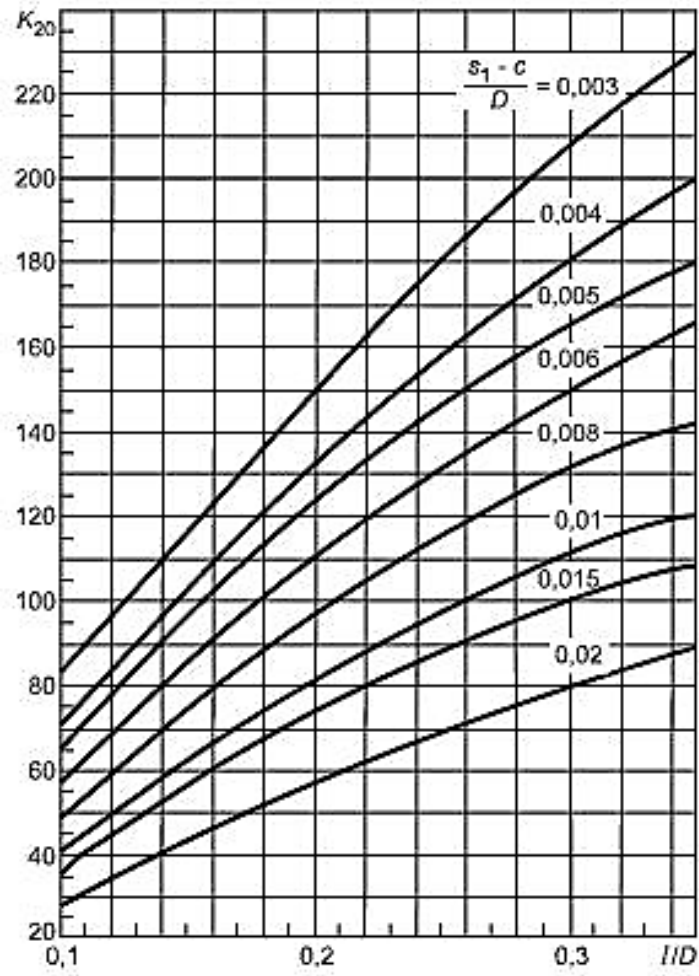


Рис. 2.3. Графіки для визначення коефіцієнта K_{20}

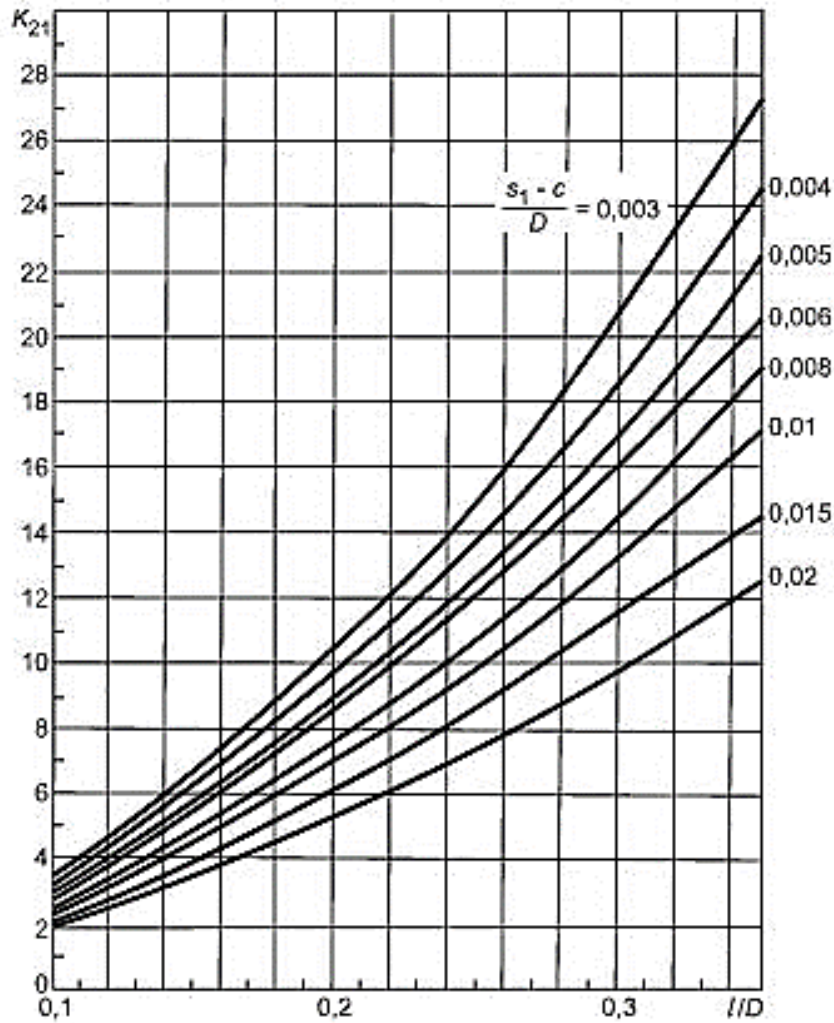


Рис. 2.4. Графіки для визначення коефіцієнта K_{21}

Довжина лінії контакту опори з днищем розраховується за формулою:

$$l = \frac{b_{1max} - K}{\cos\alpha_2}.$$

Допустиме нормальне зусилля, що діє по нормалі до підкріпленого підкладним листом еліптичного днища, обчислюють за формулою:

$$[F]_1 = 0,25K_{20}K_{22}[\sigma](S_1 - C)^2 \left(0,2 + \frac{d_4}{D}\right),$$

де K_{22} – коефіцієнт.

Допустимий згинальний момент для підкріпленого підкладним листом еліптичного днища обчислюють за формулою:

$$[M]_1 = 0,25K_{21}K_{23}[\sigma](S_1 - C)^2D \left(0,2 + \frac{d_4}{D}\right),$$

де K_{23} – коефіцієнт.

Коефіцієнти K_{22} і K_{23} визначають за графіками (рис. 2.5, 2.6).

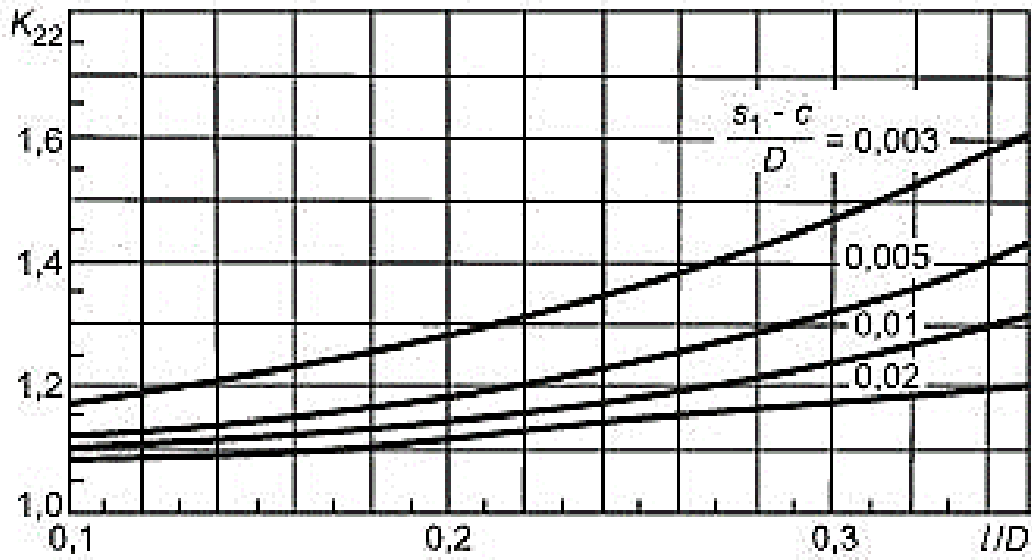


Рис. 2.5. Графіки для визначення коефіцієнта K_{22}

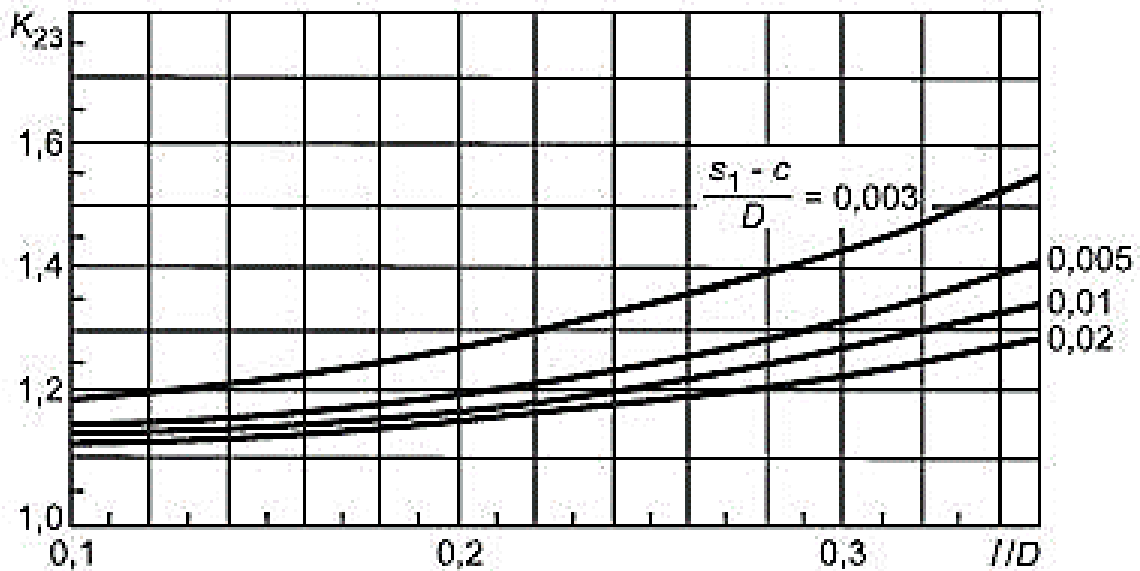


Рис. 2.6. Графіки для визначення коефіцієнта K_{23}

Питання для самоконтролю до розділу 2.3

1. Для якого типу днищ можна перевірити їх несучу спроможність при застосуванні пластинчастих опорних стійок?
2. Навести умову виконання несучої спроможності днища в місці приварювання опорної стійки.
3. Навести відмінності в розрахунках несучої спроможності днищ залежно від типу опорних стійок.

2.4. Алгоритм і приклад розрахунку несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки

Завдання. Перевірити несучу спроможність еліптичного днища вертикального апарата, який опирається на стійки.

Згинальний момент M в перерізі, де розташовані стійки відсутній.

Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини.

Розрахунок виконати для робочих умов.

Основні вихідні дані для розрахунків по варіантам подано у таблицях 1.1 і 1.2. Додаткові вихідні дані наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Додаткові вихідні данні для розрахунку

Варіант	S_1 , м	d_1 , м	d_4 , м	C , м	n	β , град	d_2 , м
1	0,009	0,63	0,70	0,0010	3	25	0,10
2	0,010	0,70	0,78	0,0012	3	25	0,10
3	0,010	0,70	0,78	0,0010	3	25	0,10
4	0,011	0,84	0,90	0,0016	3	25	0,10
5	0,012	0,84	0,90	0,0010	3	25	0,10
6	0,012	0,98	1,10	0,0010	3	25	0,10
7	0,013	0,98	1,10	0,0010	3	25	0,10
8	0,013	1,12	1,24	0,0009	3	25	0,15
9	0,014	1,12	1,24	0,0010	3	25	0,15
10	0,014	1,26	1,40	0,0010	3	25	0,15
11	0,014	1,26	1,40	0,0009	3	25	0,15
12	0,015	1,40	1,55	0,0010	3	25	0,15
13	0,017	1,40	1,55	0,0007	3	25	0,15
14	0,016	1,54	1,72	0,0012	3	25	0,15
15	0,017	1,54	1,72	0,0010	3	25	0,15
16	0,017	1,68	1,90	0,0007	3	25	0,20
17	0,020	1,82	2,04	0,0010	3	25	0,20
18	0,022	1,40	1,55	0,0014	3	25	0,15
19	0,026	1,40	1,55	0,0009	3	25	0,15
20	0,028	1,40	1,55	0,0010	3	25	0,15
Приклад розрахунку	0,008	0,98	1,10	0,0010	3	25	0,10

Таблиця 2.3. Алгоритм і приклад розрахунку несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустимі напруження для матеріалу обичайки $[\sigma]$, МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ для зварених елементів)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150$ °С допустимі напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Умови застосування розрахункових формул	Для торосферичних днищ опорні стійки повинні бути приєднані в області сферичного сегмента, а для еліптичних днищ – в області: $0 < d_4 < 0,8D$. $\left. \begin{array}{l} \frac{G}{4} > \frac{M}{d_4} \text{ для } n = 3, \\ \frac{G}{3} > \frac{M}{0,75d_4} \text{ для } n = 3 \end{array} \right\}$	$0 < 1,10 < 0,8 \cdot 1,4 = 1,12$; $0,055/3 = 0,019 > 0$. Умови застосування розрахункових формул виконуються
3.	Розрахункова сила, яка діє на опорну стійку F_1 , МН	$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{3} + \frac{M}{0,75d_4} \text{ для } n = 3, \\ \frac{G}{2} + \frac{M}{d_4} \text{ для } n = 4. \end{cases}$	$F_1 = 0,055/3 = 0,019$ МН

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
		<p>Для $n = 4$, в разі забезпечення рівномірного розподілу навантаження між усіма опорними стійками (точний монтаж, установка прокладок, підлив бетону і т. ін.):</p> $F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{d_4}$	—
4.	Радіус кривизни серединної поверхні днища у опорного кола r_m , м.	<p>Для еліптичного днища:</p> $r_m = \frac{2D \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$ <p>Для торосферичного днища типу А: $r_m = D$. Для торосферичного днища типу В: $r_m = 0,9D$. Для торосферичного днища типу С: $r_m = 0,8D$.</p>	$r_m = \frac{2 \cdot 1,4 \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{1,1}{1,4}\right)^2}}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{1,1}{1,4}\right)^2}} =$ $= 0,717 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
5.	Кут нахилу меридіанної дотичної у опорного кола α_2 , град	<p>Для еліптичного днища:</p> $\alpha_2 = \arcsin \frac{d_4}{2D \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$ <p>Для торосферичного днища типу А:</p> $\alpha_2 = \arcsin \frac{d_4}{2D}$ <p>Для торосферичного днища типу В:</p> $\alpha_2 = \arcsin \frac{d_4}{1,8D}$ <p>Для торосферичного днища типу С:</p> $\alpha_2 = \arcsin \frac{d_4}{1,6D}$	$\alpha_2 = \arcsin \frac{1,1}{2 \cdot 1,4 \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{1,1}{1,4}\right)^2}} =$ $= 32,5^\circ$
6.	Ефективний діаметр опорної стійки з підкладним листом d_e , м	Для опорних стійок без підкладного листа $d_e = d_2$	$d_e = d_2 = 0.1$ м

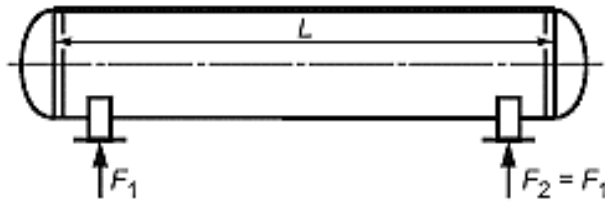
№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Радіус у вершині днища R , м	Для стандартного еліптичного днища: $R = D$. Для торосферичного днища типу А: $R = D_3$. Для торосферичного днища типу В: $R = 0,9D_3$, Для торосферичного днища типу С: $R = 0,8 D_3$.	$R = 1,4$ м
8.	Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$, МПа	$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi(S_1 - C)}{R + 0,5(S_1 - C)}$	$[p] = \frac{2 \cdot 139 \cdot 0,9(0,008 - 0,001)}{1,4 + 0,5(0,008 - 0,001)} = 1,247$ МПа
9.	Допустиме осьове зусилля $[F]_1$, МН	$[F]_1 = 1,57[\sigma](S_1 - C)^2 \frac{\cos\beta}{\cos(\alpha_2 - \beta)} \sqrt{1 + 5 \frac{d_e^2}{r_m(S_1 - C)}}$ $[F]_1 = 1,57 \cdot 139(0,008 - 0,001)^2 \frac{\cos 25^\circ}{\cos(32,5^\circ - 25^\circ)} \sqrt{1 + 5 \frac{0,1^2}{0,717(0,008 - 0,001)}} = 0,0308$ МН	
10.	Умова несучої здатності опуклого днища	$\frac{F_1 - p \frac{\pi d_e^2}{4}}{[F]_1} + \frac{p}{[p]} \leq 1,$ $\frac{F_1}{[F]_1} \leq 1$	$\frac{0,019 - 0,8 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4}}{0,0308} + \frac{0,8}{1,247} = 1,055 > 1;$ $0,019/0,0308 = 0,617 < 1.$ Умова несучої здатності опуклого днища не виконується
Якщо не виконується умова несучої здатності днища, тоді необхідно застосовувати підкладний лист			

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок несучої спроможності випуклого днища при застосуванні циліндричної опорної стійки з підкладним листом			
11.	Діаметр підкладного листа d_3 , м	d_3 обирається з умови $d_3 \leq 1,6 d_2$	Приймаємо $d_3 = 1,4 d_2 = 1,4 \cdot 0,1 = 0,14$ м
12.	Ефективний діаметр опорної стійки з підкладним листом d_e , м	Для опорних стійок з підкладним листом $d_e = d_3$	$d_e = d_3 = 0,14$ м
13.	Допустиме осьове зусилля при наявності підкладного листа $[F]_1$, МН	$[F]_1 = 1,57[\sigma](S_1 - C)^2 \frac{\cos\beta}{\cos(\alpha_2 - \beta)} \sqrt{1 + 5 \frac{d_e^2}{r_m(S_1 - C)}}$ $[F]_1 = 1,57 \cdot 139(0,008 - 0,001)^2 \frac{\cos 25^\circ}{\cos(32,5^\circ - 25^\circ)} \sqrt{1 + 5 \frac{0,14^2}{0,717(0,008 - 0,001)}} = 0,044 \text{ МН}$	
14.	Умова несучої здатності опуклого днища	$\frac{F_1 - p \frac{\pi d_e^2}{4}}{[F]_1} + \frac{p}{[p]} \leq 1,$ $\frac{F_1}{[F]_1} \leq 1$	$\frac{0,019 - 0,8 \frac{3,14 \cdot 0,14^2}{4}}{0,044} + \frac{0,8}{1,247} =$ $= 0,748 < 1;$ $0,019/0,044 = 0,43 < 1.$ <p>Умова несучої здатності опуклого днища виконується</p>
Якщо умова несучої здатності не виконується, тоді треба підібрати підкладний лист більшого розміру			

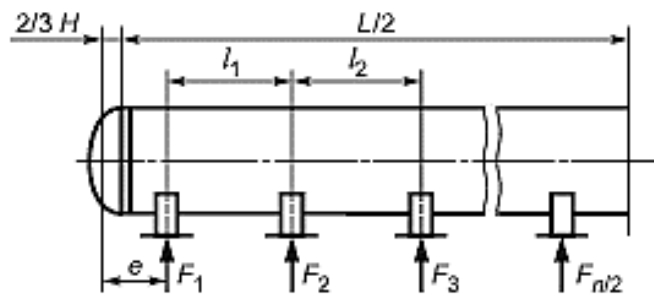
3. СІДЛОВІ ОПОРИ

3.1. Конструкції і застосування сідлових опор

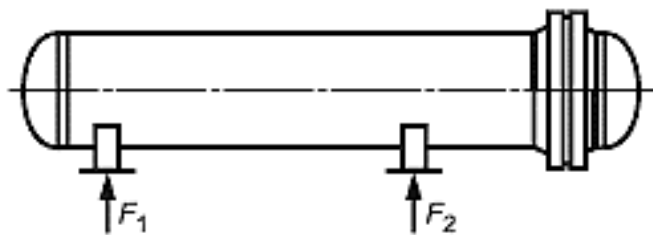
Сідлові опори застосовуються для горизонтальних посудин або апаратів. Кількість сідлових опор визначається розрахунком залежно від довжини і маси посудини. Розрахункові моделі посудин наведені на рис. 3.1.



а



б



в

Рис. 3.1. Розрахункові моделі посудин, що опираються симетрично на 2 опори (а), симетрично на 3 або більше опор (б) і такої, що опирається на опори несиметрично (в)

Одна з опор нерухома (приварна), решта – рухомі (кріпляться болтами, а отвори бід фундаментні болти виконуються овальними). Така конструкція дозволяє посудині вільно подовжуватися при високих температурах.

Відстань між нерухомою та рухомими опорами вибирається така, щоб температурне подовження посудини між суміжними опорами не перевищувала 35 мм.

Регульовальні болти допускають навантаження на одну опору при незаповненій посудині не більше 160 кН.

Зварювання деталей сідлових опор між собою виконується суцільним одностороннім нахлистовим або кутовим двостороннім швом. Зварювання опори суцільним одностороннім швом без підкладного (опорного) листа безпосередньо до корпусу посудини допускається лише для посудин з зовнішніми діаметрами від 159 до 630 мм.

Фундаментні болти рухомої опори повинні мати контргайки і не затягуватися. При цьому зазор між гайкою та опорою має бути 1...2 мм.

Дуже важкі посудини встановлюють на катки, тому що зусилля опору може бути дуже великим.

Питання для самоконтролю до розділу 3.1

1. Коли застосовуються сідлові опори?
2. Навести розрахункові моделі посудин, в яких застосовуються сідлові опори.
3. Обґрунтувати виконання частини сідлових опор рухомими.
4. Як вибирається відстань між нерухомою та рухомими опорами?

3.2. Перевірка несучої спроможності обичайки при застосуванні сідлових опор

Методика розрахунку подана відповідно до ГОСТ 34233.5 [8].

Розрахункові формули застосовні при виконанні умов:

$$60^\circ \leq \delta_1 \leq 180^\circ;$$

$$\frac{S - C}{D} \leq 0,05;$$

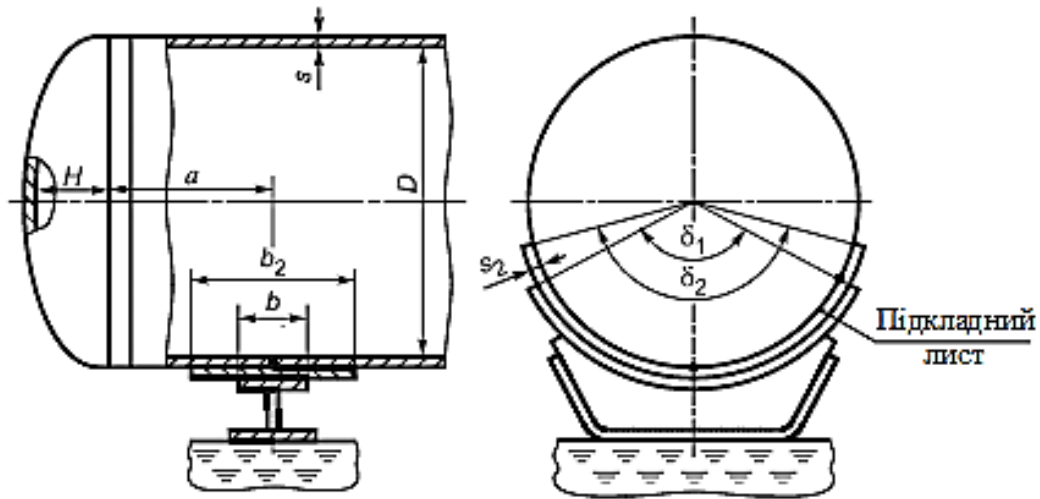
$$S_2 \geq S;$$

$$\delta_2 \geq \delta_1 + 20^\circ;$$

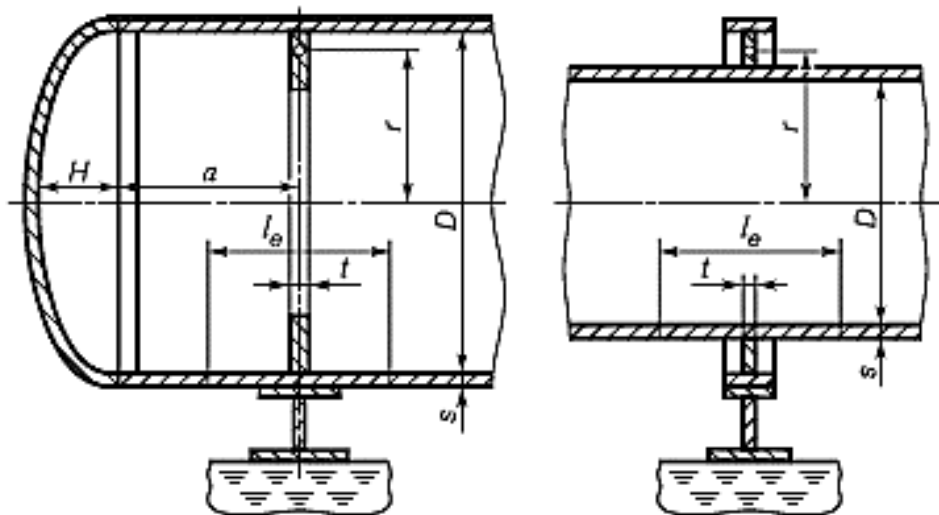
$$A_k \geq (S - C)\sqrt{D(S - C)},$$

де A_k – площа поперечного перерізу кільця жорсткості, м²; δ_1 – кут охоплення сідлової опори, град.; δ_2 – кут охоплення посудини підкладним листом, град. (рис. 3.2).

За основну розрахункову схему для визначення опорних зусиль, моментів і поперечних зусиль приймають балку змінного кільцевого перерізу, шарнірно оперту в місцях розташування опор і навантажену в загальному випадку розподіленими і зосередженими зусиллями залежно від конструкції посудини. Розрахункові зусилля і моменти визначають методами будівельної механіки.



а



б

Рис. 3.2. Циліндрична обичайка не підкріплена кільцями жорсткості (а) і циліндрична обичайка підкріплена кільцями жорсткості (б)

На рис.3.3 подані можливі розрахункові схеми для циліндричної посудини постійного перерізу з еліптичними днищами, симетрично опертої на дві, три і більше опори.

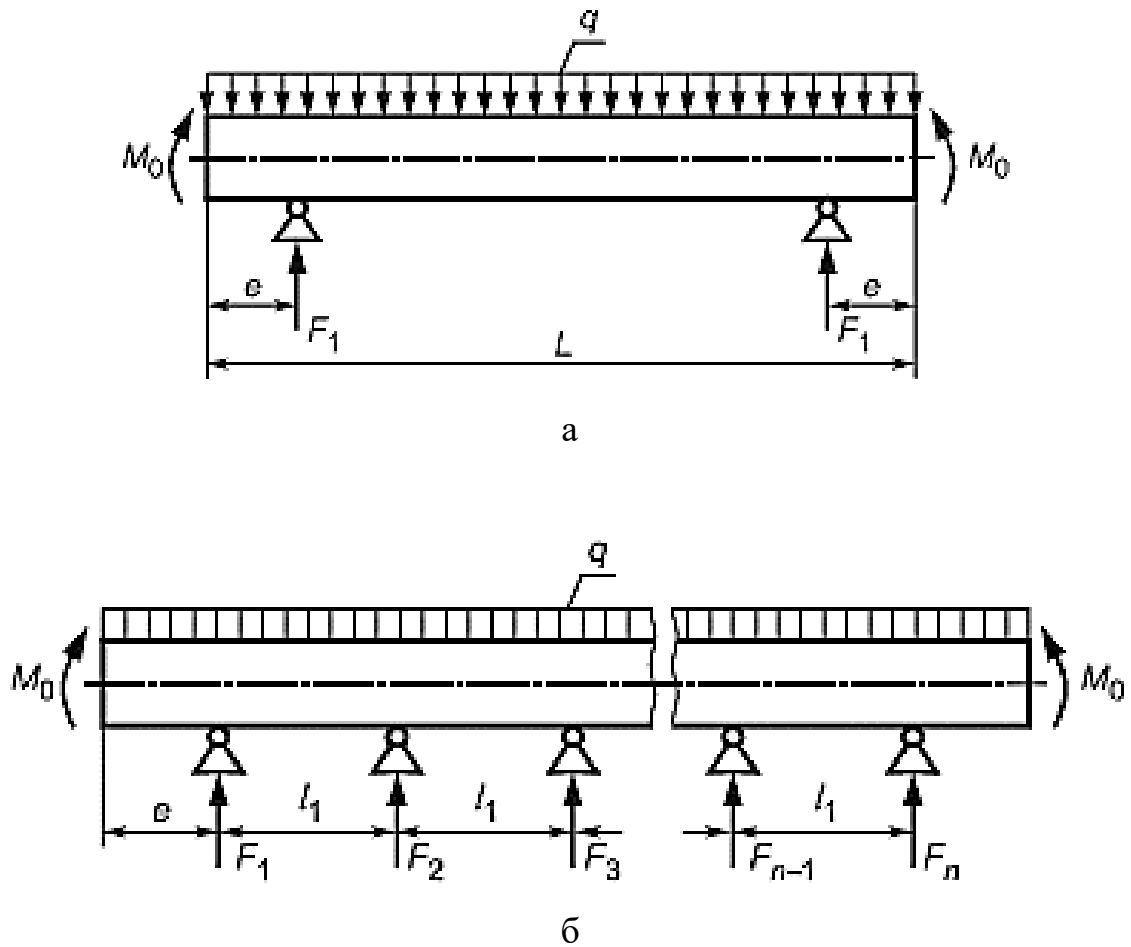


Рис. 3.3. Розрахункові схеми: однопролітна балка (а), багатопролітна балка (б)

Якщо застосовуються симетрично розташовані опори, то навантаження від маси посудини і її вмісту приймають такою, що розподілена рівномірно, навіть якщо одна опора дасть більшу осадку, ніж інша.

Розподілене вагове навантаження для наведеної на рис. 3.3а балки обчислюють за формулою:

$$q = \frac{G}{L + \frac{4}{3}H},$$

де L – довжина циліндричної частини посудини включно з довжиною циліндричної відбортовки днища, м.

Розрахунковий згинальний момент, що діє на консольну частину обичайки:

$$M_0 = q \frac{D^2}{16}.$$

При визначенні M_0 допускається враховувати тільки вагу рідини в посудині без урахування власної маси посудини.

Опорне вертикальне зусилля F_i в загальному випадку визначається методами технічної механіки і враховує сумарну масу посудини і її вмісту. Для симетричних схем розташування опор, наведених на рис. 3.3а, опорне вертикальне зусилля без урахування додаткових зовнішніх сил визначають за формулою:

$$F_i = G/2.$$

Згинальні моменти слід обчислювати в перерізах обичайки над опорами і між опорами, де вони мають найбільші значення.

Поперечні зусилля слід обчислювати в перерізах обичайки над опорами.

У загальному випадку згинальні моменти і поперечні зусилля визначають методами будівельної механіки. Якщо опори розташовані несиметрично (рис. 3.1в), тоді поперечні зусилля слід визначати в перерізах обичайки над опорами по епюрі поперечних зусиль з обох сторін від опори і вибирати найбільші.

Для схеми балки, наведеної на рис. 3.3а опорне зусилля обчислюють за формулою:

$$F_1 = F_2 = G/2;$$

згинальний момент над опорами обчислюють за формулою:

$$M_1 = M_2 = \frac{qe^2}{2} - M_o;$$

максимальний згинальний момент між опорами обчислюють за формулою:

$$M_{12} = M_o + F_1 \left(\frac{L}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \left(\frac{L}{2} + \frac{2}{3}H \right)^2 ;$$

поперечне зусилля в перерізі оболонки над опорою обчислюють за формулою:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{L - 2a}{L + \frac{4}{3}H} F_1,$$

де a – довжина виступаючої циліндричної частини посудини разом з відбортовкою днища, м; e – довжина вільно виступаючої частини еквівалентної посудини, м.

Для схеми балки, наведеної на рис. 3.3б згинальні моменти M_l і M_n над 1-ю і n -ю опорами обчислюють за формулою:

$$M_1 = M_n = \max \left(\frac{qe^2}{2} - M_o; \frac{ql_1^2}{8} \right),$$

згинаючий момент M_i над опорами обчислюють за формулою:

$$M_i = \frac{ql_1^2}{8},$$

поперечне зусилля в перерізі оболонки над опорами розраховують за формулою:

$$Q_i = 0,5F_i,$$

де l_1 – відстань між двома сідловими опорами, м.

Надалі визначають несучу спроможність обичайки, умови міцності і стійкості в перерізі між опорами і в місці розташування опорного вузла. Розрахунок доволі складний з використанням допоміжних параметрів і

коефіцієнтів, застосовний для обичайок без кілець жорсткості і з кільцями жорсткості. Розрахункові формули наведені в ГОСТ 34233.5 [8].

Питання для самоконтролю до розділу 3.2

1. Навести умови проведення перевірки несучої спроможності обичайки під сідловими опорами.
2. Навести розрахункові схеми циліндричної горизонтальної посудини постійного перерізу, які застосовуються для визначення опорних зусиль, моментів і поперечних зусиль.
3. В яких місцях горизонтальної посудини слід визначати несучу спроможність обичайки, умови міцності і стійкості?

4. СТРОПУВАЛЬНІ ВУШКА

4.1. Конструкції стропувальних вушок

Схеми можливого розташування стропувальних вушок наведені на рис. 4.1.

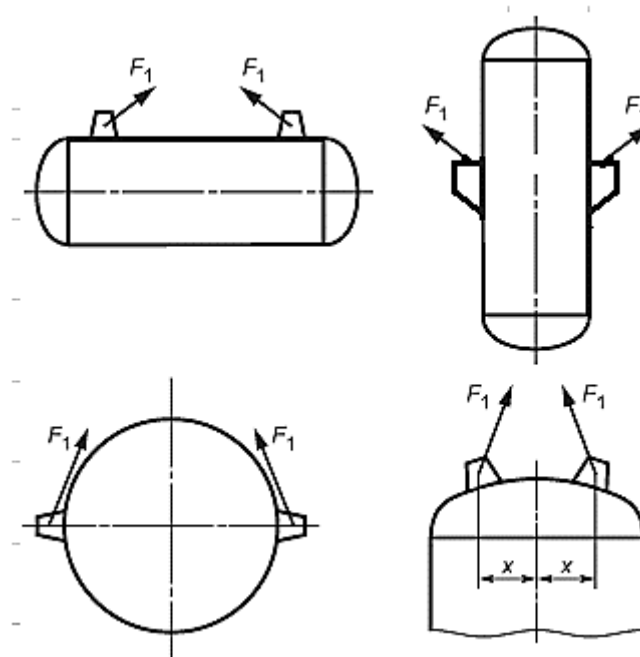


Рис. 4.1. Схеми розташування стропувальних вушок

Стропувальні вушка можуть бути привареними як у меридіанному, так і в окружному напрямках циліндричної обичайки. При цьому обичайка може бути укріплена кільцем жорсткості (рис. 4.2, 4.3).

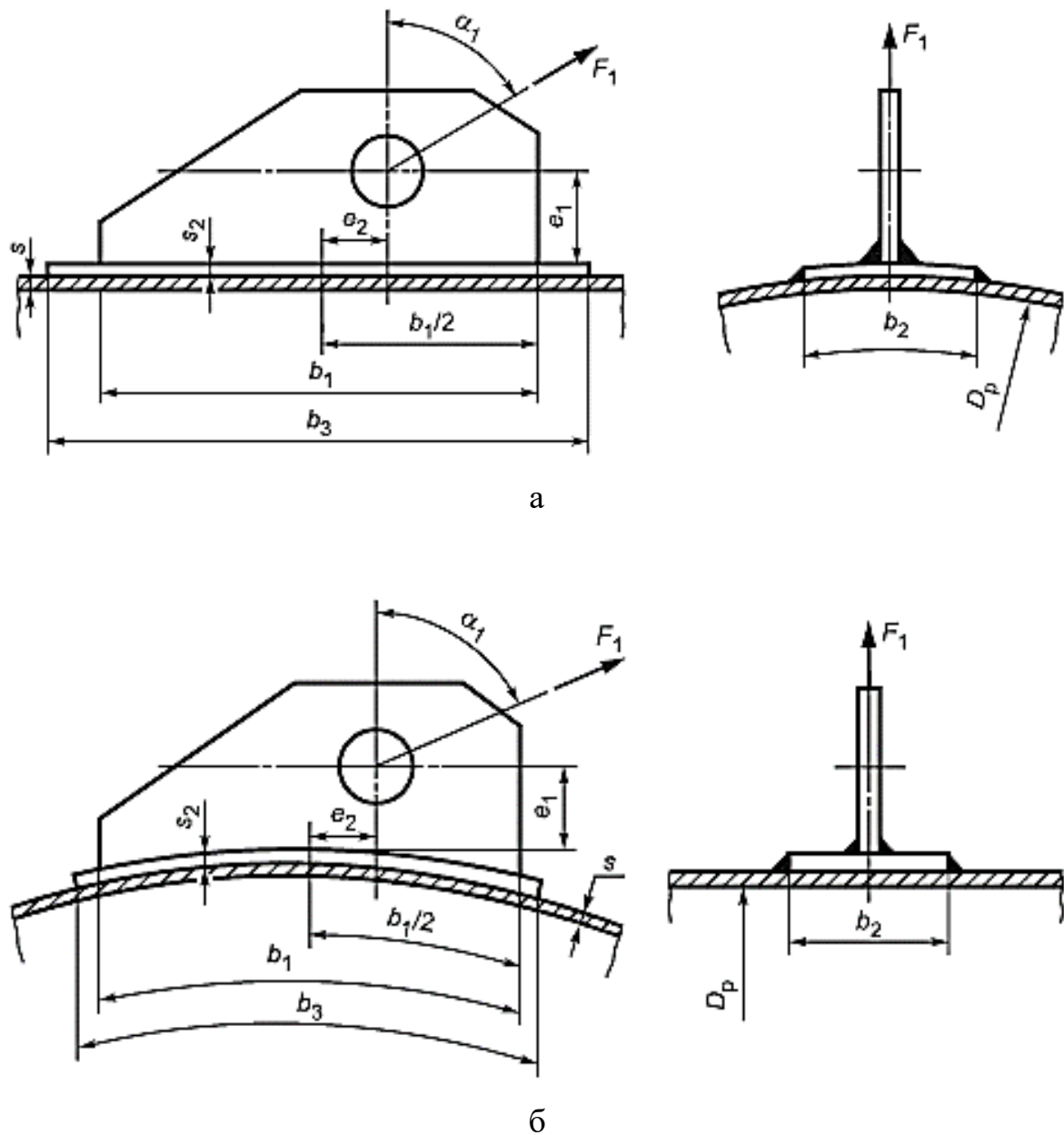


Рис. 4.2. Стропувальне вушко з підкладним кільцем, яке приварене до циліндричної обичайки, що не укріплене кільцем жорсткості у меридіанному напрямку (а) і в окружному напрямку (б)

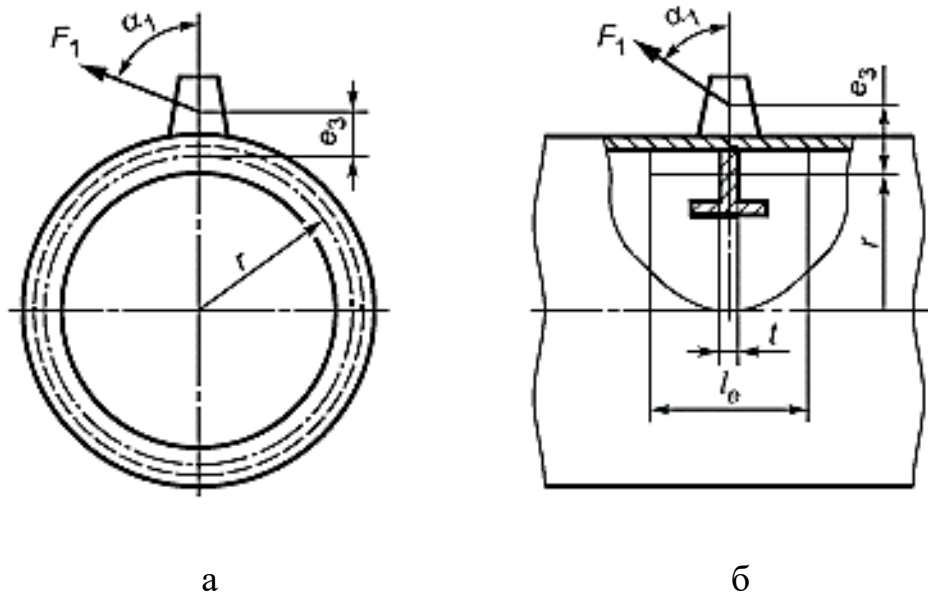


Рис. 4.3. Стропувальне вушко, що приварене до укріпленої кільцем жорсткості циліндричної обичайки в окружному напрямку (а) і у меридіанному напрямку (б)

Питання для самоконтролю до розділу 4.1

1. Навести можливі схеми розташування стропувальних вушок.
2. Обґрунтувати відмінність конструкцій стропувальних вушок залежно від їх розташування.
3. Обґрунтувати застосування підкладних кілець і кілець жорсткості в місцях розташування стропувальних вушок.

4.2. Перевірка несучої спроможності обичайки в місці приварки стропувального вушка

Методика розрахунку подана відповідно до ГОСТ 34233.5 [8].

Умови застосування розрахункових формул:

$$(S - C)/D_p \leq 0,05.$$

При наявності підкладного листа формули застосовні при $b_3 \leq 1,5 b_1$, $S_2 > S$, де b_1 – довжина стропувального вушка в основі, м.

Навантаження F_1 діє в площині стропувального вушка.

До торосферичного днища стропувальне вушко повинне бути приварене на ділянці сферичного сегмента, до еліптичних днищ – на ділянці $0 \leq x \leq 0,4D$.

При визначенні навантаження F_1 для посудин і апаратів з стропувальними вушками вітрові та сейсмічні впливи не враховують.

Розрахунок сили

Навантаження F_1 , що діє на стропувальне вушко, визначають за спеціальними методами розрахунку.

Для симетричної посудини, яка закріплена на двох симетрично розташованих стропувальних вушках, навантаження на вушко обчислюють за формулою:

$$F_1 = \frac{G}{2\cos\alpha_1},$$

де α_1 – кут між напрямком зусилля і нормаллю до стінки обичайки, град.

Перевірка несучої спроможності обичайки, яке не підкріплена елементами жорсткості

Несуча спроможність обичайки в місці приварювання стропувального вушка без підкладного листа повинна задовольняти умові:

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i](S - C)^2}{|6K_3\cos\alpha_1| + \frac{12e_1}{b_1}K_4 \left| \sin\alpha_1 - \frac{e_2}{e_1}\cos\alpha_1 \right|}$$

де e_2 – відстань між віссю отвору і середньої лінією вушка, м; K_3, K_4 – коефіцієнти.

Несуча спроможність обичайки в місці приварювання стропувального вушка з підкладним листом повинна задовольняти умові:

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{K_5[\sigma_i](S - C)^2}{|6K_3 \cos \alpha_1| + \frac{12(e_1 + S_2)}{b_3} K_4 \left| \sin \alpha_1 - \frac{e_2}{e_1 + S_2} \cos \alpha_1 \right|},$$

де K_5 – коефіцієнт.

Граничне напруження вигину в місці кріплення опор:

$$[\sigma_i] = K_1 K_2 [\sigma],$$

де коефіцієнти K_1 і K_2 розраховують за формулами:

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \vartheta_1^2}},$$

$$K_2 = 1,25 \text{ для робочих умов,}$$

$$K_2 = 1,05 \text{ для умов випробувань і монтажу.}$$

Для стропувальних вушок циліндричних і конічних обичайок, які приварені у поздовжньому напрямку:

$$\vartheta_1 = 0,2,$$

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2[\sigma]\varphi},$$

$$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{my},$$

$$\bar{\sigma}_{my} = \frac{pD_p}{2(S - C)}.$$

Для стропувальних вушок циліндричних і конічних обичайок, які приварені у окружному напрямку:

$$\vartheta_1 = 0,3,$$

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2[\sigma]\varphi},$$

$$\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx},$$

для циліндричної обичайки:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S-C)} + \frac{1}{\pi D_p(S-C)} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right),$$

для конічної обичайки:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S-C)} + \frac{1}{\pi D_k(S-C)\cos\alpha} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right).$$

Якщо відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом більша за $\sqrt{D_p S}$, тоді приймають $\varphi = 1$.

Для стропувальних вушок, які приварені до опуклих днищ, розрахунок слід проводити окремо для вушка, привареного уздовж обичайки, і для вушка, привареного в окружному напрямку обичайки, обчислюючи в обох випадках загальне мембранне напруження за формулою:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{pD_p}{2(S-C)}.$$

Для стропувальних вушок, які приварені до опуклих днищ, розрахунок слід проводити окремо для вушка, привареного уздовж обичайки, і для вушка, привареного в окружному напрямку обичайки. Вирішальним буде менше значення $[F]_1$.

Для умов монтажу при відсутності загальних мембранних напружень максимальне напруження вигину приймають:

– для стропувальних вушок, які приварені до циліндричних і конічних обичайок в поздовжньому напрямку $[\sigma_i] = 2,09[\sigma]$;

– для стропувальних вушок, які приварені до опуклим днищ або до циліндричних і конічних обичайок в окружному напрямку $[\sigma_i] = 1,92[\sigma]$.

При $\vartheta_2 < 0$ приймають $\vartheta_2 = |\vartheta_2|$, а знак коефіцієнта ν_1 змінюють на зворотній.

Коефіцієнти K_3, K_4 визначаються за графіками, які наведені на рис. 4.4, 4.5. При цьому за довжину стропувального вушка в місці приварки b_0 приймають:

$b_0 = b_1$ для стропувальних вушок без підкладного листа;

$b_0 = b_3$ для стропувальних вушок з підкладним листом.

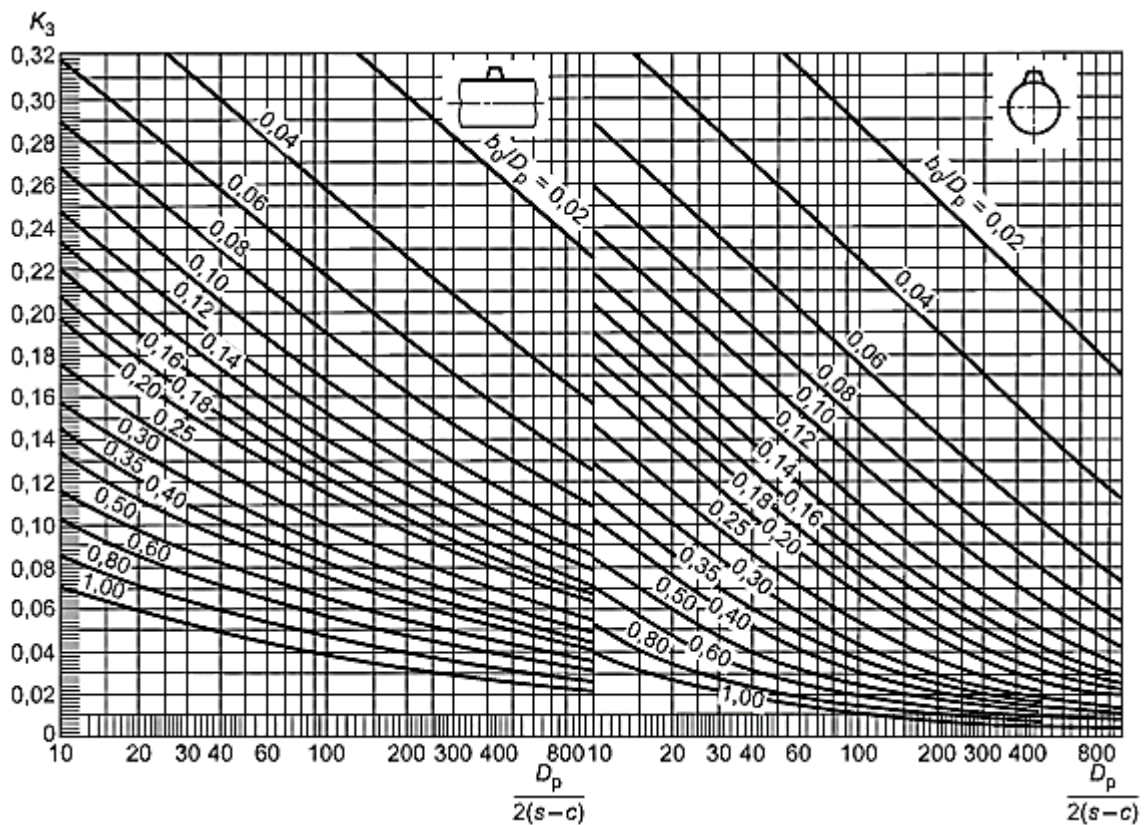


Рис. 4.4. Графіки для визначення коефіцієнта K_3

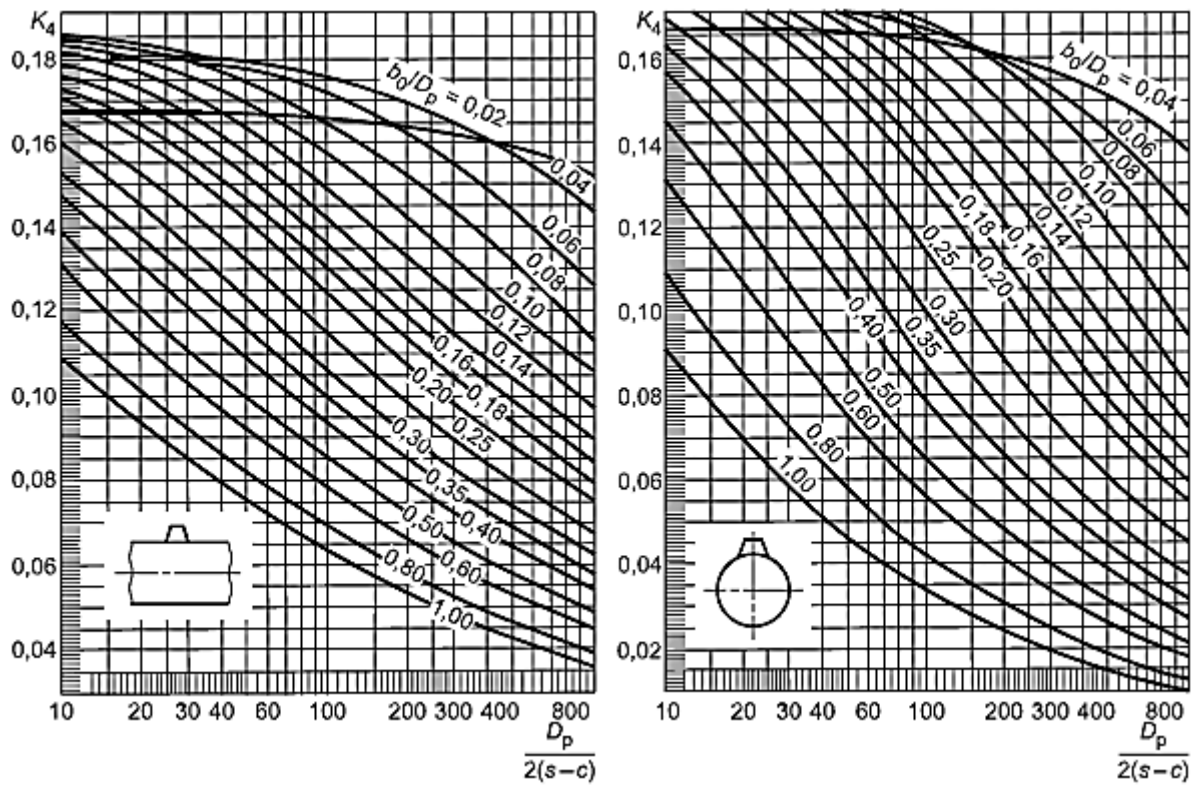


Рис. 4.5. Графіки для визначення коефіцієнта K_4

Коефіцієнт K_5 розраховують за формулами:

– для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку:

$$K_5 = \min\{\exp(1,0882 - 1,4216x + 0,26544 \ln z + 1,11 \ln x) + 1; 2,0\},$$

– для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку:

$$K_5 = \min(\exp(1,0848 - 2,0892x + 0,32775 \ln z + 1,09 \ln x) + 1; 1,8),$$

$$K_5 = \min\{\exp(1,0848 - 2,0892x + 0,32775 \ln z + 1,09 \ln x) + 1; 1,8\},$$

де x і z – параметри для визначення коефіцієнта K_5 , які розраховуються за формулами:

$$x = \frac{2b_2}{D_p}, z = \frac{D_p}{2(S - C)}$$

Перевірка несучої спроможності циліндричної обичайки, підкріпленої кільцем жорсткості, яке розташоване безпосередньо під стропувальним вушком

Ефективна несуча довжина обичайки:

$$l_e = t + 1,1\sqrt{D(S - C)},$$

де t – ширина ділянки кільця жорсткості в місці приварювання до стінки обичайки, м.

Несуча спроможність повинна задовольняти умові:

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{4[\sigma]_к W_1}{K_6 r},$$

де $[\sigma]_к$ – допустиме напруження для матеріалу кільця жорсткості, МПа; W_1 – момент пружного опору кільця жорсткості при згині, м³; r – радіус нейтрального волокна кільця жорсткості, м; K_6 – коефіцієнт.

Коефіцієнт K_6 розраховують за формулами:

– для стропувальних вушок, які приварені до циліндричних і конічних обичайок у поздовжньому напрямку:

$$K_6 = \sqrt{\cos^2 \alpha_1 + \left(\frac{4e_3}{r} \cdot \frac{W_1}{W_к}\right)^2 \sin^2 \alpha_1},$$

– для стропувальних вушок, які приварені до опуклих днищ або до циліндричних і конічних обичайок в окружному напрямку:

$$K_6 = \max \left\{ |\cos \alpha_1| + 2 \frac{e_3}{r} |\sin \alpha_1|; \frac{\left(0,5 + 10 \frac{e_3}{r}\right) |\cos \alpha_1| + |\sin \alpha_1|}{4 + 10 \frac{e_3}{r}} \right\},$$

де e_3 – відстань між точкою докладання зусиль і нейтральної віссю кільця жорсткості, м; $W_к$ – момент пружного опору кільця жорсткості при крученні, м³.

Якщо $[\sigma]_k > [\sigma]$, тоді замість $[\sigma]_k$ підставляють $[\sigma]$.

Питання для самоконтролю до розділу 4.2

1. Навести місця приварки стропувальних вушок до сферичних і еліптичних днищ.
2. Як розраховуються навантаження на стропувальні вушка?
3. Навести особливості перевірки несучої спроможності обичайки залежно від наявності підкладного листа і елементів жорсткості.

4.3. Алгоритм і приклад розрахунку несучої спроможності обичайки в місці приварки стропувального вушка

Завдання. Перевірити несучу спроможність еліптичного днища вертикального апарата в місці приварки стропувального вушка. На днищі симетрично розташовано 2 вушка.

Апарат навантажено внутрішнім надлишковим тиском.

Довжина швів, що контролюються, становить 100 % від загальної довжини.

Відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом менша за $\sqrt{D_p S}$.

Розрахунок виконати для робочих умов.

Основні вихідні дані для розрахунків по варіантам подано у таблицях 1.1 і 1.2.

Додаткові вихідні дані наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Додаткові вихідні данні для розрахунку

Варіант	S_1 , м	C , м	H , м	α_1 , град.	x , м	b_1 , м	e_1 , м	e_2 , м
1	0,009	0,0010	0,225	20	0,36	0,32	0,07	0,06
2	0,010	0,0012	0,25	20	0,40	0,35	0,08	0,07
3	0,010	0,0010	0,25	20	0,40	0,35	0,08	0,07
4	0,011	0,0016	0,30	20	0,48	0,42	0,10	0,08
5	0,012	0,0010	0,30	20	0,48	0,42	0,10	0,08
6	0,012	0,0010	0,35	20	0,56	0,50	0,11	0,09
7	0,013	0,0010	0,35	20	0,56	0,50	0,11	0,09
8	0,013	0,0009	0,40	20	0,64	0,56	0,13	0,10
9	0,014	0,0010	0,40	20	0,64	0,56	0,13	0,10
10	0,014	0,0010	0,45	20	0,72	0,64	0,14	0,12
11	0,014	0,0009	0,45	20	0,72	0,64	0,14	0,12
12	0,015	0,0010	0,50	20	0,80	0,70	0,16	0,13
13	0,017	0,0007	0,50	20	0,80	0,70	0,16	0,13
14	0,016	0,0012	0,55	20	0,88	0,78	0,18	0,14
15	0,017	0,0010	0,55	20	0,88	0,78	0,18	0,14
16	0,017	0,0007	0,60	20	0,96	0,84	0,19	0,16
17	0,020	0,0010	0,60	20	0,96	0,84	0,20	0,17
18	0,022	0,0014	0,50	20	0,80	0,70	0,16	0,13
19	0,026	0,0009	0,50	20	0,80	0,70	0,16	0,13
20	0,028	0,0010	0,50	20	0,80	0,70	0,16	0,13
Приклад розрахунку	0,008	0,0010	0,35	20	0,56	0,50	0,12	0,09

Таблиця 4.2. Алгоритм розрахунку несучої спроможності оболонки в місці приварки стропувального вушка і приклад розрахунку для випадку застосування еліптичного днища

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустимі напруження для матеріалу обичайки $[\sigma]$, МПа	$[\sigma]$ визначають за таблицею А.1 додатка А залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправочний коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ для зварених елементів)	З таблиці А.1 для сталі марки 20 за розрахункової температури $t = 150$ °С допустимі напруження $[\sigma] = 139$ МПа
2.	Розрахунковий діаметр D_p , м	Для циліндричної обичайки: $D_p = D$. Для конічної обичайки: $D_p = D_{\kappa}/\cos\alpha$ Для сферичної оболонки і сферичного сегмента торосферичних днищ: $D_p = R$. Для еліптичного днища: $D_p = \frac{D^2}{4H} \sqrt{1 - 4x^2 \frac{(D^2 - 4H^2)}{D^4}}$	$D_p = \frac{1,4^2}{4 \cdot 0,35} \sqrt{1 - 4 \cdot 0,56^2 \frac{1,4^2 - 4 \cdot 0,35^2}{1,4^4}} = 1,01 \text{ м}$
3.	Умови застосування розрахункових формул	$(S - C)/D_p \leq 0,05$, $0 \leq x \leq 0,4D$. Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_I .	$(0,008 - 0,001)1,01 = 0,00707 < 0,05$; $x = 0,56 \text{ м}$; $0,4 \cdot 1,4 = 0,56 \text{ м}$ $0 < x = 0,56 \text{ м}$ Умови застосування розрахункових формул виконуються

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4.	Навантаження F_1 , МН	Для симетричної посудини, яка закріплена на двох симетрично розташованих стропувальних вушках: $F_1 = \frac{G}{2\cos\alpha_1}$	$F_1 = \frac{0,055}{2 \cdot \cos 20^\circ} = 0,0293 \text{ МН}$
5.	Загальне мембранне напруження $\bar{\sigma}_m$, МПа	Для стропувальних вушок циліндричних і конічних обичайок, які приварені у поздовжньому напрямку: $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{my}$, $\bar{\sigma}_{my} = \frac{pD_p}{2(S - C)}$ Для стропувальних вушок циліндричних і конічних обичайок, які приварені у окружному напрямку: $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx}$, для циліндричної обичайки: $\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S - C)} + \frac{1}{\pi D_p(S - C)} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right)$ для конічної обичайки: $\bar{\sigma}_{mx} = \frac{pD_p}{4(S - C)} + \frac{1}{\pi D_k(S - C)\cos\alpha} \left(F \pm \frac{4M}{D_p} \right)$ Для стропувальних вушок, які приварені до опуклих днищ: $\bar{\sigma}_m = \frac{pD_p}{2(S - C)}$	Для опуклих днищ замість S підставляємо S_1 . $\bar{\sigma}_m = \frac{0,8 \cdot 1,01}{2(0,008 - 0,001)} = 57,71 \text{ МПа}$
6.	Коефіцієнт K_2	$K_2 = 1,25$ для робочих умов, $K_2 = 1,05$ для умов випробувань і монтажу.	$K_2 = 1,25$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Коефіцієнт міцності зварних швів обичайки в області опорного вузла φ	φ визначають за таблицею В.1 додатка В залежно від виду зварного шва та довжини швів, що контролюються. Якщо відстань між опорним вузлом і найближчим зварним швом більша за $\sqrt{D_p S}$, тоді приймають $\varphi = 1$.	Для стикового шва, що виконується вручну з одного боку, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини $\varphi = 0,9$
8.	Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними мембранними напруженнями ϑ_2	$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2[\sigma]\varphi}$ При $\vartheta_2 < 0$ приймають $\vartheta_2 = \vartheta_2 $, а знак коефіцієнта ϑ_1 змінюють на зворотній.	$\vartheta_2 = \frac{57,71}{1,25 \cdot 139 \cdot 0,9} = 0,37$
9.	Коефіцієнт, який являє собою відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напружень вигину ϑ_1	Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку: $\vartheta_{1п} = 0,2$, якщо за попередньою формулою отримали $\nu_2 \geq 0$; $\vartheta_{1п} = -0,2$, якщо за попередньою формулою отримали $\vartheta_2 < 0$. Для стропувальних вушок, які приварені у окружному напрямку: $\vartheta_{1о} = 0,3$, якщо за попередньою формулою отримали $\vartheta_2 \geq 0$; $\vartheta_{1о} = -0,3$, якщо за попередньою формулою отримали $\vartheta_2 < 0$.	$\vartheta_{1п} = 0,2,$ $\vartheta_{1о} = 0,3$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
10.	Коефіцієнт K_I	<p>Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку:</p> $K_{1n} = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_{1n}\vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_{1n}\vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2)\vartheta_{1n}^2}}$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку:</p> $K_{1o} = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_{1o}\vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_{1o}\vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2)\vartheta_{1o}^2}}$	$K_{1n} = \frac{1 - 0,37^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,2 \cdot 0,37\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + 0,2 \cdot 0,37\right)^2 + (1 - 0,37^2)0,2^2}} =$ $= 1,01$ $K_{1o} = \frac{1 - 0,37^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,37\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,37\right)^2 + (1 - 0,37^2)0,3^2}} =$ $= 0,89$
11.	Граничне напруження вигину в місці кріплення опор $[\sigma_i]$, МПа	<p>Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку (робочі умови):</p> $[\sigma_i]_n = K_{1n}K_2[\sigma].$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку (робочі умови):</p> $[\sigma_i]_o = K_{1o}K_2[\sigma].$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку (монтаж):</p> $[\sigma_i]_n = 2,09[\sigma].$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку (монтаж):</p> $[\sigma_i]_o = 1,92[\sigma].$	$[\sigma_i]_n = 1,01 \cdot 1,25 \cdot 139 = 175,48 \text{ МПа,}$ $[\sigma_i]_o = 0,89 \cdot 1,25 \cdot 139 = 154,63 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
12.	Довжина стропувального вушка в місці приварки b_0 , м	$b_0 = b_1$ для стропувальних вушок без підкладного листа	$b_0 = 0,5$ м
13.	Коефіцієнт K_3	Коефіцієнт K_3 визначаються за графіками (рис. 4.4) залежно від b_0/D_p , $D_p/[2(S-C)]$ і розташування стропувальних вушок. Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_l .	$b_0/D_p = 0,5/1,01 = 0,495$; $D_p/[2(S_l-C)] = 1,01/[2(0,008 - 0,001)] = 72,14$. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку $K_{3n} = 0,072$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку $K_{3o} = 0,03$.
14.	Коефіцієнт K_4	Коефіцієнт K_4 визначаються за графіками (рис. 4.5) залежно від b_0/D_p , $D_p/[2(S-C)]$ і розташування стропувальних вушок. Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_l .	$b_0/D_p = 0,5/1,01 = 0,495$; $D_p/[2(S_l-C)] = 1,01/[2(0,008 - 0,001)] = 72,14$. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку $K_{4n} = 0,093$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку $K_{4o} = 0,076$.

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
15.	Допустиме опорне зусилля на стропувальне вушко $[F]_1$, МН	$[F]_1 = \frac{[\sigma_i](S - C)^2}{ 6K_3 \cos \alpha_1 + \frac{12e_1}{b_1} K_4 \left \sin \alpha_1 - \frac{e_2}{e_1} \cos \alpha_1 \right }$ <p>Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_I. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку: $[\sigma_i] = [\sigma_i]_n, K_3 = K_{3n}, K_4 = K_{4n}$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку: $[\sigma_i] = [\sigma_i]_o, K_3 = K_{3o}, K_4 = K_{4o}$.</p> <p>Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку:</p> $[F]_{1n} = \frac{175,48(0,008 - 0,001)^2}{ 6 \cdot 0,072 \cos 20^\circ + \frac{12 \cdot 0,12}{0,5} 0,093 \left \sin 20^\circ - \frac{0,09}{0,12} \cos 20^\circ \right } = 0,017 \text{ МН.}$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку:</p> $[F]_{1o} = \frac{154,63(0,008 - 0,001)^2}{ 6 \cdot 0,03 \cos 20^\circ + \frac{12 \cdot 0,12}{0,5} 0,076 \left \sin 20^\circ - \frac{0,09}{0,12} \cos 20^\circ \right } = 0,03 \text{ МН}$	
16.	Умова несучої спроможності	$F_l \leq \min \{ [F]_{1n}; [F]_{1o} \}$	$\min \{ 0,017; 0,03 \} = 0,017 \text{ МН};$ $0,0293 \text{ МН} > 0,017 \text{ МН}.$ Умова несучої спроможності не виконується
Якщо не виконується умова несучої спроможності днища, тоді необхідно застосовувати підкладний лист			

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок несучої спроможності оболонки з підкладним листом в місці приварки стропувального вушка			
17.	Довжина підкладного листа b_3 , м	b_3 вибирають з умови $b_3 \leq 1,5 b_1$	Приймаємо $b_3 = 1,3 b_1 = 1,3 \cdot 0,5 = 0,65$ м
18.	Ширина підкладного листа b_2 , м	b_2 обирають з конструктивних міркувань	Приймаємо $b_2 = 0,1$ м
19.	Виконавча товщина підкладного листа S_2 , м	S_2 вибирають з умови $S_2 > S$. Для опуклих днищ замість S підставляємо S_1 .	Приймаємо $S_2 = 0,01$ м $> 0,008$ м
20.	Довжина стропувального вушка в місці приварки b_0 , м	$b_0 = b_3$ для стропувальних вушок з підкладним листом	$b_0 = 0,65$ м
21.	Коефіцієнт K_3	Коефіцієнт K_3 визначаються за графіками (рис. 4.4) залежно від b_0/D_p , $D_p/[2(S - C)]$ і розташування стропувальних вушок. Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_1 .	$b_0/D_p = 0,65/1,01 = 0,64$; $D_p/[2(S_1 - C)] = 1,01/[2(0,01 - 0,001)] = 56,11$. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку $K_{3n} = 0,064$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку $K_{3o} = 0,026$.

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
22.	Коефіцієнт K_4	Коефіцієнт K_4 визначаються за графіками (рис. 4.5) залежно від b_0/D_p , $D_p/[2(S-C)]$ і розташування стропувальних вушок. Для опуклих днищ замість S підставляємо S_l .	$b_0/D_p = 0,65/1,01 = 0,64$; $D_p/[2(S_l - C)] = 1,01/[2(0,01 - 0,001)] = 56,11$. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку $K_{4n} = 0,088$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку $K_{4o} = 0,07$.
23.	Параметр x	$x = 2b_2/D_p$	$x = 2 \cdot 0,1/1,01 = 0,198$
24.	Параметр z	$z = D_p/[2(S-C)]$. Для опуклих днищ замість S підставляємо S_l .	$z = 1,01/[2(0,01 - 0,001)] = 56,11$
25.	Коефіцієнт K_5	Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку: $K_{5n} = \min\{\exp(1,0882 - 1,4216x + 0,26544 \ln z + 1,11 \ln x) + 1; 2,0\}$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку: $K_{5o} = \min\{\exp(1,0848 - 2,0892x + 0,32775 \ln z + 1,09 \ln x) + 1; 1,8\}$.	
		$K_{5n} = \min\{\exp(1,0882 - 1,4216 \cdot 0,198 + 0,26544 \ln 56,11 + 1,11 \ln 0,198) + 1; 2,0\} = \min\{2,08; 2,0\} = 2,0$. $K_{5o} = \min\{\exp(1,0848 - 2,0892 \cdot 0,198 + 0,32775 \ln 56,11 + 1,09 \ln 0,198) + 1; 1,8\} = \min\{2,25; 1,8\} = 1,8$.	

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
26.	Допустиме опорне зусилля на стропувальне вушко $[F]_1$, МН	$[F]_1 = \frac{K_5[\sigma_i](S - C)^2}{ 6K_3 \cos \alpha_1 + \frac{12(e_1 + S_2)}{b_3} K_4 \left \sin \alpha_1 - \frac{e_2}{e_1 + S_2} \cos \alpha_1 \right }$ <p>Для опуклих днищ у формули замість S підставляємо S_l. Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку: $[\sigma_i] = [\sigma_i]_n, K_3 = K_{3n}, K_4 = K_{4n}, K_5 = K_{5n}$. Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку: $[\sigma_i] = [\sigma_i]_o, K_3 = K_{3o}, K_4 = K_{4o}, K_5 = K_{5o}$.</p>	<p>Для стропувальних вушок, які приварені у поздовжньому напрямку:</p> $[F]_{1n} = \frac{2 \cdot 175,48(0,008 - 0,001)^2}{ 6 \cdot 0,064 \cos 20^\circ + \frac{12(0,12 + 0,01)}{0,65} 0,088 \left \sin 20^\circ - \frac{0,09}{0,12 + 0,01} \cos 20^\circ \right } = 0,04 \text{ МН.}$ <p>Для стропувальних вушок, які приварені в окружному напрямку:</p> $[F]_{1o} = \frac{1,8 \cdot 175,48(0,008 - 0,001)^2}{ 6 \cdot 0,026 \cos 20^\circ + \frac{12(0,12 + 0,01)}{0,65} 0,07 \left \sin 20^\circ - \frac{0,09}{0,12 + 0,01} \cos 20^\circ \right } = 0,077 \text{ МН.}$
27.	Умова несучої спроможності	$F_l \leq \min \{[F]_{1n}; [F]_{1o}\}$	$\min \{0,04; 0,077\} = 0,04 \text{ МН};$ $0,0293 \text{ МН} < 0,04 \text{ МН}.$ Умова несучої спроможності виконується
Якщо умова несучої спроможності не виконується, тоді треба підібрати підкладний лист більшого розміру			

5. ОПОРНІ ОБИЧАЙКИ

Для колонних апаратів, як найбільш важких, а також для апаратів з співвідношенням висоти до діаметра не менше 5 при установках на відкритих майданчиках використовують суцільні опори – циліндричні або конічні обичайки (рис. 5.1).

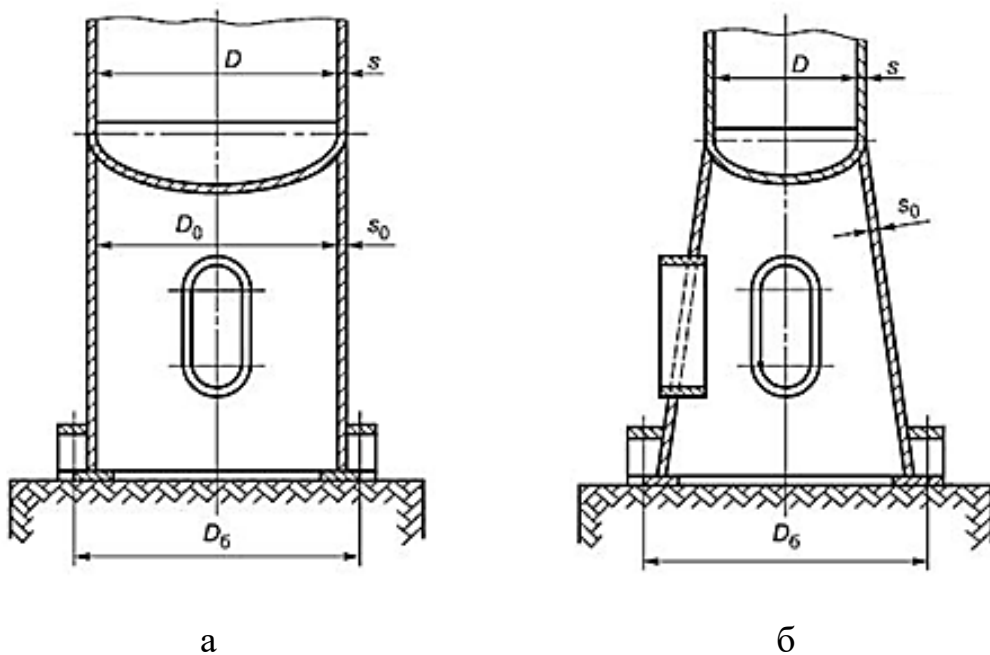


Рис. 5.1. Опорні обичайки: циліндрична (а); конічна (б)

Висота циліндричних опор повинна бути не менше 0,6 метрів, вона добирається за умовами експлуатації апарата і може досягати 3 метрів.

Конічні опори використовуються для високих апаратів невеликого діаметра (менше 1 м) коли співвідношення висоти апарата до його діаметра більше 10. Така конструкція надає апаратам стійкість і знижує напруження на опорну поверхню фундаментного кільця. Для запобігання перекиданню використовують розтяжки під кутом 120° .

Опорна обичайка приварюється до корпусу колони. Якщо днище колони зварене з окремих частин, тоді в опорній обичайці повинні бути передбачені вирізи, що перешкоджають перетинанню швів (шва, що з'єднує

опору з корпусом зі зварними меридіанними швами на днищі). В цьому випадку вентиляційні отвори не виконуються. При телескопічному з'єднанні опори з корпусом (рис. 5.2) відстань між зварним швом і кільцевим зварним швом приварки днища до обичайки колони приймається не менше $1,6S_1 \dots 1,6 \cdot 10^{-2}$ м при товщині днища $S_1 < 0,03$ м, а при $S_1 \geq 0,03$ м ця відстань повинна дорівнювати $0,6S_1 + 4,8 \cdot 10^{-2}$ м. Якщо діаметри опорної обичайки і колони однакові, тоді можна полегшити виготовлення днища через зменшення висоти циліндричного борта, а також спростити збірку опори з днищем.

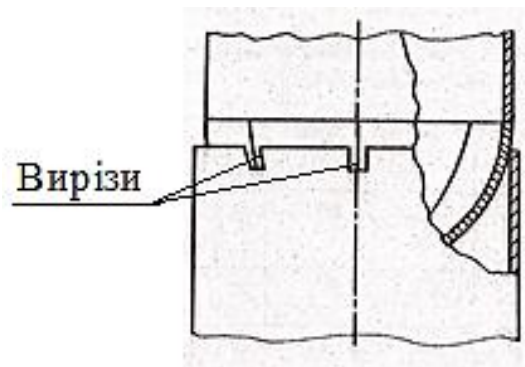


Рис. 5.2. Варіант виконання з'єднання опорної обичайки з корпусом колони

В опорній обичайці виконуються 1 чи 2 лази, отвори для відведення трубопроводів, у верхній частині – не менше двох вентиляційних отворів діаметром не більше 0,1 м для виведення газів, які збираються при недостатній герметичності трубопроводів.

Для зменшення температурних напружень в місці з'єднання опори до корпусу опорну обичайку зовні ізолюють до лап, а з середини – звичайно тільки верхню частину. Це дозволяє знизити температурний перепад поміж опорою і днищем колони.

Діаметр отворів під анкерні болти в опорному вузлі приймають в 1,5 рази більше, ніж діаметр болтів при наявності підкладних шайб під гайки.

Для полегшення монтажу апарата отвори під анкерні болти роблять у вигляді подовжених пазів.

Конструкції опорних вузлів наведені на рис. 5.3.

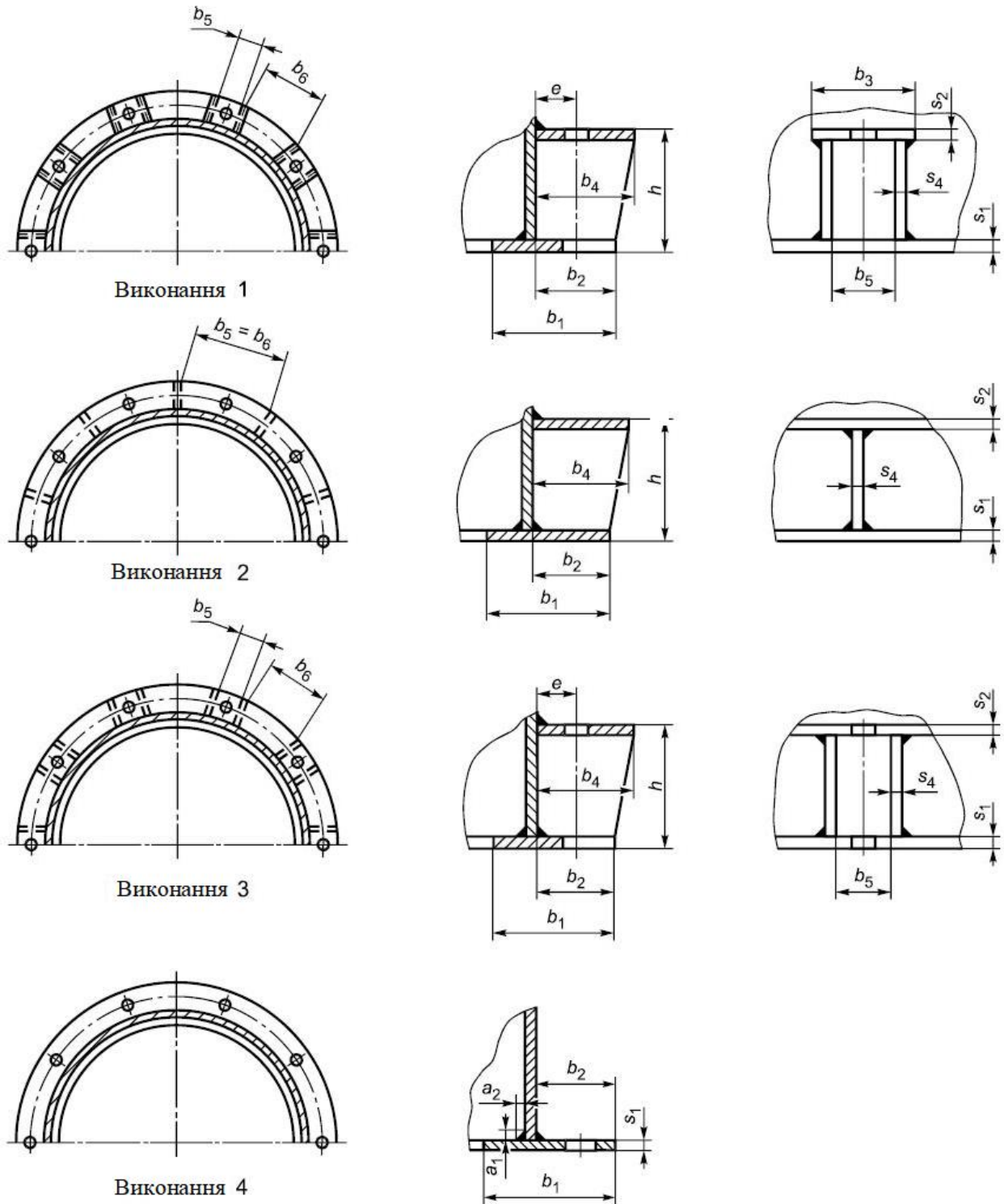


Рис. 5.3. Конструкції опорних вузлів

Матеріал деталей опор вибирається з умов експлуатації. У таблиці 5.1, яка кладена за даними довідника [10] наведені сталі, які можна рекомендувати для опор залежно від температури робочого середовища та найхолоднішої п'ятиденки.

Таблиця 5.1. Матеріал опорних обичайок

Середня температура найхолоднішої п'ятиденки, °С	Температура робочого середовища в колоні, °С	Марка сталі
– 30	Від – 30 до 350	Ст3кп, Ст3сп, Ст3пс ГОСТ 380
– 40	Від – 40 до 350	20 ГОСТ 1050
– 40	Від – 40 до 450	16ГС ГОСТ 5520

Вибрану марку матеріалу необхідно перевіряти на відповідність до діючих нормативних характеристик.

Для анкерних болтів використовують сталі Ст3сп, Ст3пс за ГОСТ 380 і 16ГС за ГОСТ 5520.

Перевірку опорної обичайки на міцність і стійкість, а також розрахунок елементів опорного вузла слід проводити для робочих умов і умов випробування. Методика і приклад розрахунку наведені в посібнику [6].

Питання для самоконтролю до розділу 5

1. Коли застосовуються опорні обичайки?
2. Обґрунтувати застосування циліндричних і конічних опор.
3. Навести особливості проектування опорних обичайок.
4. Навести конструкції опорних вузлів.
5. Яким чином треба вибирати матеріал деталей опор?

ДОДАТКИ

Додаток А. Допустимі напруження сталей

Властивості конструкційних матеріалів подані за ГОСТ 34233.1–2017.

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

*Для розрахункової температури стінки 425 °С.

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

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

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

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

Таблиця А.2. Допустимі напруження для теплостійких хромомолібденових сталей

Розрахункова температура стінки, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа для сталей марок											
	12ХМ		12МХ		15ХМ		15Х5М		15Х5М-У		10Х2М1А-А	
	Розрахунковий ресурс, год.											
	10 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	116	100	120	107
490	105	89	105	89	107	91	83	70	114	97	104	93
500	96	72	96	72	99	74	79	59	108	81	88	78
510	82	61	82	61	84	63	72	54	97	73	80	71
520	69	52	69	52	74	55	66	50	85	64	70	62
530	60	45	57	43	67	50	60	45	72	54	60	53
540	50	37	47	35	57	43	54	40	58	43	52	45
550	41	31	–	–	49	37	47	35	52	39	45	38
560	33	25	–	–	41	31	40	30	45	34	38	33
570	–	–	–	–	–	–	35	26	40	30	32	27
580	–	–	–	–	–	–	30	22	34	25	27	23
590	–	–	–	–	–	–	28	21	30	22	24	20
600	–	–	–	–	–	–	25	19	25	19	19	16
610	–	–	–	–	–	–	20	15	20	15	17	–
620	–	–	–	–	–	–	18	13	18	13	14	–
630	–	–	–	–	–	–	17	12	17	12	11	–
640	–	–	–	–	–	–	16	11	16	11	10	–
650	–	–	–	–	–	–	14	10	14	10	9	–

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

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

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

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

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа для сталей марок							
	03X21H21M4ГБ	03X18H11	03X17H14M3	08X18H10T, 08X18H12T, 08X17H13M2T, 08X17H15M3T		12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T		10X14Г14Н4Т
				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 до таблиці А3 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 А.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 марок					
	08X18Г8Н2Т	07X13АГ20	02X8Н22С6	15X18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	08X22Н6Т, 08X21Н6М2Т
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 А.5. Допустимі напруження для алюмінію і його сплавів

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

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

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

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

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

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

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

2. Допустимі напруження наведені для товщин листів від 3 до 10 мм.
3. Для проміжних значень розрахункових температур стінки допустимі напруження визначають лінійною інтерполяцією з округленням результатів до 0,1 МПа у бік меншого значення.

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

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

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

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

Додаток Б. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу

Таблиця Б.1. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу за

ГОСТ 34233.1–2017

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

Додаток В. Коефіцієнти міцності зварних швів

Таблиця В.1. Коефіцієнти міцності зварних швів за ГОСТ 34233.1–2017

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском: навч. посіб. Київ: “Видавництво «Політехніка»”, 2011. 272 с.
2. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання і надійність обладнання хімічних виробництв: термінологічний словник. Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 216 с.
3. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонок І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1999. 148 с.
4. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 121 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23885>.
5. Андреев І. А. Роз’ємні міцно-щільні з’єднання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 138 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35927>.
6. Андреев Ігор. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38716>.
7. Андреев Ігор. Укріплення отворів в посудинах та апаратах: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42254>.
8. ГОСТ 34233.5-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.

(Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2019. 33 с.

9. 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.

10. Лацинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов: справочник. Ленинград: Машиностроение, 1981. 382 с.