

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

**Ігор АНДРЕЄВ**

## **РОЗРАХУНОК КОЛОННИХ АПАРАТІВ НА МІЦНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ**

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

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

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

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

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 5 від 14.01.2021 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 10 від 21.12.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

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

## **РОЗРАХУНОК КОЛОННИХ АПАРАТІВ НА МІЦНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ**

Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньо-професійної програми «Обладнання хімічних, нафтопереробних та целюлозно-паперових виробництв» / І. А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 4,53 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 112 с.

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

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ .....</b>	<b>14</b>
<b>2. РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ОСНОВНИХ ТИПІВ СУДИН І АПАРАТІВ.....</b>	<b>17</b>
<b>3. ВІТРОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКЕ ДІЄ НА КОЛОННИЙ АПАРАТ .....</b>	<b>19</b>
<b>4. РЕЗОНАНСНЕ ВИХРОВЕ ЗБУДЖЕННЯ .....</b>	<b>29</b>
<b>5. РОЗРАХУНКОВІ ЗУСИЛЛЯ ВІД СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ .....</b>	<b>31</b>
<b>6. РОЗРАХУНОК КОЛОННОГО АПАРАТА НА МІЦНІСТЬ .....</b>	<b>32</b>
<b>7. ПЕРЕВІРКА СТІЙКОСТІ КОЛОНИ.....</b>	<b>39</b>
<b>8. ОПОРНА ОБИЧАЙКА.....</b>	<b>48</b>
<b>9. АЛГОРИТМ І ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОЛОННОГО АПАРАТА .....</b>	<b>64</b>
<b>Додаток А. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу.....</b>	<b>108</b>
<b>Додаток Б. Допустимі напруження сталей .....</b>	<b>109</b>
<b>Додаток В. Мінімальні значення умовної границі плинності.....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>111</b>

## ВСТУП

Колоні апарати призначені для здійснення процесів ректифікації, абсорбції, адсорбції, екстракції і т. ін.

За способом організації контакту фаз колоні апарати підрозділяються на насадкові, тарілчасті і плівкові.

Корпуси апаратів, які мають діаметр більше 1200 мм і працюють при великих тисках, виконують суцільнозварними. Апарати діаметром 400...1000 мм виконують такими, що складаються з окремих царг.

При проектуванні колонних апаратів необхідно враховувати також умови експлуатації обладнання. Властивості конструкційного матеріалу під впливом процесів, які здійснюються в колоні, можуть змінюватися, а якщо невірно вибраний матеріал обладнання, тоді можуть з'являтися нові шкідливі речовини. Перелічені особливості зумовлюють специфічні вимоги до конструювання, розрахунку, виготовлення, випробування і експлуатації обладнання.

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

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

Основні стандартизовані терміни і визначення, вимоги до конструювання і виготовлення обладнання та окремих елементів,

класифікація сталей і чавунів та їх застосування, методики визначення допустимих напружень і нормативних параметрів, основи безмоментної теорії розрахунку, а також розрахунки на міцність елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під дією внутрішнього і зовнішнього тисків наведено у попередніх роботах [1–5].

## ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$A$  – площа найбільш ослабленого поперечного перерізу,  $\text{м}^2$ ;

$A_j$  – площа, обмежена контуром для  $j$ -ї площадки,  $\text{м}^2$ ;

$A_6$  – площа поперечного перерізу фундаментного болта по внутрішньому діаметру різьби,  $\text{м}^2$ ;

$a$  – катет зварного шва в місці приварювання опорної обичайки до корпусу, м;

$a_1$  – катет зварного шва по опорній обичайці в місці приварювання до нижнього опорного кільця, м;

$a_2$  – катет зварного шва по нижньому опорному кільцю в місці приварювання опорної обичайки, м;

$B_1$  – коефіцієнт;

$b_1$  – ширина нижнього опорного кільця, м;

$b_2$  – виступаюча ширина нижнього опорного кільця, м;

$b_3$  – довжина верхнього опорного елемента, м;

$b_4$  – виступаюча ширина верхнього опорного елемента, м;

$b_5$  – мінімальна відстань між двома суміжними ребрами, м;

$b_6$  – максимальна відстань між двома суміжними ребрами, м;

$b_7$  – ширина пластини, що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця, м;

$b_{IR}$  – розрахункова ширина нижнього опорного кільця, м;

$b_{ш}$  – довжина штуцера, який укріплює отвір, м;

$C$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;  
 $C_F$  – коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту, Н/м<sup>3</sup>;  
 $C_B$  – сумарний додаток на корозію до діаметра фундаментного болта, м;  
 $C_o$  – сума додатків до розрахункової товщини стінки опорної обичайки, м;  
 $D$  – внутрішній діаметр колони у розрахунковому перерізі, м;  
 $D_l$  – найменший внутрішній діаметр конічної обичайки, м;  
 $D_F$  – ефективний діаметр конічної обичайки при осьовому стисненні і вигині, м;  
 $D_{min}$  – мінімальний зовнішній діаметр колони, м;  
 $D_{ei}$  – внутрішній діаметр  $i$ -ї ділянки колони, м;  
 $D_i$  – зовнішній діаметр  $i$ -ї ділянки колони, м;  
 $D_{\sigma}$  – діаметр кола фундаментних болтів, м;  
 $D_{\kappa}$  – діаметр фундаментного кільця опори, м;  
 $D_n$  – зовнішній діаметр апарата колонного типу з урахуванням ізоляції в розрахунковому перерізі на висоті, що дорівнює  $0,8H$  від рівня закріплення, м;  
 $D_o$  – внутрішній діаметр циліндричної опорної обичайки або внутрішній діаметр конічної опорної обичайки в розрахунковому перерізі, м;  
 $d$  – діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта, м;  
 $d_l$  – середній діаметр отвору в колоні, м;  
 $d_{\sigma}$  – внутрішній діаметр різьби фундаментних болтів, м;  
 $d_{\phi}$  – номінальний діаметр різьби фундаментних болтів, м;  
 $d_{uu}$  – середній діаметр штуцера, який укріплює отвір, м;

$E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу при розрахунковій температурі, Па;

$e$  – відстань від осі фундаментного болта до обичайки опори, м;

$F$  – розрахункова осьова стискаюча сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі (без урахування навантаження, що виникає від тиску), Н;

$F_1$  – сила  $F$  в робочих умовах, Н;

$F_2$  – сила  $F$  при випробуваннях, Н;

$F_3$  – сила  $F$  в умовах монтажу, Н;

$[F]$  – допустима осьова сила, Н;

$[F]_E$  – допустима осьова стискаюча сила з умови стійкості в границях пружності, Н;

$[F]_{E1}$  – допустима осьова стискаюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності, Н;

$[F]_{E2}$  – допустима осьова стискаюча сила з умови загальної стійкості в границях пружності, Н;

$[F]_\sigma$  – допустима осьова стискаюча сила з умови міцності, Н;

$G$  – вагове навантаження від власної маси колони з вмістом, Н;

$G_1$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в робочих умовах

від власної маси апарата з урахуванням маси робочого середовища, маси внутрішніх пристроїв, маси приєднаного обладнання, маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, маси ізоляції, маси вогнезахисту, а також зусиль у напрямку осі апарата від приєднаних трубопроводів, Н;

$G_2$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в умовах гідравлічного випробування від власної маси апарата з урахуванням маси

рідини, маси внутрішніх приварних пристроїв і маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, Н;

$G_3$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в умовах монтажу від власної маси апарата з урахуванням маси внутрішніх приварних пристроїв і маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, Н;

$G_i$  – вагове навантаження  $i$ -ї ділянки колони, Н;

$H$  – висота колони, м;

$H_1, H_2, H_3$  – висоти 1-ї, 2-ї, 3-ї ділянок колони змінного перерізу, м;

$h$  – висота опорного вузла, м;

$h_0$  – висота днища, м;

$h_i$  – висота  $i$ -ї ділянки колони, м;

$I$  – момент інерції верхнього основного металевго перерізу колони колонного типу щодо центральної осі, м<sup>4</sup>;

$I_1, I_2, I_3$  – момент інерції верхнього металевго перерізу 1-ї, 2-ї, 3-ї ділянки колони змінного перерізу щодо центральної осі, м<sup>4</sup>;

$I_F$  – мінімальний момент інерції підшви фундаменту, м<sup>4</sup>;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$K$  – аеродинамічний коефіцієнт;

$l$  – розрахункова довжина гладкої обичайки корпусу колони, м;

$l_0$  – довжина циліндричної частини днища (відбортовка), м;

$l_k$  – довжина конічного днища, яка враховується при визначенні розрахункової довжини  $l$ , м;

$l_0$  – довжина циліндричної обичайки колони, м;

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

$M$  – розрахунковий згинаючий момент, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі, Н·м;

$M_1$  – момент  $M$  в робочих умовах, Н·м;



$M_2$  – момент  $M$  при випробуваннях, Н·м;

$M_3$  – момент  $M$  в умовах монтажу, Н·м;

$M_{G1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від дії ексцентричних вагових навантажень, в тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;

$M_{G2}$  – згинаючий момент при випробуваннях від дії ексцентричних вагових навантажень, в тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;

$M_{G3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від дії ексцентричних вагових навантажень, в тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;

$M_{R1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від сейсмічних впливів, Н·м;

$M_{R3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від сейсмічних впливів, Н·м;

$M_{V1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від дії вітрових навантажень, Н·м;

$M_{V2}$  – згинаючий момент при випробуваннях від дії вітрових навантажень, Н·м;

$M_{V3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від дії вітрових навантажень, Н·м;

$M_{Vj}$  – згинаючий момент в розрахунковому перерізі на висоті  $x_0$  від дії вітрового навантаження на  $j$ -ю обслуговуючу площадку, Н·м;

$M_{VR}$  – розрахунковий згинаючий момент від резонансного вихрового збудження, Н·м;

$[M]$  – допустимий згинаючий момент, Н·м;

$[M]_E$  – допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності, Н·м;

$[M]_\sigma$  – допустимий згинаючий момент з умови міцності, Н·м;

$m_i$  – коефіцієнт пульсації тиску вітру для середини  $i$ -ї ділянки апарата на висоті  $x_i$ ;

$m_j$  – коефіцієнт пульсації тиску вітру для  $j$ -ї площадки колони на висоті  $x_j$ ;

$n$  – кількість фундаментних болтів;

$n_B$  – запас міцності бетону за границею міцності на стиск;

$n_p$  – кількість ребер жорсткості;

$n_T$  – коефіцієнт запасу міцності фундаментних болтів за границею плинності;

$n_y$  – коефіцієнт запасу стійкості;

$P_{cri}$  – розрахункове вітрове навантаження, що діє на  $i$ -у ділянку колони в напрямку вітрового потоку, Н;

$P_i$  – вітрове навантаження на  $i$ -й ділянці колони, Н;

$P_{dini}$  – пульсаційна складова вітрового навантаження на  $i$ -й ділянці колони, Н;

$P_{sti}$  – середня складова вітрового навантаження на  $i$ -й ділянці колони, Н;

$P_{Vri}$  – аеродинамічна сила при резонансному вихровому збудженні, що викликає поперечні коливання в площині, перпендикулярній напрямку вітрового потоку, на  $i$ -й ділянці колони, Н;

$p$  – розрахунковий тиск, МПа;

$p_1$  – розрахунковий тиск  $p$  в робочих умовах, МПа;

$p_2$  – розрахунковий тиск  $p$  при випробуваннях, МПа;

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

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

$R_{m/20}$  – границя міцності бетону при осьовому стиску за температури 20 °С, МПа;

$r_0$  – внутрішній радіус відбортовки, м;

$Q$  – розрахункова поперечна сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі, Н;

$Q_1$  – поперечна сила, яка дорівнює найбільшому з вітрового та сейсмічного навантажень в робочих умовах, Н;

$Q_2$  – поперечна сила, що дорівнює 60% вітрового навантаження в умовах випробування, Н;

$Q_3$  – поперечна сила, яка дорівнює найбільшому з вітрового та сейсмічного навантажень в умовах монтажу, Н;

$[Q]$  – допустима поперечна сила, Н;

$S$  – виконавча товщина стінки обичайки, м;

$S_1$  – виконавча товщина нижнього опорного кільця, м;

$S_2$  – виконавча товщина верхнього опорного кільця, м;

$S_3$  – виконавча товщина пластини, що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця, м;

$S_4$  – виконавча товщина ребра, м;

$S_i$  – виконавча товщина стінки  $i$ -ї ділянки колони, м;

$S_k$  – виконавча товщина конічної обичайки, м;

$S_o$  – виконавча товщина опорної обичайки, м;

$S_{ш}$  – виконавча товщина штуцера, який укріплює отвір, м;

$q_0$  – нормативне значення вітрового тиску, МН/м<sup>2</sup>;

$T$  – розрахунковий період власних коливань апарата, с;  
 $V_{cr}$  – критична швидкість вітру, м/с;  
 $V_{max}$  – максимальна розрахункова швидкість вітру, м/с;  
 $W$  – найменший момент опору найбільш ослабленого поперечного перерізу, м<sup>3</sup>;  
 $x_0$  – висота розрахункового перерізу колони від рівня кріплення колони, м;  
 $x_i$  – відстань від рівня кріплення колони до середини  $i$ -ї ділянки апарата, м;  
 $x_j$  – висота розташування площадки обслуговування, м;  
 $x_{екв}$  – висота визначення максимальної розрахункової швидкості вітру, м;  
 $Y_s$  – координата центра ваги найбільш ослабленого поперечного перерізу, м;  
 $Z$  – кількість ділянок колони;  
 $\alpha_l$  – половина кута при вершині конічної обичайки, град;  
 $\alpha_i$  – відносне переміщення центру тяжіння  $i$ -ї ділянки, що виникає при власних коливаннях, 1/(МН·м);  
 $\alpha_n$  – максимальне відносне переміщення колони, що виникає при власних коливаннях;  
 $\beta_i, \beta_k$  – коефіцієнти;  
 $\Delta$  – допоміжний коефіцієнт;  
 $\gamma$  – допоміжний коефіцієнт;  
 $\eta$  – поправковий коефіцієнт для допустимих напружень;  
 $\eta_i$  – зведене відносне прискорення центра ваги  $i$ -ї ділянки;  
 $\Theta$  – коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти  $x_{екв} + x_{осн}$ , м;

$\Theta_i$  – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового навантаження по висоті колони;

$\Theta_j$  – коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти колони  $x_j + x_{осн}$ ;

$\lambda$  – допоміжний коефіцієнт;

$\lambda_T$  – гнучкість елемента;

$\mu$  – допоміжний коефіцієнт;

$\xi$  – коефіцієнт динамічності;

$\sigma_{E1}$  – еквівалентне напруження в розрахунковому перерізі колони на стороні, де згинальний момент викликає розтяг, МПа;

$\sigma_{E2}$  – еквівалентне напруження в розрахунковому перерізі колони на стороні, де згинальний момент викликає стиск, МПа;

$\sigma_{x1}$  – мембранне меридіане напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає розтяг, МПа;

$\sigma_{x2}$  – мембранне меридіане напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає стиск, МПа;

$\sigma_y$  – загальне мембранне кільцеве напруження, МПа;

$[\sigma]$  – допустиме напруження для матеріалу корпусу колони при розрахунковій температурі в розрахунковому перерізі, МПа;

$[\sigma]_A$  – допустиме напруження для матеріалу елемента опорного вузла при розрахунковій температурі, МПа;

$[\sigma]_B$  – допустиме напруження для фундаментних болтів, МПа;

$[\sigma]_Б$  – допустиме напруження бетону на стиск, яке визначається залежно від марки бетону по будівельним нормам і правилам, МПа;

$[\sigma]_o$  – допустиме напруження для матеріалу опорної обичайки при розрахунковій температурі, МПа;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварного шва;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – коефіцієнти;

$\Sigma A_p$  – сума площ всіх проекцій профілів  $j$ -ї площадки на площину, перпендикулярну напрямку вітру, м<sup>2</sup>;

$\nu$  – коефіцієнт просторової кореляції пульсацій тиску вітру на висоті  $H + x_{осн}$ ;

$\chi_1$ – $\chi_6$  – коефіцієнти;

$\chi_j$  – допоміжний коефіцієнт для  $j$ -ї площадки на висоті колони  $x_j + x_{осн}$ ;

## 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Вітрове навантаження визначають для посудин і апаратів, які встановлювані на відкритих майданчиках.

Навантаження від сейсмічного впливу визначають для всіх посудин і апаратів, призначених для установки на майданчиках із сейсмічністю 7, 8 і 9 балів за 12-бальною макросейсмічною шкалою MSK-64. Інтенсивність сейсмічних впливів для району установки посудини або апарата приймають по картах загального сейсмічного районування.

Посудини і апарати розраховують в робочих умовах, в умовах випробування і в умовах монтажу. В робочих умовах розрахунок посудини або апарата виконують на дію вітрового навантаження і вітрового навантаження при резонансному вихровому збудженні і на дію навантаження від сейсмічного впливу в поєднанні з іншими діючими на апарат навантаженнями.

В умовах випробування посудини або апарата враховують дію вітрового навантаження в обсязі 60% в поєднанні з іншими, діючими на апарат навантаженнями, які можуть мати місце при гідро- або пневмовипробуваннях. Навантаження від сейсмічного впливу в умовах випробування не розглядають.

В умовах монтажу посудин і апаратів виконують розрахунок на міцність елементів їх кріплення на дію вітрового або сейсмічного навантаження.

Розрахунок на міцність необхідно проводити для всіх прогнозованих станів посудин і апаратів, що працюють під тиском і виникають під час їх експлуатації, випробування, транспортування, монтажу. При цьому слід враховувати всі навантаження і зовнішні чинники, які можуть вплинути на міцність і стійкість конструкції, а також враховувати ймовірність їх одночасного впливу.

Зокрема, при визначенні розрахункових параметрів для кожного елемента посудини або апарата необхідно враховувати за умови їх наявності наступні навантаження і фактори:

- внутрішній і / або зовнішній тиск;
- температури навколишнього середовища і робочі температури;
- різницю температур в перехідних станах або різницю коефіцієнтів лінійного розширення;
- навантаження від маси посудини і її вмісту в робочих умовах і в умовах випробування;
- навантаження при транспортуванні і монтажі посудини;
- інерційні навантаження при русі, зупинках і коливаннях елементів посудин і апаратів;
- навантаження від вітрових і сейсмічних впливів;
- реактивні зусилля (протидії), які передаються від опор, кріплень, трубопроводів і т. ін.;
- ударні навантаження від впливу газорідинної суміші чи інших причин;
- різницю температур в перехідних станах і / або різницю коефіцієнтів лінійного розширення;
- навантаження від обмеженості температурних деформацій;

- зміни тиску і температури як в процесі нормальної експлуатації, так і при можливих порушеннях режиму роботи;
- повзучість металу;
- втому при змінних навантаженнях;
- вібрацію;
- резонанс;
- корозію і ерозію;
- старіння металу під дією середовища і інші механізми деградації матеріалу [6].

Розрахунковий тиск, коефіцієнти міцності зварних швів і прибавки до товщини стінки визначають за ГОСТ 34233.1 [6].

Розрахункову температуру і температурні напруження визначають за ГОСТ 34233.1 [6].

Вагове навантаження від власної маси посудини або апарата і його вмісту визначають за проектною документацією.

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

1. Пояснити, для яких посудин і апаратів треба визначати вітрове навантаження.
2. Коли треба враховувати навантаження від сейсмічного впливу?
3. Пояснити особливості розрахунку в робочих умовах, при випробуваннях і в умовах монтажу.
4. Які навантаження і фактори треба враховувати при визначенні розрахункових параметрів?



## 2. РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ОСНОВНИХ ТИПІВ СУДИН І АПАРАТІВ

Для апаратів колонного типу висотою не менше 10 м з відношенням  $H/D_{min}$  не менше 1,5, а також висотою менше 10 м з відношенням  $H/D_{min}$  більше 5, закріплених в нижніх перерізах, при визначенні зусиль від вітрових та сейсмічних навантажень в якості розрахункової динамічної моделі приймають консольний пружно-защемлений прямолінійний стержень змінного кільцевого перерізу з масами, зосередженими в середині ділянок [7].

При розгляді коливань такого стержня приймають, що рух його вузлів відбувається в одній площині (див. рис. 2.1).

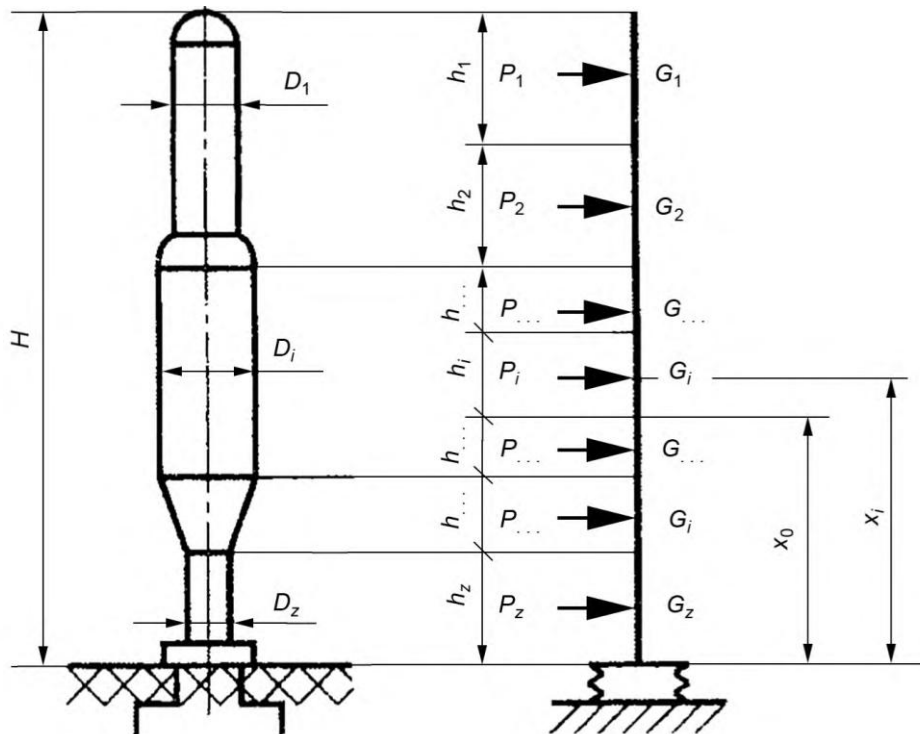


Рис. 2.1. Розрахункова схема колони

Висоту колони  $H$  відраховують від рівня закріплення апарата (верхнього обрізу фундаменту) і розбивають на  $z$  ділянок висотою, як правило,  $h_i$  не більше 10 м.

Якщо апарат встановлюють на високий постамент або на спеціальну конструкцію (етажерку), тоді при обчисленні коефіцієнтів, що залежать від зміни тиску вітру і сейсмічної сили по висоті, враховують відстань від поверхні землі  $x_{осн}$  до рівня закріплення апарата. При цьому динамічні характеристики розрахункової моделі апарата рекомендують визначати з урахуванням піддатливості опорної конструкції.

Вітрове навантаження, розподілене безперервно по висоті апарата, замінюють зосередженими горизонтальними силами, прикладеними в середині кожного з  $z$  ділянок розрахункової схеми.

Розрахункове сейсмічне навантаження прикладають горизонтально в середині кожного з  $z$  ділянок.

Для вертикальних посудин і апаратів, що спираються на опори-лапи, опори-стійки, пластинчасті опори, а також апаратів колонного типу висотою менше 10 м с відношенням  $H/D_{min}$  не більше 5 в якості розрахункової схеми приймають невагомий консольний стержень кільцевого перерізу з масою, зосередженою в центрі ваги апарата. У цьому випадку в якості крайових умов допускається використовувати як пружне, так і жорстке защемлення. Вітрове навантаження, яке розподілене безперервно по висоті апарата, замінюють зосередженою горизонтальною силою і моментом, прикладеними в центрі ваги апарата. Розрахункове сейсмічне навантаження прикладають горизонтально в центрі ваги апарата.

## Питання для самоконтролю до розділу 2

1. Навести розрахункові схеми колонних апаратів, які приймають при визначенні зусиль від вітрових та сейсмічних навантажень.
2. Обґрунтувати принцип заміни вітрового навантаження зосередженими горизонтальними силами.
3. Навести розрахункові схеми для вертикальних посудин і апаратів, що спираються на опори-лапи, опори-стійки, пластинчасті опори, а також апаратів колонного типу висотою менше 10 м с відношенням  $H/D_{min}$  не більше 5.

## 3. ВІТРОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКЕ ДІЄ НА КОЛОННИЙ АПАРАТ

Розрахункове вітрове навантаження, що діє на  $i$ -у ділянку апарата при його власних коливаннях в напрямку горизонтальної дії вітру, визначають як суму середньої  $P_{sti}$  і пульсаційної  $P_{dini}$  складових вітрового навантаження:

$$P_i = P_{sti} + P_{dini}.$$

Середню складову вітрового навантаження на  $i$ -й ділянці апарата обчислюють за формулою:

$$P_{sti} = K \cdot q_0 \cdot \Theta_i \cdot D_i \cdot h_i,$$

де  $K = 0,7$  – аеродинамічний коефіцієнт;  $q_0$  – нормативне значення вітрового тиску, Н/м<sup>2</sup>;  $\Theta_i$  – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового навантаження по висоті колони;  $D_i$  – зовнішній діаметр  $i$ -ї ділянки колони, м;  $h_i$  – висота  $i$ -ї ділянки колони, м.

Нормативне значення вітрового тиску  $q_0$  визначається за ДБН В.1.2-2:2006 [8]. Для району Києва  $q_0 = 370$  Па.

$\Theta_i$  розраховується за формулою:

$$\Theta_i = \begin{cases} 0,75 & \text{при } x_i \leq 5 \text{ м} \\ (x_i/10)^{0,3} & \text{при } x_i > 5 \text{ м} \end{cases}$$

В цій формулі  $x_i$  – відстань від рівня кріплення колони до середини  $i$ -ї ділянки апарата, м.

Пульсаційна складова вітрового навантаження на  $i$ -й ділянці апарата розраховується за формулою:

$$P_{\text{дин}i} = v \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_i$$

де  $v$  – коефіцієнт просторової кореляції пульсацій тиску вітру на висоті  $H$ ;  $G_i$  – вагове навантаження  $i$ -ї ділянки колони, Н;  $\xi$  – коефіцієнт динамічності;  $\eta_i$  – зведене відносне прискорення центра ваги  $i$ -ї ділянки.

Коефіцієнт  $v$  обчислюється за формулою:

$$v = 0,968 - 0,025\sqrt{H}$$

Для визначення коефіцієнта динамічності  $\xi$  застосовується залежність:

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5\varepsilon}$$

де  $\varepsilon$  – безрозмірний параметр, що залежить від періоду власних коливань апарата колонного типу, який, у свою чергу, розраховується за формулою:

$$\varepsilon = T\sqrt{g_0} / 1790,$$

де  $T$  – розрахунковий період власних коливань колони, с.

Розрахунковий період власних коливань колони постійного перерізу з приблизно рівномірно розподіленим по висоті апарата масою обчислюють за формулою:

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{4E \cdot I}{H \cdot C_F \cdot I_F}},$$

де  $E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу при розрахунковій температурі, Па;  $I$  – момент інерції верхнього основного металевого перерізу апарата колонного типу щодо центральної осі, м<sup>4</sup>;  $I_F$  – мінімальний момент інерції підшви фундаменту, м<sup>4</sup>;  $C_F$  – коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту, Н/м<sup>3</sup>;  $T_0$  розраховується за формулою:

$$T_0 = 1,8H \sqrt{\frac{GH}{gE \cdot I}},$$

де  $G$  – вагове навантаження від власної маси колони з вмістом, Н;  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

Розрахунковий основний період власних коливань апарата змінного перерізу обчислюють за формулою:

$$T = 2\pi \cdot H \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z G_i \cdot \alpha_i^2}{g \left( \frac{H}{2E \cdot I_1} \gamma + \frac{1}{C_F \cdot I_F} \right)}},$$

де  $I_1$  – момент інерції верхнього металевого перерізу 1-ї ділянки колони змінного перерізу відносно центральної осі, м<sup>4</sup>;  $\alpha_i$  – відносне переміщення центрів тяжіння, відповідно,  $i$ -ї ділянки, що виникає при власних коливаннях;  $\gamma$  – допоміжний коефіцієнт.

Допоміжний коефіцієнт  $\gamma$  (рис. 3.1):

$$\gamma = \frac{2}{H^3} \left[ H_1^3 (\Delta + \lambda) + H_2^3 \cdot \mu + 2 \frac{I_1}{I_2} H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \right],$$

де  $H_1, H_2, H_3$  – висоти 1-ї, 2-ї, 3-ї ділянок колони змінного перерізу, м;  $I_1, I_2, I_3$  – момент інерції верхнього металевого перерізу 1-ї, 2-ї, 3-ї ділянки апарата змінного перерізу щодо центральної осі, м<sup>4</sup>;  $\Delta, \lambda, \mu$  – допоміжні коефіцієнти.

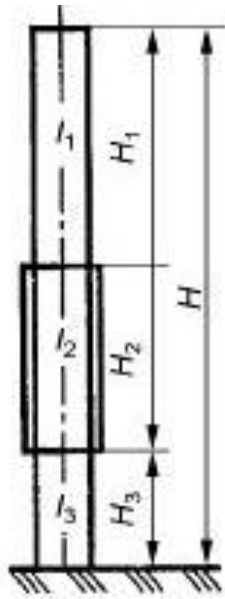


Рис. 3.1. Розрахункова схема до визначення допоміжних коефіцієнтів

Допоміжний коефіцієнт  $\Delta$  визначається за рис. 3.2 або розраховується за формулою:

$$\Delta = \frac{1}{3} + \frac{l_1}{l_2} \frac{H_2}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} + 1 \right].$$

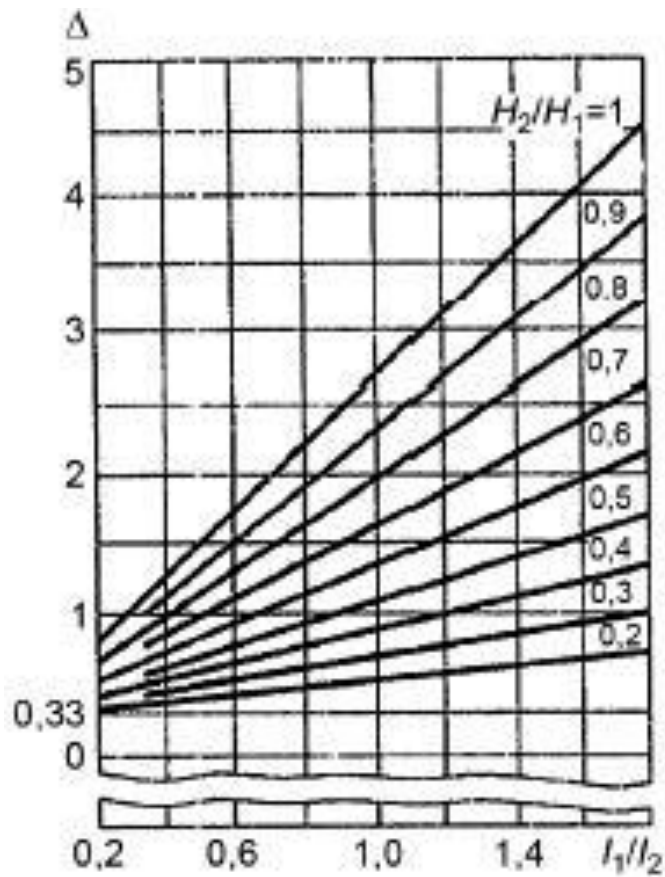


Рис. 3.2. Графік для визначення допоміжного коефіцієнта  $\Delta$

Допоміжний коефіцієнт  $\lambda$  визначається за рис. 3.3 або розраховується за формулою:

$$\lambda = \frac{I_1}{I_3} \frac{H_3}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_3}{H_1} \right)^2 + \frac{H_3}{H_1} + 1 \right].$$

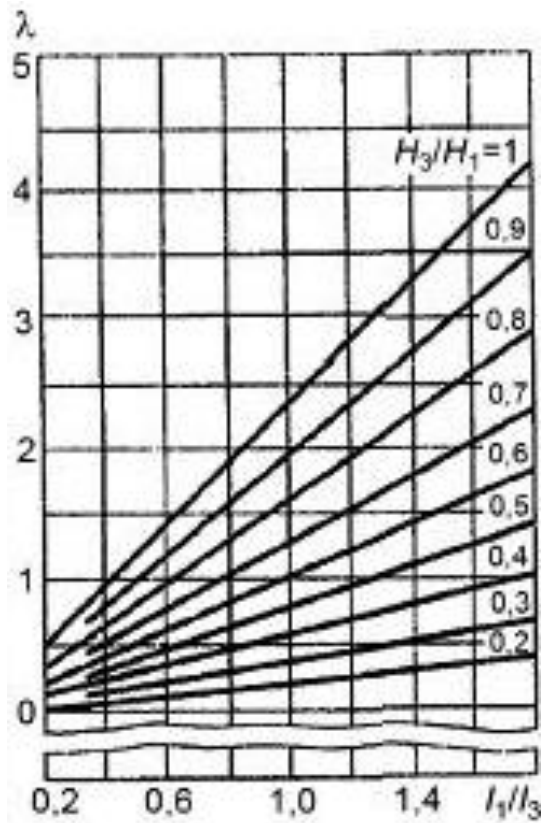


Рис. 3.3. Графік для визначення допоміжного коефіцієнта  $\lambda$

Допоміжний коефіцієнт  $\mu$  визначається за рис. 3.4 або розраховується за формулою:

$$\mu = \frac{I_1}{I_3} \frac{H_3}{H_2} \left( \frac{H_3}{H_2} + 1 \right).$$



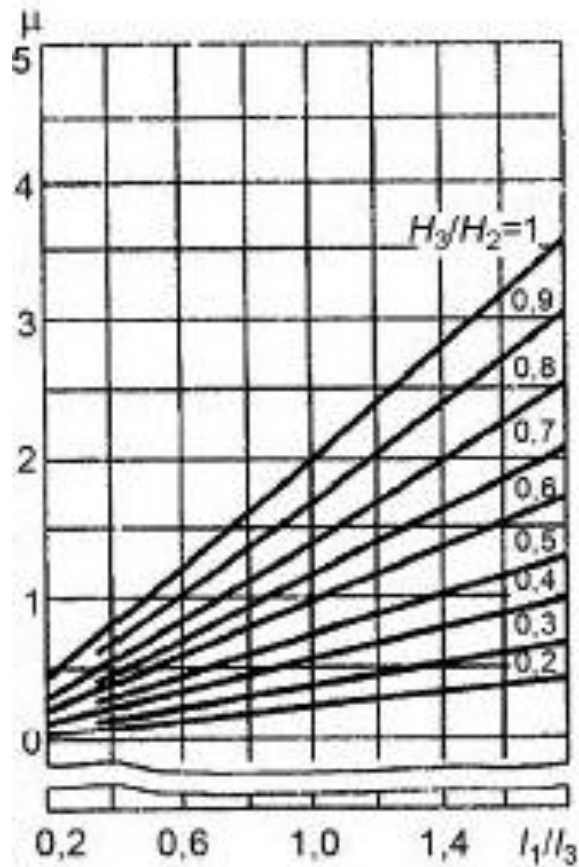


Рис. 3.4. Графік для визначення допоміжного коефіцієнта  $\mu$

Коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту  $C_F$  визначається за даними інженерної геології, а при відсутності таких даних  $C_F = 6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$ .

Зведене відносне прискорення центра ваги  $i$ -ї ділянки  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \alpha_i \sum_{i=1}^z (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{sti}) / \sum_{i=1}^z (\alpha_i^2 \cdot G_i)$$

В цій формулі:  $\alpha_i$  – відносне переміщення центрів тяжіння, відповідно,  $i$ -ї ділянки, що виникає при власних коливаннях;  $m_i$  – коефіцієнт пульсації тиску вітру для середини  $i$ -ї ділянки апарата на висоті  $x_i$ .

Визначення  $\alpha_i$  здійснюється за формулою:

$$\alpha_i = \gamma \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} \beta_i + \frac{x_i}{H \cdot C_F \cdot I_F},$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнт.

Для кожної  $i$ -ї ділянки апарата коефіцієнти  $\beta_i$  визначають по рис. 3.5 або обчислюють за формулами:

$$\beta_i = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{x_i}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_i}{H} \right)^3 \right],$$

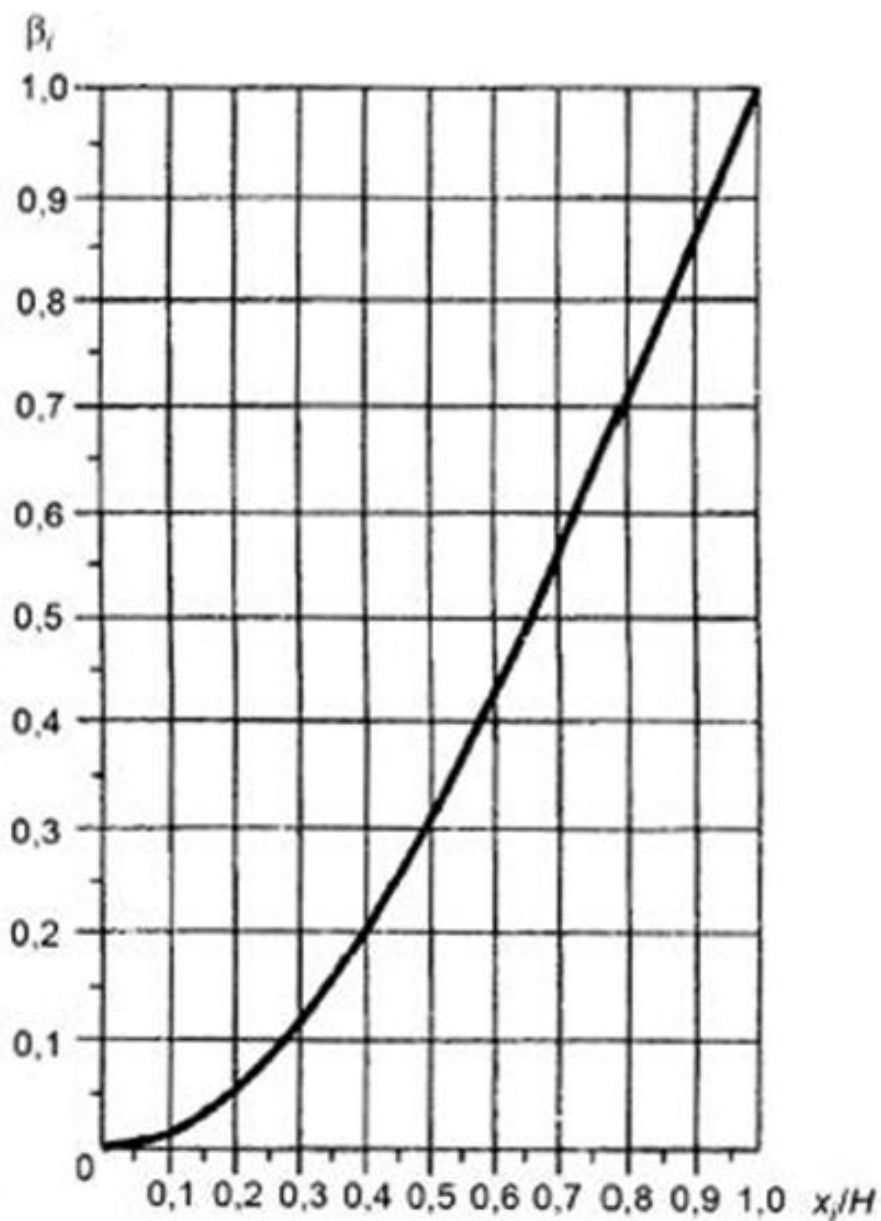


Рис. 3.5. Графік для визначення допоміжного коефіцієнта  $\beta_i$

Коефіцієнт пульсації тиску вітру  $m_i$  для середини  $i$ -ї ділянки апарата на висоті  $x_i$ :

$$m_i = 0,76(x_i/10)^{-0,15}.$$

Розрахунковий згинаючий момент від дії вітрового навантаження в розрахунковому перерізі апарата на висоті  $x_0$  розраховують за формулою:

$$M_V = \sum_{i=1}^n P_i(x_i - x_0) + \sum_{j=1}^m M_{V_j},$$

де  $x_0$  – висота розрахункового перерізу колони від рівня кріплення колони, м;  $M_{V_j}$  – згинаючий момент в розрахунковому перерізі на висоті  $x_0$  від дії вітрового навантаження на  $j$ -ю обслуговуючу площадку, Н·м.

Обслуговуючі майданчики та інші зовнішні елементи, що виступають за межі зовнішнього діаметра колони, під дією вітрового навантаження створюють для нього додаткові згинальні моменти.

Якщо при розрахунку апаратів колонного типу відомі розміри і розташування обслуговуючих площадок, то середню складову вітрового навантаження, прикладену на обслуговуючу  $j$ -ю площадку, розташовану на висоті  $x_j$  над рівнем кріплення колони, обчислюють за формулою:

$$M_{V_j} = 1,4q_0 \cdot \Theta_j(x_j - x_0)(1 + 0,75\xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \sum A_p,$$

де  $x_j$  – висота розташування площадки обслуговування, м;  $\Theta_j$  – коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти колони  $x_j$ ;  $\chi_j$  – допоміжний коефіцієнт для  $j$ -ї площадки на висоті колони  $x_j$ ;  $m_j$  – коефіцієнт пульсації тиску вітру для  $j$ -ї площадки колони на висоті  $x_j$ ;  $\sum A_p$  –

сума площ всіх проєкцій профілів  $j$ -ї площадки на площину, перпендикулярну напрямку вітру, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти колони  $x_j$ :

$$\Theta_j = \begin{cases} 0,75 \text{ при } x_j \leq 5 \text{ м,} \\ (x_j/10)^{0,3} \text{ при } x_j > 5 \text{ м} \end{cases}$$

Допоміжний коефіцієнт для  $j$ -ї площадки на висоті колони  $x_j$ :

$$\chi_j = 1,56(x_j/H)^{1,6}$$

Коефіцієнт пульсації тиску вітру для  $j$ -ї площадки колони на висоті  $x_j$ :

$$m_j = 0,76(x_j/10)^{-0,15}$$

В разі відсутності точних даних про форму площадки момент  $M_{Vj}$  розраховують за формулою:

$$M_{Vj} = 0,85q_0 \cdot \Theta_j (x_j - x_0)(1 + 0,75\xi \cdot \chi_j \cdot m_j)A_j,$$

де  $A_j$  – площа, обмежена контуром для  $j$ -ї площадки, м<sup>2</sup>.

### Питання для самоконтролю до розділу 3

1. Надати алгоритм визначення розрахункового вітрового навантаження, що діє на  $i$ -у ділянку апарата.
2. Навести формулу для розрахунку згинаючого моменту від дії вітрового навантаження в розрахунковому перерізі апарата.
3. Обґрунтувати вплив обслуговуючих площадок на середню складову вітрового навантаження.

#### 4. РЕЗОНАНСНЕ ВИХРОВЕ ЗБУДЖЕННЯ

Розрахунок на резонансне вихрове збудження проводять для апаратів колонного типу, які відповідають умовам  $H/D_{min} > 10$ , якщо критична швидкість вітру  $V_{cr}$ , яка викликає резонансні коливання, менше максимальної розрахункової швидкості вітру  $V_{max}$  для району установки апарата:

$$V_{cr} < V_{max}.$$

Критична швидкість вітру, яка викликає резонансні коливання:

$$V_{cr} = \frac{5D_n}{T},$$

де  $D_n$  – зовнішній діаметр апарата колонного типу з урахуванням ізоляції в розрахунковому перерізі на висоті  $x_{зкв}$ , що дорівнює  $0,8H$  від рівня закріплення, м.

Максимальну розрахункову швидкість вітру на висоті  $x_{зкв}$  від рівня кріплення колони обчислюють за формулою:

$$V_{max} = 1,5\sqrt{q_0 \cdot \Theta},$$

де  $\Theta$  – коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти  $x_{зкв}$ , м.

Коефіцієнт  $\Theta$  розраховується за формулою:

$$\Theta = \begin{cases} 0,75 \text{ при } x_{зкв} \leq 5 \text{ м,} \\ (x_{зкв}/10)^{0,3} \text{ при } x_{зкв} > 5 \text{ м} \end{cases}$$

Аеродинамічну силу при резонансному вихровому збудженні, що викликає поперечні коливання в площині, перпендикулярній напрямку вітрового потоку, на  $i$ -й ділянці колони обчислюють за формулою:

$$P_{VRi} = 4,5\pi \cdot V_{cr}^2 \cdot D_i \cdot h_i \frac{\alpha_i}{\alpha_n},$$

де  $\alpha_n$  – максимальне відносне переміщення колони, що виникає при власних коливаннях.

Величина  $\alpha_n$  розраховується за формулою:

$$\alpha_n = \gamma \frac{H}{2E \cdot I_1} + \frac{1}{2C_F \cdot I_F}.$$

Поряд з впливом аеродинамічної сили  $P_{VRi}$  при резонансному вихровому збудженні враховують дію вітрового навантаження в напрямку вітрового потоку.

Розрахункове вітрове навантаження, що діє на  $i$ -у ділянку колони в напрямку вітрового потоку, обчислюють за формулою:

$$P_{cxi} = \left( \frac{V_{cr}}{V_{max}} \right)^2 P_i.$$

Розрахунковий згинаючий момент  $M_{VR}$  в розрахунковому перерізі колони на висоті  $x_0$  від спільної дії аеродинамічної сили при резонансному вихровому збудженні і вітрового навантаження обчислюють за формулою:

$$M_{VR} = \sum_{i=1}^n [(\sqrt{P_{VRi}^2 + P_{cxi}^2})(x_i - x_0)]$$

#### **Питання для самоконтролю до розділу 4**

1. Обґрунтувати умови, які необхідні для проведення розрахунку апаратів колонного типу на резонансне вихрове збудження.

2. Як визначається критична швидкість вітру, що викликає резонансні коливання?

3. Пояснити вплив резонансного вихрового збудження на величину розрахункового згинаючого моменту.

## **5. РОЗРАХУНКОВІ ЗУСИЛЛЯ ВІД СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ**

Розрахунку на сейсмічну дію підлягають всі посудини і апарати, встановлені на майданчиках із розрахунковою сейсмічністю 7, 8 і 9 балів за модифікованою шкалою MSK-64 для середніх ґрунтових умов.

Розрахункову сейсмічність майданчика визначають в завданні на проектування посудини або апарата на основі нормативної сейсмічності району їх установки.

Для апаратів колонного типу і вертикальних посудин і апаратів визначають розрахункові сейсмічні навантаження, що діють в горизонтальному напрямку.

При виконанні розрахунків на сейсмічну дію застосовують два рівня сейсмічних впливів:

- а) проектний землетрус (рівень ПЗ);
- б) максимальний розрахунковий землетрус (рівень МРЗ).

Розрахунок на сейсмічні навантаження, що відповідає рівню ПЗ, виконують для всіх посудин і апаратів. Розрахунок проводять лінійно-спектральним методом.

Розрахунок на сейсмічні навантаження, що відповідають рівню МРЗ, виконують для посудин і апаратів, розташованих на виробничих об'єктах надзвичайно високої і високої небезпеки.

Розрахунок, який відповідає рівню МРЗ, для посудин і апаратів може виконуватися як динамічним методом в тимчасовій області із

застосуванням інструментальних або синтезованих акселерограм, так і лінійно-спектральним методом.

Для апаратів колонного типу висотою понад 75 м розрахунок, який відповідає рівню МРЗ, виконують динамічним методом. При відсутності інструментальних або синтезованих акселерограм для майданчика, на якому встановлюються апарати, допускається використовувати універсальні узагальнені акселерограми (див. ГОСТ 34283 [7]).

### **Питання для самоконтролю до розділу 5**

1. Які посудини і апарати підлягають виконанню розрахунку на сейсмічну дію?
2. Яким чином визначається розрахункова сейсмічність майданчика?
3. Навести рівні сейсмічних впливів.

## **6. РОЗРАХУНОК КОЛОННОГО АПАРАТА НА МІЦНІСТЬ**

Відповідно ГОСТ 34233.9 [9] при розрахунку апаратів колонного типу перевіряють такі розрахункові перерізи:

– поперечний переріз корпусу в місці приєднання опорної обичайки (рис. 6.1, переріз В-В), поперечні перерізи корпусу, що відрізняються по діаметру і / або товщині, по різному матеріальному виконанню, розрахунковій температурі і / або тиску і т. ін .;

– поперечний переріз опорної обичайки в місці приєднання до корпусу (рис. 6.2, переріз Г-Г), а також для складової опорної обичайки – поперечний переріз в зоні з'єднання циліндричної і конічної обичайок;

– поперечний переріз опорної обичайки в місцях розташування отворів (рис. 6.2, переріз Д-Д);



– поперечний переріз опорної обичайки в місці приєднання нижнього опорного кільця (рис. 6.2, переріз Е-Е).

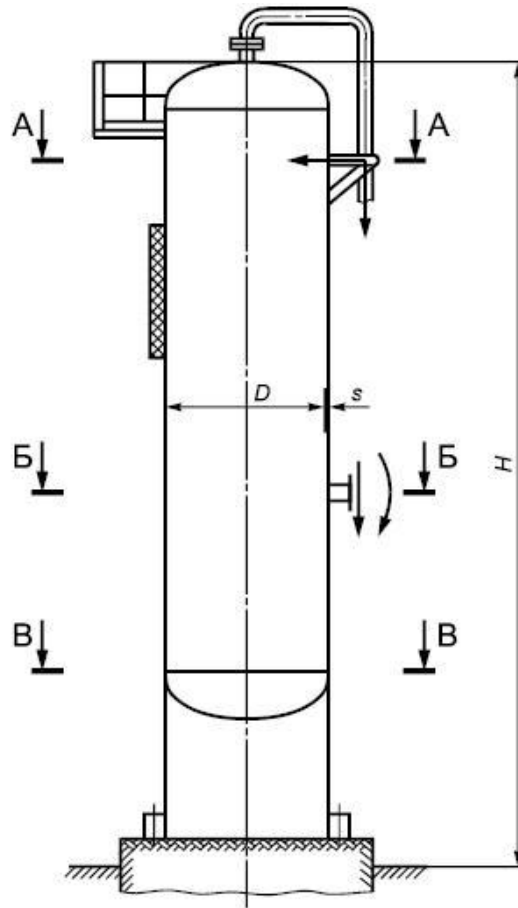
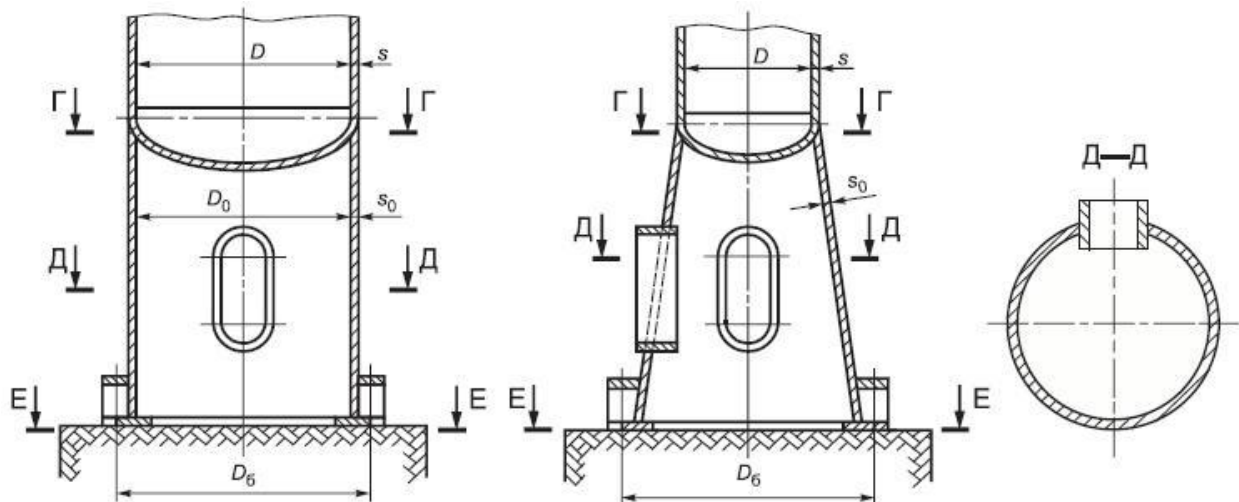


Рис. 6.1. Розрахункові перерізи корпусу колони



а

б

Рис. 6.2. Розрахункові перерізи опорної обичайки: а – циліндрична опора,  
б – конічна опора

Оцінювання локальних напружень від місцевих навантажень проводять в розрахункових вузлах, де прикладені ці навантаження (рис. 6.1, перерізи А-А і Б-Б).

Розрахунок апарата колонного типу проводять для робочих умов, умов випробувань і монтажу (табл. 6.1).

Таблиця 6.1. Навантаження, які діють на колону

Умова	Розрахунковий тиск $p$ , МПа	Розрахункова осьова стискаюча сила $F$ , Н	Розрахункова поперечна сила $Q$ , Н	Розрахунковий згинаючий момент $M$ , Н·м
Робочі умови	$p_1$	$F_1 = G_1$	$Q_1$	$M_1 = M_{G1} + \max\{M_{V1}; M_{VR}\}$ Для сейсмічних районів: $M_1 = M_{G1} + \max\{M_{V1}; M_{VR}; M_{R1}\}$
Випробування	$p_2$	$F_2 = G_2$	$Q_2$	$M_2 = M_{G2} + 0,6M_{V2}$
Монтаж	0	$F_3 = G_3$	$Q_3$	$M_3 = M_{G3} + M_{V3}$ Для сейсмічних районів: $M_3 = M_{G3} + \max\{M_{V3}; M_{R3}\}$

де  $p_1$  – розрахунковий тиск  $p$  в робочих умовах, МПа;  $p_2$  – розрахунковий тиск  $p$  при випробуваннях, МПа;  $F$  – розрахункова осьова стискаюча сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі (без урахування навантаження, що виникає від тиску), Н;  $F_1$  – сила  $F$  в робочих умовах, Н;  $F_2$  – сила  $F$  при випробуваннях,

$H$ ;  $F_3$  – сила  $F$  в умовах монтажу, Н;  $G_1$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в робочих умовах від власної маси апарата з урахуванням маси робочого середовища, маси внутрішніх пристроїв, маси приєднаного обладнання, маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, маси ізоляції, маси вогнезахисту, а також зусиль у напрямку осі апарата від приєднаних трубопроводів, Н;  $G_2$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в умовах гідравлічного випробування від власної маси апарата з урахуванням маси рідини, маси внутрішніх приварних пристроїв і маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, Н;  $G_3$  – вагове навантаження в розрахунковому перерізі в умовах монтажу від власної маси апарата з урахуванням маси внутрішніх приварних пристроїв і маси обслуговуючих майданчиків без обслуговуючого персоналу, Н;  $Q$  – розрахункова поперечна сила, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі, Н;  $Q_1$  – поперечна сила, яка дорівнює найбільшому з вітрового та сейсмічного навантажень в робочих умовах, Н;  $Q_2$  – поперечна сила, що дорівнює 60% вітрового навантаження в умовах випробування, Н;  $Q_3$  – поперечна сила, яка дорівнює найбільшому з вітрового та сейсмічного навантажень в умовах монтажу, Н;  $M$  – розрахунковий згинаючий момент, що діє на повну площу перерізу обичайки в розрахунковому перерізі, Н·м;  $M_1$  – момент  $M$  в робочих умовах, Н·м;  $M_2$  – момент  $M$  при випробуваннях, Н·м;  $M_3$  – момент  $M$  в умовах монтажу, Н·м;  $M_{G1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від дії ексцентричних вагових навантажень, в тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;  $M_{G2}$  – згинаючий момент при випробуваннях від дії ексцентричних вагових навантажень, в тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;  $M_{G3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від дії ексцентричних вагових навантажень, в

тому числі від приєднувальних трубопроводів і обладнання, Н·м;  $M_{V1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від дії вітрових навантажень, Н·м;  $M_{V2}$  – згинаючий момент при випробуваннях від дії вітрових навантажень, Н·м;  $M_{V3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від дії вітрових навантажень, Н·м;  $M_{R1}$  – згинаючий момент в робочих умовах від сейсмічних впливів, Н·м;  $M_{R3}$  – згинаючий момент в умовах монтажу від сейсмічних впливів, Н·м.

Стінки апарата колонного типу, що працює під дією внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску, повинні бути перевірені на міцність при спільній дії тиску, розрахункових сил і розрахункових згинальних моментів від вагових, вітрових, сейсмічних та інших зовнішніх навантажень.

Перевірку міцності стінки корпусу апарата проводять у всіх розрахункових перерізах, перерахованих вище.

Еквівалентні напруження від спільної дії тиску, розрахункових сил і розрахункових згинальних моментів від вагових, вітрових, сейсмічних і інших зовнішніх навантажень розраховують з використанням критерію максимальних дотичних напружень.

Перевірку міцності корпусу апарата проводять для робочих умов і умов випробувань.

Розрахунковий тиск  $p$ , розрахункову осьову силу  $F$  і розрахунковий згинаючий момент  $M$  для кожного розрахункового перерізу приймають за таблицею 1.

Загальні мембранні меридіональні напруження в циліндричних обичайках колонного апарата, включаючи опору, обчислюють за формулами:

– в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент

викликає розтяг:

$$\sigma_{x_1} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi \cdot D(s-c)} + \frac{4M}{\pi \cdot D^2(s-c)},$$

– в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент

викликає стиск:

$$\sigma_{x_2} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi \cdot D(s-c)} - \frac{4M}{\pi \cdot D^2(s-c)}.$$

Загальні мембранні кільцеві напруження:

$$\sigma_y = \frac{p(D+s)}{2(s-c)}.$$

Для того щоб отримати загальні мембранні меридіональні і кільцеві напруження в конічних обичайках колонного апарата, включаючи опору, значення отриманих напружень слід помножити на  $1/\cos\alpha_1$ , де  $\alpha_1$  – половина кута при вершині конічної обичайки, град.

Еквівалентні напруження по теорії найбільших дотичних напружень обчислюють за формулами:

– в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент

викликає розтяг:

$$\sigma_{E_1} = \max \left\{ \left| \sigma_{x_1} - \sigma_y \right|, \left| \sigma_y \right|, \left| \sigma_{x_1} \right| \right\},$$

– в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент

викликає стиск:

$$\sigma_{E_2} = \max \left\{ \left| \sigma_{x_2} - \sigma_y \right|, \left| \sigma_y \right|, \left| \sigma_{x_2} \right| \right\}.$$

Умова міцності апарата колонного типу при спільній дії навантажень:

$$\max \{ \sigma_{E_1}, \sigma_{E_2} \} \leq 1,2[\sigma]\varphi,$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження для матеріалу корпусу колони при розрахунковій температурі в розрахунковому перерізі, МПа;  $\varphi$  – коефіцієнт міцності зварного шва.

Якщо в стінці апарата в місці з'єднання з опорою виникають додаткові напруження, викликані зміщенням нейтральних осей в вузлі з'єднання опори з корпусом (див. рис. 6.3), і / або додаткові напруження, викликані обмеженням температурних деформацій, слід виконати оцінку цих напружень спільно з напруженням від дії тиску, осьової стискаючої сили, згинального моменту і поперечної сили. Оцінку міцності виконують відповідно до ГОСТ 34233.1-2017 (пункт 8.10) [6].

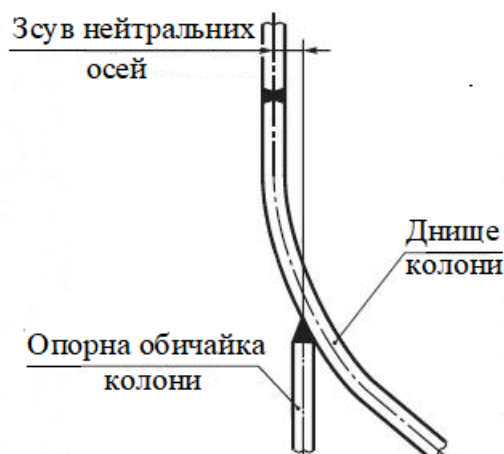


Рис. 6.3. Вузол з'єднання опорної обичайки і днища колони

## Питання для самоконтролю до розділу 6

1. Навести розрахункові перерізи, які перевіряють при розрахунку апаратів колонного типу.
2. Для яких умов проводять розрахунки апаратів колонного типу?
3. На якому боці колонного апарата згинаючий момент викликає розтяг і на якому – стиск?
4. Коли в стінці апарата в місці з'єднання з опорою виникають додаткові напруження?

## 7. ПЕРЕВІРКА СТІЙКОСТІ КОЛОНИ

Стійкість апарата колонного типу при спільній дії навантажень перевіряють в робочих умовах і умовах випробування. Перевірку на стійкість слід проводити відповідно до ГОСТ 34233.2-2017 [10]:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1,$$

де  $[p]$  – допустимий зовнішній тиск, МПа;  $[F]$  – допустима осьова сила, Н;  $[M]$  – допустимий згинаючий момент, Н·м;  $[Q]$  – допустима поперечна сила, Н.

### Допустимий зовнішній тиск

Допустимий зовнішній тиск розраховують за формулою:

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

де  $[p]_{\sigma}$  – допустимий зовнішній тиск з умови міцності, Па;  $[p]_E$  – допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності, Па.

Допустимий зовнішній тиск з умови міцності розраховують за формулою:

$$[p]_{\sigma} = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+s-c},$$

де  $D$  – внутрішній діаметр колони у розрахунковому перерізі, м.

Допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності:

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5},$$

де  $n_y$  – коефіцієнт запасу стійкості;  $B_1$  – коефіцієнт;  $l$  – розрахункова довжина гладкої обичайки корпусу колони, м.

Значення коефіцієнту запасу стійкості приймається:

$$n_y = 2,4 \text{ – для робочих умов;}$$

$$n_y = 1,8 \text{ – для умов випробування і монтажу.}$$

Формула для розрахунку коефіцієнту  $B_1$ :

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right\}.$$

У випадку царгового виконання колони за розрахункову довжину обичайки корпусу колони  $l$  приймають відстань між фланцями.

Для суцільнозварної колони з випуклим днищем (рис. 7.1) розрахункова довжина  $l$  визначається за формулою:

$$l = l_o + l_e + h_d/3,$$

де  $l_o$  – довжина циліндричної обичайки, м;  $l_e$  – довжина циліндричної частини днища (відбортовка), м;  $h_d$  – висота днища, м.



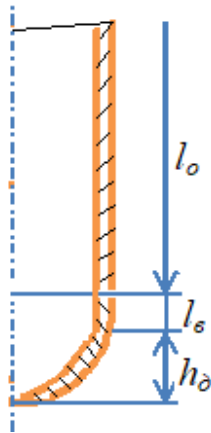


Рис. 7.1. Корпус з випуклим днищем

Якщо з іншого боку також є днище, що знаходиться під зовнішнім тиском, тоді треба збільшити розрахункову довжину на відповідну величину.

Для корпусів з конічним днищем (рис. 7.2) розрахункова довжина  $l$  визначається за формулою:

$$l = l_0 + l_\varepsilon + l_\kappa,$$

де  $l_\kappa$  – довжина конічного днища, яка враховується при визначенні розрахункової довжини  $l$ , м.

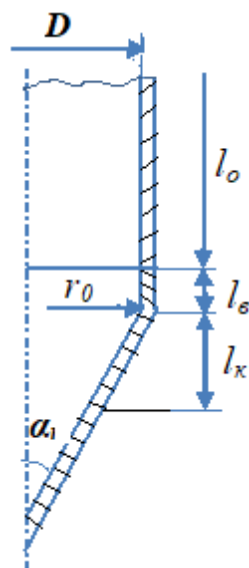


Рис. 7.2. Корпус з конічним днищем

Для конічних днищ без відбортовки:

$$l_{\kappa} = \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha_1},$$

але не більше довжини конічного днища.

Для конічних днищ з відбортовкою:

$$l_{\kappa} = \max \left\{ r_0 \sin \alpha_1; \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha_1} \right\},$$

але не більше довжини конічного днища, де  $r_0$  – внутрішній радіус відбортовки, м.

#### **Допустиме осьове стискує зусилля для циліндричної обичайки**

Допустиме осьове стискує зусилля для циліндричної обичайки обчислюють за формулою:

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

де  $[F]_{\sigma}$  – допустима осьова стискує сила з умови міцності, Н;  $[F]_E$  – допустима осьова стискує сила з умови стійкості в границях пружності, Н.

Допустима осьова стискує сила з умови міцності обчислюється за формулою:

$$[F]_{\sigma} = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma].$$

Якщо розрахункова довжина обичайки колонного апарата не перевищує внутрішній діаметр колони більше ніж у 10 разів, тоді

допустима осьова стискаюча сила з умови стійкості в границях пружності розраховується за формулою:

$$[F]_E = [F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5},$$

де  $[F]_{E1}$  – допустима осьова стискаюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності, Н.

Якщо розрахункова довжина обичайки  $l$  перевищує діаметр  $D$  більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром, додатково виконують перевірку на умову загальної стійкості в границях пружності. При цьому допустиме осьове стискаюче зусилля з умови стійкості визначають як менше з двох:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \}.$$

Допустиме осьове стискаюче зусилля, яке визначається з умов загальної стійкості в границях пружності  $[F]_{E2}$ , слід розраховувати, використовуючи розрахункову схему затисненої в нижньому перерізі балки Ейлера змінного кільцевого перерізу із зосередженими у вузлах масами [ГОСТ 34233.9–2017].

Для апарата постійного перерізу з рівномірно розподіленим по висоті стискаючим навантаженням допустима осьова стискаюча сила з умови загальної стійкості в границях пружності обчислюється за формулою:

$$[F]_{E2} = \frac{\pi(D+s-c)(s-c)E}{n_y} \cdot \left( \frac{\pi}{\lambda_T} \right)^2,$$

де  $\lambda_r$  – гнучкість елемента.

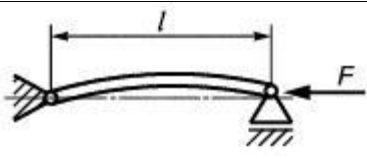
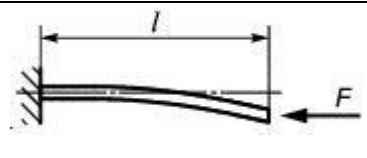
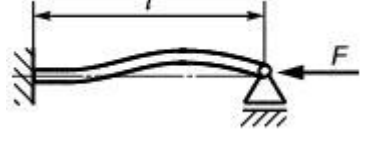
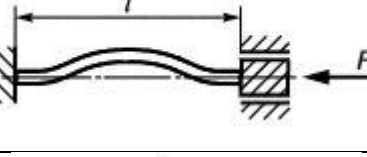
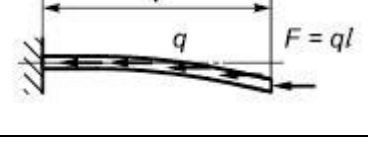
Гнучкість  $\lambda_r$  розраховується за формулою:

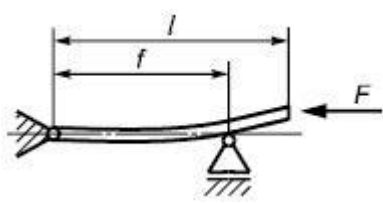
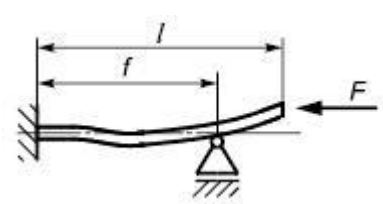
$$\lambda_r = \frac{2,83l_{np}}{D+s-c},$$

де  $l_{np}$  – зведена розрахункова довжина, м.

Зведена розрахункова довжина обирається за табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Зведена довжина циліндричної обичайки  $l_{np}$  [10]

Розрахункова схема	$f/l$	$l_{np}$
	–	$l$
	–	$2l$
	–	$0,7l$
	–	$0,5l$
	–	$1,12l$

Розрахункова схема	$f/l$	$l_{np}$
	0	2,00 $l$
	0,2	1,73 $l$
	0,4	1,47 $l$
	0,6	1,23 $l$
	0,8	1,06 $l$
	1,0	$l$
		0
0,2		1,70 $l$
0,4		1,40 $l$
0,6		1,11 $l$
0,8		0,85 $l$
1,0		0,70 $l$

### Допустиме осьове стискуjące зусилля для гладкої конічної обичайки

Допустиме осьове стискуjące зусилля для конічної обичайки обчислюють за формулою:

$$[F] = \min \left\{ \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}}; \frac{D_1}{D_F} [F]_{\sigma} \right\},$$

де  $D_F$  – ефективний діаметр конічної обичайки при осьовому стисненні і вигині, м.

Допустима осьова стискующая сила з умови міцності обчислюється за формулою:

$$[F]_{\sigma} = \pi D_F (s_K - c) [\sigma] \cos \alpha_1,$$

де  $S_k$  – виконавча товщина конічної обичайки, м.

Допустима осьова стискаюча сила з умови стійкості в границях пружності:

$$[F]_E = \frac{31,0 \cdot 10^{-5} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \left[ \frac{100(s_k - c)}{D_F} \right]^{2,5} .$$

Ефективний діаметр конічної обичайки при осьовому стисненні і вигині:

$$D_F = \frac{0,9D + 0,1D_1}{\cos \alpha_1} ,$$

де  $D_1$  – найменший внутрішній діаметр конічної обичайки, м.

### Допустимий згинаючий момент

Допустимий згинаючий момент обчислюють за формулою:

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

де  $[M]_\sigma$  – допустимий згинаючий момент з умови міцності, Н·м;  $[M]_E$  – допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності, Н·м.

Допустимий згинаючий момент з умови міцності:

$$[M]_\sigma = \frac{\pi}{4} D(D + s - c)(s - c)[\sigma] = \frac{D}{4} [F]_\sigma .$$

Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності:

$$[M]_E = \frac{8,9 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^3 \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5} = \frac{D}{3,5} [F]_{E1}$$

Для робочих умов ( $n_y = 2,4$ ) допускається згинаючий момент обчислювати за формулою:

$$[M] = \frac{\pi}{4} D(D+s-c)(s-c)[\sigma]\varphi_3,$$

де  $\varphi_3$  – коефіцієнт.

Коефіцієнт  $\varphi_3$  визначається за графіком (рис. 7.3).

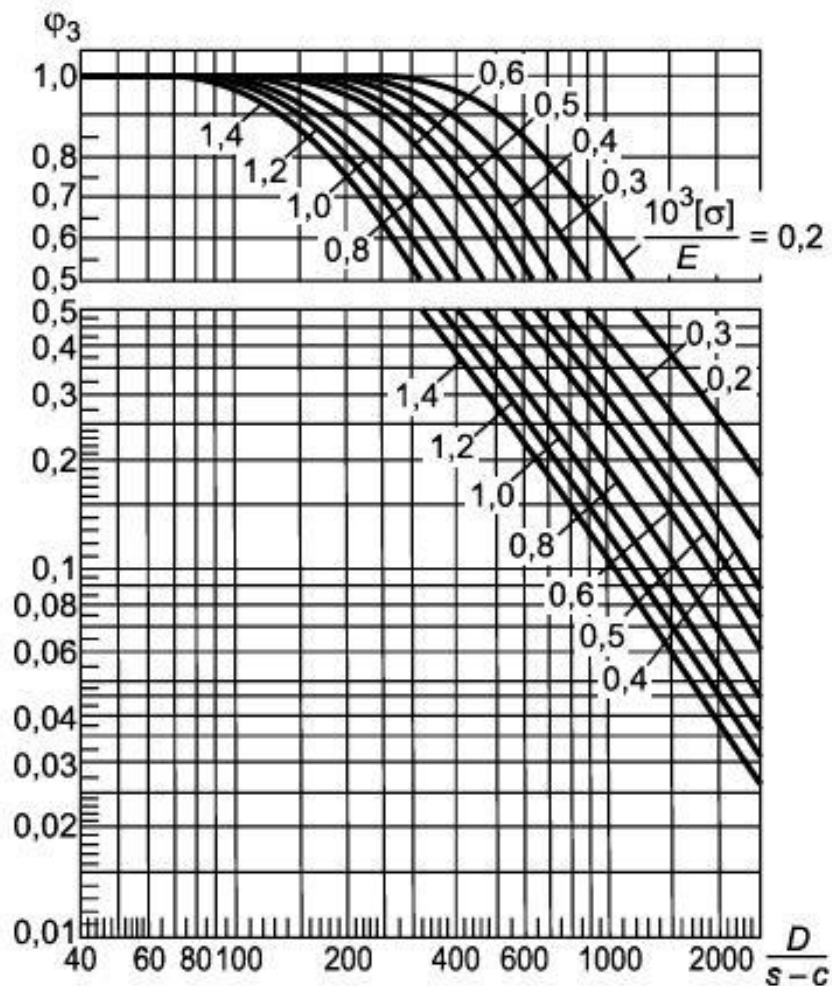


Рис. 7.3. Графік для визначення коефіцієнта  $\varphi_3$

## Допустима поперечна сила

Допустиму поперечну силу обчислюють за формулою:

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

де  $[Q]_{\sigma}$  – допустима поперечна сила з умови міцності, Н;  $[Q]_E$  – допустима поперечна сила з умови стійкості в границях пружності, Н.

Допустима поперечна сила з умови міцності:

$$[Q]_{\sigma} = 0,25[\sigma]\pi D(s - c).$$

Допустима поперечна сила з умови стійкості в границях пружності:

$$[Q]_E = \frac{2,4E(s - c)^2}{n_y} \left[ 0,18 + 3,3 \frac{D(s - c)}{l^2} \right].$$

## Питання для самоконтролю до розділу 7

1. Навести навантаження, які мають вплив на стійкість колонного апарата.
2. Надати умову стійкості колонного апарата.
3. Як визначаються допустимі значення зовнішнього тиску, стискуючої сили, згинаючого моменту і поперечної сили?

## 8. ОПОРНА ОБИЧАЙКА

### Перевірка опорної обичайки на міцність

Опорну обичайку перевіряють на міцність для робочих умов і умов випробування. Перевірку міцності опорної обичайки проводять в перерізах Г-Г і Е-Е (див. рис. 6.2) за тими самими формулами, які були



наведені для обичайки колони. Якщо опорна обичайка складається з декількох частин, що відрізняються товщиною, конструктивним (верхня частина - циліндрична, нижня - конічна) або матеріальним виконанням, слід також виконати перевірку міцності в місцях з'єднання частин опорної обичайки.

Розрахункову осьову силу  $F$  і розрахунковий згинальний момент  $M$  приймають по таблиці 6.1.

У разі зміщення нейтральних осей в місці з'єднання опори з корпусом (рис. 9) враховують додаткові напруження через зсув цих осей.

Перевірку міцності зварного шва, що з'єднує корпус апарата з опорною обичайкою (переріз Г-Г, рис. 6.2), проводять за формулою:

$$\frac{1}{\pi \cdot D_o \cdot a} \left( \frac{4M}{D_o} + F \right) \leq 0,8 \min \{ [\sigma]_o; [\sigma] \},$$

де  $D_o$  – внутрішній діаметр циліндричної опорної обичайки або внутрішній діаметр конічної опорної обичайки в розрахунковому перерізі, м;  $a$  – катет зварного шва в місці приварювання опорної обичайки до корпусу, м;  $[\sigma]_o$  – допустиме напруження для матеріалу опорної обичайки при розрахунковій температурі, МПа.

### **Перевірка опорної обичайки на стійкість**

Опорну обичайку перевіряють на стійкість в робочих умовах і умовах випробування. Перевірку на стійкість необхідно проводити, як і обичайку колони, за ГОСТ 34233.2 [10].

Розрахункову осьову силу  $F$ , розрахунковий згинальний момент  $M$  і розрахункову поперечну силу  $Q$  при перевірці на стійкість приймають за таблицею 1 для тих же розрахункових перерізів, що і при перевірці на міцність.

Міцність і стійкість опорної обичайки в зоні отворів (переріз Д-Д, рис. 6.2) визначають за формулою:

$$\frac{F}{\varphi_1[F]} + \frac{M + \varphi_3 \cdot F \cdot D_o}{\varphi_2[M]} \leq 1,$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – коефіцієнти.

Коефіцієнт  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1 = \frac{A}{\pi D_o (s_o - c)},$$

де  $A$  – площа найбільш ослабленого поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт  $\varphi_2$ :

$$\varphi_2 = \frac{4W}{\pi D_o^2 (s_o - c)},$$

де  $W$  – найменший момент опору найбільш ослабленого поперечного перерізу, м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт  $\varphi_3$ :

$$\varphi_3 = \frac{Y_s}{D_o},$$

де  $Y_s$  – координата центра ваги найбільш ослабленого поперечного перерізу, м.

При цьому отвори діаметром менше  $0,04D_o$  при визначенні міцності і стійкості опорної обичайки в зоні отворів не враховують.

Якщо в розрахунковому перерізі опорної обичайки є тільки один отвір, тоді коефіцієнти  $\varphi_1, \varphi_2$  і  $\varphi_3$  можна визначати за графіками (рис. 8.1, 8.2), де  $b_{ш}$  – довжина штуцера, який укріплює отвір, м;  $d_{ш}$  – середній діаметр штуцера, який укріплює отвір, м;  $S_{ш}$  – виконавча товщина штуцера, який укріплює отвір, м [11].

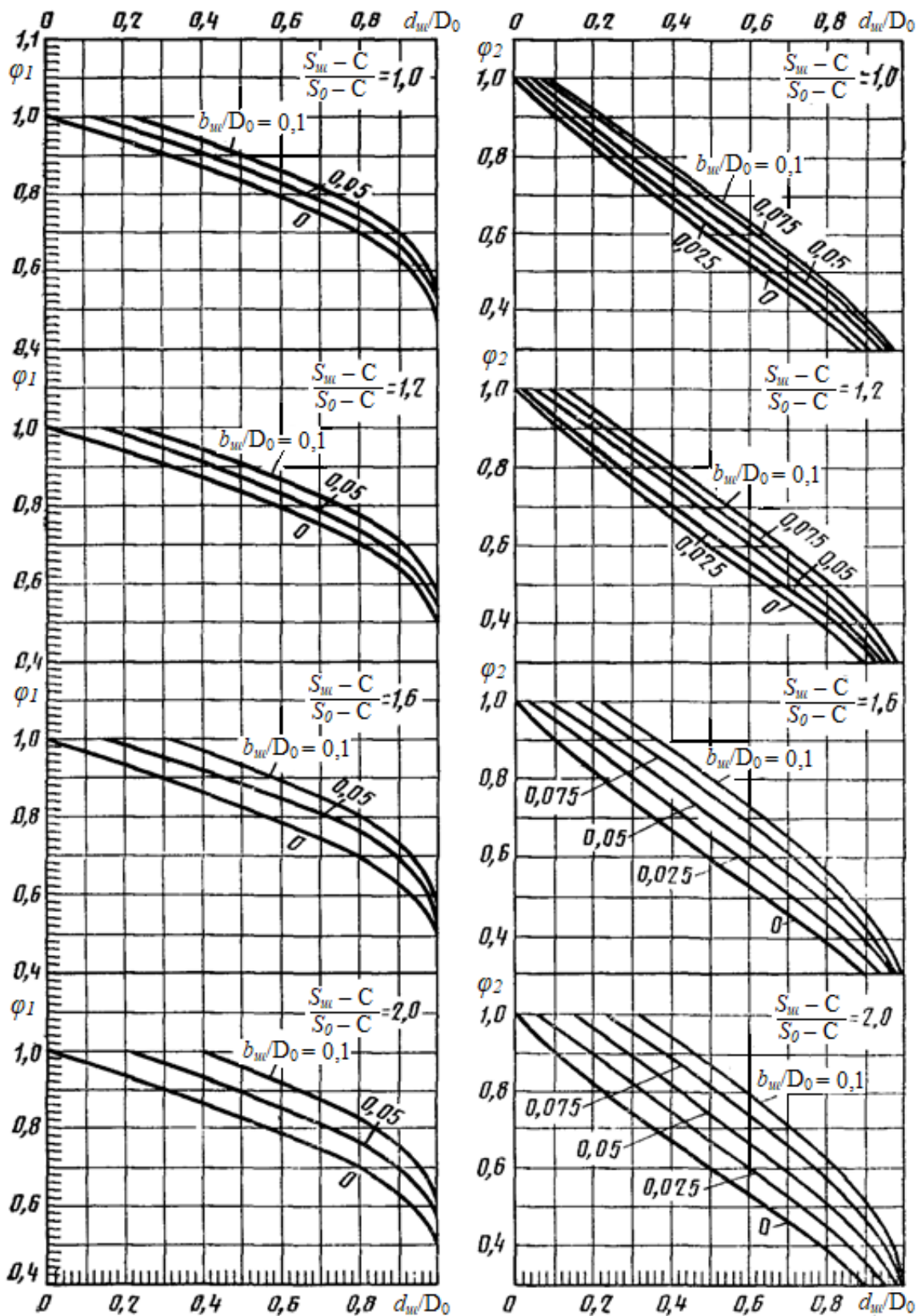


Рис. 8.1. Графіки для визначення коефіцієнтів  $\phi_1$  і  $\phi_2$

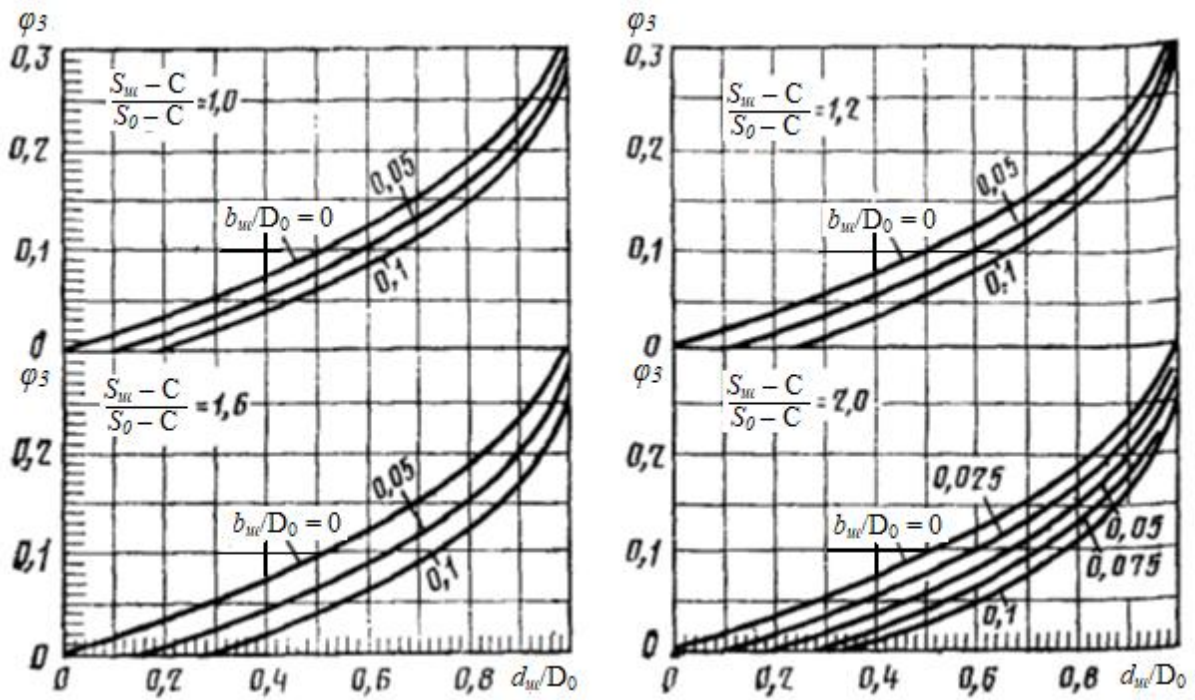


Рис. 8.2. Графіки для визначення коефіцієнта  $\varphi_3$

### Елементи опорного вузла

Розрахунок елементів опорного вузла (рис. 8.3) слід проводити для робочих умов і умов випробування.

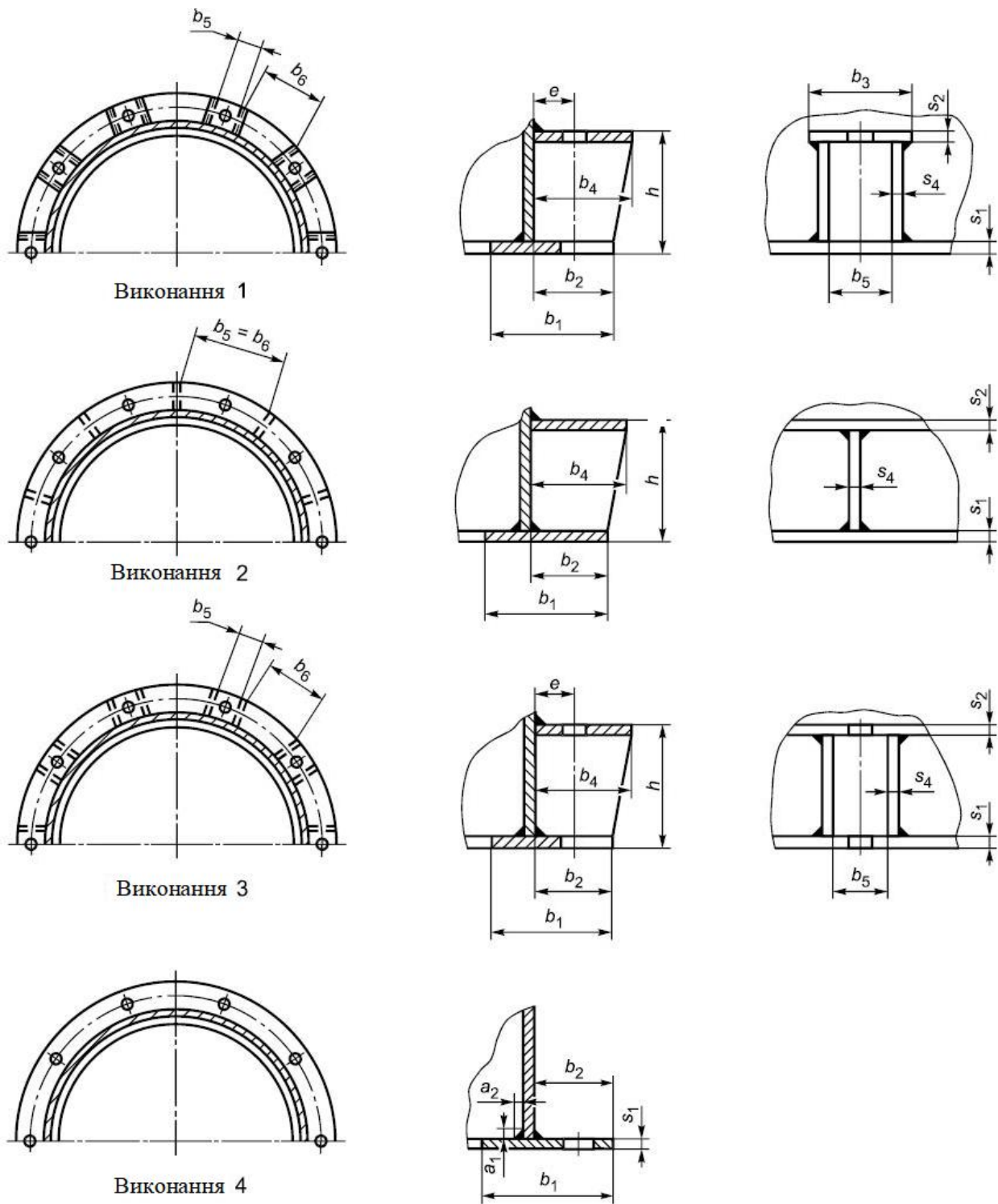


Рис. 8.3. Опорний вузол

Розрахункові осьові сили  $F$  і згинальні моменти  $M$  приймають за таблицею 1 для розрахункового перерізу Е-Е (рис. 6.2).

Товщину нижнього опорного кільця  $S_1$  обчислюють за формулою:

$$s_1 \geq \chi_1 \cdot b_2 \sqrt{\frac{\frac{4M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 [\sigma]_A} + c_0},$$

де  $\chi_1$  – коефіцієнт;  $b_1$  – ширина нижнього опорного кільця, м;  $b_2$  – виступаюча ширина нижнього опорного кільця, м;  $D_6$  – діаметр кола фундаментних болтів, м;  $[\sigma]_A$  – допустиме напруження для матеріалу елемента опорного вузла при розрахунковій температурі, МПа.

Коефіцієнт  $\chi_1$  визначається за рис. 8.4 для опорних кілець у виконанні 1, 2 і 3 (рис. 8.1) або обчислюють за формулою:

$$\chi_1 = \left[ \frac{1 + 1,81 \left( \frac{b_2}{b_6} \right)^3}{1 + 2,97 \left( \frac{b_2}{b_6} \right)^3} \right]^2,$$

де  $b_6$  – максимальна відстань між двома суміжними ребрами, м.

$\chi_1 = 1$  для опорних кілець виконання 4.

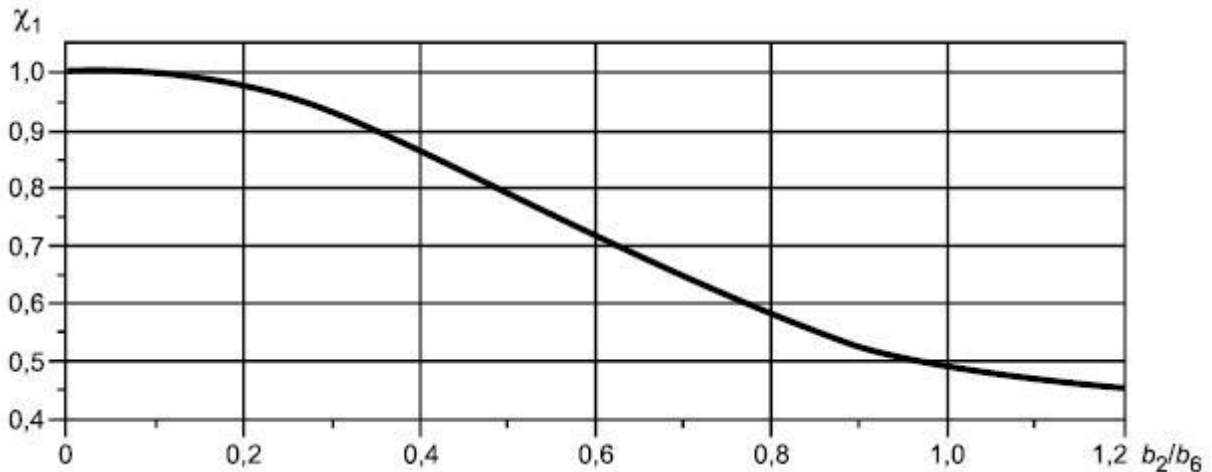


Рис. 8.4. Графік для визначення коефіцієнта  $\chi_1$

Виконавчу товщину нижнього опорного кільця із конструктивних міркувань рекомендується приймати  $S_I \geq 1,5 S_0$ .

Додатково для опорних кілець виконання 4 товщину нижнього опорного кільця  $S_I$  перевіряють за формулою:

$$s_1 \geq \sqrt{\left(\frac{4M}{D_0} - F\right) \frac{4e}{\pi \cdot D_0 [\sigma]_A}} + c_0,$$

де  $e$  – відстань від осі фундаментного болта до опорної обичайки, м.

Якщо з розрахунків виходить, що  $S_I > 2 S_0$ , тоді необхідно застосовувати конструкції нижнього опорного вузла у виконанні 1, 2 або 3.

Ширина нижнього опорного кільця  $b_1$ , що встановлюється на бетонному фундаменті, повинна відповідати умові:

$$b_1 \geq \frac{\frac{4M}{D_0} + F}{\pi \cdot D_0 [\sigma]_B},$$

де  $[\sigma]_B$  – допустиме напруження бетону на стиск, яке визначається залежно від марки бетону по будівельним нормам і правилам, МПа.

Допустимі напруження бетону на стиск слід приймати залежно від марки по таблиці 8.1 або визначати за формулою:

$$[\sigma]_B = \frac{R_{m/20}}{n_B},$$

де  $R_{m/20}$  – границя міцності бетону при осьовому стиску за температури 20 °С, МПа;  $n_B = 2.5$  – запас міцності бетону за границею міцності на стиск.

Таблиця 8.1. Допустиме напруження бетону на стиск  $[\sigma]_B$  [9]

Марка бетону за класом міцності на стиск	Клас міцності на стиск	Допустиме напруження бетону на стиск при температурі 20 °С: $[\sigma]_B$ , МПа
M150	B10	6
M200	B15	8
M250	B20	10
M350	B25	14
M400	B30	16

Товщину верхнього опорного кільця  $S_2$  обчислюють за формулою:

$$s_2 \geq \chi_2 \sqrt{\frac{A_6 [\sigma]_B}{[\sigma]_A}},$$

де  $\chi_2$  – коефіцієнт;  $A_6$  – площа поперечного перерізу фундаментного болта по внутрішньому діаметру різьби, м<sup>2</sup>;  $[\sigma]_B$  – допустиме напруження для фундаментних болтів, МПа.

Коефіцієнт  $\chi_2$  визначається за рис. 8.5 або обчислюють за формулою:

$$\chi_2 = \sqrt{\frac{3 \frac{b_4}{b_5}}{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}},$$

де  $b_4$  – виступаюча ширина верхнього опорного елемента, м;  $b_5$  – мінімальна відстань між двома суміжними ребрами, м;  $d$  – діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта, м.



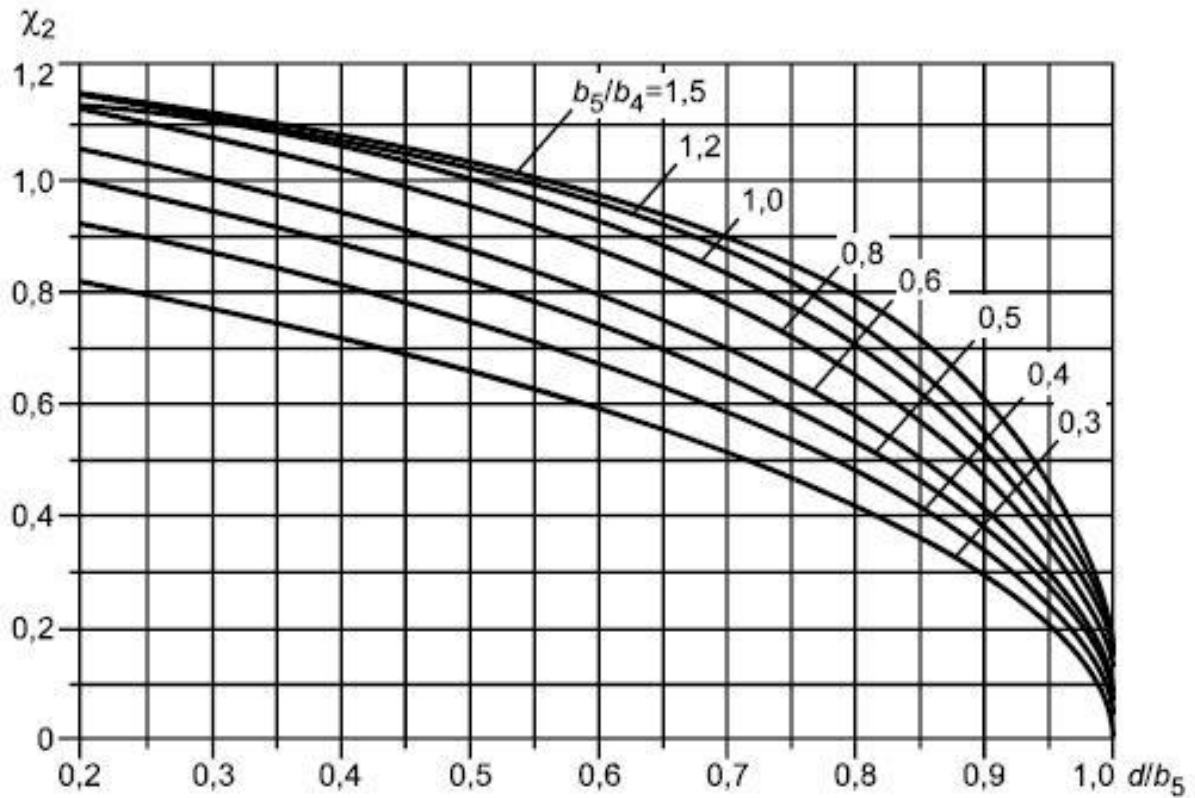


Рис. 8.5. Графік для визначення коефіцієнта  $\chi_2$

Із конструктивних міркувань рекомендується приймати  $S_2 \geq 1,5 S_0$ .

Допустиме напруження для фундаментних болтів визначається за табл. 8.2 або обчислюють за формулою:

$$[\sigma]_B = R_{0,2}^{20} / n_T,$$

де  $R_{0,2}^{20}$  – мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 °С (напруження, за якого залишкове видовження становить 0,2 %), МПа;  
 $n_T = 1.65$  – коефіцієнт запасу міцності фундаментних болтів за границею плинності.

Таблиця 8.2. Допустиме напруження для фундаментних болтів  $[\sigma]_B$  [9]

Номінальний діаметр фундаментних болтів, мм	Допустиме напруження $[\sigma]_B$ при температурі 20 °С, МПа для фундаментних болтів зі сталі марки		
	Ст3	09Г2С	10Г2С1
12, 16, 20	148	197	203
24, 30	142	184	197
36	142	172	197
42, 48, 56	136	172	197
64, 72, 80	136	166	178
90, 100	136	160	178

Допускається приймати для фундаментних болтів значення допустимих напружень менше розрахованих за вищенаведеною формулою і наведених у таблиці 8.2. При цьому для встановлюваних нових апаратів колонного типу слід вказувати значення навантаження на болти при затягуванні або значення крутного моменту так, щоб розрахункові напруження в фундаментних болтах при монтажі не перевищили новоприйнятих допустимих напружень.

Для фундаментних болтів застосовують матеріали, представлені в таблиці 8.3, залежно від абсолютної мінімальної зимової температури повітря в районі установки.

Таблиця 8.3. Нижня межа застосовності фундаментних болтів [9]

Марка сталі	Номер стандарту	Нижня температурна границя застосування, °С
Ст3пс2, Ст3сп2	ГОСТ 535	-20
Ст3пс4, Ст3сп4	ГОСТ 535	-30
09Г2С-4	ГОСТ 19281	-40
09Г2С-6	ГОСТ 19281	-70
10Г2С1-6	ГОСТ 19281	-70

Площі поперечних перерізів фундаментних болтів по внутрішньому діаметру різьби  $A_6$  наведені у табл. 8.4.

Таблиця 8.4. Площа поперечного перерізу фундаментного болта по внутрішньому діаметру різьби  $A_b$  [12]

Номинальний діаметр різьби $d_\phi$ , мм	Розрахункова площа поперечного перерізу $A_b \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>
12	0,84
16	1,57
20	2,45
24	3,52
30	5,60
36	8,16
42	11,20
48	14,72
56	20,30
64	26,76
72	34,60
80	43,44
90	55,91
100	69,95
110	85,56
125	111,91
140	141,81

Таблиця 8.5. Діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта  $d$  за ДСТУ ГОСТ 5915:2008 [13]

Номинальний діаметр різьби $d_\phi$ , мм	12	(14)	16	(18)	20	(22)	24	(27)	30	36	42	48
$d$ , мм	16,5	19,2	22,0	24,8	27,7	31,4	33,2	38,0	42,7	51,1	59,9	69,4

Примітка. Діаметри, які подані у дужках, використовувати не варто.

Таблиця 8.6. Діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта  $d$  за ГОСТ 10605-94 [14]

Номинальний діаметр різьби $d_\phi$ , мм	(52)	56	64	72	(76)	80	90	100	110	125	140	150
$d$ , мм	74,2	78,7	88,2	97,7	102,4	107,2	121,1	135,4	144,9	168,6	187,2	211,0

Примітка. Діаметри, які подані у дужках, використовувати не варто.

При наявності пластини товщиною  $S_3$ , що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця, розрахунок виконують за формулою:

$$s_2 + \chi_3 \cdot s_3 \geq \chi_2 \sqrt{\frac{A_6 [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c},$$

де  $\chi_3$  – коефіцієнт.

Коефіцієнт  $\chi_3$  визначається за рис. 8.6 або обчислюють за формулою:

$$\chi_3 = \frac{b_7}{b_4} \left( \frac{s_3}{s_2} \right)^2,$$

де  $b_7$  – ширина пластини, що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця, м.

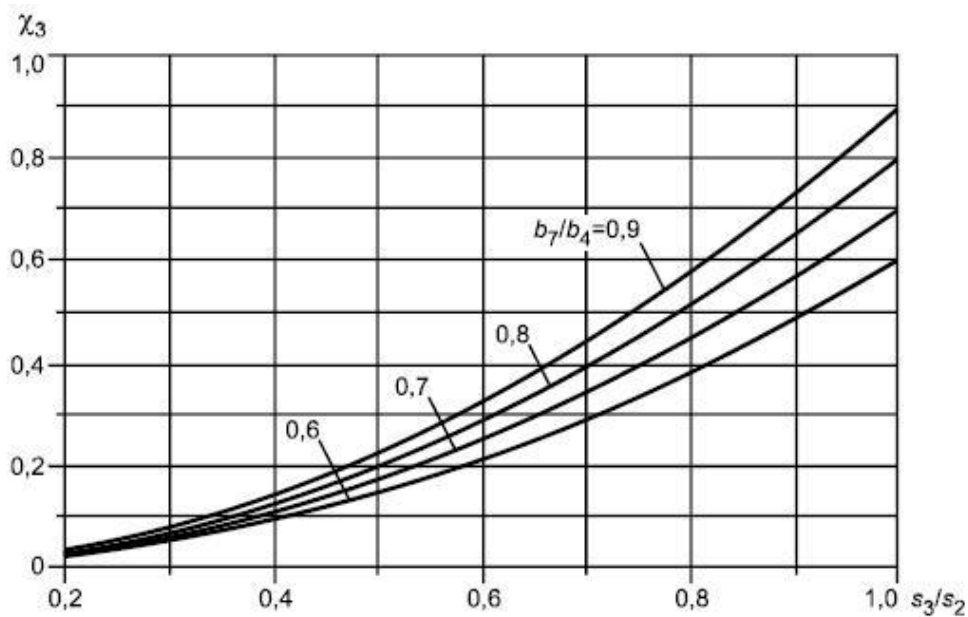


Рис. 8.6. Графік для визначення коефіцієнта  $\chi_3$

Товщину ребра  $S_4$  обчислюють за формулою:

$$s_4 \geq \frac{A_6 [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 [\sigma]_A} + c,$$

де  $\chi_4$  – коефіцієнт.

Коефіцієнт  $\chi_4 = 2$  для опорного вузла у виконанні 1 і 3,  $\chi_4 = 1$  для опорного вузла у виконанні 2.

Із конструктивних міркувань рекомендується приймати  $S_4 \geq 0,4 S_1$ .

Ребра з співвідношенням  $(b_2 / S_4) > 20$  необхідно додатково перевіряти на стійкість.

Перевірку міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця проводять за формулою:

$$\frac{6\chi_5 \cdot A_6[\sigma]_B e}{(s_0 - c_0)^2 h} \leq 1,5[\sigma]_0,$$

де  $\chi_5$  – коефіцієнт;  $e$  – відстань від осі фундаментного болта до обичайки опори, м;  $h$  – висота опорного вузла, м.

Коефіцієнт  $\chi_5$  визначається за рис. 8.7 або обчислюють за формулою:

$$\chi_5 = -0,0248 \left\{ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K.$$

В цій формулі:  $b_3$  – довжина верхнього опорного елемента, м;

$$N = \frac{D_0}{2(s_0 - c)} \left( \frac{10b_3}{D_0} \right)^{2,05}; \quad K = \begin{cases} 0 & \text{при } N \leq 10^4, \\ \left[ -0,002 \ln(N \cdot 10^{-4}) \right] & \text{при } N > 10^4. \end{cases}$$

Довжина верхнього опорного елемента  $b_3 = b_4$  для опорного вузла у виконанні 2 і  $b_3 = b_5 + b_6$  для опорного вузла у виконанні 3, де  $b_6$  – максимальна відстань між двома суміжними ребрами, м.

Перевірку міцності зварного шва приварки нижнього опорного кільця виконання 4 до опорної обичайки проводять за формулою:

$$\frac{1}{\pi D_0 1,4 \min\{a_1; a_2\}} \left( \frac{4M}{D_0} - F \right) \leq 0,5[\sigma]_0,$$

де  $a_1$  – катет зварного шва по опорній обичайці в місці приварювання до нижнього опорного кільця, м;  $a_2$  – катет зварного шва по нижньому опорному кільцю в місці приварювання опорної обичайки, м.

Для опорних кілець у виконанні 1, 2, 3 перевірку за останньою формулою не проводять.

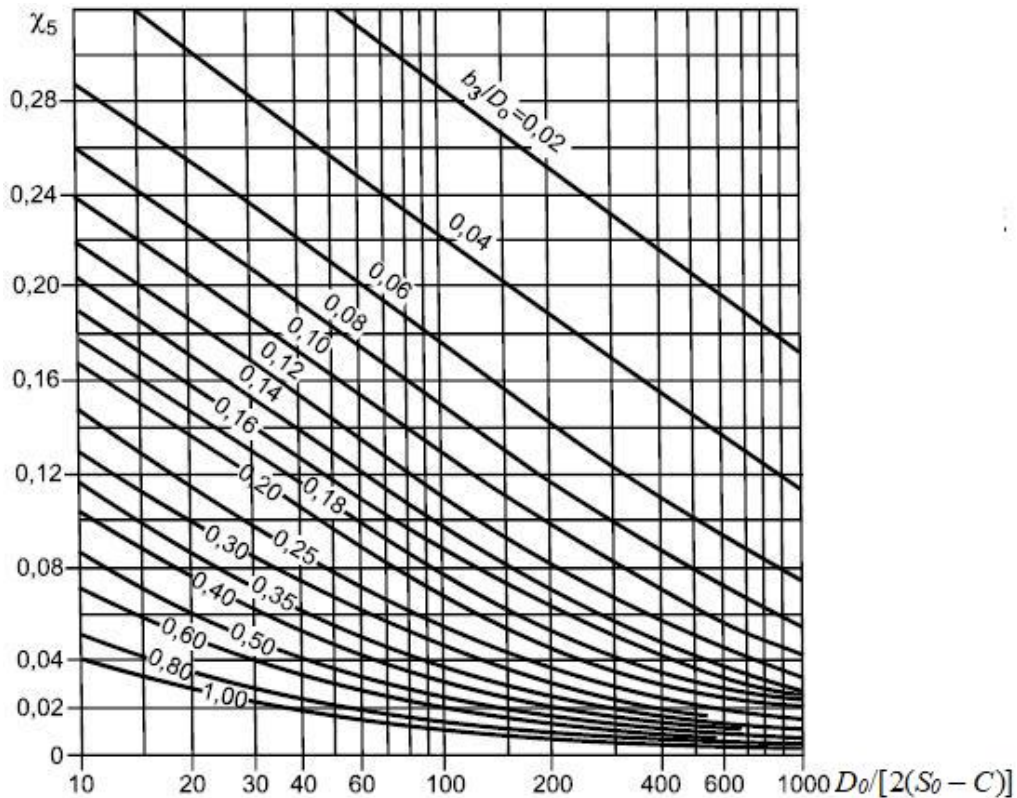


Рис. 8.7. Графік для визначення коефіцієнта  $\chi_5$

### Розрахунок фундаментних болтів

Розрахунок фундаментних болтів необхідно проводити для робочих умов і умов монтажу, якщо  $M > 0,44FD_6$ .

Розрахункові осьові сили  $F$  і згинальні моменти  $M$  приймають за таблицею 1 для розрахункового перерізу Е-Е (рис. 6.2).

У випадку, коли  $M \leq 0,44FD_6$  діаметр і кількість болтів приймають конструктивно.

Внутрішній діаметр різьби фундаментних болтів  $d_b$  обчислюють за формулою:

$$d_b \geq \chi_b \sqrt{\frac{M - 0,44 F \cdot D_b}{n[\sigma]_B D_b} + c_B},$$

де  $\chi_b$  – коефіцієнт;  $n$  – кількість фундаментних болтів;  $c_B$  – сумарний додатак на корозію до діаметра фундаментного болта, м.

Коефіцієнт  $\chi_b$  визначається за рис. 8.8 або обчислюють за формулою:

$$\chi_b = \begin{cases} 2,25 + 0,3 \frac{F \cdot D_b}{M} & \text{при } \frac{F \cdot D_b}{M} < 0,5; \\ 2,7 - 2 \frac{F \cdot D_b}{M} + 3,7 \left( \frac{F \cdot D_b}{M} \right)^2 - 2,5 \left( \frac{F \cdot D_b}{M} \right)^3 + 0,65 \left( \frac{F \cdot D_b}{M} \right)^4 & \text{при } \frac{F \cdot D_b}{M} \geq 0,5. \end{cases}$$

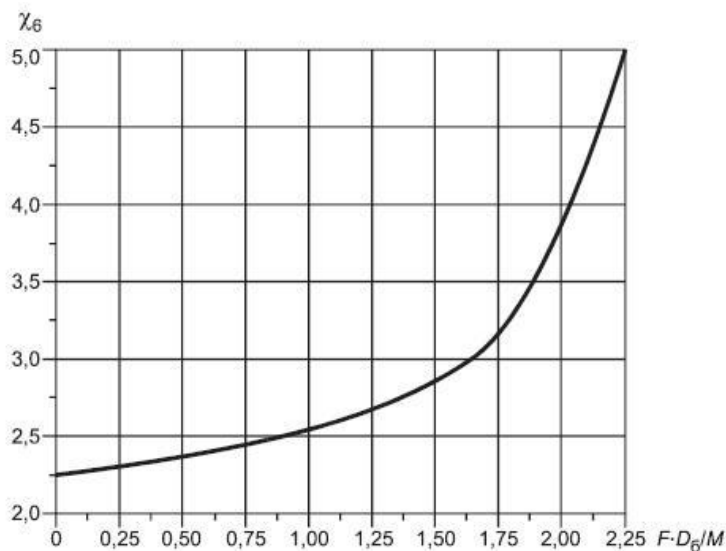


Рис. 8.8. Графік для визначення коефіцієнта  $\chi_b$

### Питання для самоконтролю до розділу 8

1. Навести перерізи, де необхідно проводити перевірку міцності опорної обичайки.
2. Надати умову стійкості опорної обичайки.
3. Навести стандартні виконання опорних вузлів колонних апаратів.

## 9. АЛГОРИТМ І ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОЛОННОГО АПАРАТА

Вихідні дані для розрахунку по варіантам подано у таблиці 9.1.

Розрахунок виконати для робочих умов. Колона – суцільнозварна. Діаметр колони однаковий по висоті апарата. Висота колони поділена на 5 ділянок. На висоті  $x_{j1}$  і  $x_{j2}$  колони розташовані 2 площадки обслуговування, які мають площі, відповідно,  $A_{j1}$  і  $A_{j2}$ . Відстань до розрахункового перерізу (висота опорної обичайки)  $x_0 = 1,5$  м. Днища колони – еліптичні, без відбортовки. Висота днищ  $h_0 = 0,25D$ . Розрахункова температура стінки  $t_R = 80^\circ\text{C}$ . Матеріал стінки колони – Ст3. Розрахунковий зовнішній тиск  $p = 0,1$  МПа. Згинаючий момент від дії ексцентричних вагових навантажень  $M_G$  відсутній. Поперечна сила  $Q$  відсутня. Коефіцієнт міцності зварного шва  $\varphi = 0,9$ . Конструкція опорної обичайки: виконання 2 без пластини підсилення верхнього опорного вузла. Коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту  $C_F = 60$  МН/м<sup>3</sup>. Внутрішній діаметр опорної обичайки  $D_0 = D$ . Висота опорного вузла  $h = 0,4$  м. Виконавча товщина опорної обичайки  $S_o = S$ . Сума додатків до розрахункової товщини стінки опорної обичайки  $C_o = C$ . Сумарний додаток на корозію до діаметра фундаментного болта  $C_B = C$ . Катет зварного шва в місці приварювання опорної обичайки до корпусу  $a = S_o$ . Середній діаметр отвору в опорній обичайці  $d_1 = 0,5$  м. Виступаюча ширина нижнього опорного кільця  $b_2 = 0,3$  м. Виступаюча ширина верхнього опорного елемента  $b_4 = 0,35$  м. Відстань між двома суміжними ребрами  $b_5 = b_6 = 0,5$  м. Фундаментні болти виконані зі сталі 09Г2С. Марка бетону фундаменту за класом міцності на стиск – М250. Колона розташована в м. Києві. Розрахункова схема подана на рис. 9.1.



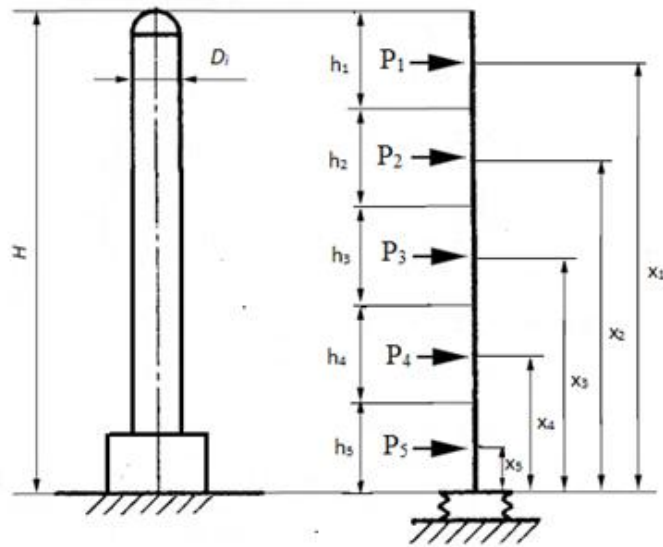


Рис. 9.1. Розрахункова схема

Таблиця 9.1. Вихідні дані до розрахунків

Варіант	$D, м$	$H, м$	$l_0, м$	$D_k, м$	$S, мм$	$C, мм$	$G, кН$	$x_{j1}, м$	$x_{j2}, м$	$A_{j1} = A_{j2}, м$	$D_6, м$	$n$
1	2	20	18	2,2	12	1	300	18	12	2,5	2,5	10
2	2	25	23	2,3	14	1	340	20	14	2,5	2,5	10
3	2	30	28	2,4	16	1	360	28	22	2,5	2,5	10
4	2,2	25	23	2,4	14	1	340	20	14	2,8	2,5	10
5	2,2	30	28	2,5	16	1	360	28	22	2,8	2,5	10
6	2,2	35	33	2,6	18	2	380	30	24	2,8	2,5	10
7	2,5	25	23	2,7	20	2	360	23	17	3,2	2,75	8
8	2,5	30	28	2,8	18	2	380	28	22	3,2	2,75	8
9	2,5	35	33	2,9	20	2	400	30	24	3,2	2,75	8
10	2,8	30	28	3,0	18	2	380	26	20	3,5	3,1	8
11	2,8	35	33	3,1	20	2	400	30	24	3,5	3,1	8
12	2,8	40	38	3,2	22	3	420	40	34	3,5	3,1	8
13	3,0	30	28	3,2	20	3	400	28	22	3,8	3,25	8
14	3,0	40	38	3,3	22	3	420	38	32	3,8	3,25	8
15	3,0	45	43	3,4	24	3	440	43	37	3,8	3,25	8
16	3,5	35	33	3,8	22	3	420	33	27	4,4	3,8	8
17	3,5	40	38	3,9	24	3	440	38	32	4,4	3,8	8
18	3,5	38	36	4,0	22	4	430	33	27	4,4	3,8	8
19	3,5	42	40	3,8	26	4	450	38	32	4,5	3,8	8
20	3,5	45	43	3,9	28	4	460	43	37	4,5	3,8	8
Приклад розрахунку	2,8	32	30	3,0	20	2	390	28	22	3,5	3,1	8

Таблиця 9.2. Алгоритм і приклад розрахунку згинаючого моменту від дії вітрового навантаження

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Вага кожної ділянки колони $G_i$ , Н	Якщо діаметр колони незмінний по висоті, тоді приблизно $G_i = G/z$ . В іншому випадку $G_i$ визначається окремо для кожної ділянки.	$G_i = 390000/5 = 78000$ Н
2.	Відстань від рівня кріплення колони до середини $i$ -ї ділянки колони $x_i$ , м	$x_i$ визначається відповідно розрахунковій схемі колони.	$x_1 = 28,8$ м; $x_2 = 22,4$ м; $x_3 = 16,0$ м; $x_4 = 9,6$ м; $x_5 = 3,2$ м
3.	Висота $i$ -ї ділянки колони $h_i$ , м	$h_i$ визначається відповідно розрахунковій схемі колони. Для колони постійного перерізу $h_i = H/z$ .	$h_i = 32/5 = 6,4$ м
4.	Мінімальний момент інерції підшви фундаменту $I_F$ , м <sup>4</sup>	$I_F = 1,3\pi D_k^4/64$	$I_F = 1,3 \cdot 3,14 \cdot 3^4/64 = 5,166$ м <sup>4</sup>
5.	Момент інерції верхнього металевого перерізу $i$ -ї ділянки колони щодо центральної осі $I_i$ , м <sup>4</sup>	$I_i = \pi[(D_i - 2C)^4 - D_{ei}^4]/64$ Для колони постійного перерізу $D_i = Const$ , $D_{ei} = Const$	Для колони постійного перерізу $I_i = I = 3,14[(2,84 - 2 \cdot 0,002)^4 - 2,8^4]/64 = 0,158$ м <sup>4</sup>

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
6.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ , МПа	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею А1 додатку А залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^{\circ}\text{C}$ )	Для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^{\circ}\text{C}$ модуль пружності в умовах розтягу $E = 1,93 \cdot 10^5$ МПа
67 7.	Період власних коливань стрижня постійного перерізу з жорстким закріпленням $T_0$ , с	$T_0 = 1,8H \sqrt{\frac{GH}{g E \cdot I}}$	$T_0 = 1,8 \cdot 3,2 \sqrt{\frac{0,39 \cdot 32}{9,81 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158}} = 0,372 \text{ с}$
8.	Розрахунковий період власних коливань колони $T$ , с	<p>Для колони постійного перерізу з приблизно рівномірно розподіленим по висоті апарата масою:</p> $T = T_0 \sqrt{1 + \frac{4E \cdot I}{H \cdot C_F \cdot I_F}}$ <p>Для апарата змінного перерізу:</p> $T = 2\pi \cdot H \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^z G_i \cdot \alpha_i^2}{g \left( \frac{H}{2E \cdot I_1} \gamma + \frac{1}{C_F \cdot I_F} \right)}}$	$T = 0,372 \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158}{32 \cdot 60 \cdot 5,166}} = 1,357 \text{ с}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
9.	Допоміжний коефіцієнт $\Delta$	$\Delta = \frac{1}{3} + \frac{I_1}{I_2} \frac{H_2}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} + 1 \right]$ або визначається за графіком (рис. 3.2)	Для колони постійного перерізу $\Delta = 1/3$
10.	Допоміжний коефіцієнт $\lambda$	$\lambda = \frac{I_1}{I_3} \frac{H_3}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_3}{H_1} \right)^2 + \frac{H_3}{H_1} + 1 \right]$ або визначається за графіком (рис. 3.3)	Для колони постійного перерізу $\lambda = 0$
11.	Допоміжний коефіцієнт $\mu$	$\mu = \frac{I_1}{I_3} \frac{H_3}{H_2} \left( \frac{H_3}{H_2} + 1 \right)$ або визначається за графіком (рис. 3.4)	Для колони постійного перерізу $\mu = 0$
12.	Допоміжний коефіцієнт $\gamma$	$\gamma = \frac{2}{H^3} \left[ H_1^3 (\Delta + \lambda) + H_2^3 \cdot \mu + 2 \frac{I_1}{I_2} H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \right]$ Для колони постійного перерізу: $\gamma = 2 \Delta$	$\gamma = 2/3$

13.	Коефіцієнти $\beta_i$	$\beta_i = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{x_i}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_i}{H} \right)^3 \right]$	$\beta_1 = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{28,8}{32} \right)^2 - \left( \frac{28,8}{32} \right)^3 \right] = 0,8505$ $\beta_2 = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{22,4}{32} \right)^2 - \left( \frac{22,4}{32} \right)^3 \right] = 0,5635$ $\beta_3 = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{16}{32} \right)^2 - \left( \frac{16}{32} \right)^3 \right] = 0,3125$ $\beta_4 = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{9,6}{32} \right)^2 - \left( \frac{9,6}{32} \right)^3 \right] = 0,1215$ $\beta_5 = \frac{1}{2} \left[ 3 \left( \frac{3,2}{32} \right)^2 - \left( \frac{3,2}{32} \right)^3 \right] = 0,0145$
-----	-----------------------	--	---

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Відносні переміщення центрів тяжіння, відповідно, $i$ -х ділянок, що виникають при власних коливаннях, $\alpha_i$ , 1/(МН·м)	$\alpha_i = \gamma \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} \beta_i + \frac{x_i}{H \cdot C_F \cdot I_F}$	$\alpha_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} \cdot 0,8505 + \frac{28,8}{32 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,0032$ $\alpha_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} \cdot 0,5635 + \frac{22,4}{32 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,0025$ $\alpha_3 = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} \cdot 0,3125 + \frac{16}{32 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,0017$ $\alpha_4 = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} \cdot 0,1215 + \frac{9,6}{32 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,001$ $\alpha_5 = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} \cdot 0,0145 + \frac{3,2}{32 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,0003$
15.	Коефіцієнт, що враховує зміну вітрового навантаження по висоті колони $\Theta_i$	$\Theta_i = \begin{cases} 0,75 & \text{при } x_i \leq 5 \text{ м} \\ (x_i/10)^{0,3} & \text{при } x_i > 5 \text{ м} \end{cases}$	$\Theta_{i1} = (28,8/10)^{0,3} = 1,373; \Theta_{i2} = (22,4/10)^{0,3} = 1,274; \Theta_{i3} = (16,0/10)^{0,3} = 1,151; \Theta_{i4} = (9,6/10)^{0,3} = 0,988$ $\Theta_{i5} = 0,75$
16.	Нормативне значення вітрового тиску $q_0$ , Па	$q_0$ визначається за ДБН В.1.2-2:2006. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ. Нормы проектирования. Для району Києва $q_0 = 370$ Па	$q_0 = 370$ Па

17.	Середня складова вітрового навантаження на $i$ -й ділянці апарата $P_{sti}$ , Н	$P_{sti} = K \cdot q_0 \cdot \Theta_i \cdot D_i \cdot h_i$ ,	$P_{st1} = 0,7370 \cdot 1,373 \cdot 2,84 \cdot 6,4 = 6463,513$ Н; $P_{st2} = 0,7370 \cdot 1,274 \cdot 2,84 \cdot 6,4 = 5997,462$ Н; $P_{st3} = 0,7370 \cdot 1,151 \cdot 2,84 \cdot 6,4 = 5418,429$ Н; $P_{st4} = 0,7370 \cdot 0,988 \cdot 2,84 \cdot 6,4 = 4651,093$ Н; $P_{st5} = 0,7370 \cdot 0,75 \cdot 2,84 \cdot 6,4 = 3530,688$ Н
18.	Коефіцієнт пульсації тиску вітру $m_k$ для середини $i$ -ї ділянки апарата на висоті $x_i$ , $m_i$	$m_i = 0,76(x_i/10)^{-0,15}$	$m_1 = 0,76(28,8/10)^{-0,15} = 0,648$ ; $m_2 = 0,76(22,4/10)^{-0,15} = 0,673$ ; $m_3 = 0,76(16,0/10)^{-0,15} = 0,708$ ; $m_4 = 0,76(9,6/10)^{-0,15} = 0,765$ ; $m_5 = 0,76(3,2/10)^{-0,15} = 0,902$
19.	Зведене відносне прискорення центра ваги $i$ -ї ділянки $\eta_i$	$\eta_i = \alpha_i \sum_{i=1}^z (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{sti}) / \sum_{i=1}^z (\alpha_i^2 \cdot G_i)$	$\eta_1 = 0,0032 \left( \frac{0,0032 \cdot 0,648 \cdot 6463,513 + \dots}{0,0032^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0025 \cdot 0,673 \cdot 5997,462 + \dots}{\dots 0,0025^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0017 \cdot 0,708 \cdot 5418,429 + \dots}{\dots 0,0017^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,001 \cdot 0,765 \cdot 4651,093 + \dots}{\dots 0,001^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0003 \cdot 0,902 \cdot 3530,688}{\dots 0,0003^2 \cdot 78000} \right) = 0,0692$

			$\eta_2 = 0,0025 \left( \frac{0,0032 \cdot 0,648 \cdot 6463,513 + \dots}{0,0032^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0025 \cdot 0,673 \cdot 5997,462 + \dots}{\dots 0,0025^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0017 \cdot 0,708 \cdot 5418,429 + \dots}{\dots 0,0017^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,001 \cdot 0,765 \cdot 4651,093 + \dots}{\dots 0,001^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0003 \cdot 0,902 \cdot 3530,688}{\dots 0,0003^2 \cdot 78000} \right) = 0,054$ $\eta_3 = 0,0017 \left( \frac{0,0032 \cdot 0,648 \cdot 6463,513 + \dots}{0,0032^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0025 \cdot 0,673 \cdot 5997,462 + \dots}{\dots 0,0025^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0017 \cdot 0,708 \cdot 5418,429 + \dots}{\dots 0,0017^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,001 \cdot 0,765 \cdot 4651,093 + \dots}{\dots 0,001^2 \cdot 78000 + \dots} + \frac{\dots + 0,0003 \cdot 0,902 \cdot 3530,688}{\dots 0,0003^2 \cdot 78000} \right) = 0,0372$
--	--	--	--



73

$$\eta_4 = 0,001 \left( \begin{array}{l} \frac{0,0032 \cdot 0,648 \cdot 6463,513 + \dots}{0,0032^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0025 \cdot 0,673 \cdot 5997,462 + \dots}{\dots 0,0025^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0017 \cdot 0,708 \cdot 5418,429 + \dots}{\dots 0,0017^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,001 \cdot 0,765 \cdot 4651,093 + \dots}{\dots 0,001^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0003 \cdot 0,902 \cdot 3530,688}{\dots 0,0003^2 \cdot 78000} \end{array} \right) = 0,0218$$

$$\eta_5 = 0,0003 \left( \begin{array}{l} \frac{0,0032 \cdot 0,648 \cdot 6463,513 + \dots}{0,0032^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0025 \cdot 0,673 \cdot 5997,462 + \dots}{\dots 0,0025^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0017 \cdot 0,708 \cdot 5418,429 + \dots}{\dots 0,0017^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,001 \cdot 0,765 \cdot 4651,093 + \dots}{\dots 0,001^2 \cdot 78000 + \dots} \\ \dots + \frac{0,0003 \cdot 0,902 \cdot 3530,688}{\dots 0,0003^2 \cdot 78000} \end{array} \right) = 0,0071$$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
20.	Безрозмірний параметр, що залежить від періоду власних коливань апарата колонного типу $\varepsilon$	$\varepsilon = T \sqrt{q_0} / 790$	$\varepsilon = 1,357 \sqrt{390} / 790 = 0,0339$
21.	Коефіцієнт $\nu$	$\nu = 0,968 - 0,025 \sqrt{H}$	$\nu = 0,968 - 0,025 \sqrt{32} = 0,827$
22.	Коефіцієнт динамічності $\xi$	$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5\varepsilon}$	$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot 0,0339} = 1,825$
23.	Пульсаційна складова вітрового навантаження на $i$ -й ділянці апарата $P_{dini}$ , Н	$P_{dini} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_i$	$P_{din1} = 0,827 \cdot 78000 \cdot 1,825 \cdot 0,0692 = 8146.46$ Н; $P_{din2} = 0,827 \cdot 78000 \cdot 1,825 \cdot 0,054 = 6357.07$ Н; $P_{din3} = 0,827 \cdot 78000 \cdot 1,825 \cdot 0,0372 = 4379.31$ Н; $P_{din4} = 0,827 \cdot 78000 \cdot 1,825 \cdot 0,0218 = 2566.37$ Н; $P_{din5} = 0,827 \cdot 78000 \cdot 1,825 \cdot 0,00709 = 834.66$ Н

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
24.	Розрахункове вітрове навантаження, що діє на $i$ -у ділянку апарата при його власних коливаннях в напрямку горизонтальної дії вітру $P_i$	$P_i = P_{sti} + P_{dini}$	$P_1 = 6463,513 + 8146.46 = 14609,97 \text{ Н};$ $P_2 = 5997,462 + 6357.07 = 12354,53 \text{ Н};$ $P_3 = 5418,429 + 4379.31 = 9797,74 \text{ Н};$ $P_4 = 4651,093 + 2566.37 = 7217,46 \text{ Н};$ $P_5 = 3530,688 + 834.66 = 4365,35 \text{ Н}$
75 25.	Коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти колони $x_j$ , $\Theta_j$	$\Theta_j = \begin{cases} 0,75 \text{ при } x_j \leq 5 \text{ м}, \\ (x_j/10)^{0,3} \text{ при } x_j > 5 \text{ м} \end{cases}$	$\Theta_{j1} = (28/10)^{0,3} = 1,362;$ $\Theta_{j2} = (22/10)^{0,3} = 1,267$
26.	Допоміжний коефіцієнт для $j$ -ї площадки на висоті колони $x_j$ , $\chi_j$	$\chi_j = 1,56(x_j/H)^{1,6}$	$\chi_{j1} = 1,56(28/32)^{1,6} = 1,26;$ $\chi_{j2} = 1,56(22/32)^{1,6} = 0,86$
27.	Коефіцієнт пульсації тиску вітру для $j$ -ї площадки колони на висоті $x_j$ , $m_j$	$m_j = 0,76(x_j/10)^{-0,15}$	$m_{j1} = 0,76((28/10)^{-0,15} = 0,651;$ $m_{j2} = 0,76((22/10)^{-0,15} = 0,675$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
28.	Середня складова вітрового навантаження, прикладена на обслуговуючу $j$ -ю площадку, розташовану на висоті $x_j$ над рівнем кріплення колони, $M_{Vj}$ , Н·м	<p>Якщо відомі розміри і розташування обслуговуючих площадок:</p> $M_{Vj} = 1,4q_0 \cdot \Theta_j(x_j - x_0)(1 + 0,75\xi \cdot \chi_j \cdot m_j) \sum A_p$ <p>В разі відсутності точних даних про форму площадки:</p> $M_{Vj} = 0,85q_0 \cdot \Theta_j(x_j - x_0)(1 + 0,75\xi \cdot \chi_j \cdot m_j) A_j$	$M_{Vj1} = 0,85 \cdot 370 \cdot 1,362(28 - 1,5) \cdot (1 + 0,75 \cdot 1,825 \cdot 1,26 \cdot 0,651)3,5 = 84334,76 \text{ Н·м};$ $M_{Vj2} = 0,85 \cdot 370 \cdot 1,267(22 - 1,5) \cdot (1 + 0,75 \cdot 1,825 \cdot 0,86 \cdot 0,675)3,5 = 51307,04 \text{ Н·м}$
29.	Розрахунковий згинаючий момент від дії вітрового навантаження в розрахунковому перерізі апарата на висоті $x_0$ , $M_V$ , Н·м	$M_V = \sum_{i=1}^n P_i(x_i - x_0) + \sum_{j=1}^m M_{Vj}$	$M_V = 14609,97(28,8 - 1,5) + 12354,53(22,4 - 1,5) + 9797,74(16,0 - 1,5) + 7217,46(9,6 - 1,5) + 4365,35(3,2 - 1,5) + 84334,76 + 51307,04 = 1000653,41 \text{ Н·м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок на резонансне вихрове збудження			
30.	Перша умова виконання розрахунку на резонансне вихрове збудження	$H/D_{min} > 10$ . Якщо ця умова не виконується, тоді подальший розрахунок на резонансне вихрове збудження не здійснюється	$32/2,84 = 11,27 > 10$ , тому треба виконувати розрахунок на резонансне вихрове збудження.
31.	Критична швидкість вітру, яка викликає резонансні коливання $V_{cr}$ , м/с	$V_{cr} = \frac{5D_H}{T}$	$V_{cr} = 5 \cdot 2,84 / 1,357 = 10,46$ м/с
32.	Висота визначення максимальної розрахункової швидкості вітру $x_{екв}$ , м	$x_{екв} = 0,8H$	$x_{екв} = 0,8 \cdot 32 = 25,6$ м
33.	Коефіцієнт $\Theta$	$\Theta = \begin{cases} 0,75 \text{ при } x_{екв} \leq 5 \text{ м,} \\ (x_{екв} / 10)^{0,3} \text{ при } x_{екв} > 5 \text{ м} \end{cases}$	$\Theta = (25,6/10)^{0,3} = 1,326$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
34.	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V_{max}$ на висоті $x_{екв}$ , м/с	$V_{max} = 1,5 \sqrt{g_0 \cdot \ominus}$	$V_{max} = 1,5 \sqrt{370 \cdot 1,326} = 33,22 \text{ м/с}$
35.	Друга умова виконання розрахунку на резонансне вихрове збудження	$V_{cr} < V_{max}.$ Якщо ця умова не виконується, тоді подальший розрахунок на резонансне вихрове збудження не здійснюється	10,46 м/с < 33,22 м/с, тобто треба виконувати подальший розрахунок на резонансне вихрове збудження.
36.	Максимальне відносне переміщення колони, що виникає при власних коливаннях $\alpha_H$ , 1/(МН·м)	$\alpha_H = \gamma \frac{H}{2E \cdot I_1} + \frac{1}{2C_F \cdot I_F}$	$\alpha_H = \frac{2}{3} \cdot \frac{32}{2 \cdot 1,93 \cdot 10^5 \cdot 0,158} + \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot 5,166} = 0,001963 \frac{1}{\text{МН} \cdot \text{м}}$
37.	Аеродинамічна сила при резонансному вихровому збудженні, що викликає поперечні коливання в площині, перпендикулярній напрямку вітрового потоку, на $i$ -й ділянці колони $P_{VRi}$ , Н	$P_{VRi} = 4,5 \pi \cdot V_{cr}^2 \cdot D_i \cdot k_i \frac{\alpha_i}{\alpha_H}$	$P_{VR1} = 4,5 \cdot 3,14 \cdot 10,46^2 \cdot 2,84 \cdot 6,4 \cdot 0,0032 / 0,001963 = 45807,18 \text{ Н};$ $P_{VR2} = 4,5 \cdot 3,14 \cdot 10,46^2 \cdot 2,84 \cdot 6,4 \cdot 0,0025 / 0,001963 = 35786,86 \text{ Н};$ $P_{VR3} = 4,5 \cdot 3,14 \cdot 10,46^2 \cdot 2,84 \cdot 6,4 \cdot 0,0017 / 0,001963 = 24335,06 \text{ Н};$ $P_{VR4} = 4,5 \cdot 3,14 \cdot 10,46^2 \cdot 2,84 \cdot 6,4 \cdot 0,001 / 0,001963 = 14314,74 \text{ Н};$ $P_{VR5} = 4,5 \cdot 3,14 \cdot 10,46^2 \cdot 2,84 \cdot 6,4 \cdot 0,0003 / 0,001963 = 4294,42 \text{ Н}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
38.	Розрахункове вітрове навантаження, що діє на $i$ -у ділянку колони в напрямку вітрового потоку $P_{cri}$ , Н	$P_{cri} = \left( \frac{V_{cr}}{V_{max}} \right)^2 P_i.$	$P_{cr1} = (10,46/33,22)^2 \cdot 14609,97 = 1448,48 \text{ Н};$ $P_{cr2} = (10,46/33,22)^2 \cdot 12354,53 = 1224,83 \text{ Н};$ $P_{cr3} = (10,46/33,22)^2 \cdot 9797,74 = 971,35 \text{ Н};$ $P_{cr4} = (10,46/33,22)^2 \cdot 7217,46 = 715,54 \text{ Н};$ $P_{cr5} = (10,46/33,22)^2 \cdot 4365,35 = 432,78 \text{ Н};$
79	39. Розрахунковий згинаючий момент в розрахунковому перерізі колони на висоті $x_0$ від спільної дії аеродинамічної сили при резонансному вітровому збудженні і вітрового навантаження $M_{VR}$ , Н·м	$M_{VR} = \sum_{i=1}^n [(\sqrt{P_{VRi}^2 + P_{cri}^2})(x_i - x_0)]$	$M_{VR} = \sqrt{45807,18^2 + 1448,48^2} \cdot 28,8 - 1,5 +$ $+ \sqrt{35786,86^2 + 1224,83^2} \cdot 22,4 - 1,5 +$ $+ \sqrt{24335,06^2 + 971,35^2} \cdot 16,0 - 1,5 +$ $+ \sqrt{14314,74^2 + 715,54^2} \cdot 9,6 - 1,5 +$ $+ \sqrt{4294,42^2 + 432,78^2} \cdot 3,2 - 1,5 = 2476115,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Таблиця 9.3. Алгоритм і приклад розрахунку колонного апарата на міцність

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу колони за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	Допустиме напруження матеріалу колони $[\sigma]$ визначають за таблицею Б.1 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^{\circ}\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 150$ МПа
80 2.	Розрахункові навантаження, які діють на колону	Розрахункові тиск $p$ , осьова стискуюча сила $F$ , поперечна сила $Q$ , згинаючий момент $M$ обираються за таблицею 1	$F = G = 0,39$ МН; $M = M_G + \max\{M_V; M_{VR}\} = 0 + \max\{2476115,4; 1000653,41\} = 2476115,4$ Н·м = 2,476 МН·м
3.	Загальне мембранне меридіональне напруження в циліндричній обичайці колонного апарата, включаючи опору, в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент викликає розтяг $\sigma_{x1}$ , МПа	$\sigma_{x1} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi \cdot D(s-c)} + \frac{4M}{\pi \cdot D^2(s-c)}$	$\sigma_{x1} = \frac{-0,1(2,8+0,02)}{4(0,02-0,002)} - \frac{0,39}{3,14 \cdot 2,8(0,02-0,002)} + \frac{4 \cdot 2,476}{3,14 \cdot 2,8^2(0,02-0,002)} = 15,97 \text{ МПа}$ Тиск $p$ вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
81 4.	Загальне мембранне меридіональне напруження в циліндричній обичайці колонного апарата, включаючи опору, в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент викликає стиск $\sigma_{x2}$ , МПа	$\sigma_{x2} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi \cdot D(s-c)} - \frac{4M}{\pi \cdot D^2(s-c)}$	$\sigma_{x2} = \frac{-0,1(2,8+0,02)}{4(0,02-0,002)} - \frac{0,39}{3,14 \cdot 2,8(0,02-0,002)} - \frac{4 \cdot 2,476}{3,14 \cdot 2,8^2(0,02-0,002)} = -28,73 \text{ МПа}$ <p>Тиск <math>p</math> вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки</p>
5.	Загальні мембранні кільцеві напруження $\sigma_y$ , МПа	$\sigma_y = \frac{p(D+s)}{2(s-c)}$	$\sigma_y = \frac{-0,1(2,8+0,02)}{2(0,02-0,002)} = -7,83 \text{ МПа}$ <p>Тиск <math>p</math> вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки</p>
6.	Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає розтяг $\sigma_{E1}$ , МПа	$\sigma_{E1} = \max \left\{ \left  \sigma_{x1} - \sigma_y \right ; \left  \sigma_y \right ; \left  \sigma_{x1} \right  \right\}$	$\sigma_{E1} = \max \{  15,97 + 7,83 ;  -7,83 ;  15,97  \} = 23,8 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає стиск $\sigma_{E2}$ , МПа	$\sigma_{E2} = \max \left\{ \left  \sigma_{x_2} - \sigma_y \right , \left  \sigma_y \right , \left  \sigma_{x_2} \right  \right\}$	$\sigma_{E2} = \max \{  -28,73 + 7,83 ;  -7,83 ;  -28,73  \} = 28,73 \text{ МПа}$
8.	Умова міцності апарата колонного типу при спільній дії навантажень	$\max \{ \sigma_{E1}; \sigma_{E2} \} \leq 1,2[\sigma]\varphi$	$\max \{ 23,80; 28,73 \} = 28,73 \text{ МПа};$ $1,2 \cdot 150 \cdot 0,9 = 162 \text{ МПа};$ $28,73 \text{ МПа} < 162 \text{ МПа}.$ <p>Умова міцності апарата колонного типу при спільній дії навантажень виконується</p>
Якщо не виконується умова міцності, тоді необхідно збільшити товщину стінки апарата, повторити розрахунок, починаючи з визначення ваги колони і вітрового навантаження			

Таблиця 9.4. Алгоритм і приклад розрахунку циліндричного колонного апарата на стійкість

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Розрахункові навантаження, які діють на колону	Розрахункові тиск $p$ , осьова стискаюча сила $F$ , поперечна сила $Q$ , згинаючий момент $M$ обираються за таблицею 6.1	$F = G = 0,39$ МН; $Q = 0$ ; $M = M_G + \max\{M_V; M_{VR}\} = 0 + \max\{2476115,4; 1000653,41\}$ $= 2476115,4$ Н·м = 2,476 МН·м
2.	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ , МПа	Модуль пружності в умовах розтягу $E$ визначають за таблицею А1 додатку А залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (при випробуваннях приймається $t = 20^{\circ}\text{C}$ )	З таблиці А.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^{\circ}\text{C}$ $E = 1,93 \cdot 10^5$ МПа
3.	Допустиме напруження матеріалу колони за розрахункової температури $[\sigma]$ , МПа	Допустиме напруження матеріалу колони $[\sigma]$ визначають за таблицею Б.1 залежно від марки сталі, з якої виконана обичайка і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^{\circ}\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma] = 150$ МПа
4.	Коефіцієнт запасу стійкості $n_y$	Значення коефіцієнту запасу стійкості обирають залежно від умов, при якому виконують розрахунок. $n_y = 2,4$ для робочих умов; $n_y = 1,8$ для умов випробувань	$n_y = 2,4$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
84 5.	Довжина кінцевого днища $l_k$ , м. (Визначається тільки для корпусів з кінцевими днищами)	Для кінцевих днищ без відбортовки $l_k = \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha_1}$ і для кінцевих днищ з відбортовкою $l_k = \max \left\{ r_0 \sin \alpha_1; \frac{D}{6 \operatorname{tg} \alpha_1} \right\},$ але не більше довжини кінцевого днища.	–
6.	Розрахункова довжина обичайки корпусу колони $l$ , м	У випадку царгового виконання колони за розрахункову довжину $l$ приймають відстань між фланцями. Для гладкої суцільнозварної колони з випуклим днищем: $l = l_o + l_e + h_d/3$ . Для корпусів з кінцевим днищем: $l = l_o + l_e + l_k$ . Якщо з іншого боку також є днище, що знаходиться під зовнішнім тиском, тоді треба збільшити $l$ на відповідну величину.	Через те, що колона має 2 днища: $l = l_o + 2l_e + 2h_d/3 = 30 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot 0,7/3 = 30,47 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Коефіцієнт $B_1$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right\}$	$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \frac{2,8}{30,47} \sqrt{\frac{2,8}{100(0,02 - 0,002)}} \right\} =$ $= \min \{1,0; 1,08\} = 1,0$
8.	Допустимий зовнішній тиск з умови міцності $[p]_\sigma$ , МПа	$[p]_\sigma = \frac{2[\sigma](s-c)}{D+s-c}$	$[p]_\sigma = \frac{2 \cdot 150(0,02 - 0,002)}{2,8 + 0,02 - 0,002} = 1,92 \text{ МПа}$
85 9.	Допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності $[p]_E$ , МПа	$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5}$	$[p]_E =$ $= \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,93 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{2,8}{30,47} \left[ \frac{100(0,02 - 0,002)}{2,8} \right]^{2,5} =$ $= 0,051 \text{ МПа}$
10.	Допустимий зовнішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{[p]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_\sigma}{[p]_E} \right)^2}}$	$[p] = \frac{1,92}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,92}{0,051} \right)^2}} = 0,051 \text{ МПа}$
11.	Допустима осьова стискаюча сила з умови міцності $[F]_\sigma$ , МН	$[F]_\sigma = \pi(D+s-c)(s-c)[\sigma]$	$[F]_\sigma = 3,14(2,8 + 0,02 - 0,002)(0,02 - 0,002)150 =$ $= 23,89 \text{ МН}$

12.	Допустима осьова стискаюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності $[F]_{E1}$ , МН	$[F]_{E1} = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D^2 \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5}$	$[F]_{E1} =$ $= \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot 1,93 \cdot 10^5}{2,4} 2,8^2 \left[ \frac{100(0,02 - 0,002)}{2,8} \right]^{2,5} =$ $= 64,76 \text{ МПа}$
13.	Зведена розрахункова довжина $l_{пр}$ , м. (Визначається, якщо розрахункова довжина обичайки $l$ перевищує діаметр $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром)	$l_{пр}$ обирається за табл. 7.1.	$l/D = 30,47/2,8 = 10,88 > 10, \text{ тоді:}$ $l_{пр} = l = 30,47 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
14.	Гнучкість $\lambda_r$ . (Визначається, якщо розраховується зведена розрахункова довжина $l_{пр}$ )	$\lambda_r = \frac{2,83l_{пр}}{D+s-c}$	$\lambda_r = \frac{2,83 \cdot 30,47}{2,8 + 0,02 - 0,002} = 30,6$
15.	Допустима осьова стискаюча сила з умови загальної стійкості в границях пружності $[F]_{E2}$ , МН. (Визначається, якщо , якщо розраховується гнучкість $\lambda_r$ )	$[F]_{E2}$ , слід розраховувати, використовуючи розрахункову схему затисненої в нижньому перерізі балки Ейлера змінного кільцевого перерізу із зосередженими у вузлах масами. Для апарата постійного перерізу з рівномірно розподіленим по висоті стискаючим навантаженням: $[F]_{E2} = \frac{\pi(D+s-c)(s-c)E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_r}\right)^2$	$[F]_{E2} = \frac{3,14(2,8 + 0,02 - 0,002)(0,02 - 0,002)1,93 \cdot 10^5}{2,4} \left(\frac{3,14}{30,6}\right)^2 = 134,87 \text{ МН}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
88 16.	Допустиме осьове стиску- юче зусилля з умови стійкості $[F]_E$ , МН	Якщо розрахункова довжина обичайки $l$ колонного апарата не перевищує внутрішній діаметр $D$ колони більше ніж у 10 разів, тоді $[F]_E = [F]_{E1}$ . Якщо $l$ перевищує $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром: $[F]_E = \min \{ [F]_{E1}, [F]_{E2} \}$	Через те, що $l/D = 30,47/2,8 = 10,88 > 10$ , допустиме осьове стиску- юче зусилля з умови стійкості $[F]_E$ будемо визначати, як мінімальне з $[F]_{E1}$ і $[F]_{E2}$ : $[F]_E = 64,76$ МН
17.	Допустиме осьове стиску- юче зусилля $[F]$ , МН	$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}}$	$[F] = \frac{23,89}{\sqrt{1 + \left( \frac{23,89}{64,76} \right)^2}} = 22,41 \text{ МН}$
18.	Допустимий згинаючий момент з умови міцності $[M]_{\sigma}$ , МН·м	$[M]_{\sigma} = 0,25D[F]_{\sigma}$	$[M]_{\sigma} = 0,25 \cdot 2,8 \cdot 23,89 = 16,72 \text{ МН·м}$



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
19.	Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності $[M]_E$ , Н·м	$[M]_E = D[F]_{E1}/3,5.$	$[M]_E = 2,8 \cdot 64,76/3,5 = 51,81 \text{ МН}\cdot\text{м}$
20.	Допустимий згинаючий момент $[M]$ , МН·м	$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E}\right)^2}}$	$[M] = \frac{16,72}{\sqrt{1 + \left(\frac{16,72}{51,81}\right)^2}} = 15,91 \text{ МН}\cdot\text{м}$
21.	Допустима поперечна сила з умови міцності $[Q]_{\sigma}$ , МН	$[Q]_{\sigma} = 0,25[\sigma]\pi D(s-c)$	Через те, що на колону не діє поперечна сила, $[Q]_{\sigma}$ розраховувати не треба
22.	Допустима поперечна сила з умови стійкості в границях пружності $[Q]_E$ , МН	$[Q]_E = \frac{2,4E(s-c)^2}{n_y} \left[ 0,18 + 3,3 \frac{D(s-c)}{l^2} \right].$	Через те, що на колону не діє поперечна сила, $[Q]_E$ розраховувати не треба
23.	Допустима поперечна сила $[Q]$ , МН	$[Q] = \frac{[Q]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{\sigma}}{[Q]_E}\right)^2}}$	Через те, що на колону не діє поперечна сила, $[Q]$ розраховувати не треба

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
24	Умова стійкості колони	$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1$	<p>Через те, що на колону не діє поперечна сила умова стійкості приймає вигляд:</p> $\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1$ <p>0,1/0,051 + 0,39/22,41 + 2,476/15,91 = 2,14 &gt; 1</p> <p>Умова стійкості колони не виконується.</p>
90	<p>Якщо умова стійкості не виконується, тоді треба збільшити товщину стінки колони або застосувати ребра жорсткості і зробити перерахунок</p> <p>Укріпимо циліндричну обичайку колони ребрами жорсткості і зробимо перерахунок.</p> <p>Встановимо через рівний проміжок на обичайці ребра жорсткості у кількості <math>n_p = 6</math>, тоді розрахункова довжина обичайки колони буде дорівнювати: <math>l = l_o / (n_p - 1) = 30 / (6 - 1) = 6</math> м</p>		
25.	Допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності $[p]_E$ , МПа	$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{l} \left[ \frac{100(s-c)}{D} \right]^{2,5}$	$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,93 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{2,8}{6} \left[ \frac{100(0,02 - 0,002)}{2,8} \right]^{2,5} = 0,26 \text{ МПа}$
26.	Допустимий зовнішній тиск $[p]$ , МПа	$[p] = \frac{[p]_\sigma}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_\sigma}{[p]_E}\right)^2}}$	$[p] = \frac{1,92}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,92}{0,26}\right)^2}} = 0,26 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
27.	Зведена розрахункова довжина $l_{пр}$ , м. (Визначається, якщо розрахункова довжина обичайки $l$ перевищує діаметр $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром)	$l_{пр}$ обирається за табл. 7.1.	$l/D = 6/2,8 = 2,14 < 10$ і $l_{пр}$ визначати не треба
28.	Гнучкість $\lambda_r$ . (Визначається, якщо розрахункова довжина обичайки $l$ перевищує діаметр $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром)	$\lambda_r = \frac{2,83l_{пр}}{D + s - c}$	—

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
92 29.	Допустима осьова стискаюча сила з умови загальної стійкості в границях пружності $[F]_{E2}$ , МН. (Визначається, якщо розрахункова довжина обичайки $l$ перевищує діаметр $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром)	$[F]_{E2}$ , слід розраховувати, використовуючи розрахункову схему затисненої в нижньому перерізі балки Ейлера змінного кільцевого перерізу із зосередженими у вузлах масами. Для апарата постійного перерізу з рівномірно розподіленим по висоті стискаючим навантаженням: $[F]_{E2} = \frac{\pi(D+s-c)(s-c)E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_T}\right)^2$	—
30.	Допустиме осьове стискаюче зусилля з умови стійкості $[F]_E$ , МН	Якщо розрахункова довжина обичайки $l$ колонного апарата не перевищує внутрішній діаметр $D$ колони більше ніж у 10 разів, тоді $[F]_E = [F]_{E1}$ . Якщо розрахункова довжина обичайки $l$ перевищує внутрішній діаметр $D$ більш ніж в 10 разів, а також для складених обичайок корпусів колонних апаратів, що відрізняються товщиною і діаметром: $[F]_E = \min \{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \}$	$[F]_E = [F]_{E1} = 64,76$ МН

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
31.	Допустиме осьове стискуjące зусилля з умови стійкості $[F]$ , МН	$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E}\right)^2}}$	$[p] = \frac{1,92}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,92}{0,051}\right)^2}} = 0,051 \text{ МПа}$
32.	Допустимий згинаючий момент з умови міцності $[M]_{\sigma}$ , МН·м	$[M]_{\sigma} = 0,25D[F]_{\sigma}$	$[M]_{\sigma} = 0,25 \cdot 2,8 \cdot 23,89 = 16,72 \text{ МН·м}$
93 33.	Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності $[M]_E$ , Н·м	$[M]_E = D[F]_{EI}/3,5.$	$[M]_E = 2,8 \cdot 64,76/3,5 = 51,81 \text{ МН·м}$
34.	Допустимий згинаючий момент $[M]$ , МН·м	$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E}\right)^2}}$	$[M] = \frac{16,72}{\sqrt{1 + \left(\frac{16,72}{51,81}\right)^2}} = 15,91 \text{ МН·м}$
35.	Умова стійкості колони	$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1$	$0,1/0,26 + 0,39/22,41 + 2,476/15,91 = 0,56 < 1.$ Умова стійкості колони виконується.

Таблиця 9.5. Алгоритм і приклад розрахунку опорної обичайки

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
1.	Допустиме напруження матеріалу опорної обичайки $[\sigma]_0$ і колони $[\sigma]$ за розрахункової температури, МПа	$[\sigma]_0$ і $[\sigma]$ визначають за таблицею Б.1 залежно від марки сталі і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка і колона зварні)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^\circ\text{C}$ допустимі напруження $[\sigma]_0 = 150$ МПа, $[\sigma] = 150$ МПа
2.	Розрахункові навантаження, які діють на опорну обичайку	Розрахункові тиск $p$ , осьова стискаюча сила $F$ , поперечна сила $Q$ , згинаючий момент $M$ обираються за таблицею б.1	$F = G = 0,39$ МН; $Q = 0$ ; $M = M_G + \max\{M_V; M_{VR}\} = 0 + \max\{2476115,4; 1000653,41\} = 2476115,4$ Н·м = 2,476 МН·м
3.	Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає розтяг $\sigma_{x1}$ , МПа	$\sigma_{x1} = \frac{p(D_0 + S_0)}{4(S_0 - C_0)} - \frac{F}{\pi \cdot D_0(S_0 - C_0)} + \frac{4M}{\pi \cdot D_0^2(S_0 - C_0)}$	$\sigma_{x1} = \frac{-0,1(2,8 + 0,02)}{4(0,02 - 0,002)} - \frac{0,39}{3,14 \cdot 2,8(0,02 - 0,002)} + \frac{4 \cdot 2,476}{3,14 \cdot 2,8^2(0,02 - 0,002)} = 15,97 \text{ МПа}$ Тиск $p$ вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
4.	Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає стиск $\sigma_{x2}$ , МПа	$\sigma_{x2} = \frac{p(D_o + S_o)}{4(S_o - C_o)} - \frac{F}{\pi \cdot D_o(S_o - C_o)} - \frac{4M}{\pi \cdot D_o^2(S_o - C_o)}$	$\sigma_{x2} = \frac{-0,1(2,8 + 0,02)}{4(0,02 - 0,002)} - \frac{0,39}{3,14 \cdot 2,8(0,02 - 0,002)} - \frac{4 \cdot 2,476}{3,14 \cdot 2,8^2(0,02 - 0,002)} = -28,73 \text{ МПа}$ <p>Тиск <math>p</math> вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки</p>
5.	Загальні мембранні кільцеві напруження $\sigma_y$ , МПа	$\sigma_y = \frac{p(D_o + S_o)}{2(S_o - C_o)}$	$\sigma_y = \frac{-0,1(2,8 + 0,02)}{2(0,02 - 0,002)} = -7,83 \text{ МПа}$ <p>Тиск <math>p</math> вводиться зі знаком «-» через те, що він спричиняє стиск стінки</p>
6.	Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає розтяг $\sigma_{E1}$ , МПа	$\sigma_{E1} = \max \left\{ \left  \sigma_{x1} - \sigma_y \right , \left  \sigma_y \right , \left  \sigma_{x1} \right  \right\}$	$\sigma_{E1} = \max \{  15,97 + 7,83 ;  -7,83 ;  15,97  \} = 23,8 \text{ МПа}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
7.	Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає стиск $\sigma_{E2}$ , МПа	$\sigma_{E2} = \max \left\{ \left  \sigma_{x2} - \sigma_y \right , \left  \sigma_y \right , \left  \sigma_{x2} \right  \right\}$	$\sigma_{E2} = \max \{  28,73 + 7,83 ;  -7,83 ;  -28,73  \} = 36,56 \text{ МПа}$
8.	Умова міцності опорної обичайки при спільній дії навантажень	$\max \{ \sigma_{E1}; \sigma_{E2} \} \leq 1,2[\sigma]\varphi$	$\max \{ 23,80; 36,56 \} = 36,56 \text{ МПа};$ $1,2 \cdot 150 \cdot 0,9 = 162 \text{ МПа};$ $36,56 \text{ МПа} < 162 \text{ МПа}.$ <p>Умова міцності опорної обичайки при спільній дії навантажень виконується</p>
Якщо не виконується умова міцності, тоді необхідно збільшити товщину стінки опорної обичайки, повторити розрахунок, починаючи з визначення ваги колони і вітрового навантаження			
9.	Перевірка міцності зварного шва, що з'єднує корпус апарата з опорною обичайкою	$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot a} \left( \frac{4M}{D_0} + F \right) \leq 0,8 \min \{ [\sigma]_0; [\sigma] \}$	$\frac{1}{3,14 \cdot 2,8 \cdot 0,02} \left( \frac{4 \cdot 2,476}{2,8} + 0,39 \right) \leq 0,8 \min \{ 150; 150 \}$ $22,33 \text{ МПа} < 120 \text{ МПа}$ <p>Умова міцності виконується</p>



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Розрахунок фундаментних болтів			
97 10.	Перевірка умови для проведення розрахунку фундаментних болтів	Якщо $M > 0,44FD_6$ розрахунок діаметра і кількості фундаментних болтів необхідно проводити. Коли $M \leq 0,44FD_6$ діаметр і кількість болтів приймають конструктивно.	$M = 2,476 \text{ МПа}$ $0,44FD_6 = 0,44 \cdot 0,39 \cdot 3,1 = 0,53 \text{ МПа}$ $2,476 \text{ МПа} > 0,53 \text{ МПа}$ Необхідно проводити розрахунок діаметра і кількості фундаментних болтів
11.	Коефіцієнт $\chi_6$ (виконується, якщо $M > 0,44FD_6$ )	$\chi_6$ визначається за рис. 8.8 або обчислюють за формулою: $\chi_6 = \begin{cases} 2,25 + 0,3 \frac{F \cdot D_6}{M} & \text{при } \frac{F \cdot D_6}{M} < 0,5; \\ 2,7 - 2 \frac{F \cdot D_6}{M} + 3,7 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^2 - 2,5 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^3 + 0,65 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^4 & \text{при } \frac{F \cdot D_6}{M} \geq 0,5. \end{cases}$	$FD_6/M = 0,39 \cdot 3,1 / 2,476 = 0,49 < 0,5$ $\chi_6 = 2,25 + 0,3 \cdot 0,39 / 2,476 = 2,3$
12.	Кількість фундаментних болтів $n$	$n$ приймається конструктивно	$n = 8$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
13.	Мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 °С $R_{0,2}^{20}$ , МПа	$R_{0,2}^{20}$ визначається за табл. В.1 додатка В залежно від марки сталі	Для сталі марки 09Г2С $R_{0,2}^{20} = 280$ МПа
14.	Допустиме напруження для фундаментних болтів при температурі 20 °С, МПа $[\sigma]_B$ , МПа	$[\sigma]_B = R_{0,2}^{20}/n_T$	$[\sigma]_B = 280/1,65 = 169,7$ МПа
15.	Внутрішній діаметр різьби фундаментних болтів $d_\phi$ , м (виконується, якщо $M > 0,44FD_\phi$ )	$d_\phi \geq \chi_\phi \sqrt{\frac{M - 0,44F \cdot D_\phi}{n[\sigma]_B D_\phi}} + c_B$ <p>Номінальний діаметр різьби обирається за табл. 8.4</p>	$d_\phi = 2,3 \sqrt{\frac{2,476 - 0,44 \cdot 0,39 \cdot 3,1}{8 \cdot 169,7 \cdot 3,1}} + 0,002 = 0,051 \text{ м}$ <p>За табл. 8.4 обираємо номінальний діаметр різьби <math>d_\phi = 56</math> мм</p>

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
16.	Площа найбільш ослабленого поперечного перерізу $A$ , м <sup>2</sup>	$A$ визначається залежно від кількості і розмірів отворів в опорній обичайці	Для опорної обичайки з одним отвором діаметром $d_1$ : $A = \pi D_0(S_0 - C_0) - d_1 S_0 =$ $= 3,14 \cdot 2,8(0,02 - 0,002) - 0,5 \cdot 0,02 =$ $= 0,148 \text{ м}^2$
Перевірка опорної обичайки на стійкість (отвори діаметром менше $0,04D_0$ при визначенні міцності і стійкості опорної обичайки в зоні отворів не враховують)			
99 17.	Коефіцієнт $\varphi_1$	$\varphi_1 = \frac{A}{\pi D_0^2 (s_0 - c_0)}$ <p>Якщо в розрахунковому перерізі опорної обичайки є тільки один отвір, тоді коефіцієнт <math>\varphi_1</math> можна визначати за графіками рис. 8.1</p>	$\varphi_1 = \frac{0,148}{3,14 \cdot 2,8(0,02 - 0,002)} = 0,935$
18.	Коефіцієнт $\varphi_2$	$\varphi_2 = \frac{4W}{\pi D_0^2 (s_0 - c_0)}$ <p>Якщо в розрахунковому перерізі опорної обичайки є тільки один отвір, тоді коефіцієнт <math>\varphi_2</math> можна визначати за графіками рис. 8.1</p>	За графіками (рис. 8.1) для отвору без штуцера при $d_1/D_0 = 0,5/2,8 = 0,18$ : $\varphi_2 = 0,84$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
19.	Коефіцієнт $\varphi_3$	$\varphi_3 = \frac{Y_s}{D_0}$ <p>Якщо в розрахунковому перерізі опорної обичайки є тільки один отвір, тоді коефіцієнт <math>\varphi_3</math> можна визначати за графіками рис. 8.2</p>	<p>За графіками (рис. 8.2) для отвору без штуцера при <math>d_1/D_0 = 0,5/2,8 = 0,18</math>:</p> $\varphi_3 = 0,03$
20.	Допустима осьова стискаюча сила з умови міцності $[F]_\sigma$ , МН	$[F]_\sigma = \pi(D_0 + s_0 - c_0)(s_0 - c_0)[\sigma]_0$	$[F]_\sigma = 3,14(2,8 + 0,02 - 0,002)(0,02 - 0,002)150 = 23,89 \text{ МН}$
21.	Допустима осьова стискаюча сила з умови стійкості в границях пружності $[F]_E$ , МН	$[F]_E = \frac{31 \cdot 10^{-5} E}{n_y} D_0^2 \left[ \frac{100(s_0 - c_0)}{D_0} \right]^{2,5}$	$[F]_E = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot 1,93 \cdot 10^5}{2,4} 2,8^2 \left[ \frac{100(0,02 - 0,002)}{2,8} \right]^{2,5} = 64,76 \text{ МН}$
22.	Допустиме осьове стискаюче зусилля $[F]$ , МН	$[F] = \frac{[F]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_\sigma}{[F]_E} \right)^2}}$	$[F] = \frac{23,89}{\sqrt{1 + \left( \frac{23,89}{64,76} \right)^2}} = 22,41 \text{ МН}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
23.	Допустимий згинаючий момент з умови міцності $[M]_{\sigma}$ , МН·м	$[M]_{\sigma} = 0,25D_0[F]_{\sigma}$	$[M]_{\sigma} = 0,25 \cdot 2,8 \cdot 23,89 = 16,72 \text{ МН} \cdot \text{м}$
24.	Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності $[M]_E$ , Н·м	$[M]_E = D_0[F]_E/3,5.$	$[M]_E = 2,8 \cdot 64,76/3,5 = 51,81 \text{ МН} \cdot \text{м}$
25.	Допустимий згинаючий момент $[M]$ , МН·м	$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E}\right)^2}}$	$[M] = \frac{16,72}{\sqrt{1 + \left(\frac{16,72}{51,81}\right)^2}} = 15,91 \text{ МН} \cdot \text{м}$
26.	Перевірка міцності і стійкості опорної обичайки в зоні отворів	$\frac{F}{\varphi_1[F]} + \frac{M + \varphi_3 \cdot F \cdot D_0}{\varphi_2[M]} \leq 1$	$\frac{0,39}{0,935 \cdot 22,41} + \frac{2,476 + 0,03 \cdot 0,39 \cdot 2,8}{0,84 \cdot 15,91} = 0,21 < 1$ Умова міцності і стійкості опорної обичайки в зоні отворів виконується

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
27.	Коефіцієнт $\chi_1$	<p>Для опорних кілець у виконанні 1, 2 і 3 <math>\chi_1</math> визначається за рис. 8.4 або обчислюють за формулою:</p> $\chi_1 = \left[ \frac{1 + 1,81 \left( \frac{b_2}{b_6} \right)^3}{1 + 2,97 \left( \frac{b_2}{b_6} \right)^3} \right]^2$ <p>Для опорних кілець виконання 4 <math>\chi_1 = 1</math></p>	$\chi_1 = \left[ \frac{1 + 1,81 \left( \frac{0,3}{0,5} \right)^3}{1 + 2,97 \left( \frac{0,3}{0,5} \right)^3} \right]^2 = 0,72$
28.	Допустиме напруження для матеріалу елемента опорного вузла при розрахунковій температурі $[\sigma]_A$ , МПа	$[\sigma]_A$ визначають за таблицею Б.1 залежно від марки сталі, з якої виконана елемент опорного вузла і розрахункової температури (поправковий коефіцієнт для допустимих напружень $\eta = 1$ через те, що обичайка зварна)	З таблиці Б.1 для сталі марки Ст3 за розрахункової температури $t = 80^\circ\text{C}$ допустиме напруження $[\sigma]_A = 150$ МПа
29.	Допустиме напруження бетону на стиск $[\sigma]_B$ , МПа	$[\sigma]_B$ приймається залежно від марки бетону по таблиці 8.1 або визначається за формулою: $[\sigma]_B = \frac{R_{m/20}}{\gamma_B}$	За таблицею 8.1: $[\sigma]_B = 10$ МПа

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
30.	Ширина нижнього опорного кільця, що встановлюється на бетонному фундаменті $b_1$ , м	$b_1 \geq \frac{\frac{4M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 [\sigma]_B}$	$b_{1R} = \frac{\frac{4 \cdot 2,476}{3,1} + 0,39}{3,14 \cdot 3,1 \cdot 10} = 0,037 \text{ м}$ Враховуючи, що $b_1 > b_2$ , обираємо $b_1 = 0,5 \text{ м}$
103 31.	Товщина нижнього опорного кільця $S_1$ , м	$s_1 \geq \chi_1 \cdot b_2 \sqrt{\frac{\frac{4M}{D_6} + F}{D_6 \cdot b_1 [\sigma]_A} + c_0}$ З конструктивних міркувань рекомендується приймати $\chi > 1,5 \chi$	$S_1 = 0,72 \cdot 0,3 \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot 2,476}{3,1} + 0,39}{3,1 \cdot 0,5 \cdot 150} + 0,002} = 0,029 \text{ м}$ Приймаємо $S_1 = 0,03 \text{ м}$
32.	Додаткова перевірка товщини $S_1$ (виконується тільки для опорних кілець виконання 4)	$s_1 \geq \sqrt{\left(\frac{4M}{D_0} - F\right) \frac{4e}{\pi \cdot D_0 [\sigma]_A} + c_0}$ Якщо з розрахунків виходить, що $S_1 > 2 S_0$ , тоді необхідно застосовувати конструкції нижнього опорного вузла у виконанні 1, 2 або 3.	—
33.	Діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта $d$ , м	$d$ визначається за табл. 8.5, 8.6	$d = 78,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
34.	Коефіцієнт $\chi_2$	$\chi_2$ визначається за рис. 8.5 або обчислюють за формулою: $\chi_2 = \frac{3 \frac{b_4}{b_5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 - \frac{d}{b_5}}}}$	$\chi_2 = \frac{3 \frac{0,35}{0,5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{0,35}{0,5}\right)^2}{1 - \frac{0,0787}{0,5}}}} = 1,15$
35.	Розрахункова площа поперечного перерізу болта $A_6 \cdot 10^4, \text{ м}^2$	$A_6$ визначається за табл. 8.4	$A_6 = 20,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
36.	Товщина верхнього опорного кільця $S_2, \text{ м}$	$s_2 \geq \chi_2 \sqrt{\frac{A_6 [\sigma]_B}{[\sigma]_A}}$	$S_2 = 1,18 \sqrt{\frac{20,3 \cdot 10^{-4} \cdot 169,7}{150}} = 0,055 \text{ м}$ Приймаємо $S_2 = 0,055 \text{ м}$
37.	Коефіцієнт $\chi_3$ (розраховується при наявності пластини товщиною $S_3$ , що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця)	$\chi_3$ визначається за рис. 8.6 або обчислюють за формулою: $\chi_3 = \frac{b_7}{b_4} \left(\frac{s_3}{s_2}\right)^2$	—



№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
38.	Товщина верхнього опорного кільця при наявності пластини товщиною $S_3$ , що приварюється для підсилення до верхнього опорного кільця, $S_2$ , м	$s_2 + \chi_3 \cdot s_3 \geq \chi_2 \sqrt{\frac{A_6 [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c$	–
39.	Коефіцієнт $\chi_4$	Для опорного вузла у виконанні 1 і 3: $\chi_4 = 2$ , для опорного вузла у виконанні 2: $\chi_4 = 1$ .	$\chi_4 = 1$
40.	Товщина ребра $S_4$ , м	$s_4 \geq \frac{A_6 [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 [\sigma]_A} + c$ Із конструктивних міркувань рекомендується приймати $S_4 \geq 0,4 S_1$ . Ребра з співвідношенням $(b_2 / S_4) > 20$ необхідно додатково перевіряти на стійкість.	$S_4 = \frac{20,3 \cdot 10^{-4} \cdot 169,7}{1 \cdot 0,3 \cdot 150} + 0,002 = 0,0097 \text{ м}$ З урахуванням умови $S_4 \geq 0,4 \cdot 0,03 = 0,012 \text{ м}$ , приймаємо $S_4 = 0,015 \text{ м}$ Співвідношення $(b_2 / S_4) = 0,3 / 0,015 = 20$ , тому перевіряти на стійкість ребра не треба
41.	Довжина верхнього опорного елемента $b_3$ , м	Для опорного вузла у виконанні 2: $b_3 = b_4$ і для опорного вузла у виконанні 3: $b_3 = b_5 + b_6$	$b_3 = 0,35 \text{ м}$

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
106 42.	Коефіцієнт $\chi_5$	$\chi_5$ визначається за рис. 8.7 або обчислюють за формулою: $\chi_5 = -0,0248 \left\{ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K,$ $N = \frac{D_o}{2(s_o - c)} \left( \frac{10b_3}{D_o} \right)^{2,05};$ де $K = \begin{cases} 0 & \text{при } N \leq 10^4, \\ \left[ -0,002 \ln(N \cdot 10^{-4}) \right] & \text{при } N > 10^4 \end{cases}$	$N = \frac{2,8}{2(0,02 - 0,002)} \left( \frac{10 \cdot 0,35}{2,8} \right)^{2,05} = 122,89 \text{ м}$ $K = 0 \text{ тому, що } N = 122,89 < 10^4$ $\chi_5 = -0,0248 \left\{ \ln \frac{122,89}{1100} - \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{122,89}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + 0 = 0,12$
43.	Відстань від осі фундаментного болта до обичайки опори $e$ , м	$e = [D_6 - (D_o + 2S_o)]/2$	$e = [3,1 - (2,8 + 2 \cdot 0,02)]/2 = 0,13 \text{ м}$
44.	Перевірка міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця	$\frac{6 \chi_5 \cdot A_6 [\sigma]_B e}{(s_o - c_o)^2 h} \leq 1,5 [\sigma]_o$	$\frac{6 \cdot 0,12 \cdot 20,3 \cdot 10^{-4} \cdot 169,7 \cdot 0,13}{(0,02 - 0,002)^2 \cdot 0,4} = 249 \text{ МПа}$ $1,5 [\sigma]_o = 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ МПа}$ $249 \text{ МПа} > 225 \text{ МПа}$ <p>Умова міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця не виконується</p>

№ п/п	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула	Приклад розрахунку
Збільшуємо висоту опорного вузла до $h = 0,45$ м і робимо перерахунок перевірки міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця			
45.	Перевірка міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця (перерахунок)	$\frac{6\chi_5 \cdot A_6[\sigma]_{Be}}{(s_0 - c_0)^2 h} \leq 1,5[\sigma]_0$	$\frac{6 \cdot 0,12 \cdot 20,3 \cdot 10^{-4} \cdot 169,7 \cdot 0,13}{(0,02 - 0,002)^2 \cdot 0,45} = 221 \text{ МПа}$ $1,5[\sigma]_0 = 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ МПа}$ $221 \text{ МПа} < 225 \text{ МПа}$ <p>Умова міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця виконується</p>
46.	Перевірку міцності зварного шва приварки нижнього опорного кільця виконання 4 до опорної обичайки	$\frac{1}{\pi \cdot D_0 \cdot 1,4 \min\{a_1, a_2\}} \left( \frac{4M}{D_0} - F \right) \leq 0,5[\sigma]_0$	—

**Додаток А. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу**

*Таблиця А.1. Модулі поздовжньої пружності в умовах розтягу*

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

## Додаток Б. Допустимі напруження сталей

Властивості сталей подані за ГОСТ 34233.1–2017

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

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Допустиме напруження [σ], МПа, для сталей марок													
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20, 20К		10		10Г2, 09Г2		17ГС, 17Г1С, 10Г2С 1			
	Товщина, мм													
	до 20		понад 20		до 32		понад 32		до 160					
	Розрахунковий ресурс, год.													
	10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>		10 <sup>5</sup>   2 · 10 <sup>5</sup>	
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  $R_{0,2}^{20} / 270$ .

## Додаток В. Мінімальні значення умовної границі плинності

Властивості сталей подані за ГОСТ 34233.1–2017

*Таблиця В.1.* Мінімальні значення умовної границі плинності  $R_{0,2}$  для вуглецевих і низьколегованих марганцевистих і марганцевекрем'янистих сталей

Розрахункова температура стінки посудини або апарата, °С	Розрахункові значення умовної границі плинності $R_{0,2}$ , МПа для сталей марок							
	Ст3		09Г2С, 16ГС		20 і 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	Товщина, мм							
	До 20	Св. 20	До 32	Св. 32	До 160			
20	250	210	300	280	220	195	270	280
100	230	201	265,5	240	213	188	240	240
150	224	197	256,5	231	209	183	231	231
200	223	189	247,5	222	204	177	222	222
250	197	180	243	218	198	168	218	218
300	173	162	226,5	201	179	150	201	201
350	167	147	210	185	159	132	185	185
375	164	140	199,5	174	147	123	162	174
400	-	-	183	158	-	-	-	158
410	-	-	-	156	-	-	-	156
420	-	-	-	138	-	-	-	138

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском: навч. посіб. Київ: “Видавництво «Політехніка»”, 2011. 272 с.
2. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання і надійність обладнання хімічних виробництв: термінологічний словник. Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 216 с.
3. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонок І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1999. 148 с.
4. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 121 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23885>.
5. Андреев І. А. Роз’ємні міцно-щільні з’єднання: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 138 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35927>.
6. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 30 с.
7. ГОСТ 34283-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность при ветровых, сейсмических и других внешних нагрузках. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 26 с.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев, Минстрой Украины, 2006. 78 с.

9. ГОСТ 34233.9-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Аппараты колонного типа. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2018-08-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2018. 18 с.

10. 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.

11. Андреев И. А. Конструювання та розрахунок опор колонних апаратів: навч. посіб. Київ: МО України, Інститут змісту і методів навчання, 1997. 81 с.

12. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 2005-07-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2005. 16 с.

13. ДСТУ ГОСТ 5915:2008. Гайки шестигранные класса точности В. Конструкция и размеры. [Чинний від 2008-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2010. 13 с.

14. ГОСТ 10605-94. Гайки шестигранные с диаметром резьбы свыше 48 мм класса точности В. Технические условия. (Межгосударственный стандарт). [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. М.: Стандартиформ, 2005. 5 с.