

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА
Кафедра конструкцій з металу, дерева та пластмас

Пічугін С.Ф.

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ

Курс лекцій - частина 5

СПЕЦІАЛЬНІ МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ

Полтава ПолтНТУ 2018

Курс лекцій із дисципліни «Металеві конструкції» для студентів, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальності 0901 «Будівництво та цивільна інженерія». Частина 5 «Спеціальні металеві конструкції». – Полтава: ПолтНТУ, 2018. – 41 с.

Укладач: С.Ф. Пічугін, доктор технічних наук, професор.

Відповідальний за випуск: С.Ф. Пічугін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас.

Рецензент: О.В. Семко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва.

Затверджено науково-методичною
радою університету
Протокол № 1 від 27.09.2018

У авторській редакції

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМА 10 ЛИСТОВІ МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ.....	6
10.1 Класифікація, особливості листових конструкцій.....	6
10.2 Робота і розрахунок тонких оболонок обертання.....	8
10.3 Вертикальні циліндричні резервуари.....	10
10.4 Конструкції резервуарів.....	15
10.5 Газгольдери.....	20
Контрольні питання.....	23
ТЕМА 11 ВИСОТНІ МЕТАЛЕВІ СПОРУДИ.....	24
11.1 Галузь застосування, класифікація висотних споруд.....	24
11.2 Навантаження на висотні споруди.....	26
11.3 Проектування металевих башт.....	30
11.4 Проектування металевих щогл.....	37
Контрольні питання.....	41
Література.....	41

ВСТУП

Дисципліна «Металеві конструкції» викладається студентам, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальністю 0901 «Будівництво та цивільна інженерія» на кафедрі конструкцій з металу, дерева та пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Автор читає даний курс лекцій досить давно, використовуючи, зокрема, педагогічний досвід кафедри КМДіП, яка однією з перших підготувала і видала посібники і конспекти лекцій с металевих конструкцій державною мовою (1992 р.) [1, 2]. Курс лекцій базується на багаторічній традиції викладення в інженерних ВНЗ дисципліни «Металеві конструкції», закладеній ще до Другої світової війни класиком будівельних металевих конструкцій М.С. Стрілецьким, підручником під редакцією якого підготовлені численні покоління інженерів-будівельників [3]. Викладення курсу лекцій тісно пов'язано з діючими в Україні нормативним документами, у розробці яких приймав участь автор, щодо навантажень і впливів [4], забезпечення надійності та конструктивної безпеки [5], проектування сталевих конструкцій [6] та ін. В лекціях використовуються результати досліджень металевих конструкцій, які на протязі багатьох років виконуються на кафедрі КМДіП ПолтНТУ, а також сучасний вітчизняний і закордонний досвід проектування і возведення металевих конструкцій.

Даний курс лекцій складається з 5 частин і 11 тем:

Частина 1. Елементи металевих конструкцій:

- тема 1 – Складені балки;
- тема 2 – Центрово стиснуті колони.

Частина 2. Сталеві каркаси одноповерхових виробничих будівель (ОВБ):

- тема 3 – Компоновка сталевих каркасів ОВБ;
- тема 4 – Система в'язей каркасу ОВБ;
- тема 5 – Статичний розрахунок каркасів ОВБ

Частина 3. Елементи сталевих каркасів ОВБ:

- тема 6 – Сталеві колони каркасів ОВБ;
- тема 7 – Сталеві кроквяні ферми.
- Тема 8 – Підкранові конструкції.

Частина 4. Металеві конструкції великопролітних будівель:

- тема 9 – Металеві конструкції великопролітних будівель.

Частина 5. Спеціальні металеві конструкції:

- тема 10 – Листові металеві конструкції;
- тема 11 – Висотні металеві споруди.

Даний курс лекцій є продовженням розділу «Металеві конструкції», який викладається попередньо в межах загального курсу «Будівельні конструкції» [7] і включає такі розділи:

- металеві конструкції у будівлях і спорудах;
- матеріали для металевих конструкцій;
- робота сталі при навантаженні;
- крихке руйнування сталевих конструкцій;
- робота і розрахунок сталевих елементів, що працюють на згин;
- металеві елементи, завантажені поздовжньою силою;
- зварні з'єднання металевих конструкцій;
- болтові з'єднання металевих конструкцій.

Освоєння перелічених питань є обов'язковим перед початком вивчення дисципліни «Металеві конструкції», якій присвячений даний курс лекцій.

Курс лекцій складений достатньо об'ємно з орієнтацією на роботу зі студентами у комп'ютерних класах університету і активне використання електронної версії конспекту.

Курс лекцій дисципліни «Металеві конструкції» рекомендується для дипломників і магістрантів інших кафедр і курсів, а також аспірантам і інженерам-будівельникам, які бажають оновити і поповнити знання в галузі будівельних металевих конструкцій – важливій складовій частині формування сучасних інженерів-будівельників.

Автор

ТЕМА 10 ЛИСТОВІ МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ

- 10.1. Класифікація, особливості листових конструкцій
- 10.2. Робота і розрахунок тонких оболонок обертання
- 10.3. Вертикальні циліндричні резервуари
- 10.4. Конструкції резервуарів
- 10.5. Газгольдери

10.1. Класифікація, особливості листових конструкцій

Листовими називаються просторові конструкції, основними несучими елементами яких є плоскі або гнуті листи типу пластин й оболонок. Листові конструкції – найбільш металоємна галузь застосування металу у будівельних конструкціях – 30...45 % сталі приходяться на ці конструкції.

1. *Класифікація листових конструкцій (ЛК)*

1. Резервуари для зберігання рідин (води, нафтопродуктів та ін.).
2. Газгольдери для зберігання та перерозподілу газів.
3. Бункери, силоси для сипучих матеріалів.
4. Трубопроводи великого діаметру ($D > 0,8$ м).
5. Спеціальні листові конструкції металургійних, нафтових, газових хімічних та інших галузей промисловості (кожухи доменних печей, повітрянагрівачі, ємкості хімічної та нафтової апаратури тощо).
6. Захисні споруди-оболонки атомних електростанцій.

2. *Особливості листових конструкцій*

1. Головна особливість – з'єднання листових конструкцій повинні бути не тільки міцними, але й щільними, герметичними, тому до зварних з'єднань листових конструкцій висувуються підвищені вимоги.
2. Велика довжина зварних швів, у тому числі монтажних: у звичайних металічних конструкціях – 15...25 м на 1 тону конструкцій, у листових конструкціях – 30...50 м на 1 тону конструкцій; необхідність раціональної організації зварювальних робіт (наприклад, метод рулонування).

3. Необхідність складних технологічних операцій при виготовленні листових конструкцій:

- вальцювання циліндричних і конічних оболонок;
 - штампування і вальцювання оболонок подвійної кривини.
4. Несприятливі і різноманітні умови експлуатації ЛК:
 - ЛК можуть бути наземними, підземними, підводними;
 - ЛК сприймають статичні та динамічні навантаження, працюють під низьким, середнім чи високим тиском, під вакуумом;
 - ЛК можуть знаходитися під дією високих температур та агресивного середовища.



Рис. 10.1. Види листових конструкцій

3. Робота листових конструкцій

Листові конструкції – це сполучення циліндричних, сферичних, конічних та ін. оболонок, що знаходяться у двовісному напруженому стані. Розрізняють 3 види напруженого стану ЛК:

- *безмоментний напружений стан*, коли рівновага оболонки забезпечується тільки напруженнями, рівномірно розподіленими за товщиною оболонки (основний випадок, рис. 10.2, а);
- *моментний напружений стан*, коли рівновага оболонки забезпечується згинальними напруженнями (зустрічається відносно рідко для товстих оболонок);
- *крайовий ефект* – місцевий згин окремих ділянок ЛК (рис. 10.2, б)

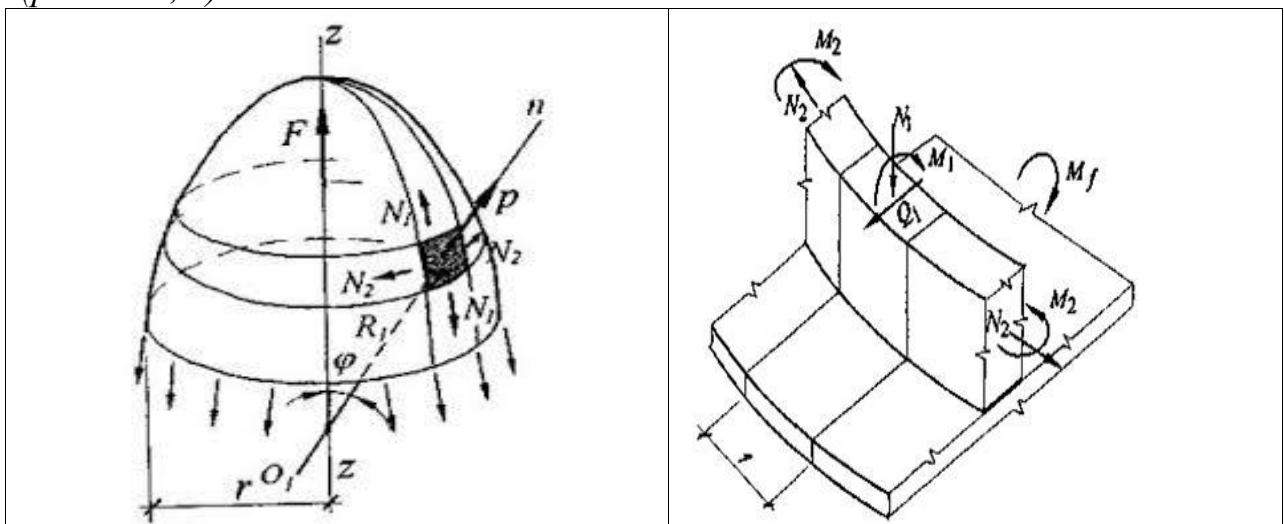


Рис. 10.2. Види напруженого стану листових конструкцій:
а – безмоментний напружений стан; б – крайовий ефект

10.2. Робота і розрахунок тонких оболонок обертання

1. Безмоментний напружений стан

Розглянемо оболонку обертання подвійної кривини, завантажену внутрішнім рівномірним тиском p (рис. 10.2, а), її геометрію визначають:

- R_1 – меридіональний радіус, що утворює криву обертання;
- R_2 – кільцевий радіус.

Відповідно на виділеній ділянці оболонки розрізняють зусилля N_1 і напруження σ_1 – *меридіональні* та зусилля N_2 і напруження σ_2 – *кільцеві*. Рівновага виділеної ділянки забезпечується тільки цими напруженнями, що характерно для безмоментного напруженого стану. Співвідношення між вказаними напруженнями описується рівнянням Лапласа:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t}, \quad (10.1)$$

де t – товщина оболонки.

Для циліндричної оболонки маємо:

$$R_1 = \infty; \sigma_2 = \frac{pR_2}{t}. \quad (10.2)$$

Для сферичної оболонки одержуємо:

$$R_1 = R_2 = R; \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{2t}. \quad (10.3)$$

Отже, при однаковому радіусі кривини сферична оболонка має напруження, удвічі менші, ніж циліндрична оболонка.

Перевірка сумісної дії напружень виконується у наступній формі:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau_{12}^2} \leq R_y \gamma_c. \quad (10.4)$$

Виконується також перевірка оболонки на стійкість:

$$\sigma_1 \leq \gamma_c \sigma_{cr}, \quad (10.5)$$

де σ_{cr} – критичне напруження втрати стійкості оболонки.

Така робота (безмоментний напружений стан) характерна для гладких ділянок ЛК, розташованих далеко від опорних закріплень, змін товщин оболонки та ін.

2. Крайовий ефект

Це місцевий згин, що з'являється у місцях стримання осьових деформацій, зміни їх умов (рис. 10.3).

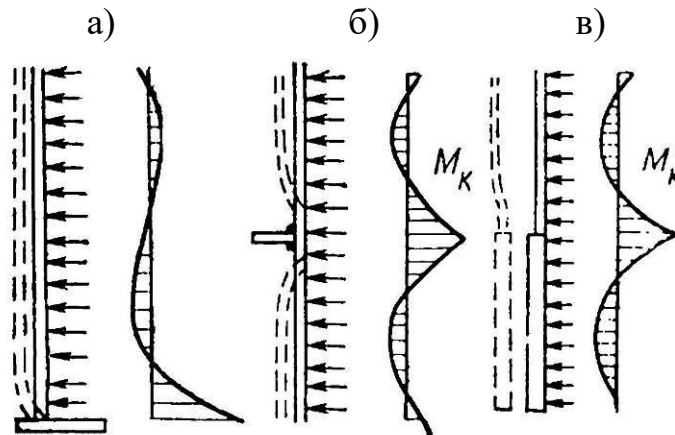


Рис. 10.3. Крайовий ефект у листових конструкціях:

а – сполучення стінки з днищем резервуару; б – кріплення ребра жорсткості;
в – зміна товщини оболонки)

Особливості крайового ефекту:

- місцевий згин виникає у вузькому діапазоні і швидко затухає;
- складний розрахунок за спеціальними формулами;
- явище в цілому – негативне, ступінь якого зростає у випадках різкої зміни форми ЛК;
- боротьба – не підсиленням і збільшенням товщин і з'єднань, а за допомогою конструктивних засобів.

10.3. Вертикальні циліндричні резервуари (низького тиску до 2 кПА)

а)



б)

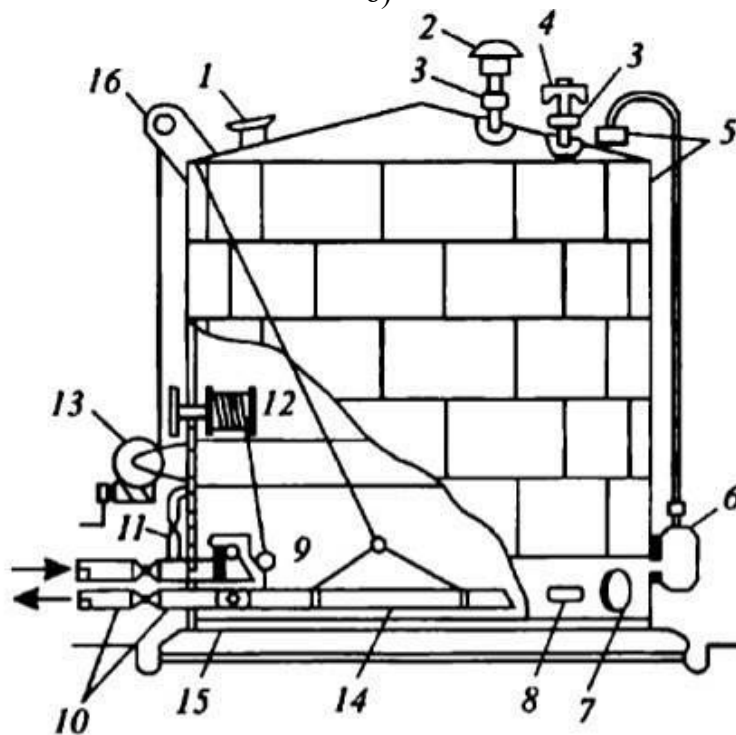


Рис. 10.4. Вертикальний циліндричний резервуар низького тиску:

а – загальний вигляд; б – обладнання резервуару: 1 – світовий люк; 2 – запобіжний клапан; 3 – вогневий запобіжник; 4 – дихальний клапан; 5 – замірний люк; 6 – показчик рівня; 7 – люк-лаз; сифонний кран; 9 – хлопавка; 10 – приймально-роздавальні патрубки; 11 – перепускний пристрій; 12 – управління хлопавкою; 13 – лебідка; 14 – підйомна труба; 15 – шарнір підйомної труби; 16 – блок

1. Конструкція резервуару низького тиску

Резервуар вертикальний, наземний, на піщаній подушці, об'ємом 100...5000 м³, окремі проекти – до 20 тис. м³

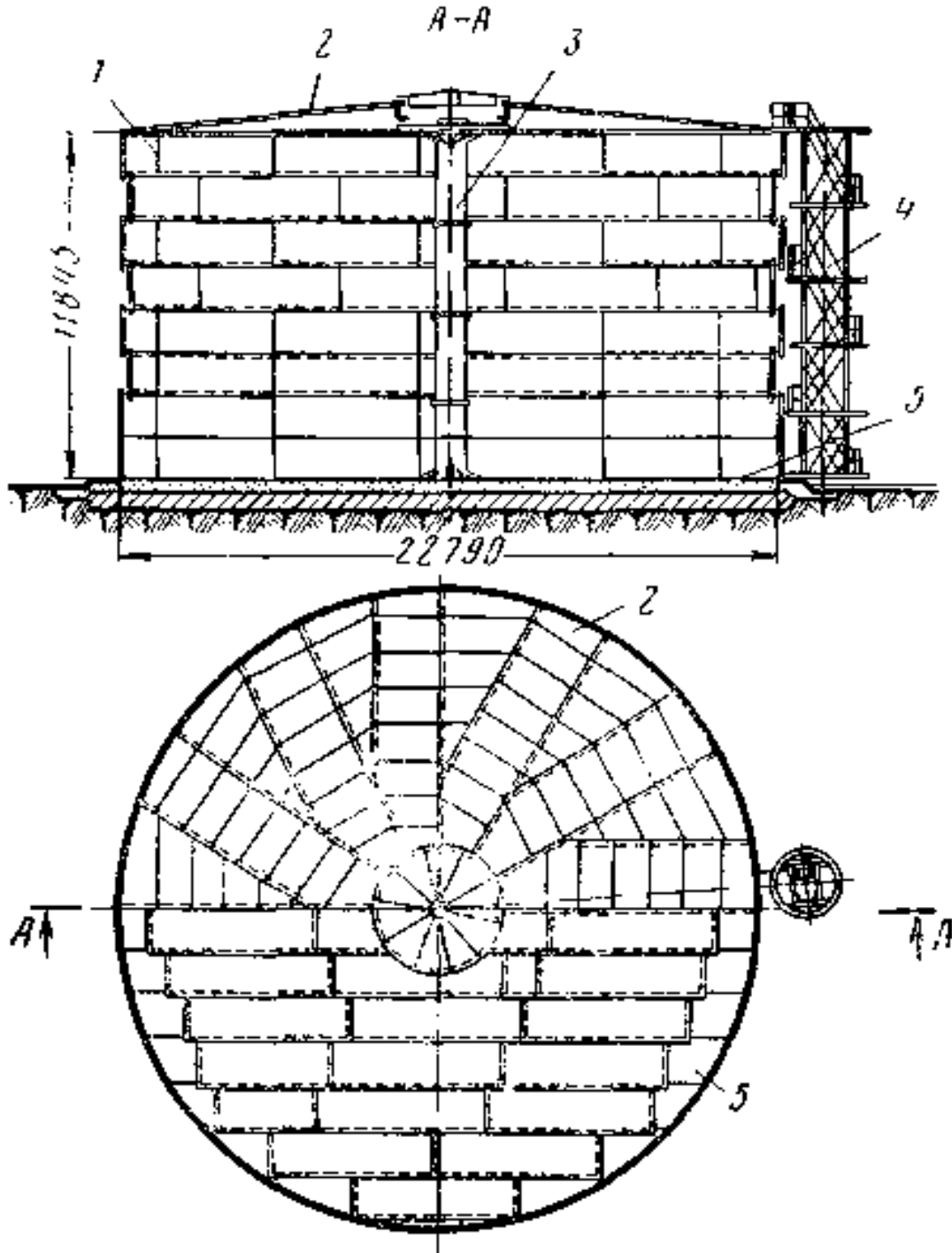


Рис. 10.5. Конструкція вертикального резервуару низького тиску:

- 1 – стінка (корпус); 2 – дах; 3 – центральна стійка;
4 – шахтна драбина; 5 – днище

2. Виготовлення і монтаж вертикальних резервуарів



Рис. 10.6. Полистовий монтаж резервуарів

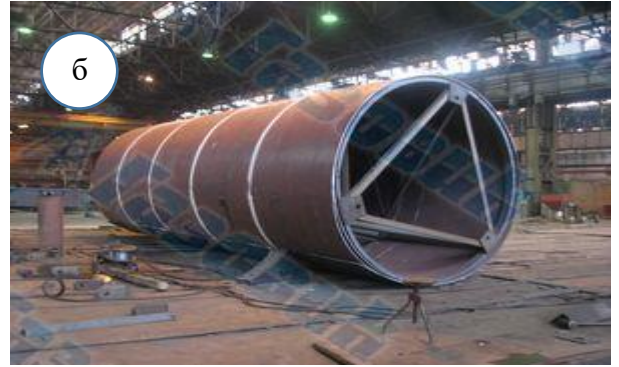


Рис. 10.7. Монтаж вертикального резервуару методом рулонування

Всі резервуари об'ємом до 30 000 м³ виготовляються методом рулонування. Основні етапи цього методу:

- зварювання на заводі елементів резервуару – стінки, днища і секторів даху;
- скатування елементів у габаритні рулони і транспортування (рис. 10.7, а, б);
- на місці – розкатування днища і встановлення центральної стійки (рис. 10.7, в);
- розкатування рулону стінки з приварюванням до днища і розкріпленням секторами даху, що спираються на центральну стійку і стінку (рис. 10.7, г, д, е) .

3. Розрахунок вертикального циліндричного резервуару

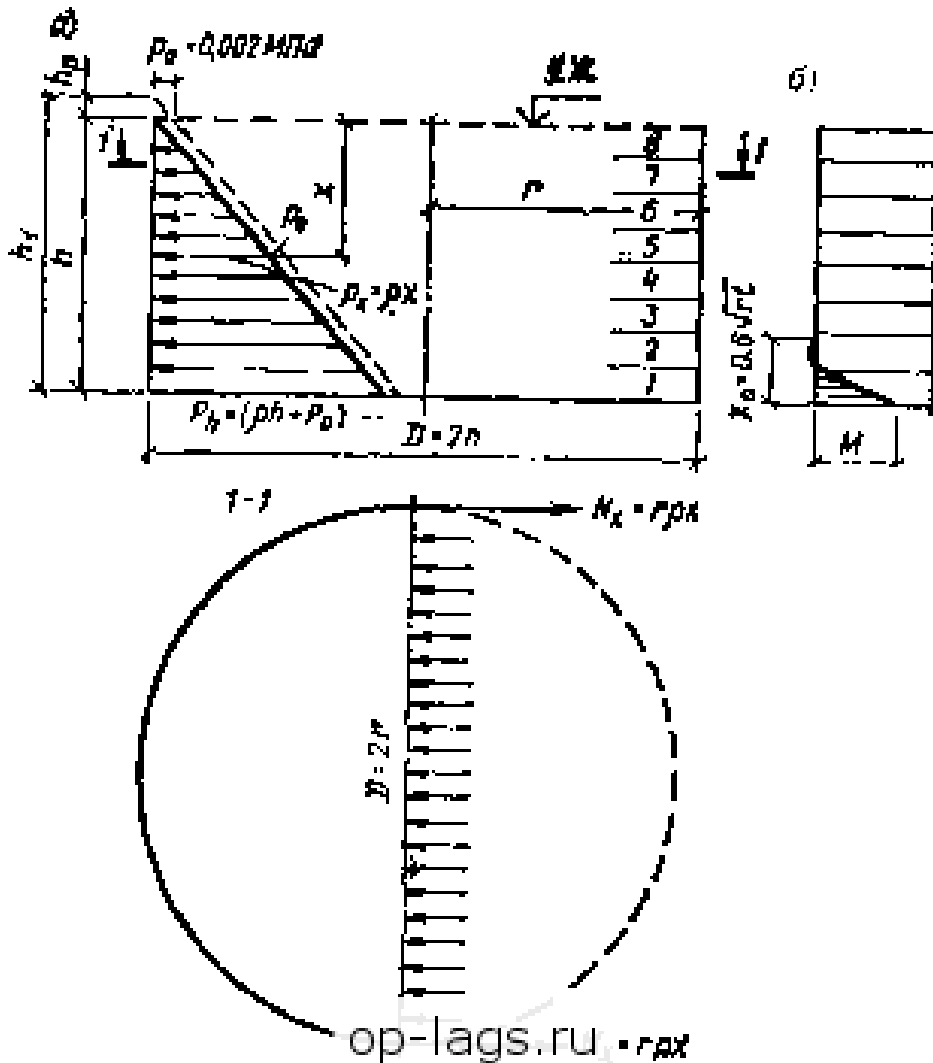


Рис. 10.8. До розрахунку стінки резервуару:
а – епюра гідростатичного тиску; б – крайовий ефект

1. Розрахунок стінки

Внутрішній тиск на стінку на глибині x (рис. 10.8, а):

$$p_x = p_g + p_0 = \gamma_{f1} x \rho + \gamma_{f2} p_n, \quad (10.6)$$

де p_g – гідростатичний тиск рідини на стінку; p_n – надлишковий (внутрішній) тиск у резервуарі; ρ – густина рідини; $\gamma_{f1} = 1,1$ – коефіцієнт надійності для гідростатичного тиску; $\gamma_{f2} = 1,2$ – коефіцієнт надійності для надлишкового тиску.

Розрахунок стінки виконується як для циліндричної оболонки (10.2) із умови, що кільцеві напруження не повинні перевищувати міцності на розтяг стикових зварних швів:

$$\sigma_{wy} = \frac{p_x r}{t} = \frac{(\gamma_{f1} x \rho + \gamma_{f2} p_n) r}{t} \leq R_{wy} \gamma_c, \quad (10.7)$$

де $\gamma_c = 0,8$ – коефіцієнт умов роботи стінки резервуару.

2. З'єднання стінки резервуару з днищем (крайовий ефект, рис. 10.8, б).

Максимальний згинальний момент у місці з'єднання (на 1 пог. см):

$$M = 0,1\rho h r t . \quad (10.8)$$

Перевірка міцності стінки в місці з'єднання із днищем

$$\sigma = \frac{g}{t} + \frac{6M}{t^2} \leq R_y \gamma_c . \quad (10.9)$$

10.4. Конструкції резервуарів

1. Резервуари низького тиску

- Резервуар із щитовим дахом (див. п. 10.3).
- Резервуар з висячим покриттям

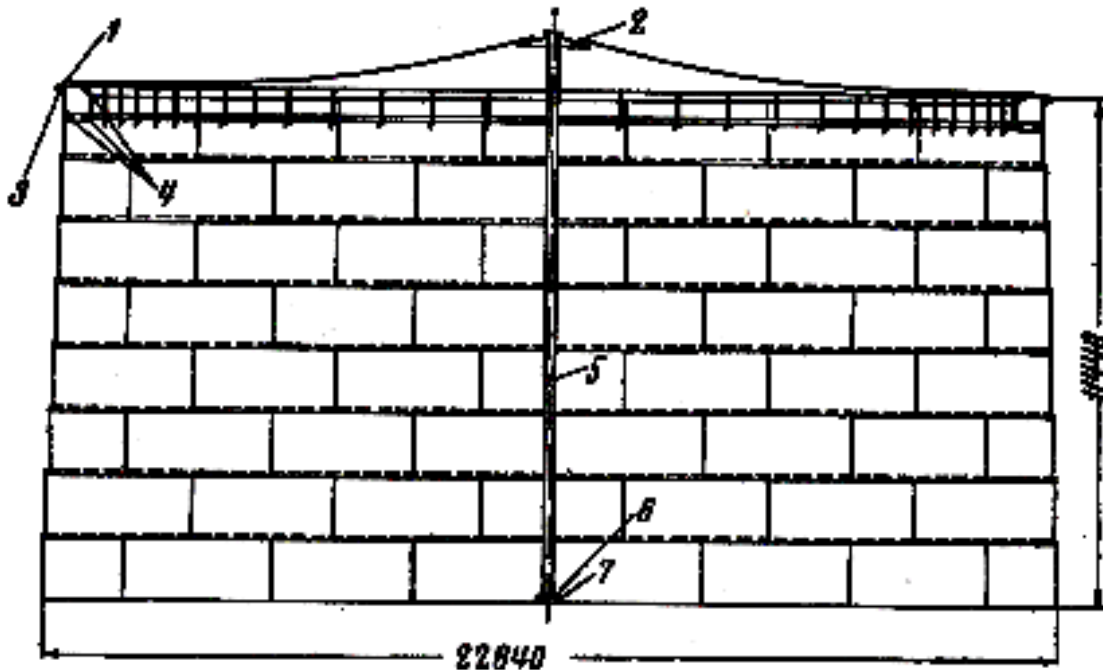


Рис. 10.9. Резервуар з висячим покриттям:

1 – стінка; 2 – висяче покриття; 3,4 – кільце жорсткості; 5 – центральна стійка;
6,7 – опорна частина стійки.

Ємкість таких резервуарів може досягати 5000 м³. Їх головна перевага – економія сталі в межах 10...15% за рахунок заміни жорсткого щитового покриття висячою мембраною.

- Резервуар з плаваючим покриттям

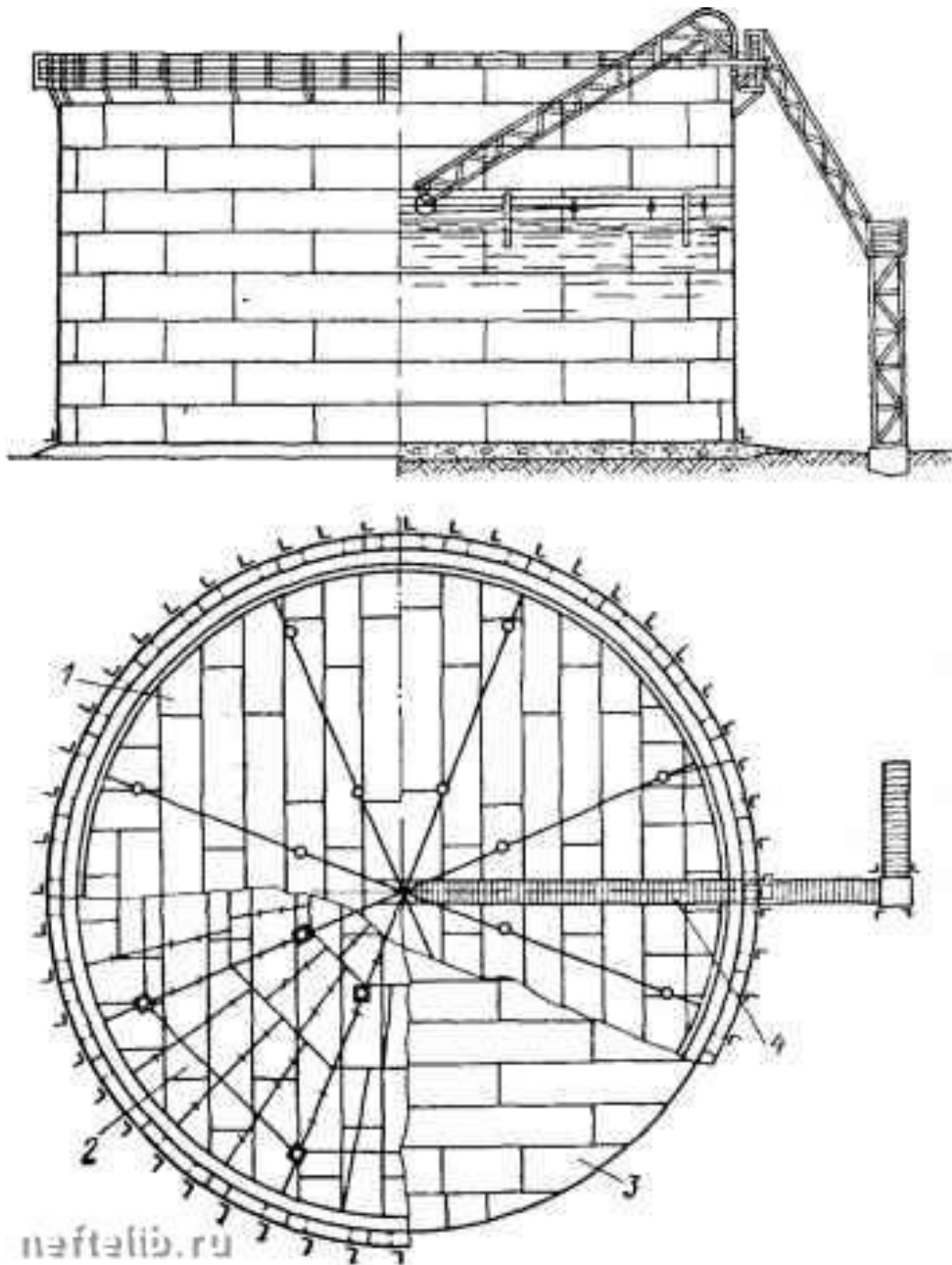


Рис. 10.10. Резервуар з плаваючим покриттям

Об'єм таких резервуарів досягає 10...100 тис. м³. Покриття резервуару виконується у вигляді понтона, який плаває на поверхні рідини. Головна перевага такого рішення – зменшення витрат нафтопродукту від випарювання.

2. Резервуари підвищеного і високого тиску

- Резервуар зі сфероциліндричним покриттям

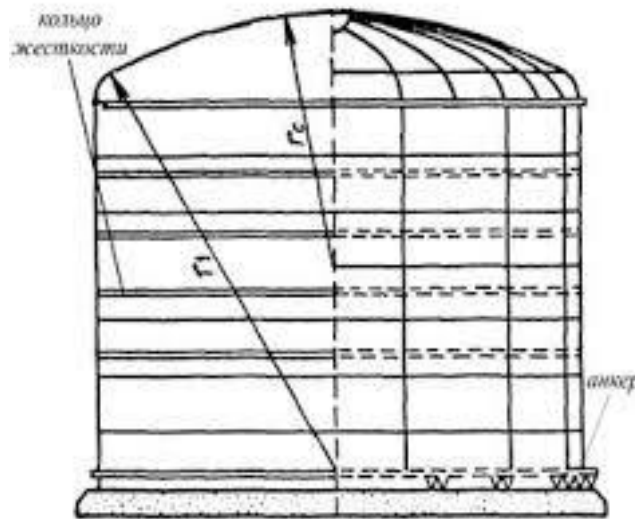


Рис. 10.11. Резервуар зі сфероциліндричним покриттям

Такі резервуари розраховані на підвищений внутрішній надмірний тиск 10..70 кПа завдяки влаштуванню просторового покриття і анкерного кріплення резервуару до фундаменту.

- Горизонтальний циліндричний резервуар

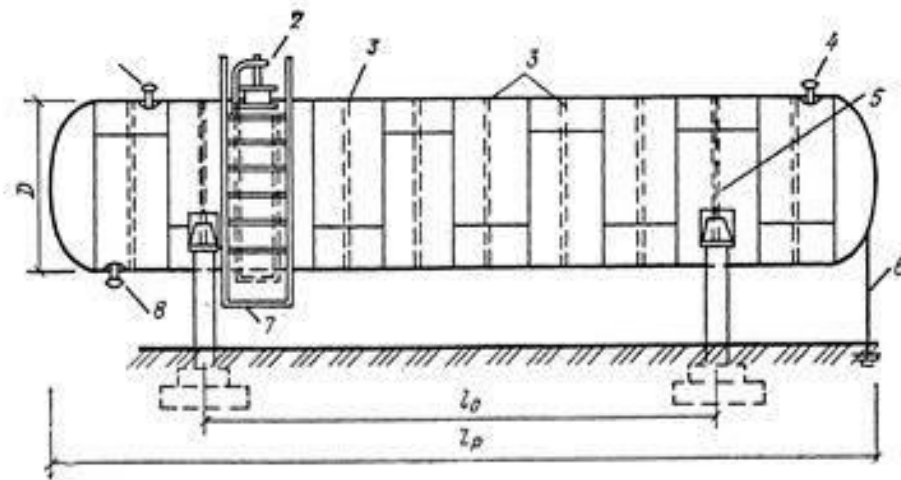


Рис. 10.12. Горизонтальний циліндричний резервуар

1 – штуцер для завантаження; 2 – лаз для огляду; 3 – кільце жорсткості; 4 – штуцер для вентиляції; 5 – опорна діафрагма; 6 – заземлення; 7 – драбина; 8 – штуцер для забору

Об'єм таких резервуарів не перевищує 400 м³, вони вписуються у залізничний габарит. Використовуються для зберігання нафтопродуктів під залишковим тиском до 200 кПа = 0,2 МПа та скраплених газів під тиском 1,8 МПа і більше.

- Краплеподібний і багатоторовий резервуари

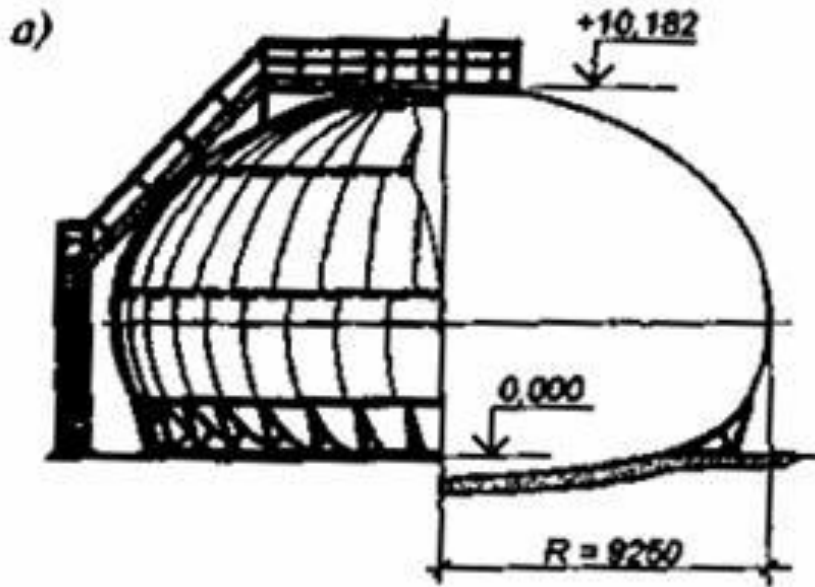


Рис. 10.13. Краплеподібний резервуар

Об'єм таких резервуарів складає 2...6 тис. м³, внутрішній тиск – 30...50 кПа. Краплеподібний резервуар має форму краплі на сухій поверхні, тобто оболонки рівного опору. Тому конструкція резервуару рівномірна і економічна, але складна у виготовленні і монтажі.

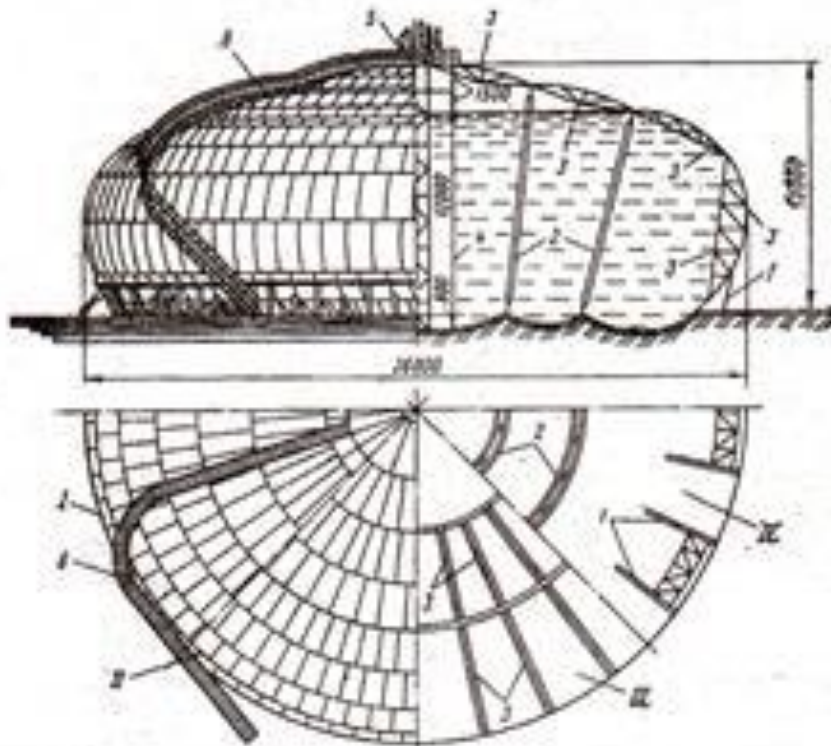


Рис. 10.14. Багатоторовий резервуар

- *Сферичний (кульовий) резервуар*

Об'єм сферичних резервуарів складає 600...4000 м³, вони використовуються для зберігання скраплених газів під високим надмірним тиском до 250 кПа. Сферична оболонка може бути багатошаровою. Недоліки – складність виготовлення і монтажу оболонки з пелюстків подвійної кривини (рис. 10.15)

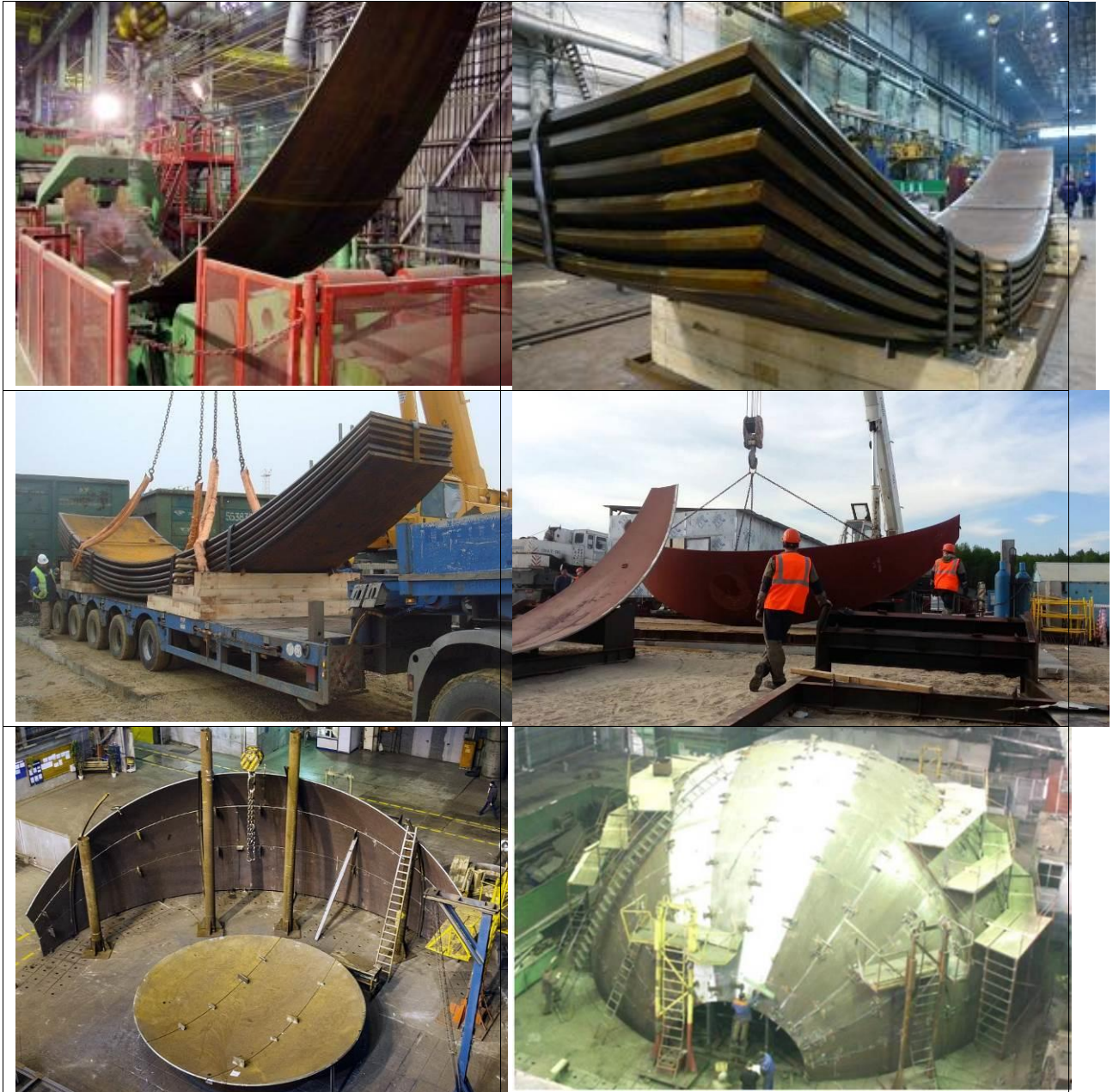


Рис. 10.15. Полистовий монтаж кульового резервуару

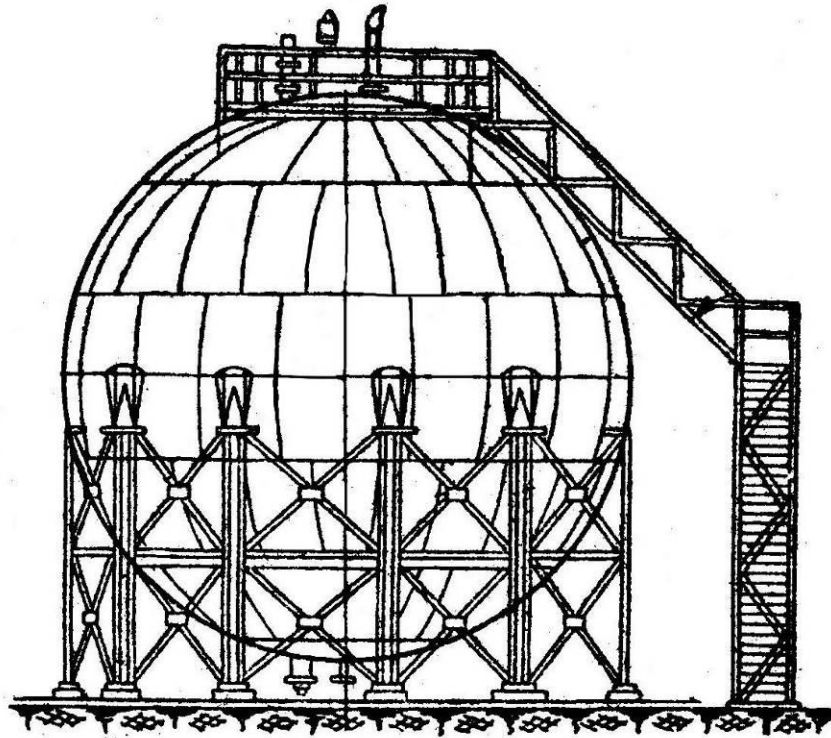
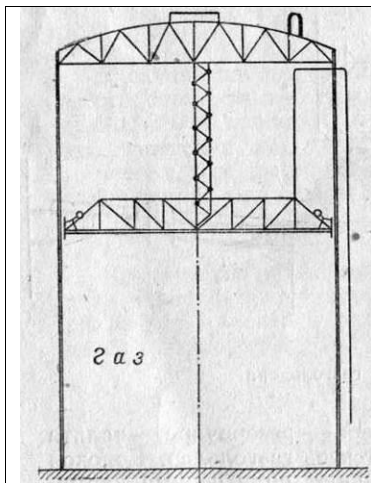


Рис. 10.16. Сферичний резервуар

10.5. Газгольders

Газгольders – це ємкості для зберігання і змішування газів. За конструкцією і умовами експлуатації газгольders поділяються на дві групи: змінного об'єму (сухі і мокрі) з тиском газу 4..5 кПа і постійного об'єму з тиском 250...2000 кПа.

1. Сухий газгольдер змінного об'єму



Сухі газгольders мають об'єм 10...100 тис. м³. Газгольдер має нерухомий корпус з днищем і дахом, всередині якого рухається поршень-шайба. При наповненні газгольдеру знизу газ після досягнення ним певного тиску долає вагу поршня і піднімає його; при витраті газу поршень опускається і своєю вагою витісняє газ.

2. Мокрий газгольдер змінного об'єму

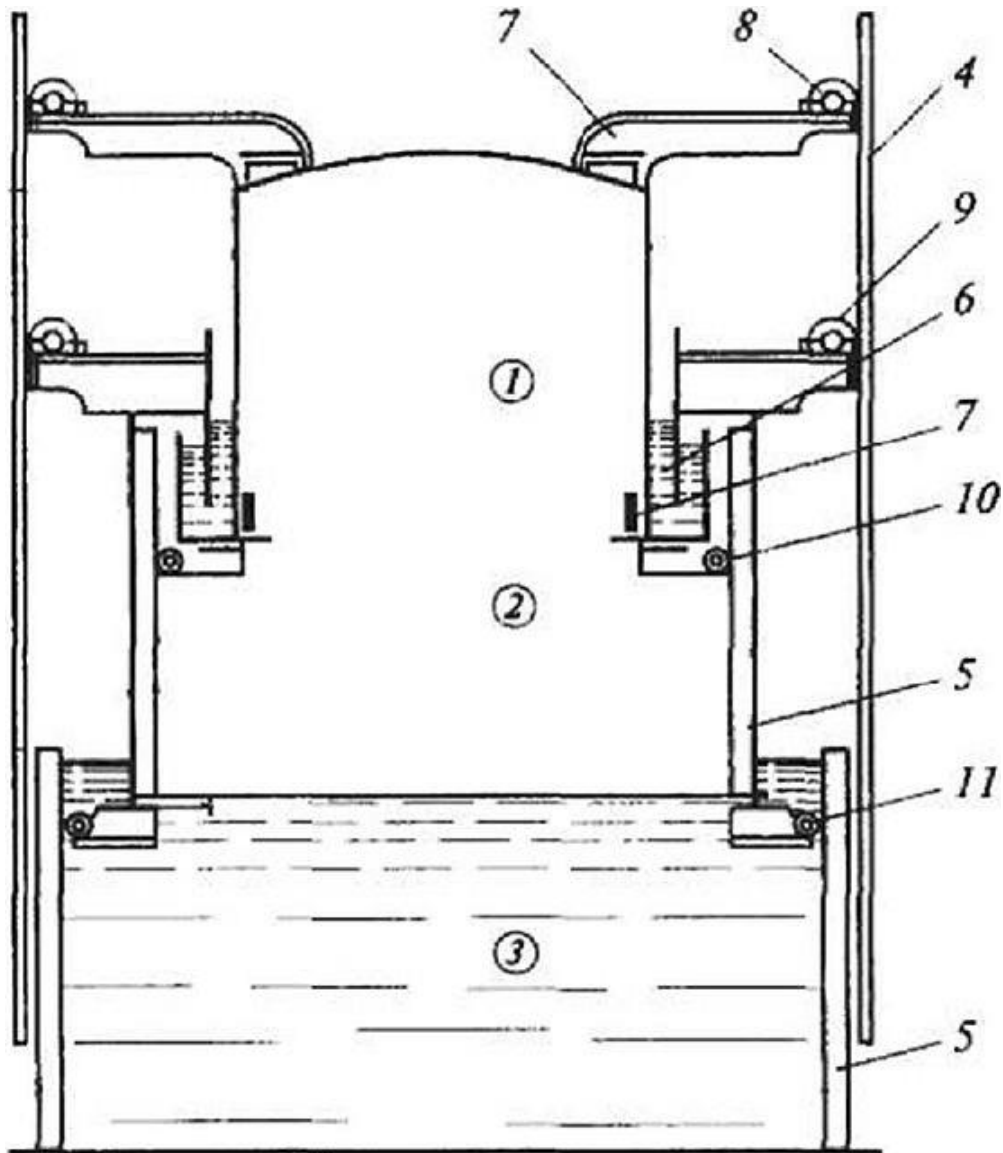


Рис. 10. 17. Схема мокрого газгольдеру змінного об'єму:

- 1 – колокол; 2 – телескоп; 3 – резервуар; 4 – зовнішні направляючі стійки;
 5 – внутрішні направляючі; 6 – жолоб з водою; 7,8 – верхній ролік колокола;
 9 – верхній ролік телескопа; 10, 11 – нижні роліки колокола і телескопа;

Мокрі газгольдери мають об'єм $100 \dots 10000 \text{ м}^3$. Через дно резервуару під колокол підводяться трубопроводи для подачі і відбирання газу. При наповненні порожнього газгольдеру газом колокол піднімається зі свого нижнього положення, зачерпує воду із резервуару нижнім жолобом і зачеплює їм верхній жолоб телескопу.

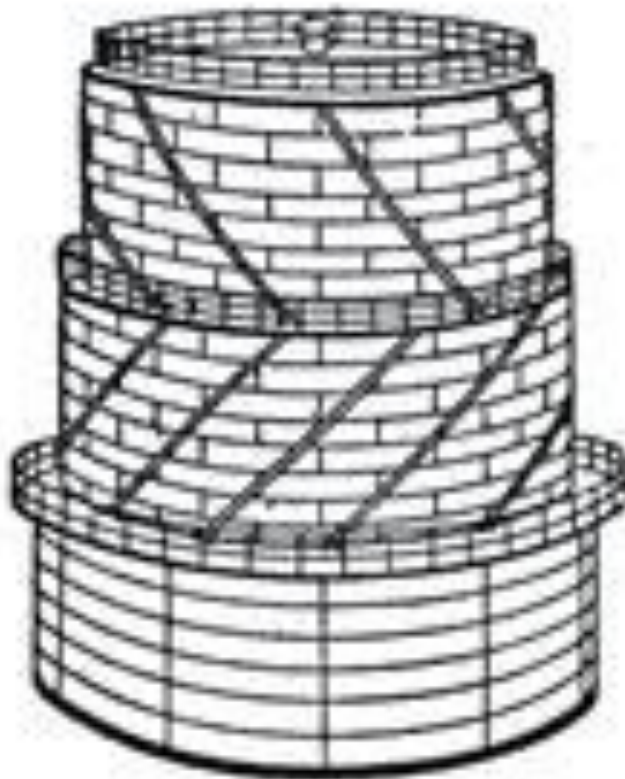
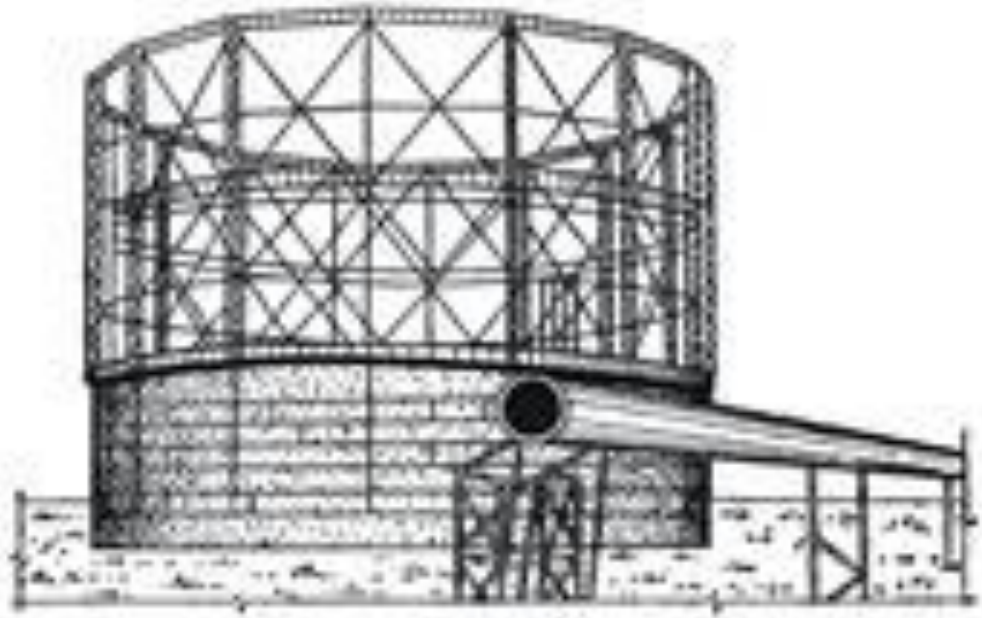


Рис. 10.18. Мокрі газгольдери змінного об'єму:
а – газгольдер з вертикальним направляючими; б – гвинтовий газгольдер

Контрольні питання

1. Види листових металічних конструкцій.
2. Особливості листових металічних конструкцій.
3. Види напруженого стану металевих листових конструкцій.
4. Розрахунок тонких оболонок обертання.
5. Конструкція вертикального циліндричного резервуару низького тиску.
6. Розрахунок вертикального циліндричного резервуару низького тиску.
7. Метод рулонування сталевих резервуарів.
6. Конструкції сталевих резервуарів підвищеного і високого тиску
7. Сталеві газгольдери

ТЕМА 11 ВИСОТНІ МЕТАЛЕВІ СПОРУДИ

- 11.1. Галузь застосування, класифікація висотних споруд
- 11.2. Навантаження на висотні споруди
- 11.3. Проектування металевих башт
- 11.4. Проектування металевих щогл

11.1. Галузь застосування, класифікація висотних споруд

Висотними називаються споруди, висота яких значно перевищує їхні розміри у поперечному напрямі.

1. Галузь застосування висотних споруд:

- опори антенних споруд зв'язку: телевізійні та радіотрансляційні опори, опори релейного та мобільного зв'язку;
- опори ліній електропередач (ЛЕП);
- промислові труби: вентиляційні, димові, витяжні;
- водонапірні башти;
- опори вітроенергетичних установок (ВЕУ);
- вишки: бурові, освітлювальні;
- градирні;
- морські стаціонарні платформи.

2. Класифікація конструктивних схем висотних споруд

За конструкцією і статичною схемою висотні споруди діляться на *башти* (вежі) та *щогли*.



Рис. 11.1. Конструкції висотних споруд:
а – башта; б – щогла



Рис. 11.2. Види висотних споруд:

а – телебашта; б – телешогла; в – опора ЛЕП; г – димова труба; д – опора ВЕУ;

е – водонапірна башта; є – бурова вишка; ж – градирня;

з – морська стаціонарна платформа

Башта – це окремо стояча консольна споруда, жорстко закріплена (защемлена) в основі.

Щогла має відносно тонкий стовбур, шарнірно спертий на фундамент, стійкість якого забезпечується системою відтяжок.

Башти більш жорсткі, компактні і архітектурно виразні (башта Ейфеля (Париж), Останкінська башта (Москва)), можуть розміщатися у центрах великих міст і формувати їхній архітектурний вираз.

Щогли більш економічні, але вимагають великих вільних площ (с. Красногорівка, Полтавська область), тому найчастіше розміщуються за межами населених пунктів.

11.2. Навантаження на висотні споруди

1. Види навантажень на висотні споруди:

- постійне – від власної ваги конструкцій;
- технологічні – від ваги і функціонування обладнання, ліфтів, антен, смкостей та ін.;
- вітрове – основне навантаження для висотних споруд;
- ожеледне;
- температурні впливи;
- тягіння вант, антен, дротів, у т.ч. при їх обриві.

2. Статична (середня) складова вітрового навантаження

Граничне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за формулою

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C, \quad (11.1)$$

де γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження;

W_0 – характеристичне значення вітрового тиску (в Па);

C – коефіцієнт, що визначається за формулою (11.2).

Характеристичне значення вітрового тиску W_0 дорівнює середній (статичній) складовій тиску вітру на висоті 10 м над поверхнею землі, який може бути перевищений у середньому один раз за 50 років. Характеристичне значення вітрового тиску W_0 визначається залежно від вітрового району по карті або за додатком Е ДБН (5 вітрових районів).

Коефіцієнт C визначається за формулою

$$C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d, \quad (11.2)$$

де C_{aer} - аеродинамічний коефіцієнт;

- C_h - коефіцієнт висоти споруди;
 C_{alt} - коефіцієнт географічної висоти;
 C_{rel} - коефіцієнт рельєфу;
 C_{dir} - коефіцієнт напрямку;
 C_d - коефіцієнт динамічності.

Розглянемо детально важливі для висотних споруд коефіцієнти висоти C_h та аеродинамічний C_{aer} , інші коефіцієнти розглядалися раніше в межах теми 5.

Коефіцієнт висоти споруди C_h враховує збільшення вітрового навантаження ϵ висотою. В нормах ДБН коефіцієнт C_h враховує висоту споруди або її частини, що розглядається, над поверхнею землі (Z), тип навколишньої місцевості і визначається за табл. 11.1 для будівель і споруд, старший період власних коливань яких перевищує $0,25c$

Таблиця 11.1

Коефіцієнти висоти споруди (для $T > 0,25 c$)

$Z(m)$	C_h для типу місцевості			
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
≤ 5	1,40	1,20	0,90	0,60
10	1,80	1,50	1,20	1,00
20	1,95	1,85	1,55	1,40
40	2,25	2,20	2,00	1,95
60	2,45	2,45	2,25	2,15
80	2,65	2,60	2,45	2,30
100	2,70	2,70	2,60	2,40
150	2,95	3,00	2,90	2,60
200	3,10	3,20	3,20	2,80

Проміжні значення коефіцієнту C_h слід визначати лінійною інтерполяцією.

Типи місцевості, що оточує будівлю чи споруду, визначаються для кожного розрахункового напрямку вітру окремо:

I – відкриті поверхні морів, озер, а також плоскі рівнини без перешкод, що піддаються дії вітру на ділянці довжиною не менш як 3 км;

II – сільська місцевість з огорожами (парканами), невеликими спорудами, будинками і деревами;

III – приміські і промислові зони, протяжні лісові масиви;

IV – міські території, на яких принаймні 15% поверхні зайняті будівлями, що мають середню висоту понад 15 м.

Аеродинамічні коефіцієнти C_{aer} враховують характер обдування споруд вітром, який залежить від швидкості вітру, форми і розмірів поверхонь, що обдуваються. Залежно від форми споруди або конструктивного елемента деякі з цих коефіцієнтів можуть, зокрема, мати вигляд:

- коефіцієнтів C_e , які слід враховувати при визначенні вітрового тиску, прикладеного нормально до зовнішніх поверхонь споруди або елемента і віднесеного до одиниці площі цієї поверхні;

- коефіцієнтів лобового опору C_x , які слід враховувати для окремих елементів і конструкцій при визначенні тієї складової загального опору тіла, яка діє в напрямку вітрового потоку і віднесена до площі проекції тіла на площину, перпендикулярну до потоку;

Для елементів наскрізних конструкцій, що мають у перерізі форму двотавра, тавра, швелера, кутика $C_x = 1,4$; для дротів і тросів $C_x = 1,2$; для споруд та їхніх елементів з коловою циліндричною поверхнею (димові та вентиляційні труби, башта і т.п.), а також елементів наскрізних конструкцій з круглих труб

$$C_x = C_{x\infty} k . \quad (11.3)$$

Тут коефіцієнт $k = 0,6 \dots 1,0$ в залежності від співвідношення розмірів споруди.

Коефіцієнт $C_{x\infty} = 0,40 \dots 1,20$ визначається за графіком *рис. 11.3* в залежності від числа Рейнольдса

$$Re = 0,88d \sqrt{W_0 C_h \gamma_{fm}} 10^5, \quad (11.4)$$

де d – діаметр споруди або елемента, м; W_0 – характеристичне значення вітрового тиску, Па; C_h – коефіцієнт висоти споруди.

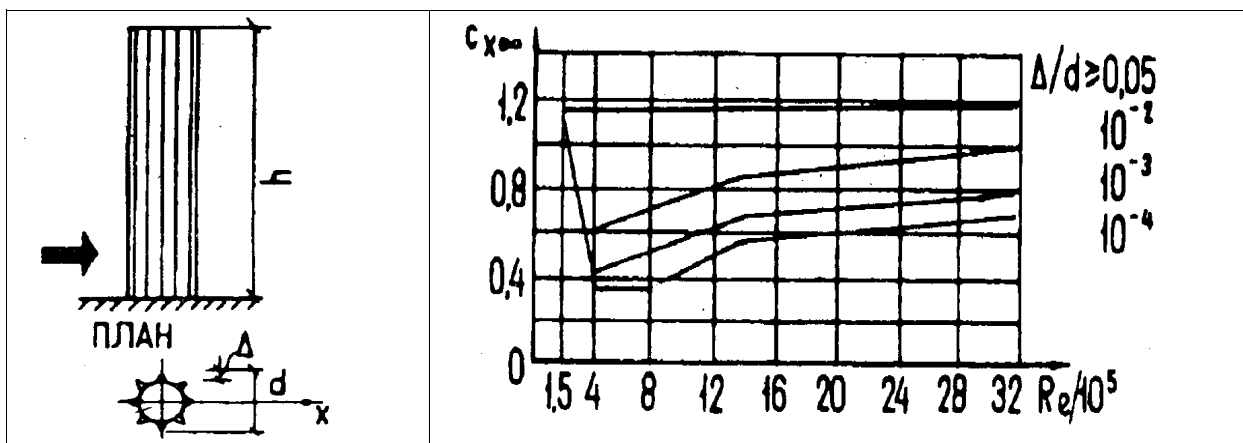


Рис. 11.3. Залежність аеродинамічного коефіцієнта від числа Рейнольдса

Значення Δ на графіку *рис. 11.3* приймаються: для дерев'яних конструкцій $\Delta = 0,005$ м; для цегляної кладки $\Delta = 0,01$ м; для бетонних і залізобетонних конструкцій $\Delta = 0,005$ м; для сталевих конструкцій $\Delta = 0,001$ м; для проводів і тросів діаметром d $\Delta = 0,01d$; для ребристих поверхонь із ребрами висотою b $\Delta = b$.

Судячи із графіка *рис. 11.3*, використання круглих труб замість прокатних профілів призводить до суттєвого зниження коефіцієнта $C_{x\infty}$, особливо при значеннях числа Рейнольдса в інтервалі від $3 \cdot 10^5$ до $12 \cdot 10^5$.

3. Пульсаційна складова вітрового навантаження

Норми СНіП 2.01.07-85 визначають пульсаційну вітрову складову за формулою

$$W_p = W_0 \zeta(z_e) V \xi . \quad (11.5)$$

Тут: W_0 – характеристичне значення середньої складової вітрового навантаження;

- $\zeta(z_e)$ – коефіцієнт пульсацій вітру, що приймається в діапазоні 0,46...1,78 залежно від еквівалентної висоти z_e і типу місцевості;

- V – коефіцієнт просторової кореляції пульсацій вітрового тиску, що знаходиться в діапазоні 0,38...0,95 залежно від розмірів розрахункової поверхні споруди або окремої конструкції, на якій враховується кореляція пульсацій;

- ξ – коефіцієнт динамічності, що знаходиться в діапазоні 1,0...2,8 (*рис. 11.4*) залежно від безрозмірного параметра $\varepsilon_1 = \sqrt{W_0(z_e)}/940 f_1$, де f_1 – перша власна частота коливань споруди (Гц), і логарифмічного декременту коливань, рівного $\delta = 0,3$ для залізобетонних і кам'яних споруд, а також для будівель із сталевим каркасом за наявності огорожуючих конструкцій, і $\delta = 0,15$ для сталевих споруджень футерованих димарів і апаратів колоного типу.

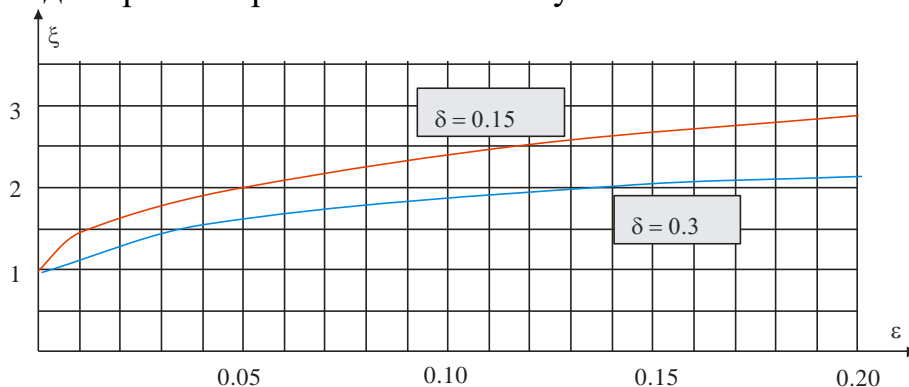


Рис. 11.4. Коефіцієнт динамічності

На відміну від викладеного підходу, норми України і Єврокод регламентують спрощений варіант динамічного розрахунку, який використовує узагальнений динамічний коефіцієнт, представлений графічно для типових споруд. Крім того, Єврокод передбачає спеціальну розрахункову процедуру для гнучких висотних споруд, таких як вежі, щогли на відтяжках, витяжні труби і т.п., основу на використанні фактора пориву і зональної схеми завантаження

11.3. Проектування металевих башт

1. Приклади башт

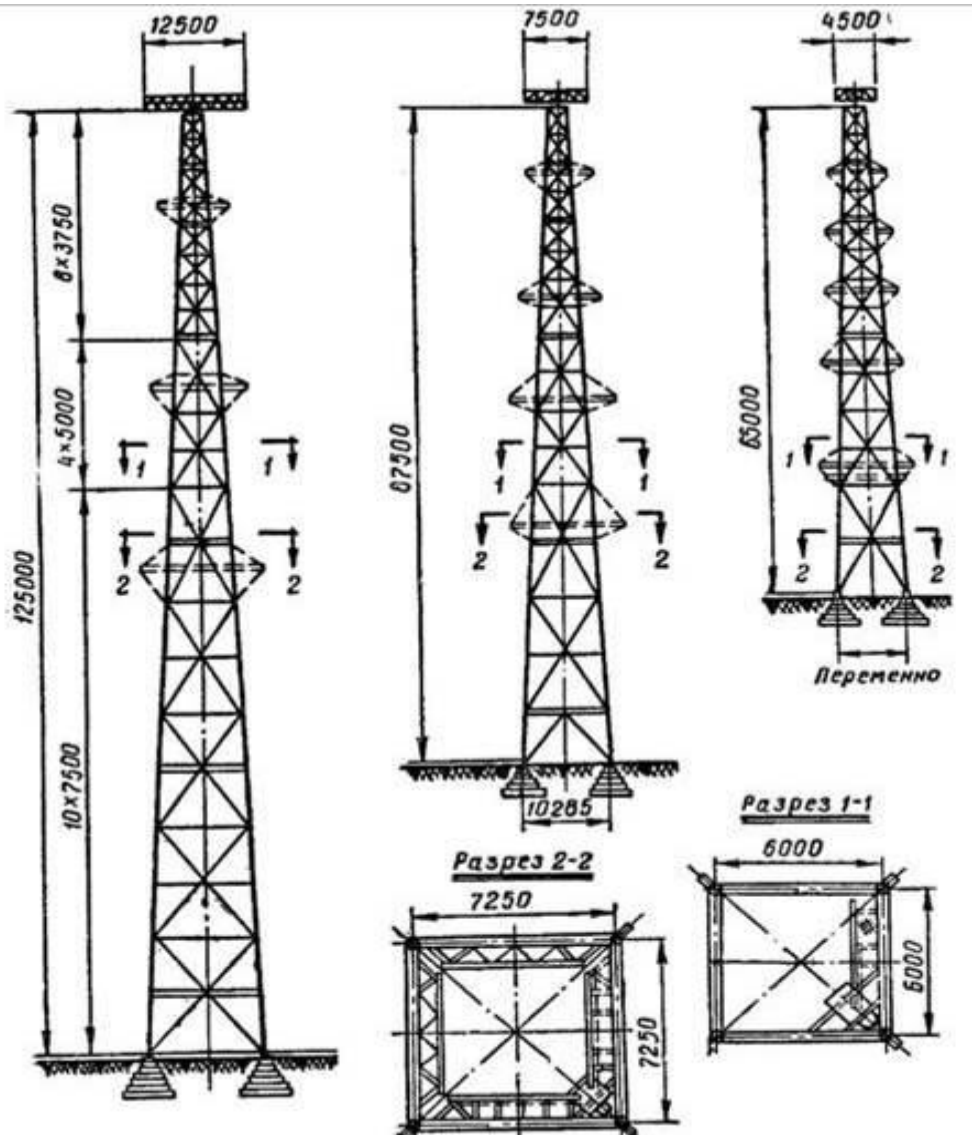


Рис. 11.5. Компонка типових телерадіотрансляційних башт

Починаючи з 1954 р. у багатьох містах СРСР почалося будівництво телевізійних башт. Типові телебашти різної висоти компонуються шляхом «відрізання» нижньої частини, причому верхня частина з антенним обладнанням залишається незмінною (рис. 11.5). Обрис типових башт – пірамідальний, решітка – хрестова. Стояки (пояси) і розпірки виконуються з труб, розкоси (з натягом) – з круглої сталі.

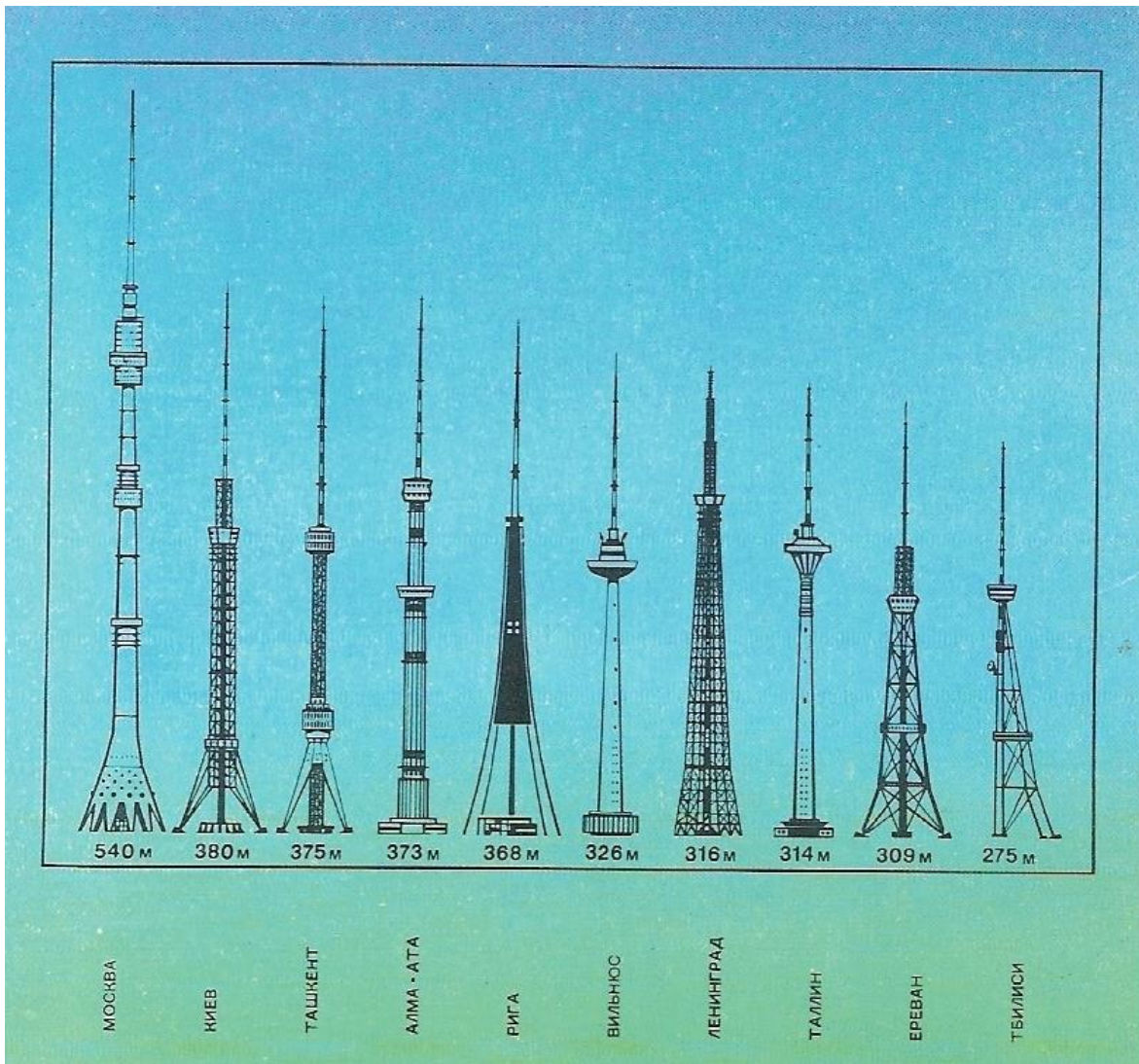


Рис. 11.6. Порівняння телебашт столиць республік б. СРСР

Одночасно з розробленням і будівництвом типових башт проводилося варіантне проектування телебашт великої висоти для столиць союзних республік і окремих великих міст. Конструктивні рішення пророблялися з урахуванням не тільки технологічних, але й архітектурних міркувань (рис. 11.6).

В 1966 р. була побудована телевізійна башта у м. Санкт-Петербурзі висотою 315 м (рис. 11.8, б). Вона має форму шестигранної піраміди, елементи якої виготовлені з труб діаметром 133...426 мм. Уперше у такій споруді монтажні стики були виконані зварними. Маса башти складає 1160 т. Монтаж виконувався методом нарощування за допомогою спеціального самопідйомного крана.

Оригінальне рішення має телевізійна башта висотою 312 м в Єревані, побудована у 1978 р. (рис. 11.7, а). Її нижня частина до відмітки 130 м вирішена у вигляді решітчастої тригранної піраміди з поясами із трьох труб, зв'язаних по гранях решіткою. Середня за висотою частина (до

відмітки 173м) являє собою решітчасту шестигранну піраміду з труб. Верхня частина запроектована у вигляді суцільної труби змінного перерізу. По вертикальній осі розміщено циліндричний стовбур діаметром 4 м. Витрати сталі на башту 1705 т.

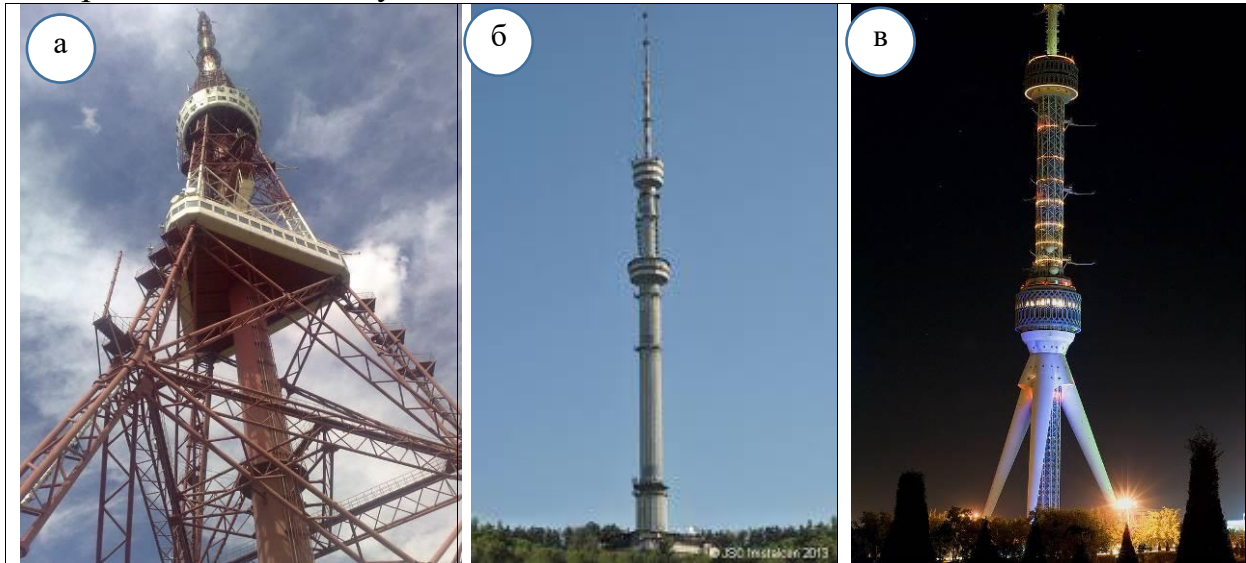


Рис. 11.7. Телебашти: а – Єреван; б – Алма-Ата; в – Ташкент

Стовбур телебашти висотою 360 м, спорудженої в 1982 р. в Алма-Аті (рис. 11.7, б), складається з ділянок циліндричної форми діаметром від 9,0 до 18,5 м. Конструкція стовбура вирішена у вигляді решітчастих призм, виконаних з зварних двотаврів. Для зменшення аеродинамічного коефіцієнта решітчастий стовбур облицьований алюмінієвими листами. Витрати сталі на башту 3700 т.

Доволі оригінальною є конструкція телевізійної башти висотою 350 м у Ташкенті, уведеної в експлуатацію в 1983 р (рис. 11.7, в). Вона має центральний решітчастий стовбур з труб, який підтримується трьома суцільностінчастими підкосами. Витрата сталі на башту 2900 т.

Не менш оригінальною є конструкція цілком зварної телевізійної башти висотою 275 м, побудованої у Тбілісі у 1975 р (рис. 11.8, в,г), проект якої був розроблений українським фахівцями УкрНДІПроектсталь-конструкція. Вертикальний циліндричний стовбур діаметром 4,0 м на відмітці 151 м підтримується двома підкосами. Башта розрахована на сейсмічні впливи силою 8 балів, її маса 1273 т.

Окремо слід виділити Останкінську телебашту в [Москві](#), збудовану в [1967](#) р. Висота башти становить 540 м, до відмітки 365 м башта виконана залізобетонною, вище цієї відмітки – сталевую. Автор проекту башти Никітін використав довоєнні розробки свого керівника Юрія Кондратюка, який запропонував подібну конструкцію для вітроенергетичної станції на горі Ай-Петрі (Крим).



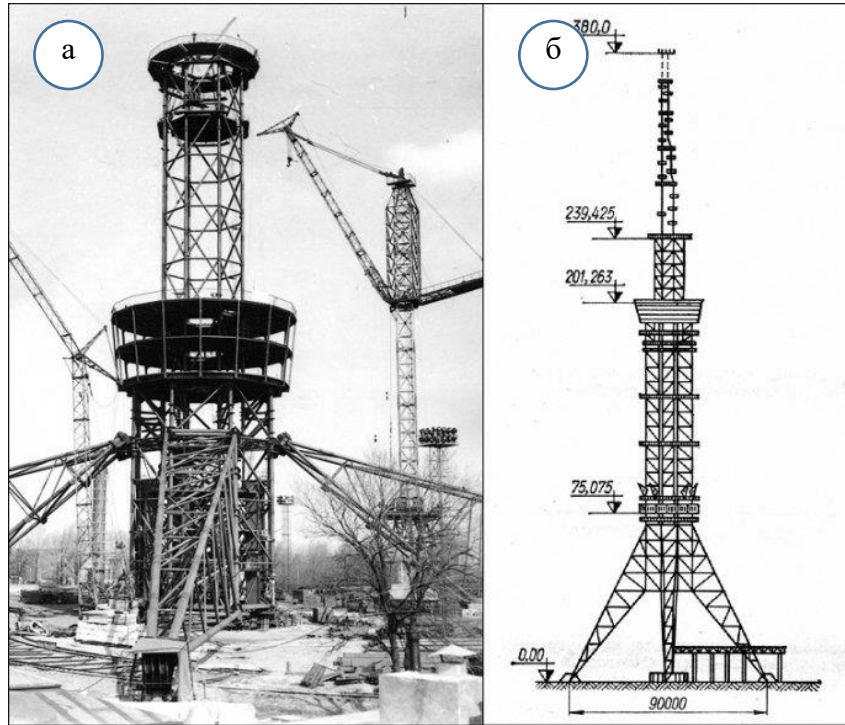


Рис. 11.9. Телебашта в Києві:

а – монтаж башти; б – загальний вигляд

Особливу увагу привертає телевізійна башта в Києві висотою 392 м, найвища вільна ґратована (решітчаста) телевежа у світі, побудована в 1973 р. (рис. 11.9, б) за проектом інституту УкрНДІПроектстальконструкція. Стовбур башти решітчастий, восьмигранного обрису, вписаний в коло діаметром 20 м, спирається на чотири просторові опори. У конструкції башти застосовані труби з високоміцної сталі з межею міцності 600 МПа. Всі з'єднання, включно монтажні, виконані зварними.

Монтаж виконувався унікальним методом підрощування знизу (рис. 11.9, а): спочатку були змонтовані опори майбутньої конструкції і встановлено 8 потужних гідравлічних домкратів, які піднімали всю башту, а в цей час під неї заводилася нова секція і таким чином вся конструкція ставала все вищою і вищою. Це дозволило виконувати зварювання і контроль якості швів внизу, на постійних робочих місцях. Маса башти 2600 т, вона на 60 м вище Ейфелевої башти, але втричі легше.

Взагалі створення висотних споруд включає наступні етапи: виготовлення габаритних секцій на спеціалізованих заводах (рис. 11.10, а); монтаж нижніх частин за допомогою звичайних підйомних кранів (рис. 11.10, б); далі монтаж продовжується універсальними підвісними самопідйомними кранами (для використання крану необхідний вільний від конструкцій внутрішній простір вежі) або повзучими самопідйомними кранами, що спираються на вже змонтовані ними конструкції та по мірі монтажу вежі переміщуються по вертикалі на змонтовані секції (рис. 11.10, в).

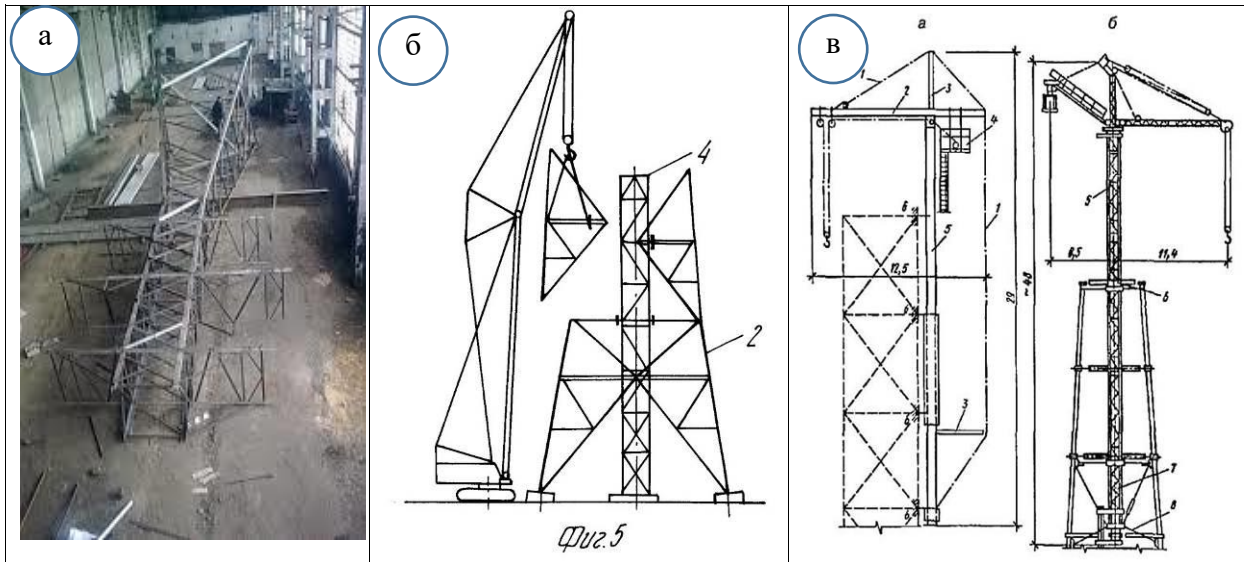


Рис. 11.10. Виготовлення і монтаж висотних споруд:

а – заводське виготовлення окремих секцій; б – монтаж нижньої частини;

в – монтаж верхньої частини

2. Розрахунок башт

При спрощеному розрахунку башта розглядається як решітчастий брус, зацмлений в основі, зусилля в якому визначаються у наступній послідовності:

- визначення навантажень;
- розкладання навантажень по гранях башти;
- розподіл навантажень по вузлах плоских ферм (граней);
- визначення зусиль звичайним методами.

Зусилля у поясах дорівнюють:

$$N = N_1 + N_2, \quad (11.6)$$

де N_1 – зусилля від вертикального навантаження F :

$$N_1 = \frac{F}{n \cdot \cos \alpha}, \quad (11.7)$$

де n – кількість поясів; α – кут нахилу поясів башти.

N_2 – зусилля в поясі від горизонтального навантаження:

- для чотиригранних башт (при напрямі вітру по діагоналі)

$$N_2 = \frac{M}{b\sqrt{2}}; \quad (11.8)$$

- для тригранних башт (при напрямі вітру на грань)

$$N_2 = \frac{2M}{b\sqrt{3}}. \quad (11.9)$$

У наведених формулах: M – момент у башті від горизонтального навантаження; b – відстань між поясами (ширина грані).

Пояси башт розраховуються на центровий стиск.

Зусилля у розкосах решітки дорівнює:

$$N_d = \frac{Q}{2 \cos \beta \cos \gamma}, \quad (11.10)$$

де Q – поперечна сила у башті від горизонтального навантаження;
 β – кут між напрямом вітру і гранню (45° або 30°); γ – кут нахилу розкосу.

Розкоси решітки розраховуються на розтяг.

3. Конструювання сталевих башт

У типових конструкціях башт найширше застосовують монтажні сполучення фланцевого типу на болтах (рис. 11.1).

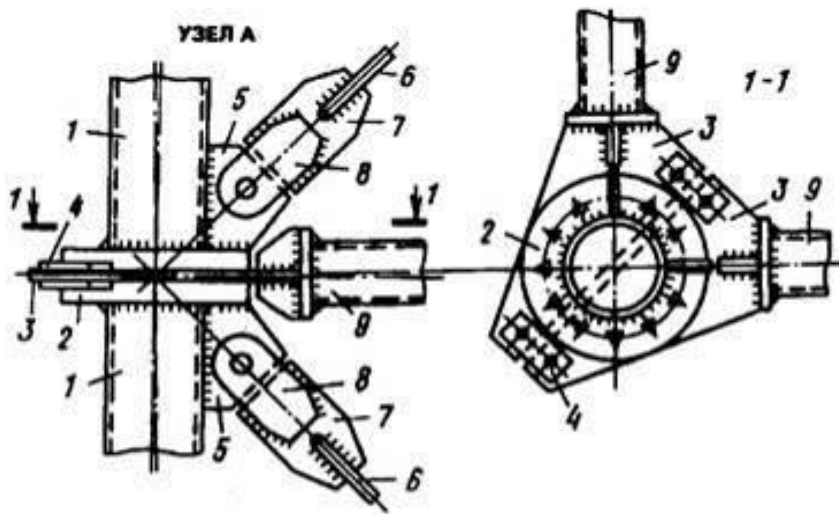


Рис. 11.11. Монтажник вузол типової башти:

1 – трубчастий пояс; 2 – фланець; 3 – кінцева фасонка розпірки; 4 – з’єднувальні планки; 5 – фасонка поясу; 6 – розкіс із круглої сталі; 7 – фасонка розкосу; 8 – проушини; 9 – трубчасті розпірки.

При монтажі башт кінцеві фасонки 3 розпірок 9 затісняються між фланцями 2, попередньо привареним до трубчастих поясів 1. Розкоси 6 поступають із заводу з привареними по кінцях фасонками 7, до яких приварені проушини 8 з отворами під болт більшого діаметра. Цим болтом розкіс кріпиться до фасонки 5, привареної до поясу 1 і фланцю 2. При монтажі кінцеві фасонки 3 з’єднуються між собою на болтах планками 4.

Якщо розміри грань призматичної башти вписуються у залізничний габарит, можлива поставка відправних марок (секцій) у вигляді плоских ферм. У цьому випадку елементи решітки, розміщені в інших площинах, кріплять на болтах, як це показано на рис. 11.12, а.

Монтажний фланцевий вузол башти з елементами з прокатних кутиків показано на рис. 11.12, б.

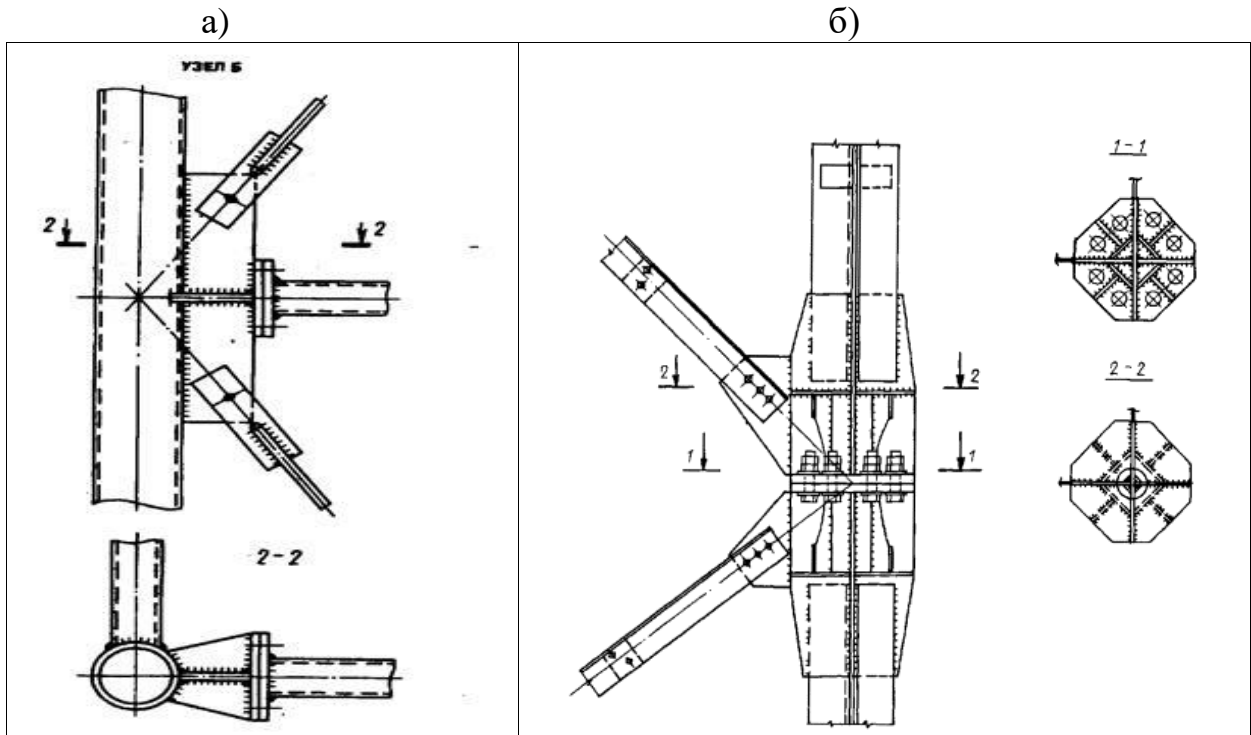


Рис. 11.12. Монтажні вузли сталевих башт:
 а – вузол габаритної секції; б – вузол башти з прокатних кутиків.

11.4. Проектування металевих щогл

1. Схеми щогл, перерізи

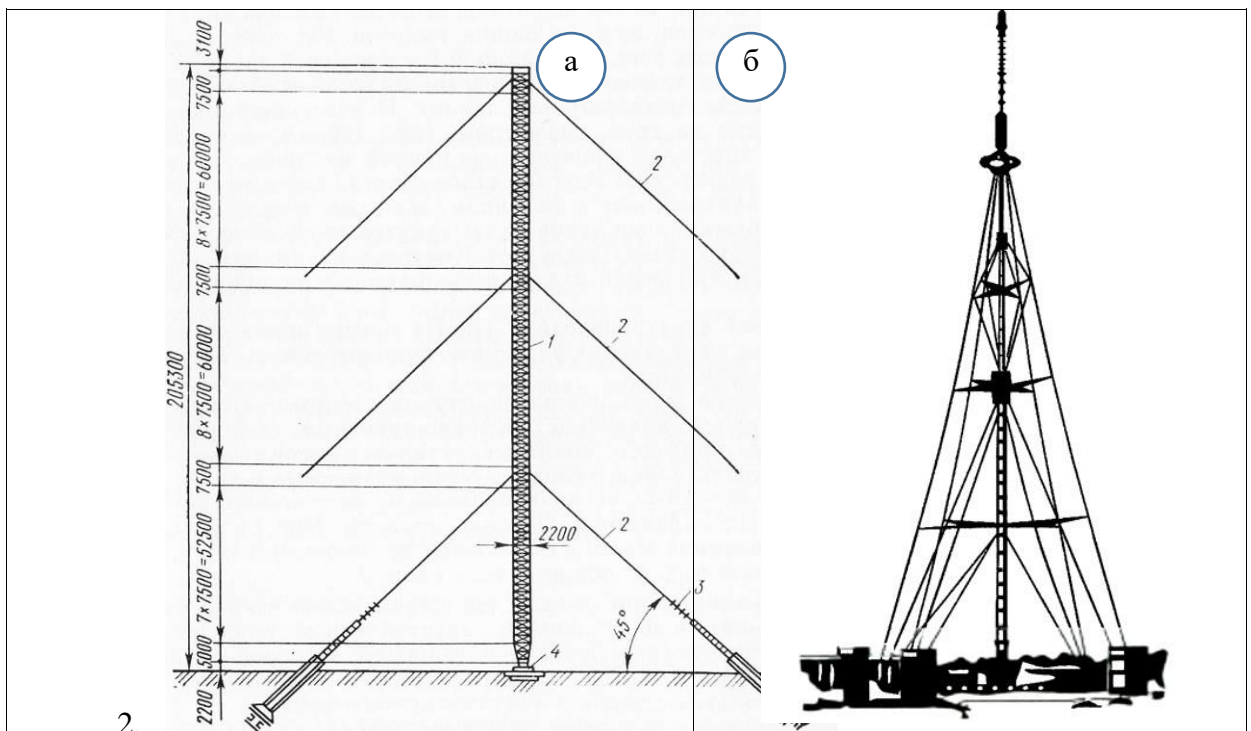


Рис. 11.13. Схеми металевих щогл:
 а – щогла з розгорнутим відтяжками; б – щогла з реями:
 1 – стовбур; 2 – відтяжки; 3 – натяжний пристрій відтяжок; 4 – рей

Стовбур металевих щогл має постійний переріз – решітчастий або суцільний. Відтяжки виконуються з тросів, вони мають кут нахилу, близький 45° і можуть розміщатися у кількох ярусах (рис. 11.13, а). Для скорочення зайнятої площі, застосовуються щогли з реями, впровадження яких дозволяє підвищити кут нахилу відтяжок до 60° (рис. 11.13, б).

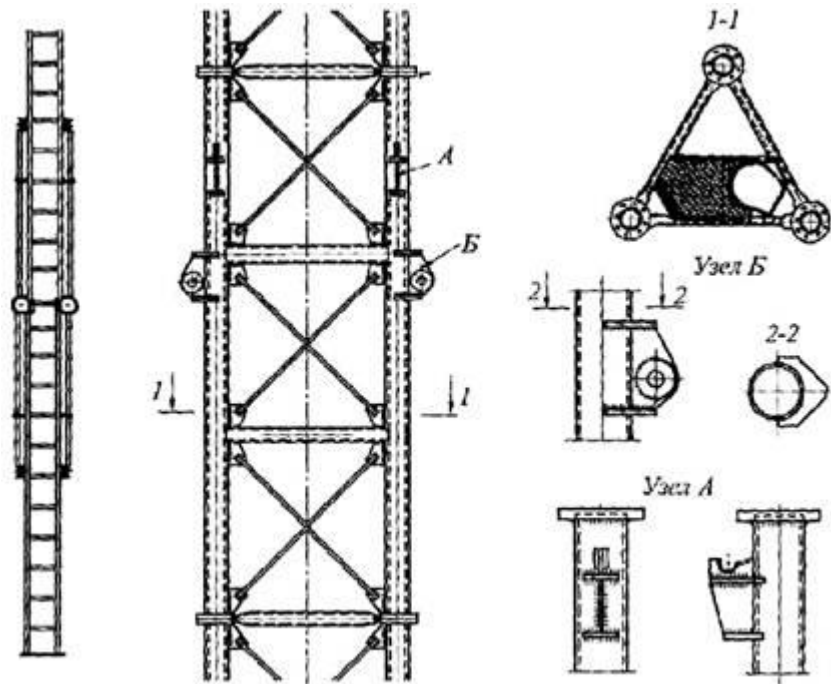


Рис. 11.14. Секція решітчастого стовбура щогли

Решітчастий стовбур щогл може бути тригранним (рис. 11.14) або чотиригранним (рис. 11.5) з поясами і розпірками з труб і розкосами з круглої сталі. Суцільний стовбур має трубчастий переріз, причому підбором його діаметру можна знизити аеродинамічний коефіцієнт, так що вітрове навантаження на нього буде меншим, ніж на решітчастий стовбур.

3. Розрахунок щогл

Розрахунок щогл виконується у два етапи:

1-й етап: стовбур розраховується як нерозрізний стиснуто-зігнутий стержень на жорстких опорах (в місцях кріплення відтяжок); при цьому визначаються зусилля у відтяжках і стовбурі і підбираються перерізи стовбура і відтяжок.

2-й етап (рис. 11.15): відтяжки розраховуються як гнучкі нитки із попереднім напруженням, визначаються пружні переміщення опор; стовбур розраховується як нерозрізний стиснуто-зігнутий стержень на пружних опорах.

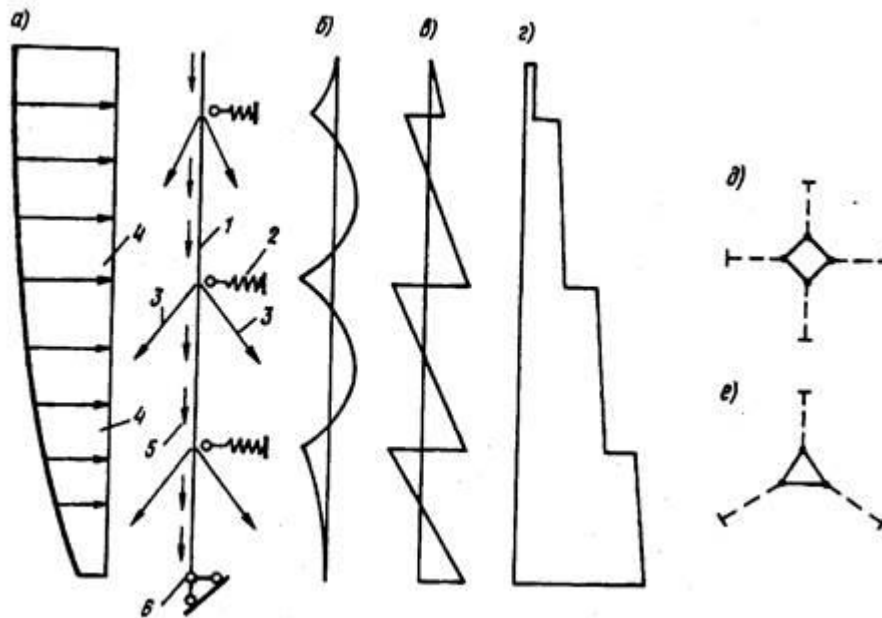


Рис. 11.15. До розрахунку щогли:

а – розрахункова схема: 1 – стовбур щогли; 2 – пружна опора; 3 – сила тяжіння відтяжок; 4 – вітрове навантаження; 5 – вертикальне навантаження; 6 – шарнірна опора; б – епюра згинальних моментів; в – епюра поперечних сил; г – епюра поздовжніх сил; д – схема розміщення відтяжок при квадратному стовбурі; е – те ж, при тригранному стовбурі

4. Конструювання сталевих щогл

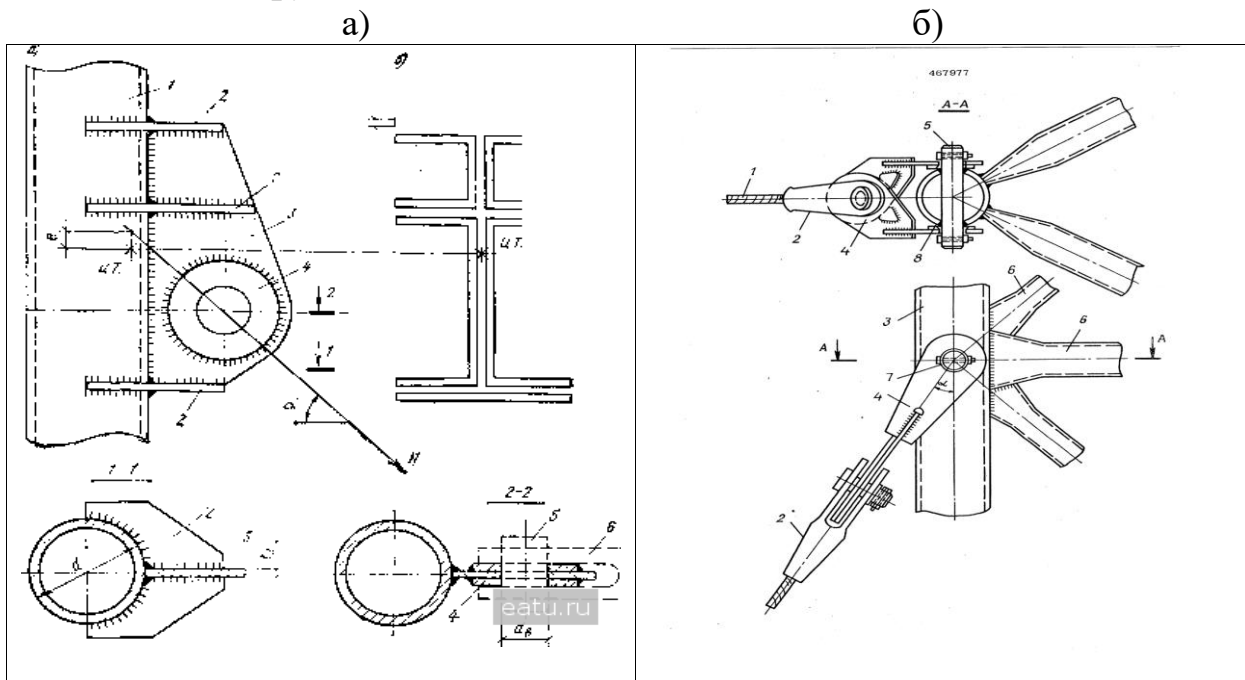


Рис. 11.16.:Варіанти кріплення відтяжки до поясу щогли

а – відтяжковий (лацменний) вузол; 1 – стовбур; 2 – поперечні ребра; 3 – фасонка; 4 – кільцеві накладки; 5 – валік; 6 – втулка; б – кріплення відтяжки до поясу

Як показано на *рис. 11.16, а*, відтяжка кріпиться до стовбура щогли за допомогою валика 5 із високоміцної сталі, який з'єднує втулку 6 (в якій закріплений канат відтяжки) з фасонкою 3 відтяжкового вузла. Для збільшення площі зминання до фасонки 3 з обох боків приварюються кільцеві накладки 4. У легких щоглах невеликої висоти відтяжка може кріпитися безпосередньо до поясу, зберігаючи аналогічне конструктивне рішення (*рис. 11.16, б*).

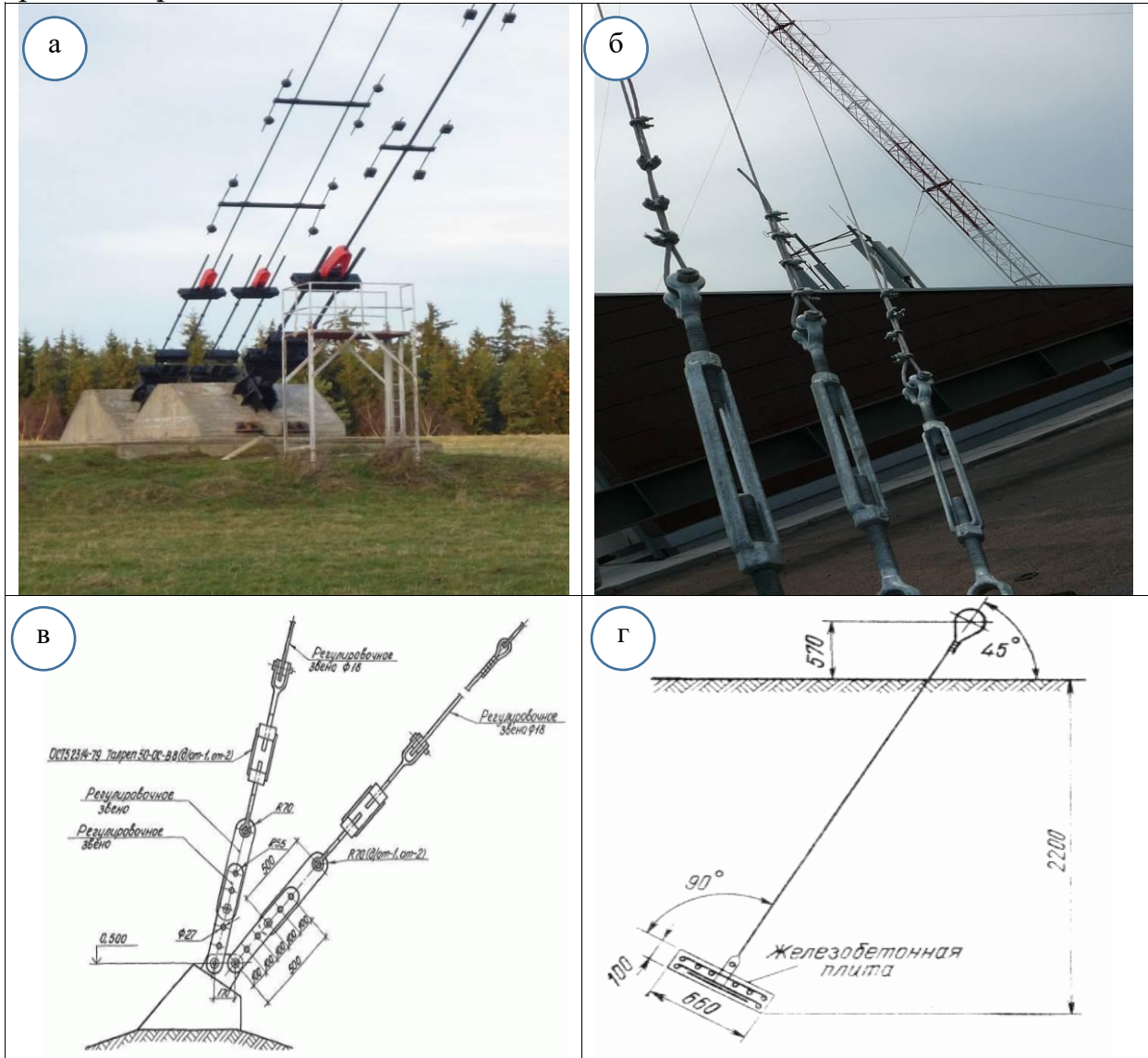


Рис. 11.17. Нижній (натяжний) вузол щогл

а – натяжні муфти; б,в – фаркопи; г – анкерний фундамент відтяжки

У нижній частині кожна відтяжка оздоблюється натяжним пристроєм, за допомогою регулюється зусилля у відтяжці при її монтажі і експлуатації (*рис. 11.17*). Натяжні пристрої (муфти, фаркопи) кріпляться до анкерних тягів, закріплених у фундаментах (*рис. 11.17, г*). З метою боротьби з вібрацією на відтяжках встановлюються віброгасники (*рис. 11.17, а*).

Контрольні питання

1. Галузь застосування висотних споруд.
2. Класифікація висотних споруд.
3. Вітрове навантаження на висотні споруди.
4. Схеми металевих башт.
5. Розрахунок металевих башт.
6. Вузли металевих башт.
7. Приклади видатних металевих башт.
8. Схеми металевих щогл.
9. Розрахунок металевих щогл.
10. Вузли металевих щогл.

Література

1. Стороженко Л.І. Металеві конструкції: Навч. посібник / Л.І. Стороженко, В.А. Пашинський, С.Ф. Пічугін, Г.М. Трусов. – К.: НМК ВО, 1992. – 172 с.
2. Стороженко Л.І. Конспект лекцій з дисципліни «Металеві конструкції» для студентів спец. 2903 / Л.І. Стороженко, Г.В. Лупаєнко, В.А. Пашинський, С.Ф. Пічугін, Г.М. Трусов. – Полтава: ПолтІБІ. Ч. 1, 1992. – 48 с.; Ч. 2, 1993. – 56 с.
3. Стрелецкий Н.С. Металлические конструкции / Н.С. Стрелецкий, А.Н. Гениев, Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Е.Н. Лессиг. – М.: Стройиздат, 1961. – 776 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. – К.: Мінбуд України, 2006. – 51 с.
5. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 30 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 205 с.
7. Винников. Ю.Л. Будівельні конструкції: навчальний посібник / Ю.Л. Винников С.Ф. Пічугін, О.О. Довженко, А.О. Дмитренко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. – 400 с.