

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 4

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ ВЕЛИКОПРОЛІТНИХ БУДІВЕЛЬ

Полтава ПолтНТУ 2018

Курс лекцій із дисципліни «Металеві конструкції» для студентів, які проходять підготовку бакалаврів за спеціальності 0901 «Будівництво та цивільна інженерія». Частина 4 «Металеві конструкції великопролітних будівель» – Полтава: ПолтНТУ, 2018. – 57 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 9. МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ	
ВЕЛИКОПРОЛІТНИХ БУДІВЕЛЬ.....	6
9.1 Галузь застосування, класифікація, особливості.....	6
9.2 Балочні конструкції великопролітних покриттів.....	13
9.3 Рамні конструкції великопролітних будівель.....	18
9.4 Арочні конструкції великопролітних покриттів.....	22
9.5 Компоновка великопролітних конструктивних схем....	30
9.6 Структурні великопролітні конструкції.....	32
9.7 Типи і особливості висячих покритть.....	41
9.8 Однопоясні висячі конструкції з гнучкими вантами.....	43
9.9 Розрахунок гнучких ниток.....	45
9.10 Двопоясні і комбіновані вантові системи, вантові ферми.....	46
9.11 Покриття з жорсткими вантами, мембранні покриття...	50
9.12 Перехресні вантові системи.....	53
Контрольні питання.....	57
Література.....	57

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 9 МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ ВЕЛИКОПРОЛІТНИХ БУДІВЕЛЬ

- 9.1. Галузь застосування, класифікація, особливості
- 9.2. Балочні конструкції великопролітних покриттів
- 9.3. Рамні конструкції великопролітних будівель
- 9.4. Арочні конструкції великопролітних покриттів
- 9.5. Компонівка великопролітних конструктивних схем
- 9.6. Структурні великопролітні конструкції
- 9.7. Типи і особливості висячих покриттів
- 9.8. Однопоясні висячі конструкції з гнучкими вантами
- 9.9. Розрахунок гнучких ниток
- 9.10. Двопоясні і комбіновані вантові системи, вантові ферми
- 9.11. Покриття з жорсткими вантами, мембранні покриття
- 9.12. Перехресні вантові системи

9.1. Галузь застосування, класифікація, особливості

1. Приклади відомих великопролітних будівель



Рис. 9.1. Ангар в аеропорту Бориспіль (Київ)

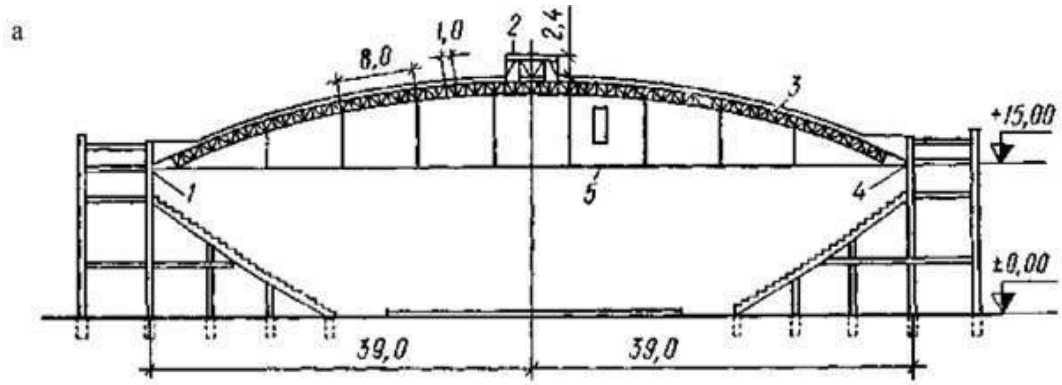


Рис. 9.2. Палац Спорту у Лужниках (Москва)



Рис. 9.3. Релей-арена (США)

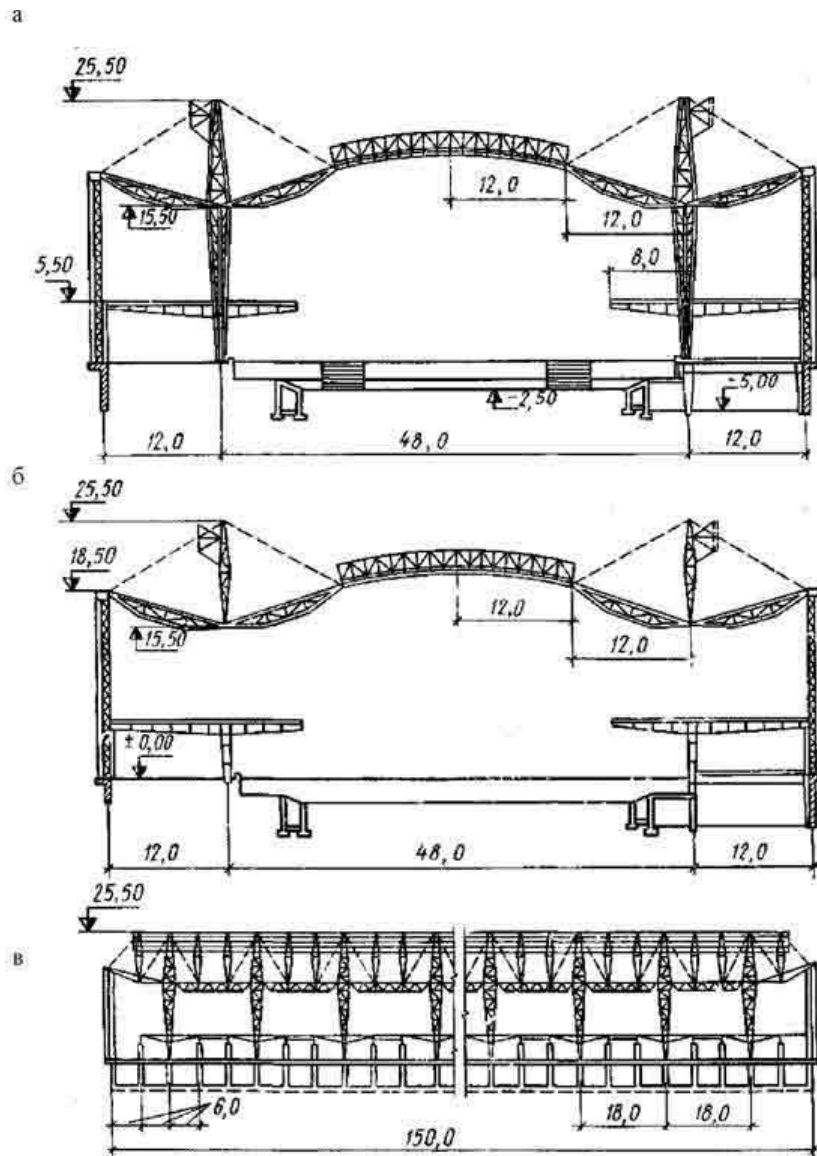


Рис. 9.4. Павільон СРСР на Світовій виставці у Брюсселі (Бельгія):
 а, б – поперечні розрізи; в – поздовжній розріз; г – загальний вигляд

2. *Галузь застосування великопролітних покритть*

1) Громадські будинки: театри, виставкові павільйони, концертні та спортивні зали, криті стадіони, ринки, цирки.

2) Будинки спеціального призначення: склади, ангари, гаражі, вокзали, тролейбусні та автобусні парки, локомотивні депо, елінги.

3) Виробничі будівлі: складальні цехи літаків, суден, ракет, габаритних машин; експериментально-лабораторні корпуси різних виробництв; гнучкі (універсальні) цехи.

Необхідність великих прольотів визначається наступними факторами: архітектурними (п.п. 1, 2); технологічними, у тому числі великими габаритами виробів (п. 3); експлуатаційними вимогами.

3. *Особливості споруд великих прольотів*

а) проста форма: найчастіше вони виконуються однопролітними, у плані ці споруди прямокутні, круглі, овальні;

б) індивідуальність (унікальність) великопролітних будівель, отже важко (і навіть не потрібно) уніфікувати і типізувати такі конструкції, вони будуються за індивідуальними проектами;

в) реалізація принципу концентрації матеріалу: потужні і важкі великопролітні конструкції встановлюють з великим кроком, що відповідним чином впливає на компоновку несучого каркасу таких будівель;

г) головна задача при проектуванні і будівництві великопролітних будівель – максимальне зменшення власної ваги покриття, яка є основним навантаженням, за рахунок наступних засобів:

- полегшення покрівлі, застосування сталевих і алюмінієвих настилів, ефективних утеплювачів;
- полегшення несучих конструкцій, впровадження конструкції з високоміцних сталей й алюмінієвих сплавів, попередньо напружених та вантових конструкцій.

4. *Класифікація великопролітних покритть (за конструкцією)*

1. Балочні великопролітні покриття.
2. Рамні великопролітні системи.
3. Арочні великопролітні системи.
4. Просторові системи: оболонки, складки, структури, бані.
5. Висячі системи: вантові і мембранні.

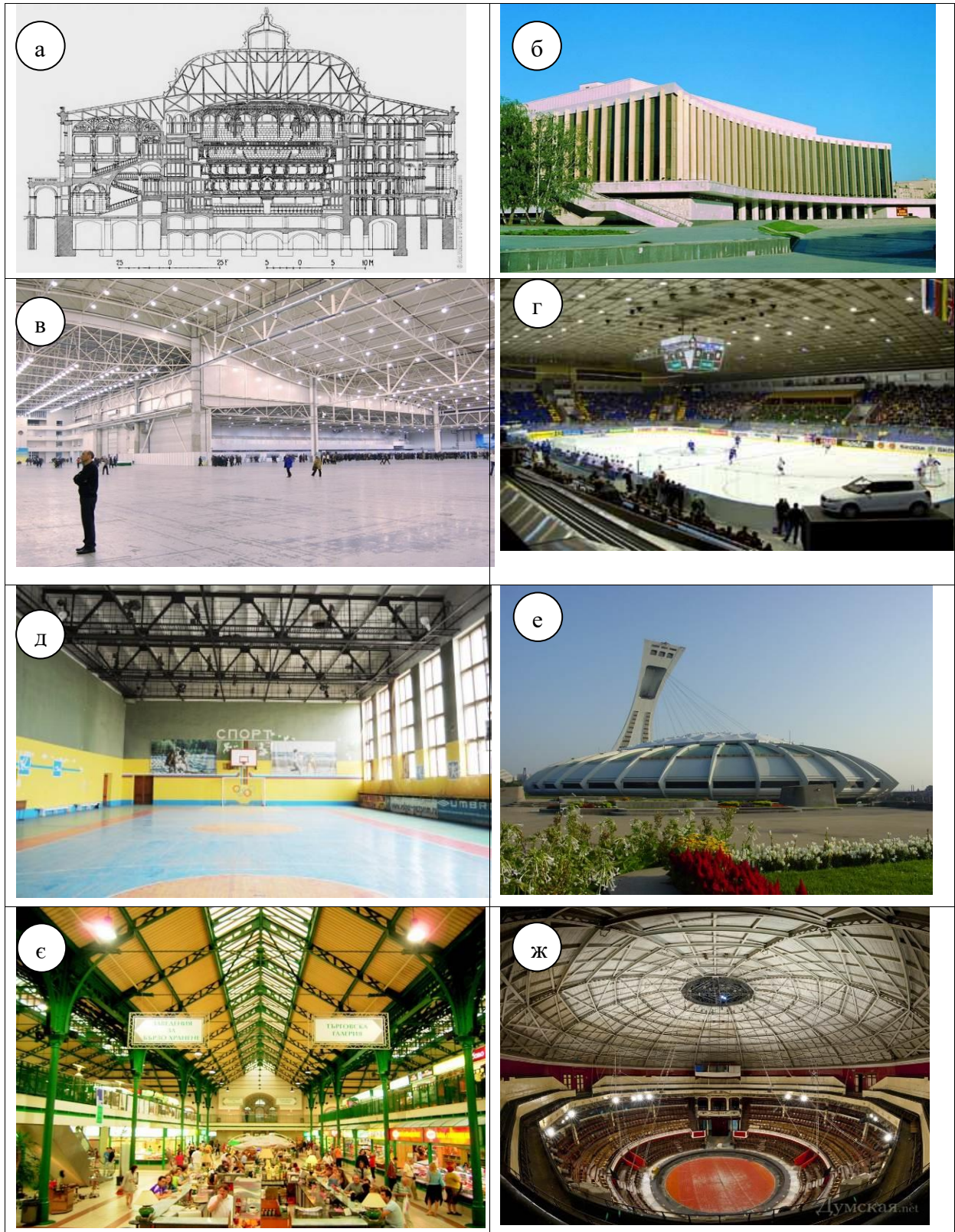


Рис. 9.5. Громадські будинки великих прольотів:

а – оперний театр (Одеса); б – Палац «Україна» (Київ); в – Міжнародний виставковий центр (Київ); г – Палац спорту (Київ); д – спортивний зал; е – Олімпійський стадіон (Монреаль, Канада); є – критий ринок; ж – цирк (Київ)

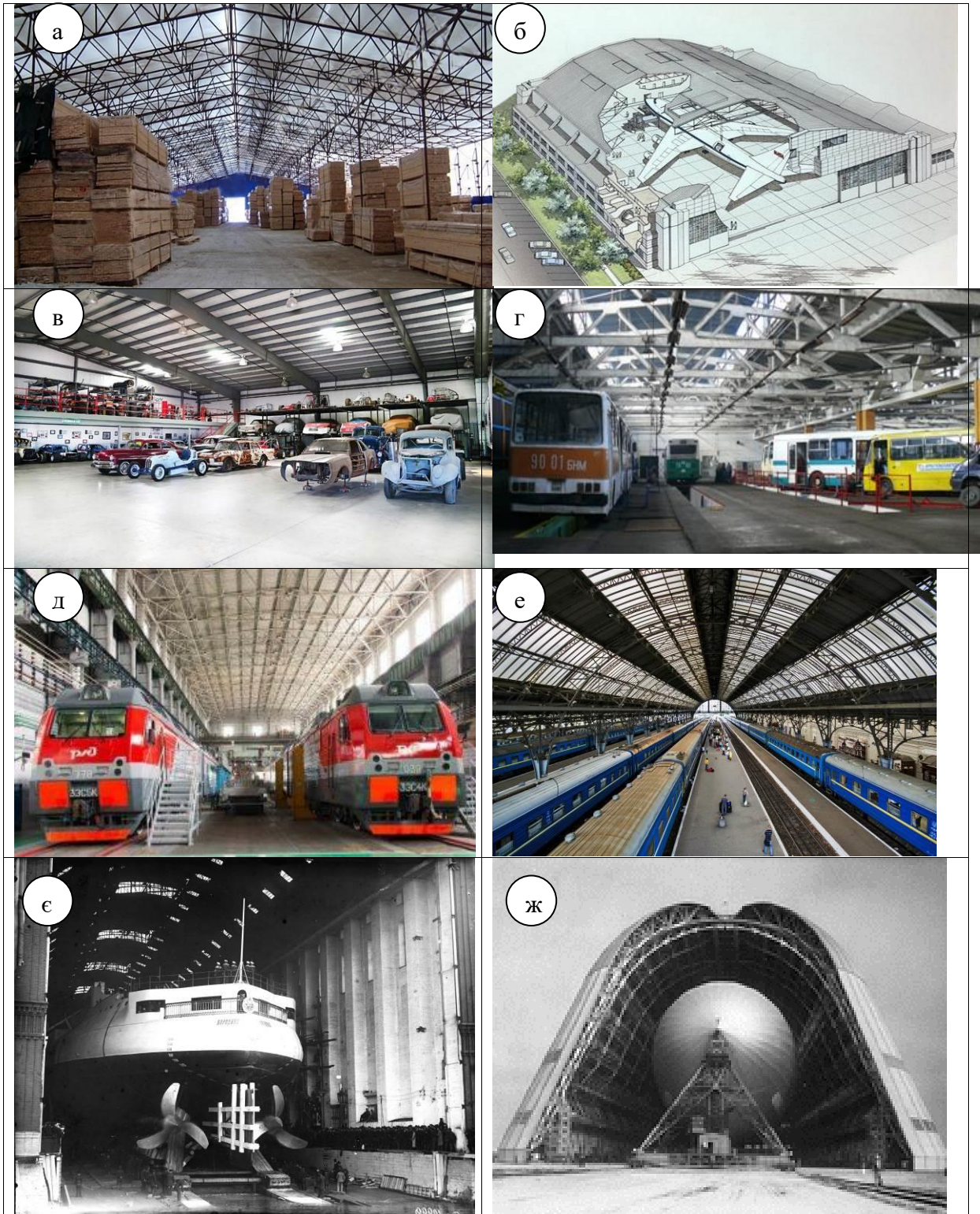


Рис. 9.6. Великопролітні будинки спеціального призначення:
 а – склад; б – ангар для літаків; в – гараж; г – автобусний парк; д – локомотивне депо (Харків); е – дебаркадер вокзалу (Львів); є – елінг для корабля; ж – елінг для



Рис. 9.7. Великопролітні виробничі будинки:
 а – літакозбиральний цех; б – корпус збирання космічних ракет (Дніпро);
 в – суднобудівний док (Німеччина)

9.2. Балочні конструкції великопролітних покриттів

1. Особливості, схеми балочних конструкцій

Балочні конструкції – це великопролітні ферми, що вільно (шарнірно) опираються на стіни, залізобетонні або сталеві колони. Балочні конструкції застосовуються тоді, коли опори не можуть сприймати розпирні зусилля і моменти, наприклад, у випадках слабких ґрунтів, обмежених габаритів опор.

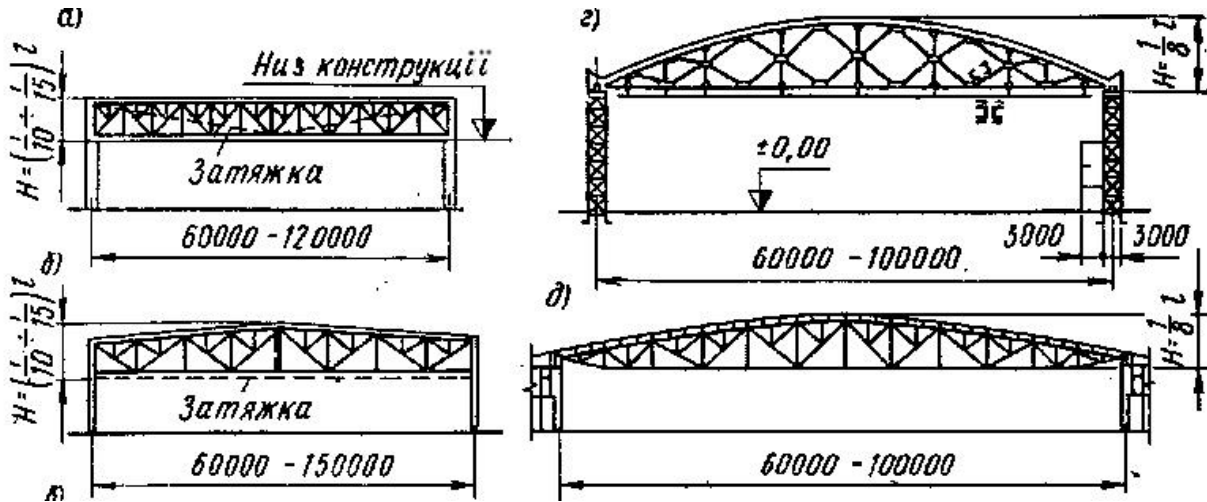


Рис. 9.8. Варіанти балочних великопролітних конструкцій

Великопролітні ферми виконуються з паралельними поясами, трапецієподібні, сегментні (рис 9.8), параболічні. Система решітки ферм: трикутна зі стійками, шпренгельна. Перспективною для негабаритних великопролітних ферм є ромбічна решітка (рис. 9.8, г), яка дає можливість ділити ферми на відправні марки за висотою.

2. Перерізи елементів, вузли

Великопролітні ферми відносяться до «важкого» типу з двостінними перерізами (рис. 9.9).

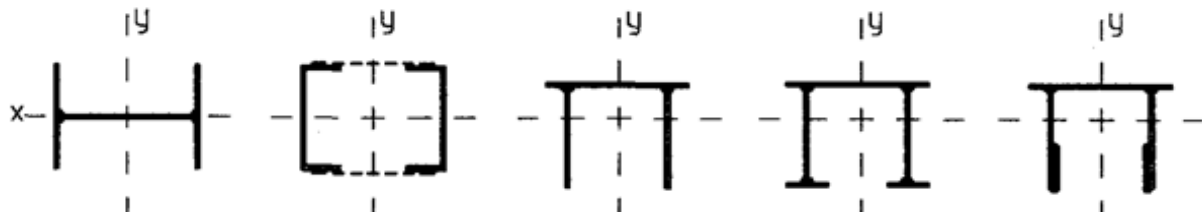


Рис. 9.9. Типи перерізів великопролітних ферм

У типовому вузлі ферми з Н-подібними перерізами всі елементи мають однакову ширину (рис. 9.10).

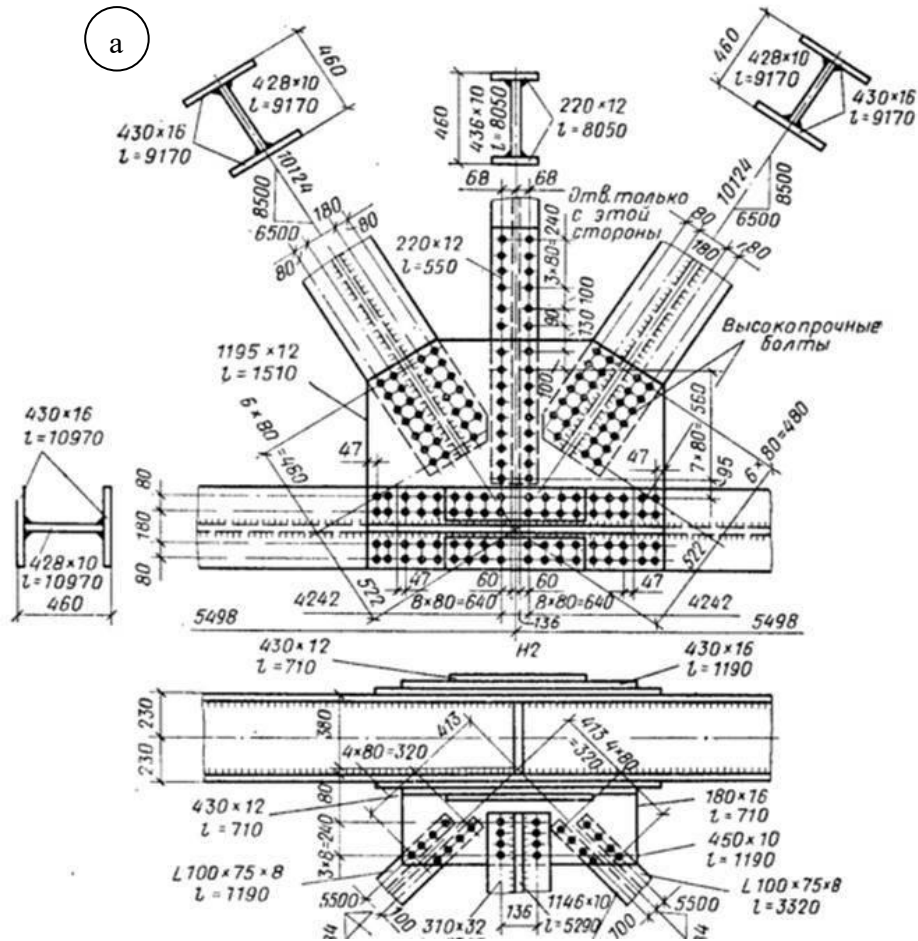


Рис. 9.10. Узел важкої зварної ферми на високоміцних болтах:
а – конструкція вузла; б – монтаж ферми

3. Приклади великопролітних балочних систем

А) Палац спорту (Харків)

Кровляна конструкція – параболічна ферма прольотом 50 м, крок 6 м, легка покрівля, перерізи елементів – парні кутики

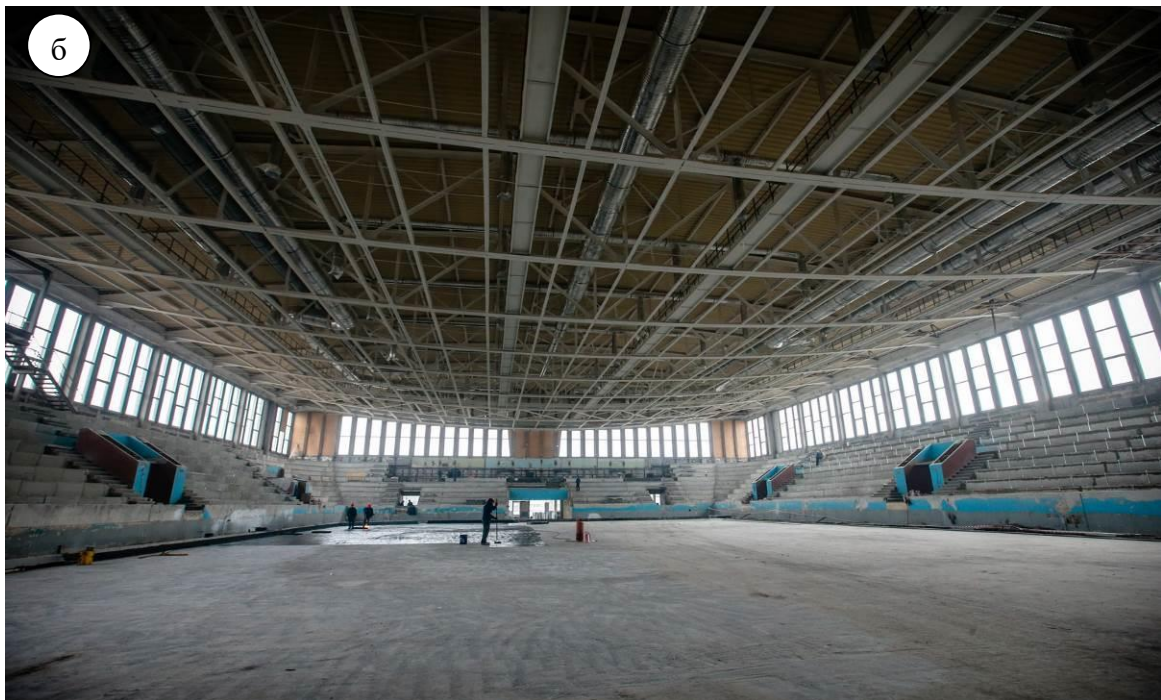


Рис. 9.11. Палац спорту (Харків):
а – загальний вигляд; б – інтер'єр Палацу

Б) Ангар в аеропорту Алмати (Казахстан)

Ангар с двома прольотами по 84 м перекритий балочною системою у вигляді сегментних ферм з ромбічною решіткою, підсилених вздовж нижнього поясу попередньо напруженою затяжкою (рис. 9.12)

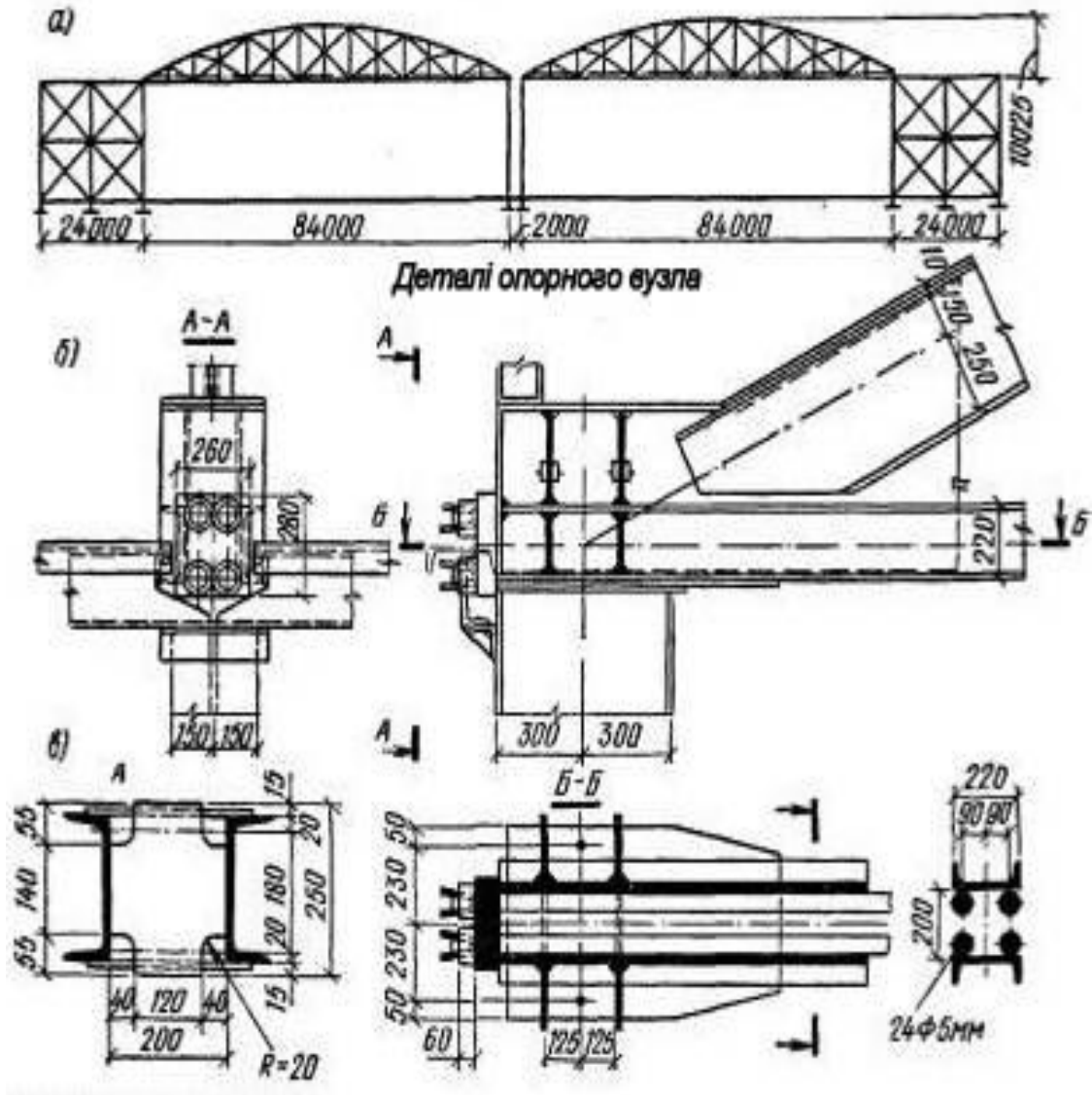


Рис. 9.12. Балочне великопролітне покриття ангару (Алмати)

В) Спортивний комплекс ЦСКА (Москва)

Спортивна споруда, возведена до Олімпіади-80, перекрита блочно-балочною системою прольотом 84 м з консолями по 13 м (рис. 9.13). Решітчасті блоки мають нижню і верхню сталеві обшивки товщиною 1,5...2,0 мм, верхня обшивка – попередньо напружена.

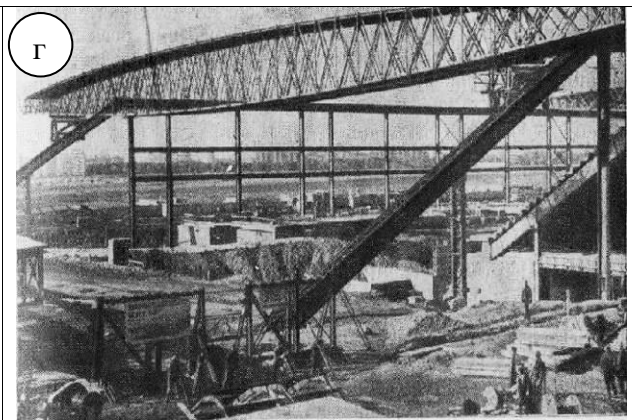
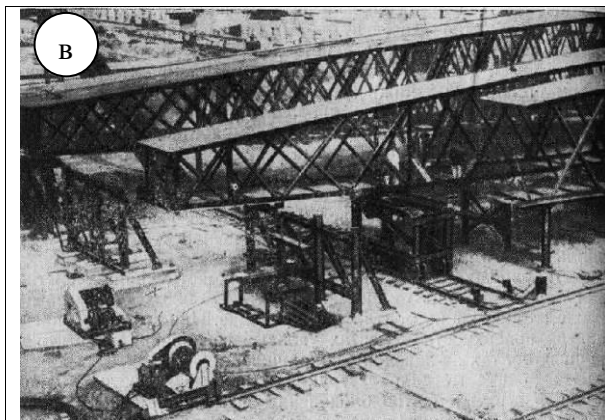
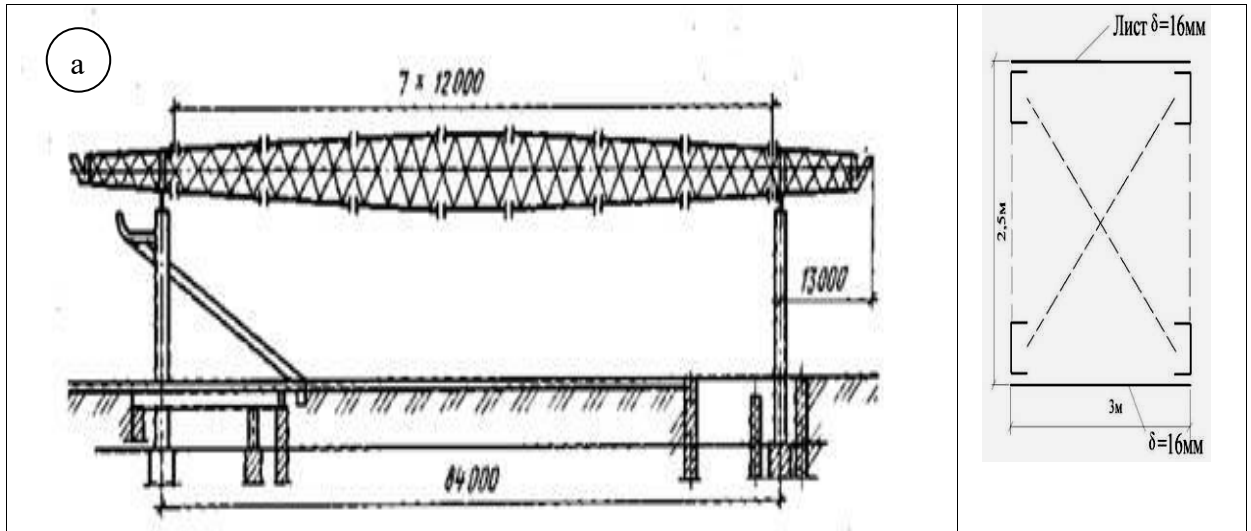


Рис. 9.13. Спортивний комплекс ЦСКА (Москва):
 а – поперечний перерізи будівлі і блоку; б – загальний вигляд комплексу;
 в,г – етапи будівництва комплексу

9.3. Рамні конструкції великопролітних будівель

1. Схеми великопролітних рам

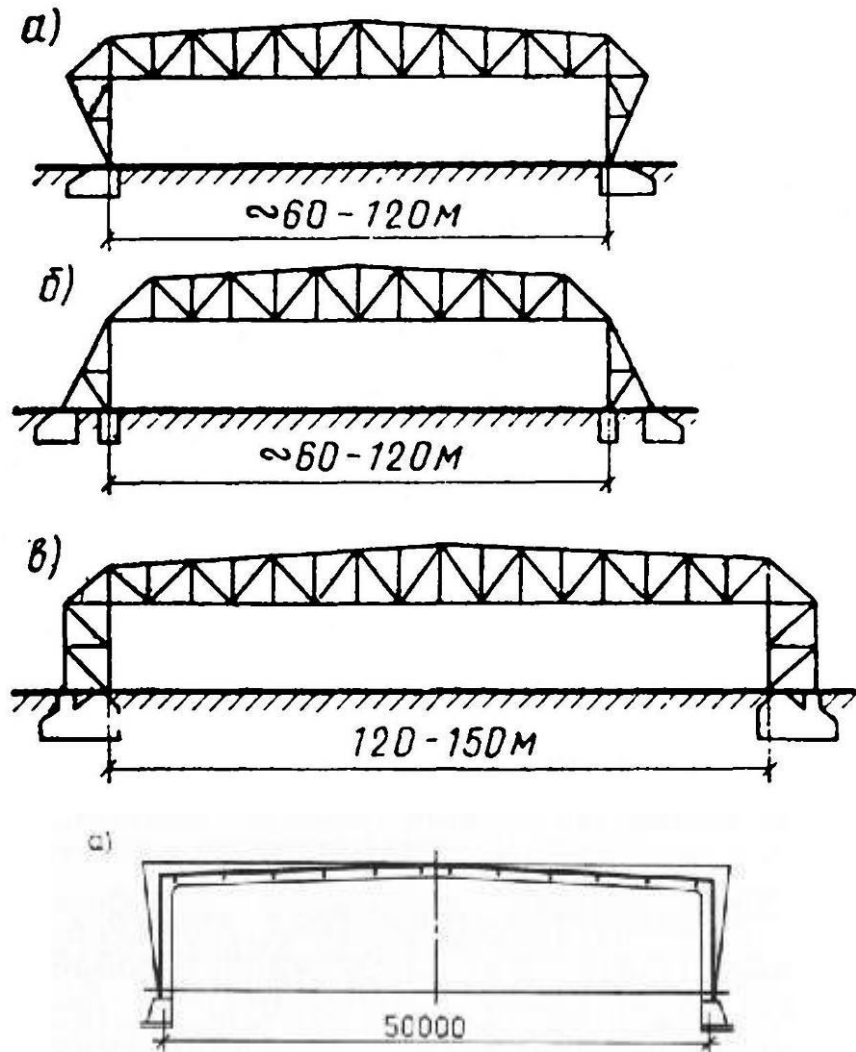


Рис. 9.14. Схеми великопролітних рам:

а,б – двохарнірні решітчасті рами; в – безшарнірна наскрізна рама;
г – двохарнірна суцільна рама

Переваги рамних систем у порівнянні з балочними системами:

- рами більш економічні, ніж балочні системи;
- у рамах з жорстким карнизними вузлами розвантажується великопролітний ригель;
- внаслідок цього може бути знижена висота ригеля, що важливо для забезпечення транспортабельності відправних марок великопролітного ригеля.

Недоліки рамних систем:

- велика ширина колон;
- чутливість рам до осідання опор;
- великі розпірні зусилля у фундаментах, розвиток фундаментів.

Компоновка великопролітних рам:

а) висота ригеля:

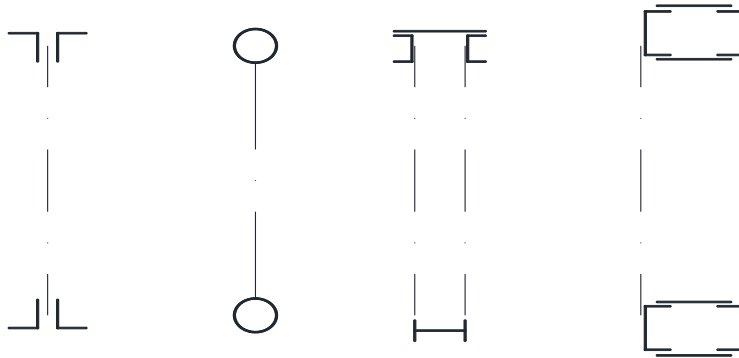
- $H_p = \left(\frac{1}{12} \dots \frac{1}{18}\right)L$ – ферми з паралельними поясами;

- $H_p = \left(\frac{1}{9} \dots \frac{1}{12}\right)L$ – ферми зі скатною покрівлею;

- $H_p = \left(\frac{1}{20} \dots \frac{1}{30}\right)L$ – суцільні рами;

б) ширина колон $B_k = 5 \dots 7$ м;

в) типи перерізів решітчастих великопролітних ригелів



Розрахунок великопролітних рам виконується як статично невизначених систем, згідно з правилами будівельної механіки. Конструкція таких рам виконується аналогічно важким фермам (див. п. 9.2).

2. Приклади великопролітних рамних систем

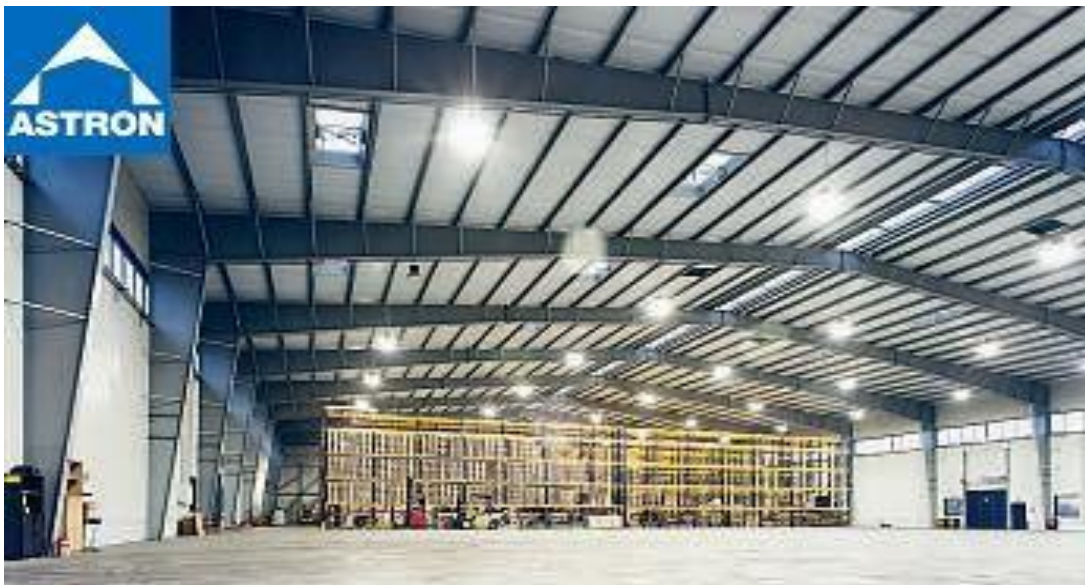


Рис. 9.15. Великопролітні суцільні сталеві рами



Рис. 9.16. Великопролітні решітчасті рами

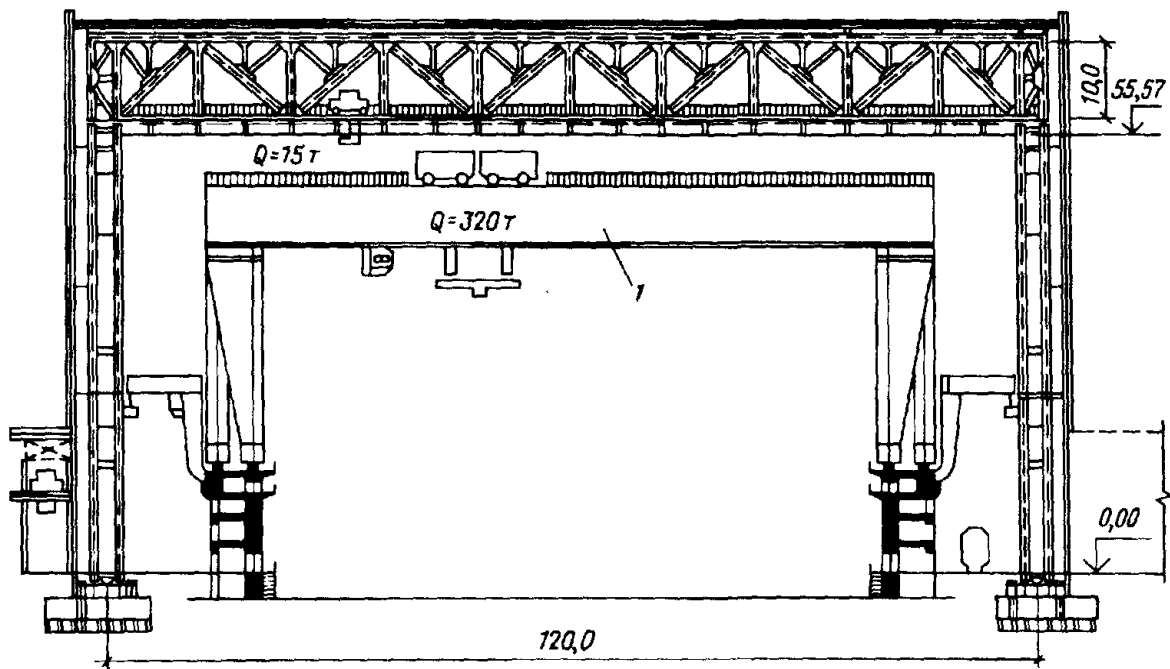


Рис. 9.17. Унікальна поперечна рама виробничої будівлі
(Северодвинськ, Росія)

3. Прийоми розвантаження великопролітного ригеля

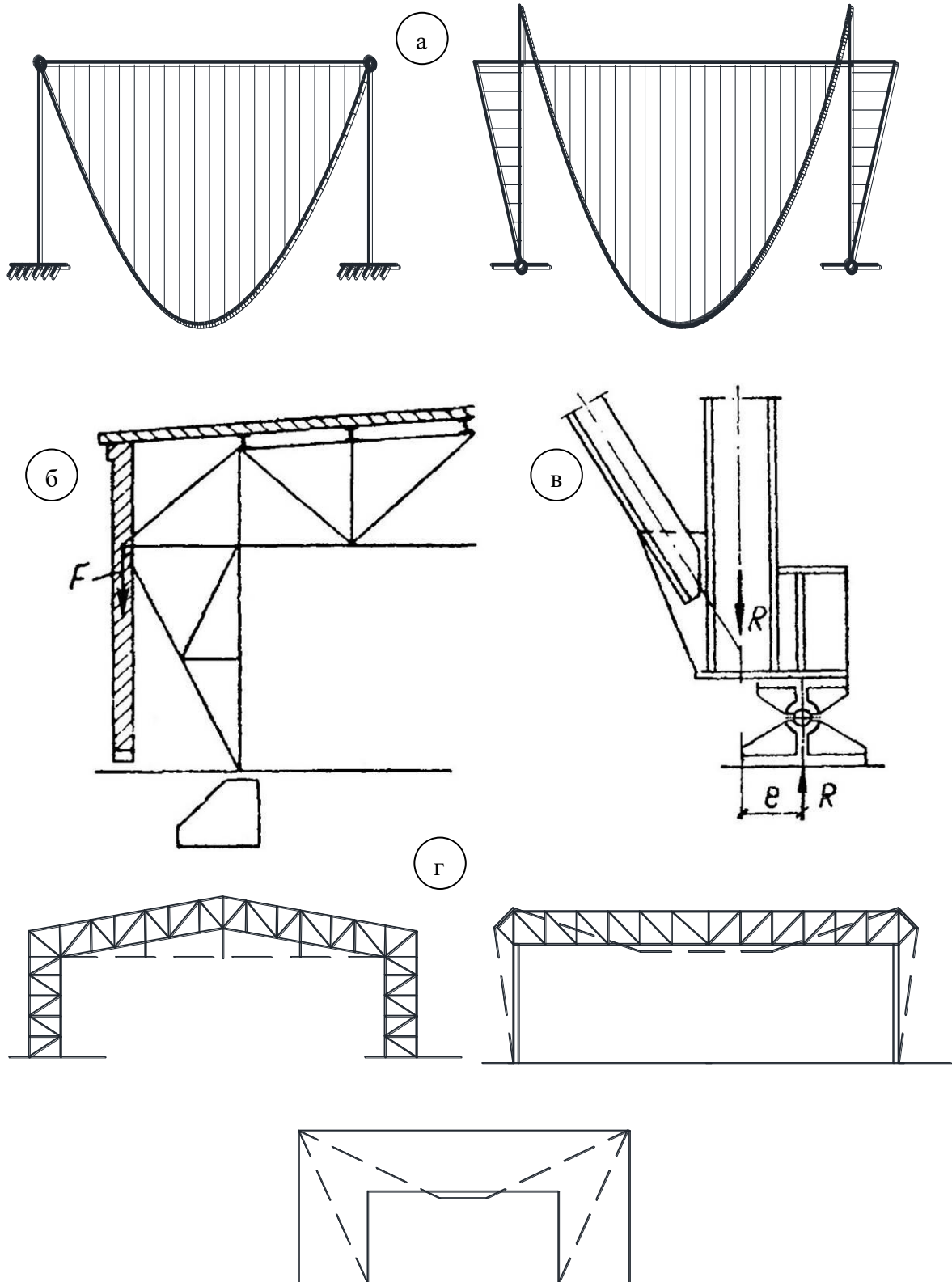


Рис. 9.18. Прийоми розвантаження ригеля великопролітних рам:
 а – заміна карнизного шарнірного вузла на жорсткий; б – підвішування стіни;
 в – зміщення опорного шарніру; г – поперечно напружені затяжки

9.4. Арочні конструкції великопролітних покриттів

1. Схеми арок

Арочні системи більш економічні, ніж балочні і рамні системи за рахунок раціонального обрису і роботи в основному на стиск.

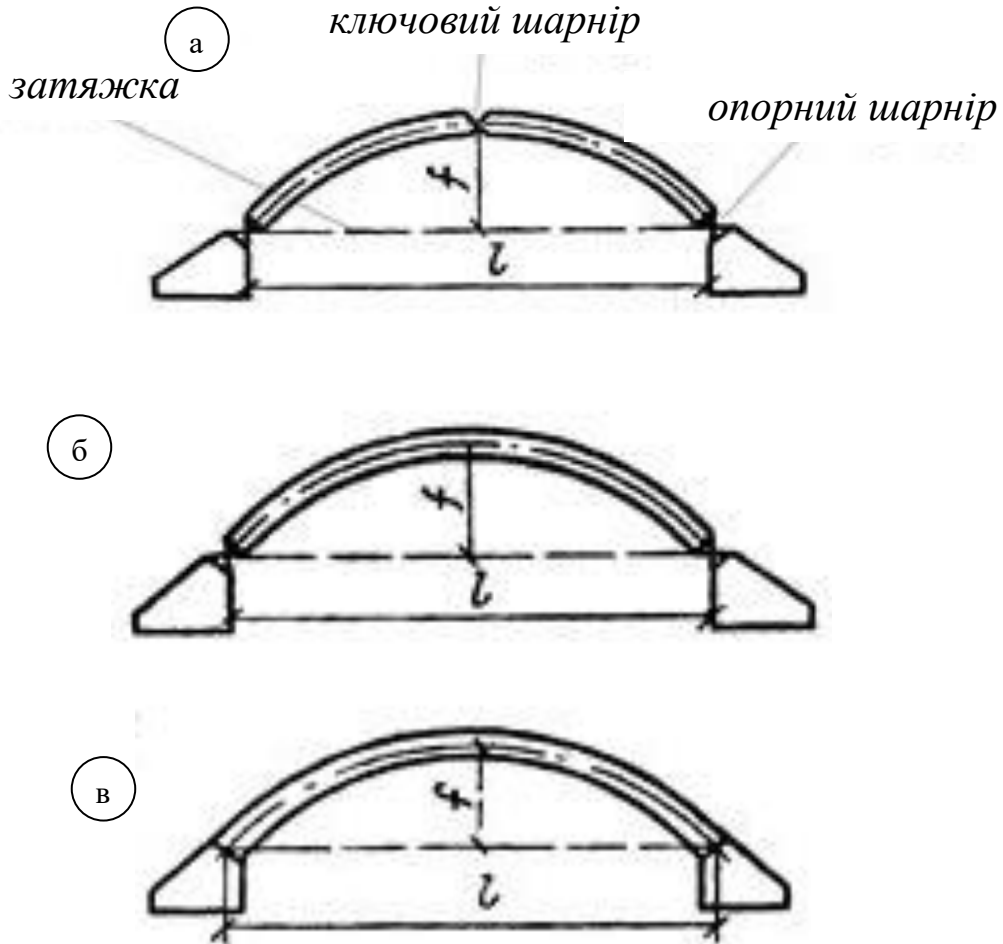


Рис. 9.19. Схеми великопролітних рам:
а – трьохшарнірна; б – двохшарнірна; в – безшарнірна

Трьохшарнірна рама (рис. 9.19, а) статично визначена, нечутлива до змін температур й осідань опор, але складна у конструкції за наявності шарнірів і важка у монтажі, тому використовується рідко.

Двохшарнірна рама (рис. 9.19, б) відносно проста у конструкції і монтажі, тому це основна схема великопролітних сталевих арок.

Безшарнірна арка (рис. 9.19, в) має найменші згинальні моменти, але чутлива до змін температур й осідань опор, має масивні фундаменти, тому застосовується рідко.

2. Сприйняття розпору великопролітних арок

Для цього використовуються затяжки, фундаменти, спеціальні опорні конструкції (рис. 9.20).

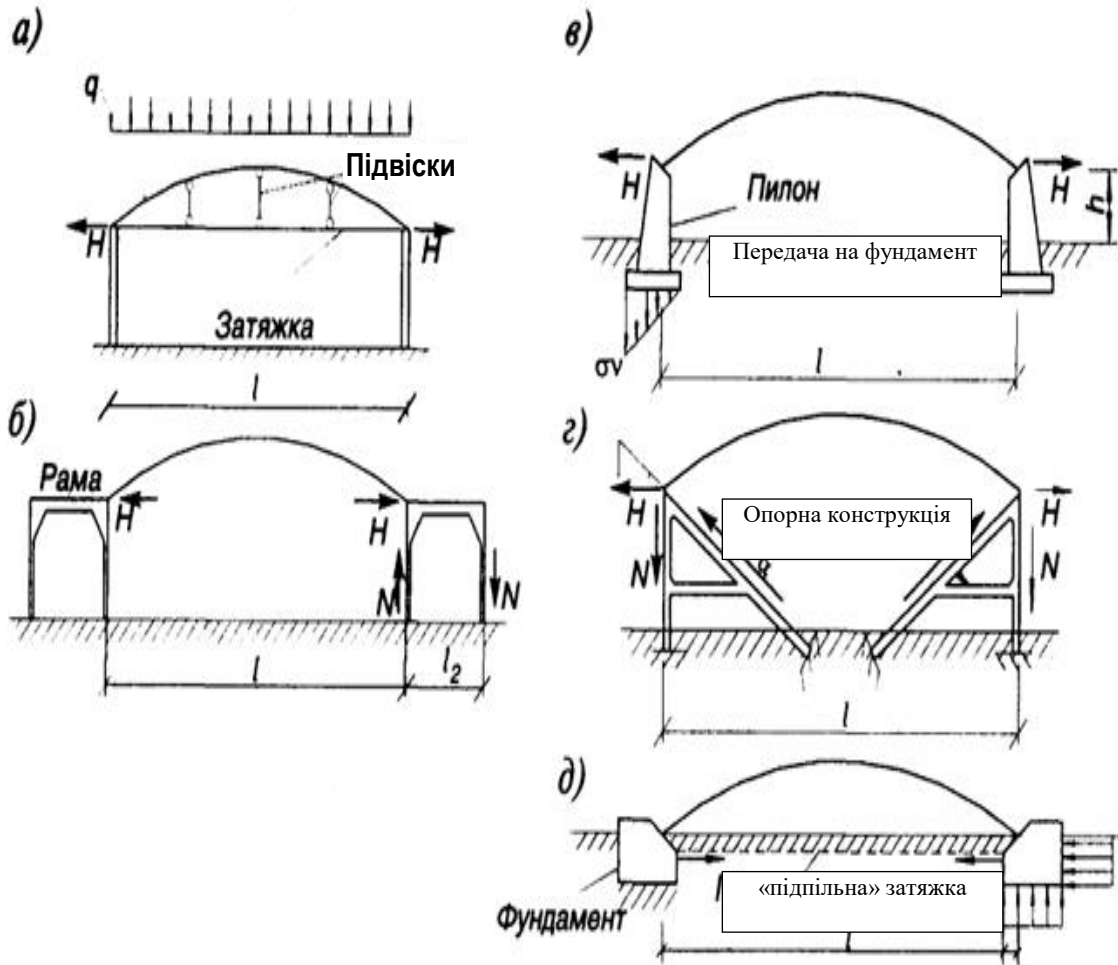


Рис. 9.20. Варіанти сприйняття розпору арок

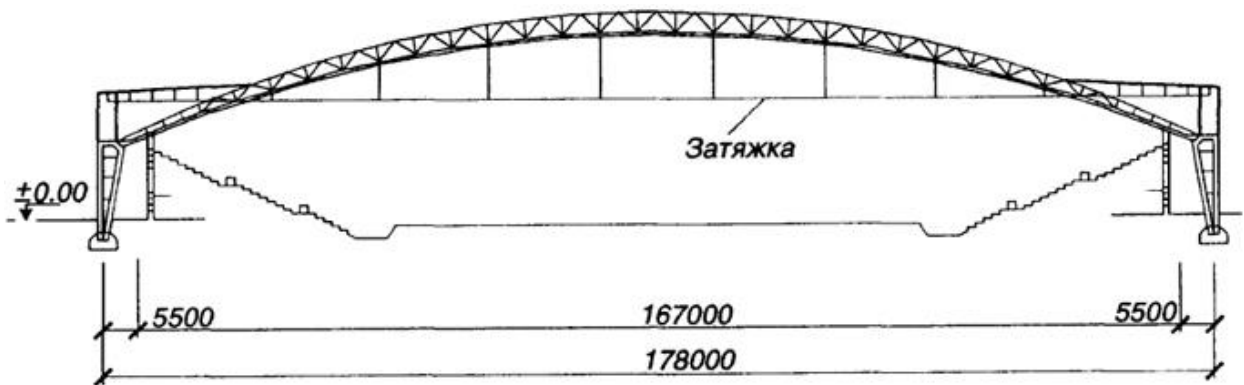


Рис. 9.21. Арка з піднятою затяжкою

3. Обрис та компоновка арок

Краще всього, коли обрис арки співпадає з кривою тиску. Тоді моменти в арці практично відсутні, вона працює головним чином на осевий стиск і є найекономічнішою.

У випадку рівномірно розподіленого крива тиску – це парабола. На практиці параболу замінюють дугою кола, що несуттєво змінює зусилля в арці, але значно спрощує виготовлення арок.

Відношення стріли підйому арки до її прольоту складає $f/l = 1/4 \dots 1/6$ для економічного варіанту і $f/l = 1/8$ для арок із затяжками, встановленими на опорах.

Арки можуть бути з паралельними поясами (рис. 9.22) або серпасті (рис. 9.23)

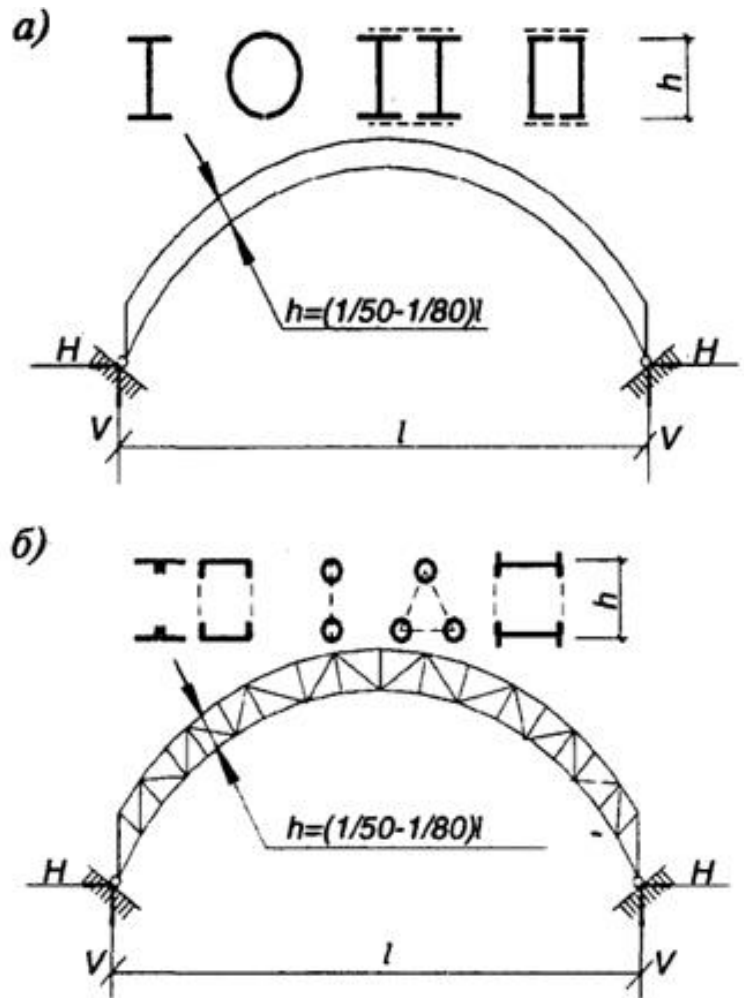


Рис. 9.22. Обрис і перерізи арок
а – суцільні арки ; б – наскрізні арки

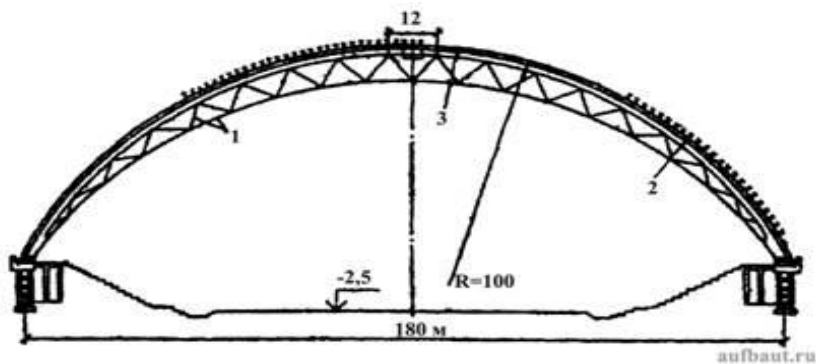


Рис. 9.23. Серпаста арка

На рис. 9.23 наведений приклад серпастої арки з жорстким верхнім поясом і нижнім поясом з решіткою із тросів (не реалізований проект покриття стадіону «Динамо» у Москві). Передбачалося регулювання зусиль в арці шляхом зміщення опор, завдяки якому у нижньому поясі і решітці повинен був завжди розтяг.

4. Особливості розрахунку великопролітних арок

Навантаження на арки (рис. 9.24):

- вертикальні – постійні, технологічні, снігові;
- температурні;
- вітрові.

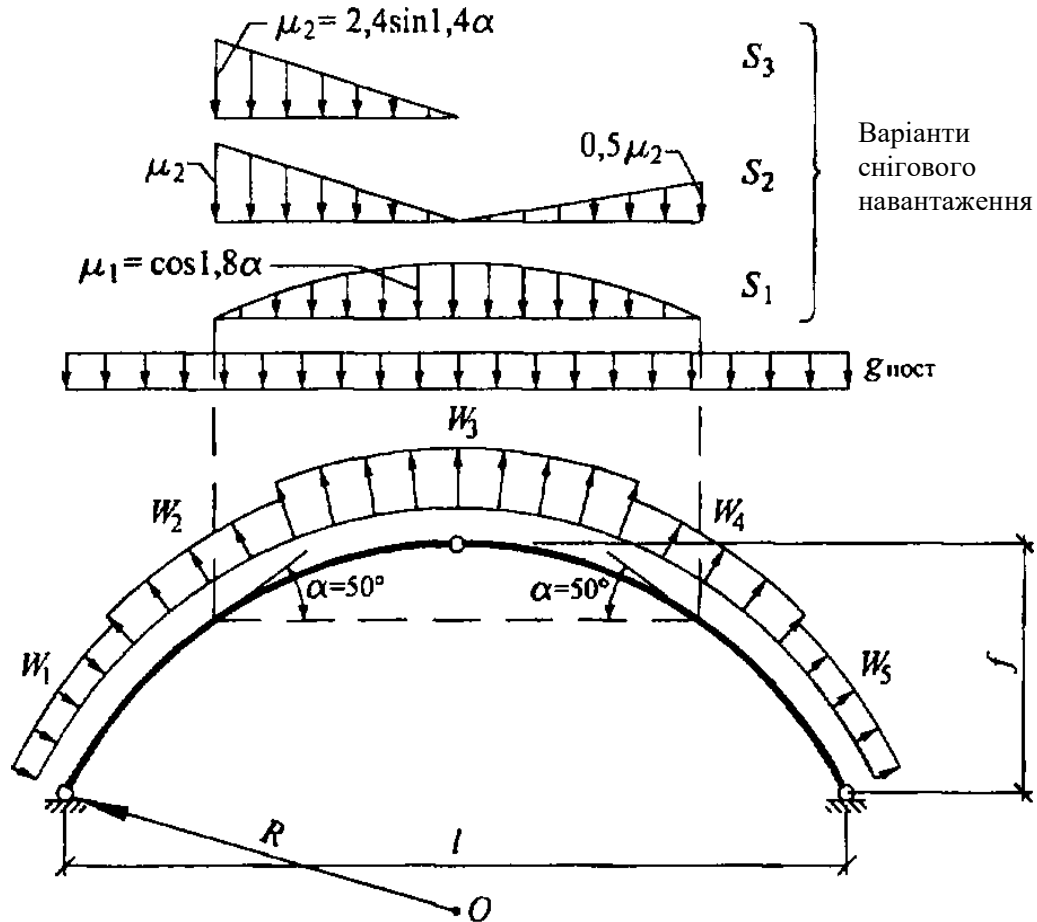


Рис. 9.24. Схеми прикладення навантажень до арки

Вітрове навантаження на великопролітні арочні споруди має специфічні особливості:

- тиск вітру має незвичайний розподіл (рис. 9.24), причому на частину арки діє вітровий відсос, що може спричинити відрив арки від опор;
- якщо торці будівлі відкриті, то вітер, направлений паралельно торцям, спричиняє внутрішній вакуум у будівлі;
- суттєвим може бути піддув у великі отвори у стінах будівлі.

Тому для унікальних арочних споруд досить часто практикується продувка в аеродинамічній трубі.

Зусилля у великопролітних арках визначаються методами будівельної механіки.

Розрахунок суцільних арок.

Такі арки розраховуються як суцільний криволінійний стиснутий стержень, виконується перевірка стійкості арки:

а) у площині арки (відносно осі $x - x$)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu S/2)^2}$$

Тут S – довжина арки; $\mu = 1,2 \div 1,3$ – трьохшарнірна арка; $\mu = 1,0 \div 1,3$ – двохшарнірна арка; $\mu = 0,7 \div 0,85$ – безшарнірна арка.

б) із площини арки (при великих M , відносно осі $y - y$)

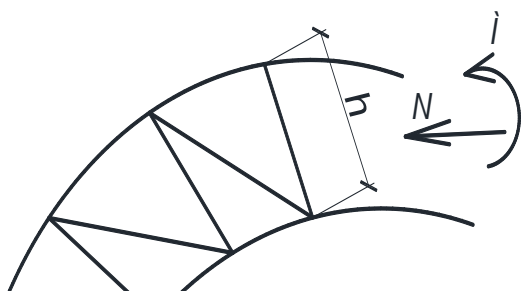
$$\sigma = \frac{N}{\varphi_y A} \leq R_y \gamma_c$$

Коефіцієнт φ_y визначається в залежності від гнучкості λ_y . Стійкість арок із площини забезпечується поперечними в'язами і прогонами; відстань між ними $l_y \leq (16 \dots 20) b_f$

Розрахунок наскрізних арок.

а) у площині арки – перевірка стійкості як суцільних арок;

б) перевірка стійкості окремих гілок:



- зусилля у верхньому поясі

$$N_{en} = -\frac{M}{h} - \frac{N}{2}$$

- зусилля у нижньому поясі

$$N_{nn} = \frac{M}{h} - \frac{N}{2}$$

По цим зусиллям – виконується розрахунок поясів як центрово стиснутих елементів.

5. Шарніри великопролітних арок

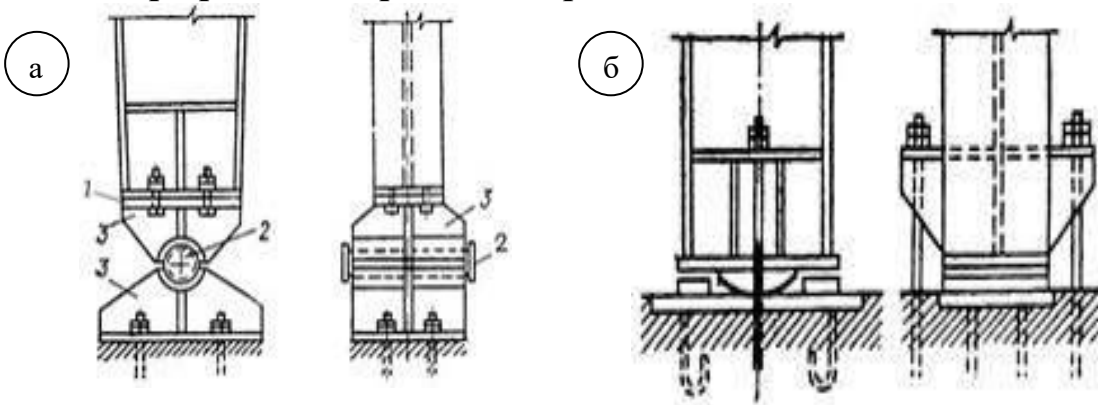


Рис. 9.25. Опорні шарніри великопролітних арок:

а – балансірий; б – плитковий; 1 – опора арки; 2 – циліндрична цапфа; 3 – балансири; 4 – плитка (циліндрична); 5 – анкерні болти

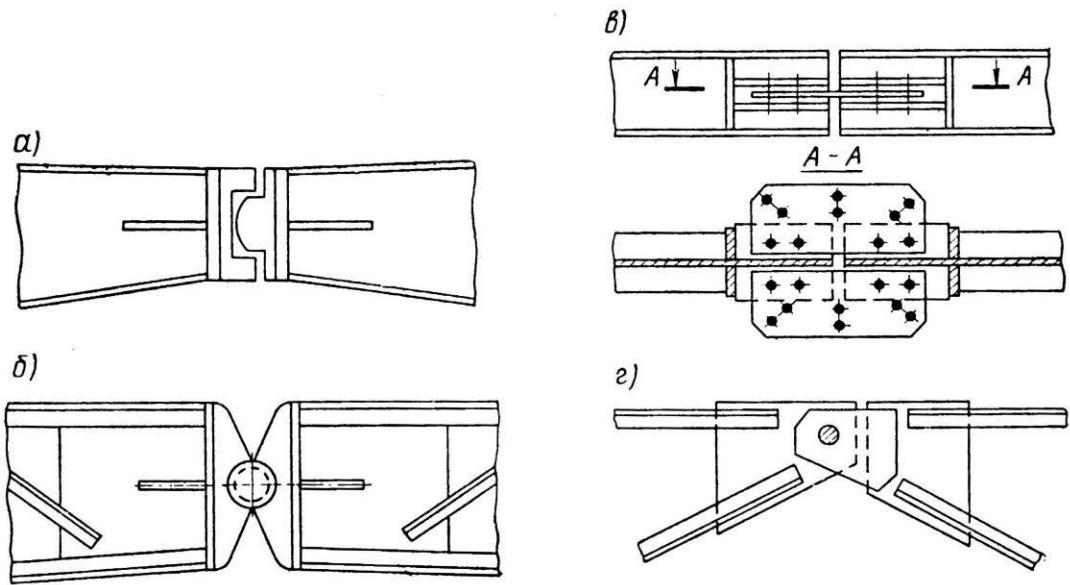


Рис. 9.26. Ключові шарніри великопролітних арок:
 а – плитковий; б – балансирний; в – листовий; г – болтовий

6. Приклади великопролітних арочних споруд



Рис. 9.27. Київський вокзал (Москва, проект В.Г. Шухова)



Рис. 9.28. Центральний вокзал Стокгольма (Швеція)

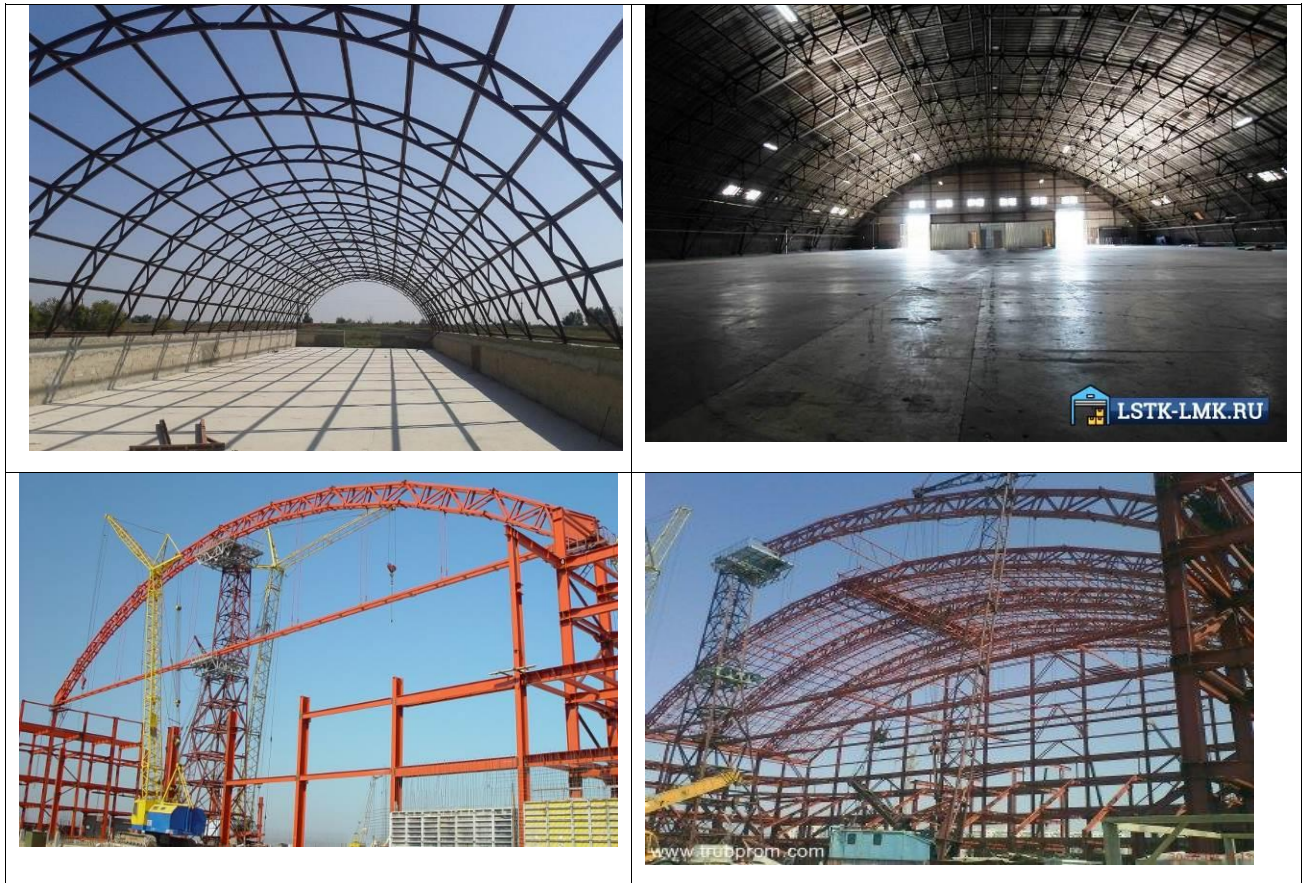


Рис. 9.29. Арочні великопролітні конструкції

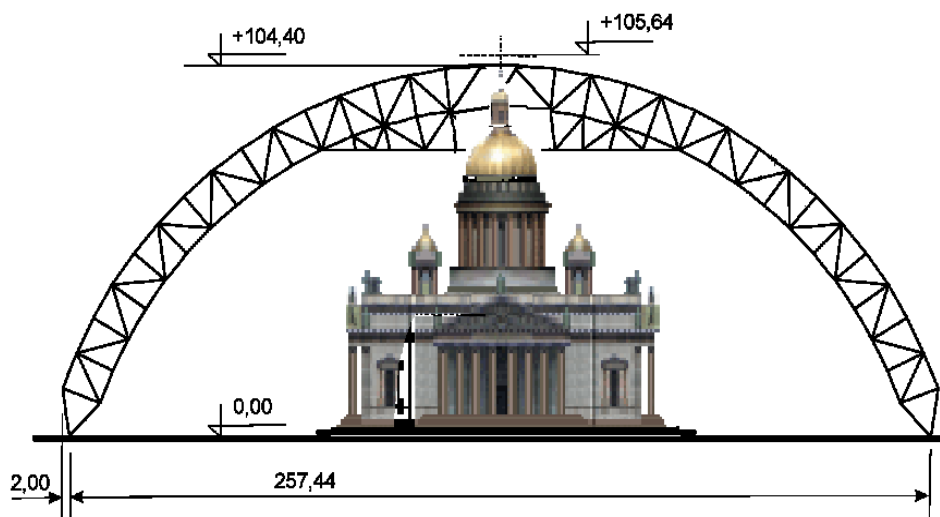


Рис. 9.30.Новий безпечний конфайнмент ЧАЕС

9.5. Компонівка великопролітних конструктивних схем

Основні фактори, які впливають на компоновку великопролітних будівель: призначення будівлі і великий крок важких великопролітних несучих конструкцій.

1. Розміщення несучих конструкцій вздовж будівлі

У деяких будівлях (ангари, авіазбиральні цехи) з великими розмірами виробів (літаки і т.і.) проліт перевищує довжину, потрібні широкі ворота – тому несучі конструкції встановлюються незвично: не поперек, як звичайно, а вздовж будівлі (рис. 9.31). У плані покриття такої будівлі являє собою ускладнену балочну клітку.

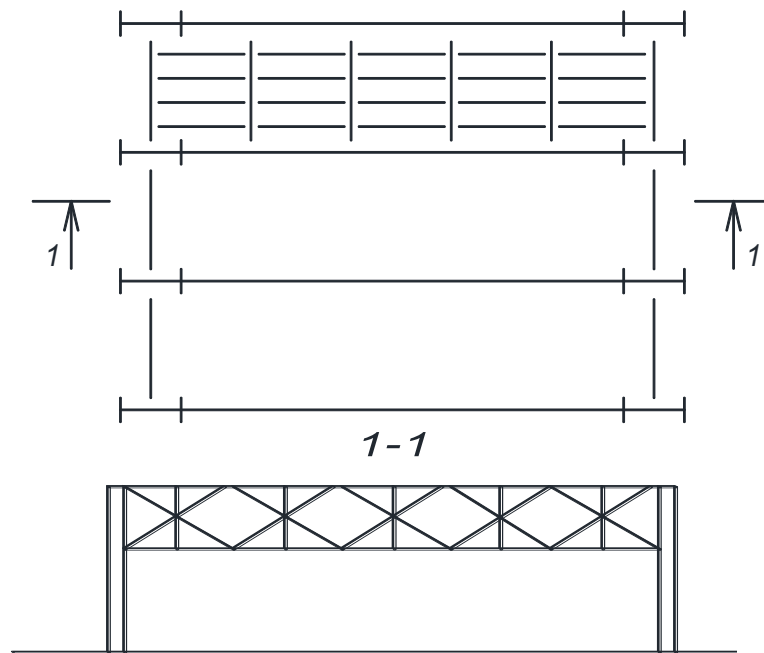


Рис. 9.31. Поздовжнє розміщення великопролітних конструкцій

Окремий випадок – неглибокий ангар, який може бути перекритий однією великопролітною фермою (рис. 9.32).

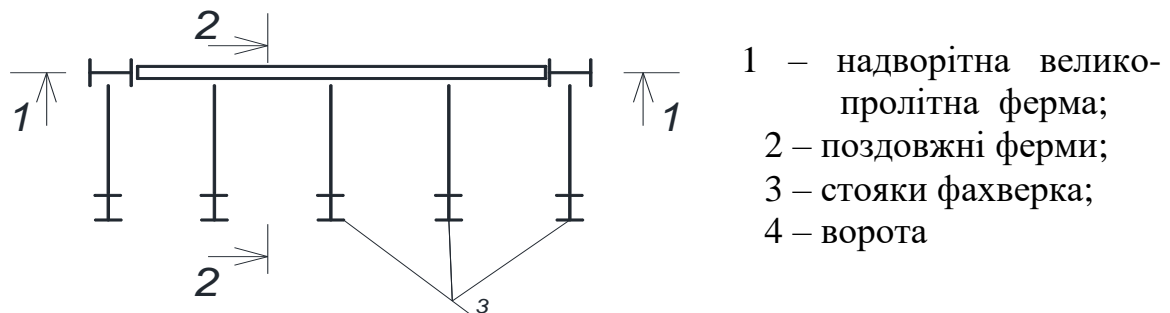


Рис. 9.32. Ангар з однією основною фермою

2. Блочна компоновка у поздовжньому напрямі

При великому кроці великопролітних конструкцій поздовжні елементи і в'язі стають важкими і громіздкими. Об'єднання масивних конструкцій у самонесучі блоки дозволяє збільшити крок між ними і виключити поздовжні в'язі (рис. 9.33).

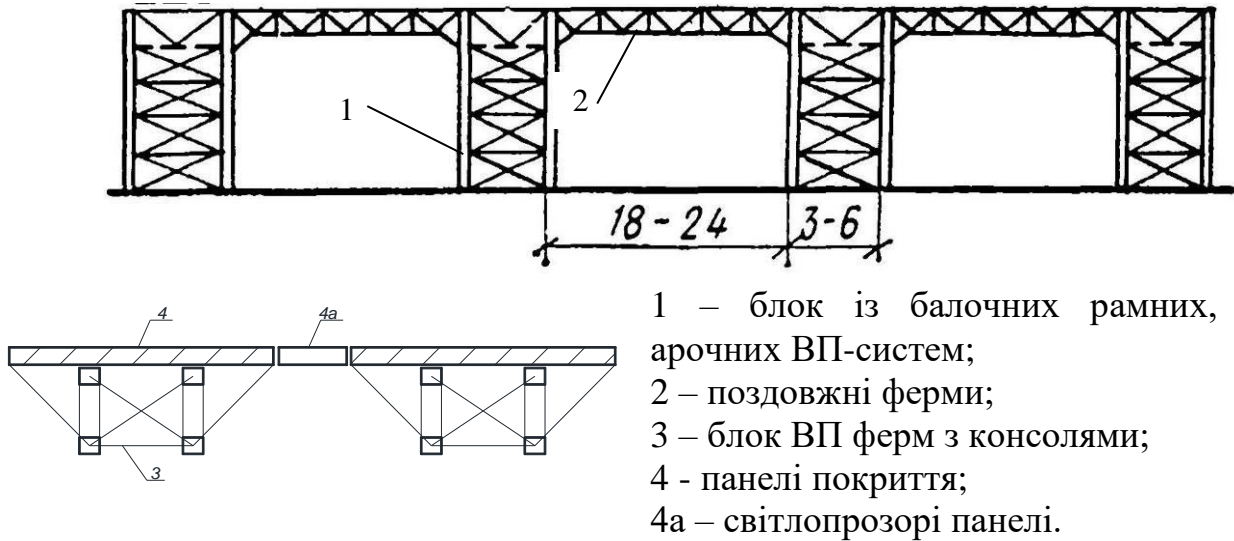


Рис. 9.33. Блочна компоновка великопролітного каркасу і покриття

3. Компоновка покрить у поздовжньому напрямі

Специфічні умови таких покрить: великий крок ригелів, важкі поздовжні елементи, верхнє освітлення, поперечні ліхтарі.

А) Скління у площині ферм (рис. 9.34) забезпечує необхідне освітлення приміщення і виключає влаштування спеціальних поперечних ліхтарів.

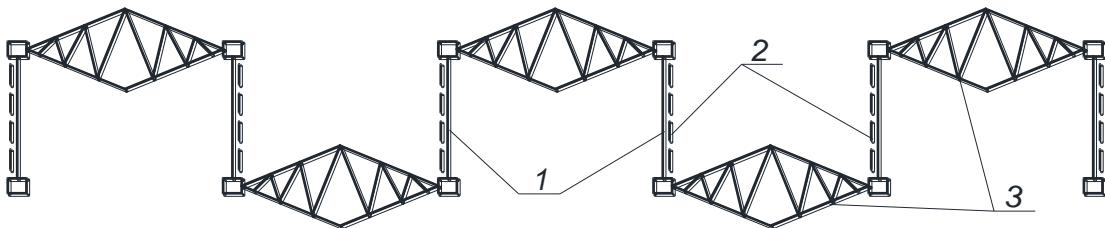


Рис. 9.34. Покриття зі склінням у площині ферм:

1 – великопролітні ферми; 2 – скління; 3 – поздовжні ферми (рибоподібні).

Б) Варіанти з тригранними фермами



Переваги таких покрить: просторова жорсткість, спрощені в'язі, зручність монтажу, можливість попереднього напруження.

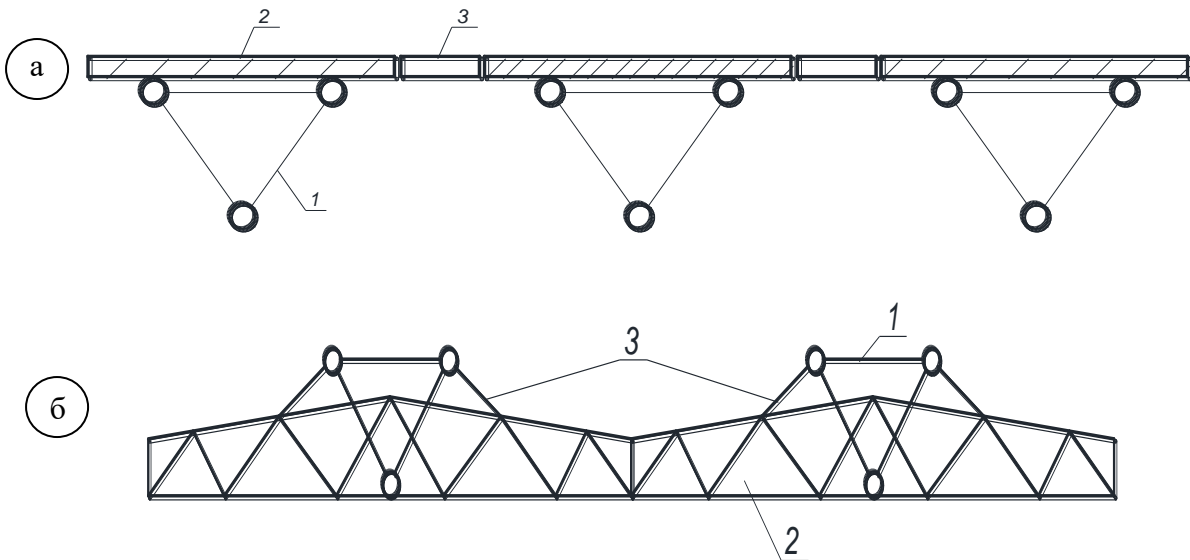


Рис. 9.35. Компонівка покрить з тригранними фермами:

- а – ферми з панелями: 1 – тригранні ферми; 2 – плита покриття, включена у роботу ферми; 3 – світлопрозора панель;
- б – поперечні і поздовжні ферми: 1 – тригранна ферма; 2 – поздовжні ферми; 3 – скління

9.6. Структурні великопролітні конструкції

Структурні конструкції (або просто «структури») – це сітчасті системи регулярної будови. Найчастіше вони мають вигляд плоских покрить або перекриттів (структурних плит), які є системами перехресних ферм (рис. 9.36).

1. Характеристика структурних конструкцій

Переваги структур:

- 1) велика просторова жорсткість, завдяки чому можна перекривати великі прольоти, варіювати опорні контури та сітку колон;
- 2) мала будівельна висота ($1/15 \dots 1/20$ прольоту), архітектурна виразність;
- 3) стандартизація елементів;
- 4) надійність у разі раптових локальних руйнувань (завдяки багатозв'язності системи);
- 5) простота монтажу.

Недоліки структур:

- 1) підвищена трудомісткість виготовлення та збирання (складні вузли);
- 2) підвищені витрати сталі (структури важчі, ніж звичайні покрить).



Рис. 9.36. Приклади плоских структурних конструкцій:
 а – модель структурного покриття; б – змонтоване структурне покриття;
 в – структурне покриття АЗС; г – структурні конструкції спортивного залу
 д – багатоповерхова будівля із структурними перекриттями

2. Компоновка структурних конструкцій

У кожній структурі можна виділити свій повторюваний об'ємний елемент (кристал) (рис. 9.37).

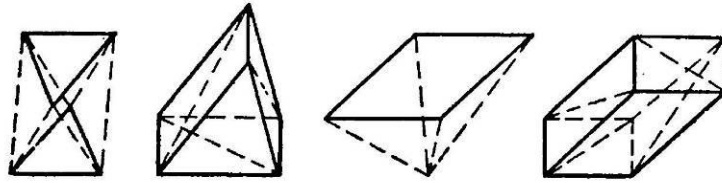


Рис. 9.37. Кристали структурних конструкцій:
а – ромб; б – призма; в – піраміда; г – паралелепіпед

Перехрестні ферми розташовується діагонально або прямокутно (відповідно з трикутними або з квадратними комірками) (рис. 9.38).

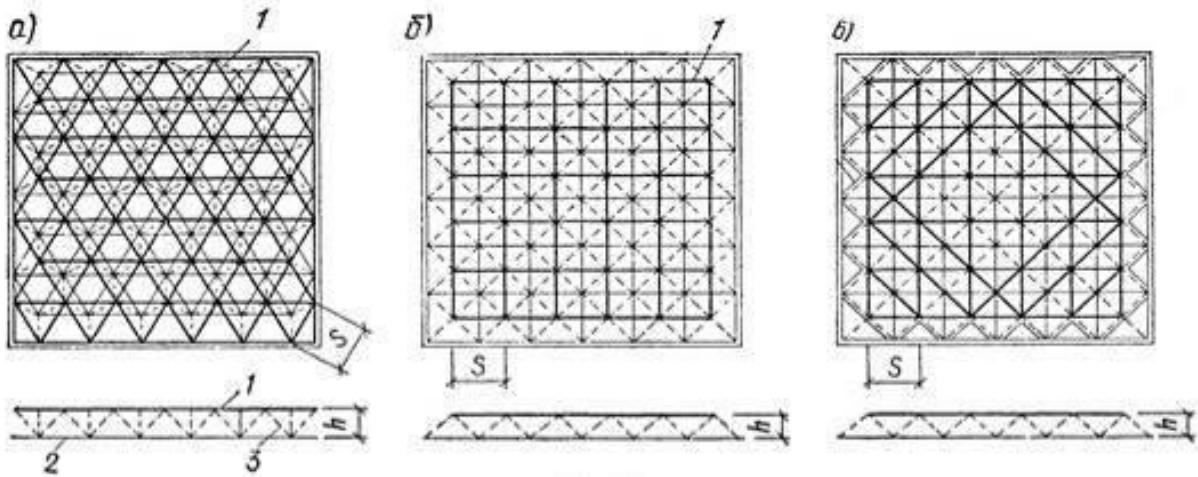


Рис. 9.38. Схеми структурних плит:

а – з трикутними комірками; б – з квадратними комірками; в – з діагональними елементами: 1 – верхні пояси; 2 – нижні пояси; 3 – розкоси; S – модуль

Типи перерізів елементів структур:

- сталеві труби – основний тип перерізів, який дає економію до 20 % у порівнянні з кутиками;

- прокатні профілі – кутики, швелери, двотаври;

- штамповані і гнуті профілі.

Кут нахилу розкосів $\sim 45^\circ$; модуль $S = 2 \dots 3$ м (до прольотів $L=50$ м).

3. Розрахунок структурних конструкцій

Структурні конструкції – багаторазово статично невизначені системи, які можуть бути одно- або багатопролітними; можуть спиратися на окремі опори різної конструкції, стіни, опорні контури; мати консолі; підкріплюватися підвісками тощо (рис. 9.39). Від цих особливостей залежить розподіл зусиль у структурах, який виявляється статичним розрахунком, точний варіант якого виконується за допомогою ЕОМ і ПЕОМ за програмними комплексами СКАД, ЛІРА та ін.

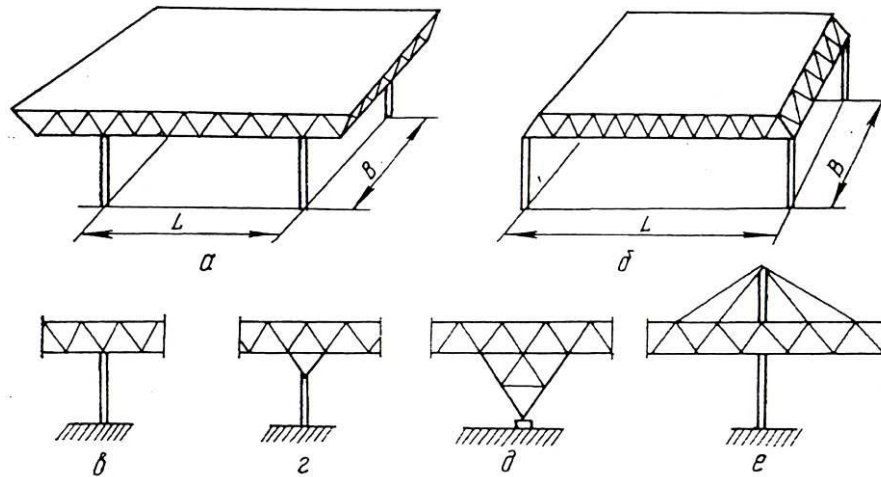


Рис. 9.39. Варіанти спирання структурних плит:

а – плита з консолями; б – плита із спиранням у кутах; в,г,д – варіанти опор;
е – плита з підвісками

Спрощений розрахунок структур виконується як плит, моменти в яких беруться із спеціальних таблиць, після чого визначаються осьові зусилля у поясах і розкосах:

$$N_n = \pm \frac{M \cdot S}{h}; \quad N_p = \frac{Q \cdot S}{2 \sin \alpha}.$$

Тут M ; Q – зусилля у плиті на одиницю довжини; h – висота (товщина) плити; S – модуль структури (рис. 9.38); α – кут нахилу розкосів.

4. Вузли структур

Вибір раціональної конструкції вузла структури – найскладніше питання, оскільки в окремих вузлах сходяться до 8 стержнів, але й найважливіше питання, оскільки вузли визначають трудомісткість будівництва всієї структури. Фірми різних країн розробили численні варіанти вузлів структур, деякі з яких показані на рис. 9.40 і 9.41.

У системі «Октаплатт» (Німеччина, рис.9.40, а) кінці трубчастих елементів, обрізані під прямим кутом, приварюються до кульової вставки на монтажі. У системі «Меро» (Німеччина) вузлова вставка має суцільний переріз з різьбовими отворами, які забезпечують гвинтове з'єднання стержнів у вузлах (рис. 9.41). У конструкції вузла «Берлін» (рис. 9.40, в) до сплюснених кінців стержнів приварюються клинові наконечники, які з'єднуються центральним болтом за допомогою кришок з відбортовкою. Вузол системи «Тріодетик» (Канада) (рис 9.40, б) має суцільний циліндричний елемент з фігурними прорізами, в які встановлюються відповідним чином оброблені сплюснені кінці трубчастих стержнів. У ЦНДІБК розроблений вузол (рис. 9.40, д), в якому сплюснені кінці труб

з'єднуються ванним зварюванням. У вузлі «Юністрат» (США) (рис. 9.40, е) елементи швелерного перерізу з'єднуються на болтах за допомогою штампованої фасонки просторової форми.

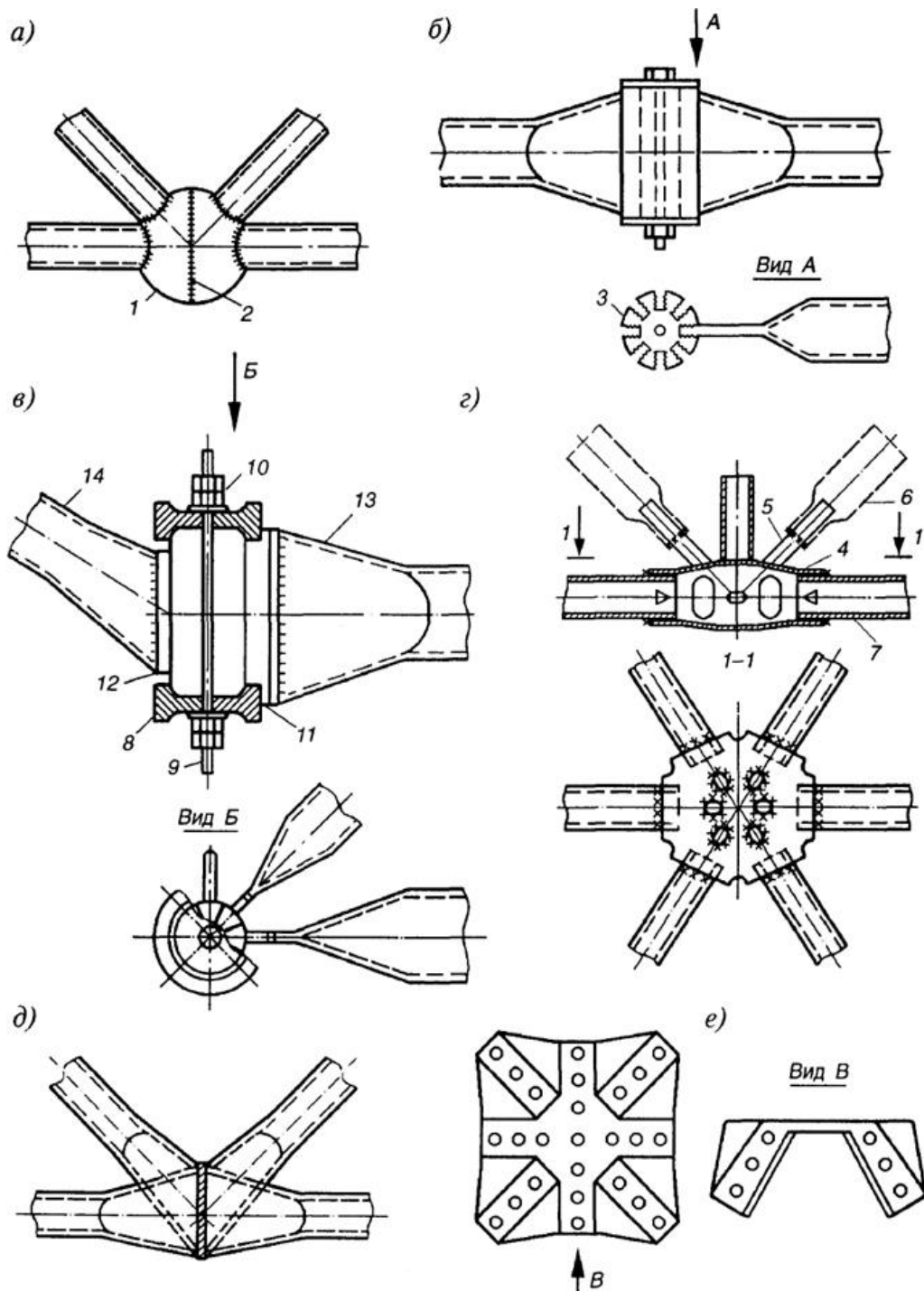


Рис. 9.40. Вузли різних структурних систем:

- а – «Октаплатт»; б – «Триодетик»; в – «Берлін»; г – «Дю Шато»; д – вузол ЦНДІБК;
 е – «Юністрат»; 1 – кульова вставка; 2 – зварний шов; 3 – фігурний проріз; 4 – кришка;
 5 – круглий стержень; 6 – труба розкошу; 7 – труба нижнього поясу; 8 – кришка;
 9 – стяжний стержень; 10 – гайка з контргайкою; 11 – наконечник з приливом;
 12 – те ж, без приливу; 13 – стежень нижнього поясу (труба зі сплющеним кінцем);
 14 – труба розкошу

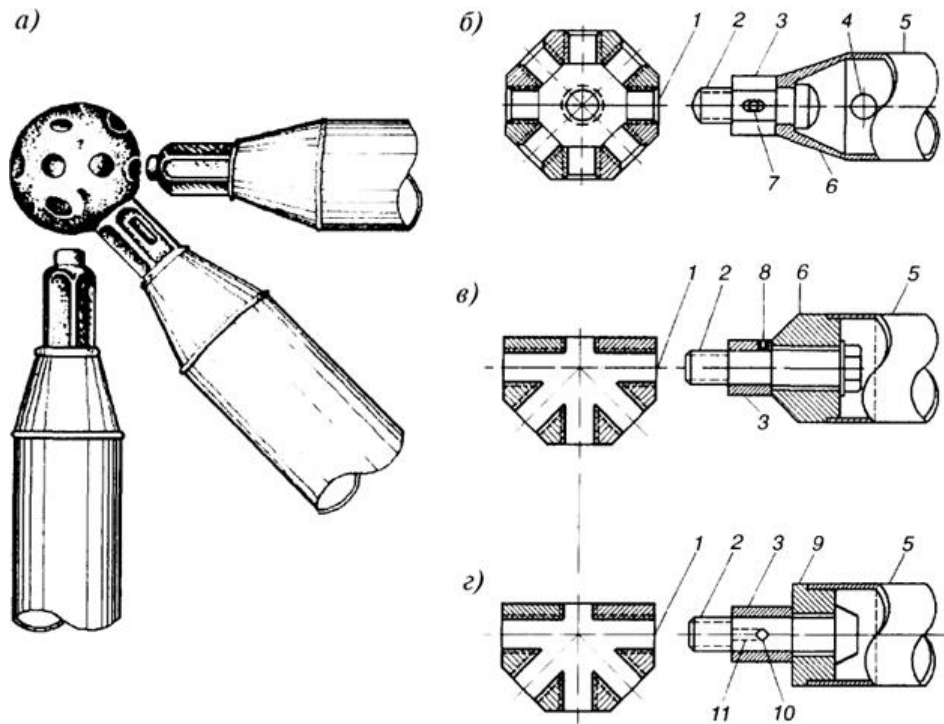


Рис. 9.41. Вузлове з'єднання «Меро» та його модифікації:

а, б – загальний вигляд вузла, вузловий елемент та деталі стержня (система «Меро»); в, г – деталі трубчатих елементів у з'єднаннях «Веймар» та «МАрХІ»; 1 – отвір із внутрішньою різьбою; 2 – болт; 3 – повідкові гайка; 4 – монтажний отвір; 5 – труба; 6 – оголовок труби; 7 – ведучий палець; 8 – фіксатор; 9 – шайба; 10 – штифт; 11 – проріз у гайці.

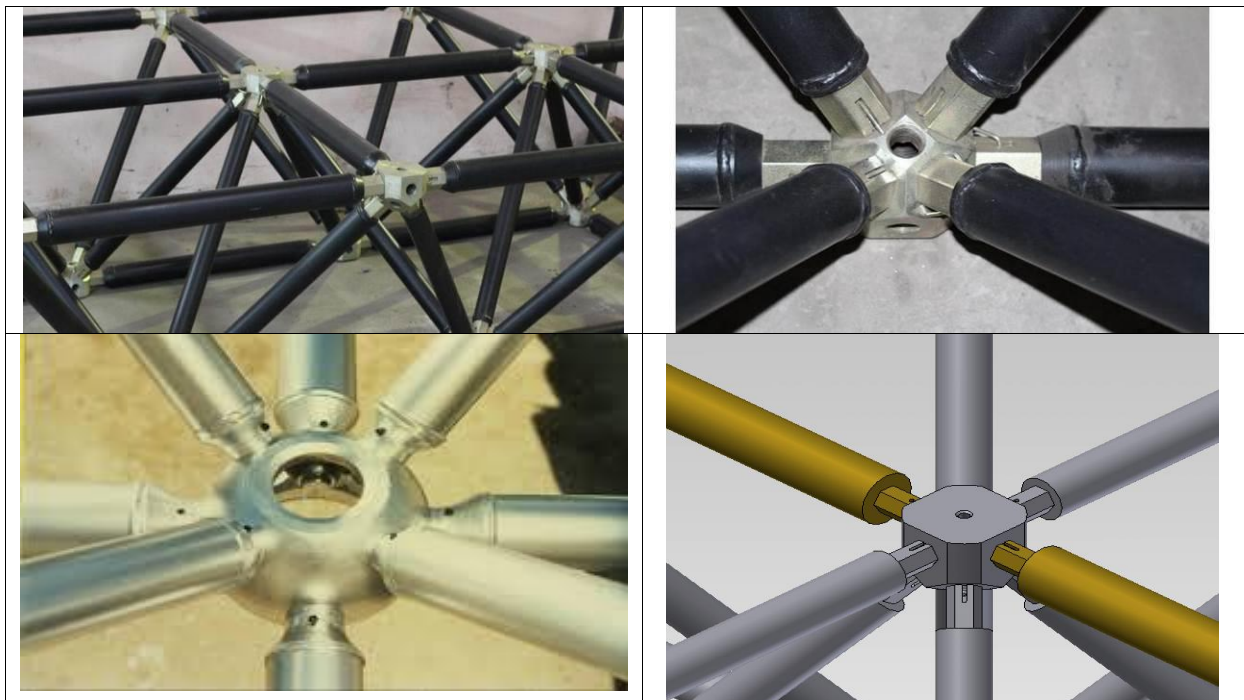


Рис. 9.42. Зібрані вузли структур

5. Монтаж структур

Елементи структур – стержні, вузлові вставки та ін. – поступають на будівельний майданчик у розібраному вигляді (рис. 9.43, а,б), після чого структура збирається на землі (рис. 9.43, в) і далі у зібраному вигляді піднімається і встановлюється у проектне положення (рис. 9.43, г,д). Такий монтаж, що відбувається у короткий термін, є однією з суттєвих переваг структурних конструкцій.

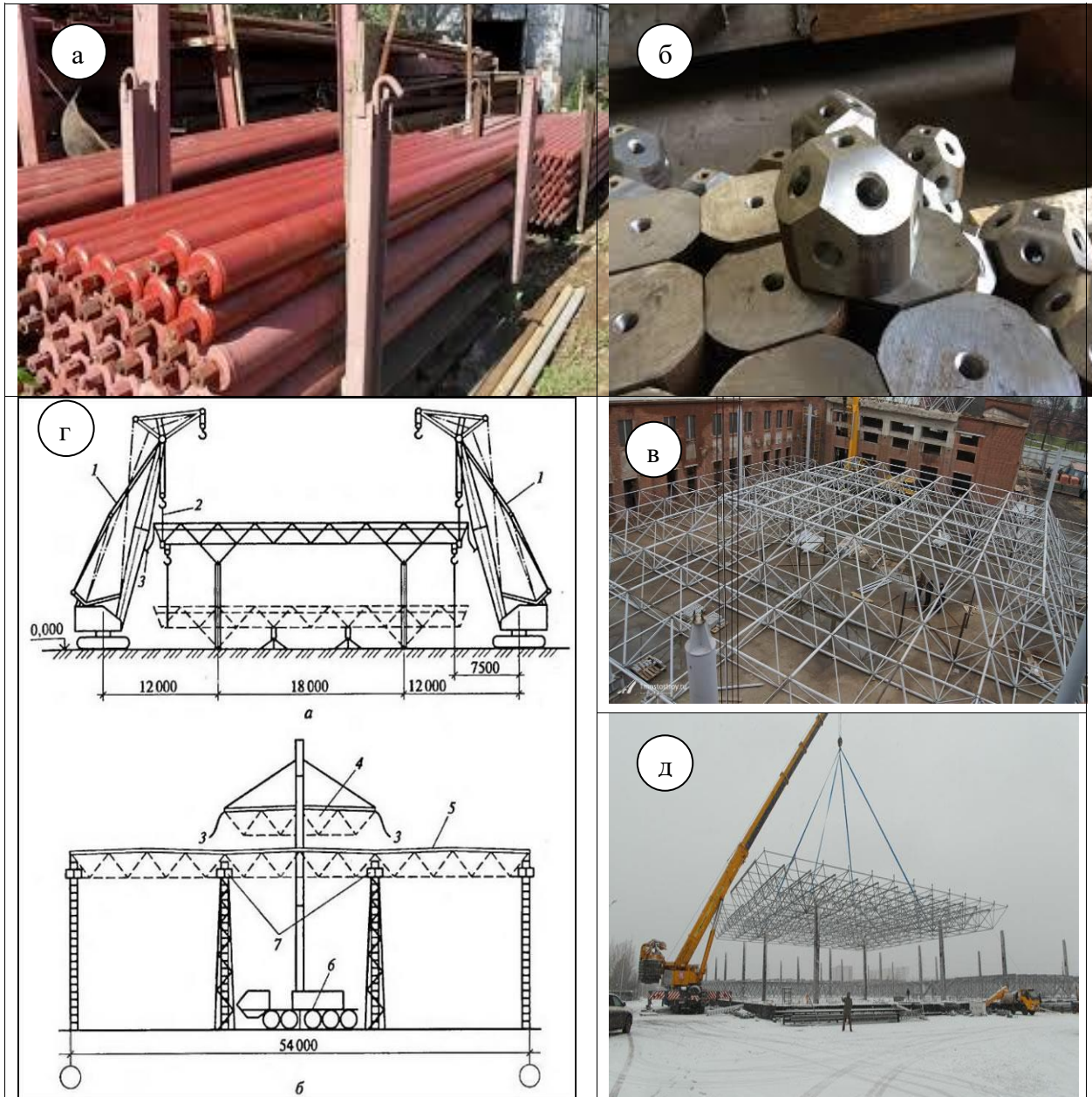


Рис. 9.43. Збирання і монтаж структур:

а – елементи структури; б – вузлові вставки; в – зібрана структура;
 г,д – підйом структур у проектне положення

6. Різні форми структурних конструкцій

Структурні конструкції не обмежуються варіантом плоских плит, а можуть приймати виразні, інколи фантастичні форми, реалізуючи сміливі задуми сучасних архітекторів (рис. 9.44).

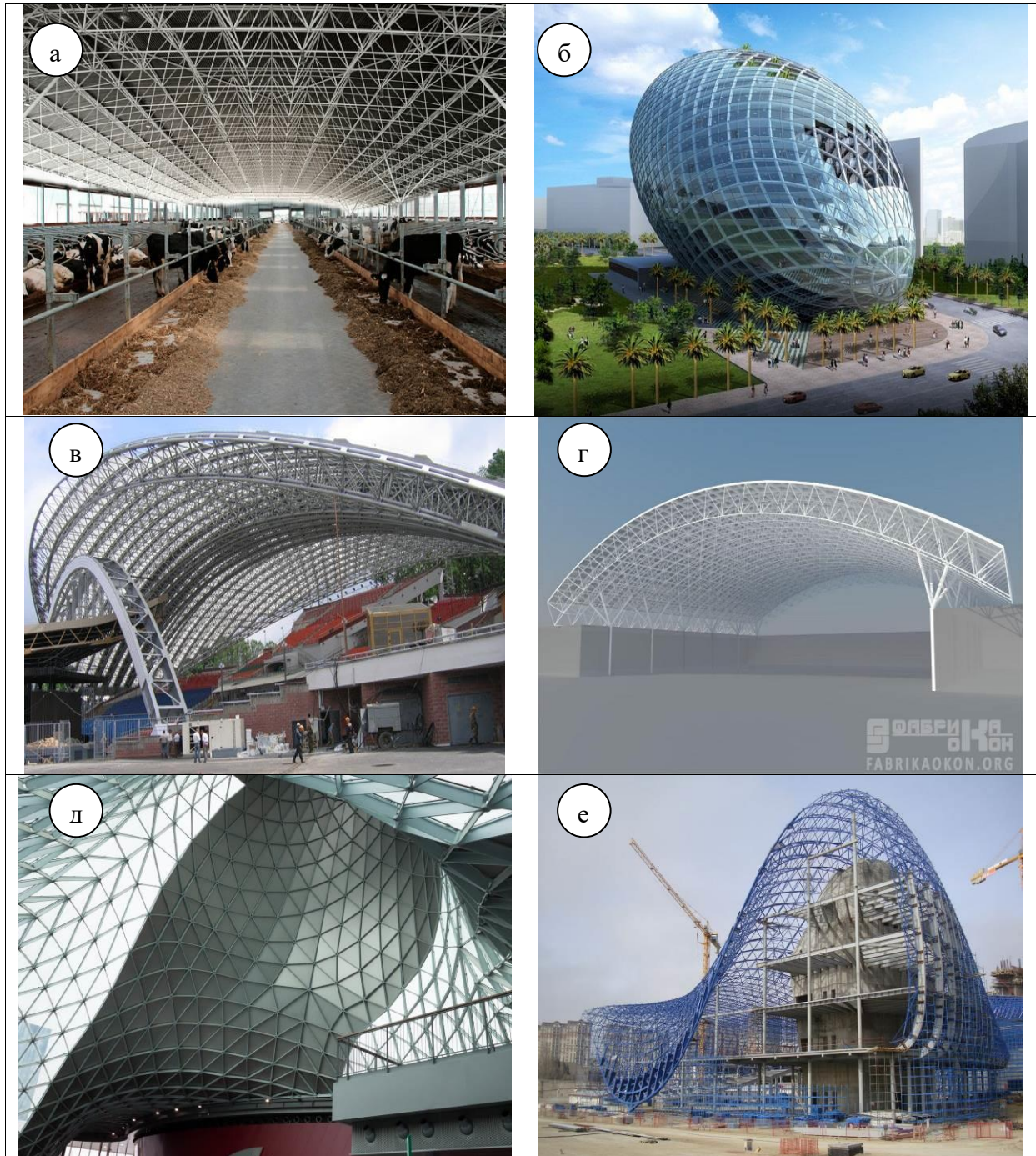


Рис. 9.44. Різноманітність форм структурних конструкцій:

а – структурне покриття корівника; б – проект Cybertecture Egg (Мумбаї, Індія);
в – концертний зал «Слов'янського базару» (Вітебськ, Беларусь); г, д – криволінійні
форми структур; е – Центр Гейдара Алієва (Баку, Азербайджан)

7. Інші просторові великопролітні конструкції

Бані (рис.9.45).

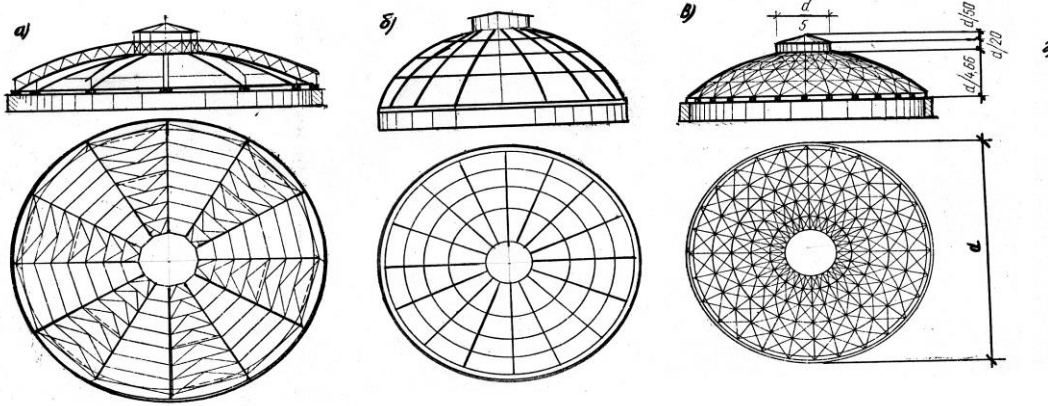


Рис. 9.45. Типи бань:

а – ребриста; б – ребристо-кільцева; в – сітчаста; г – загальний вигляд сітчастої бані

Оболонки (рис.9.46).



Рис. 9.46. Сітчаста оболонка

Складки (рис. 9.47)

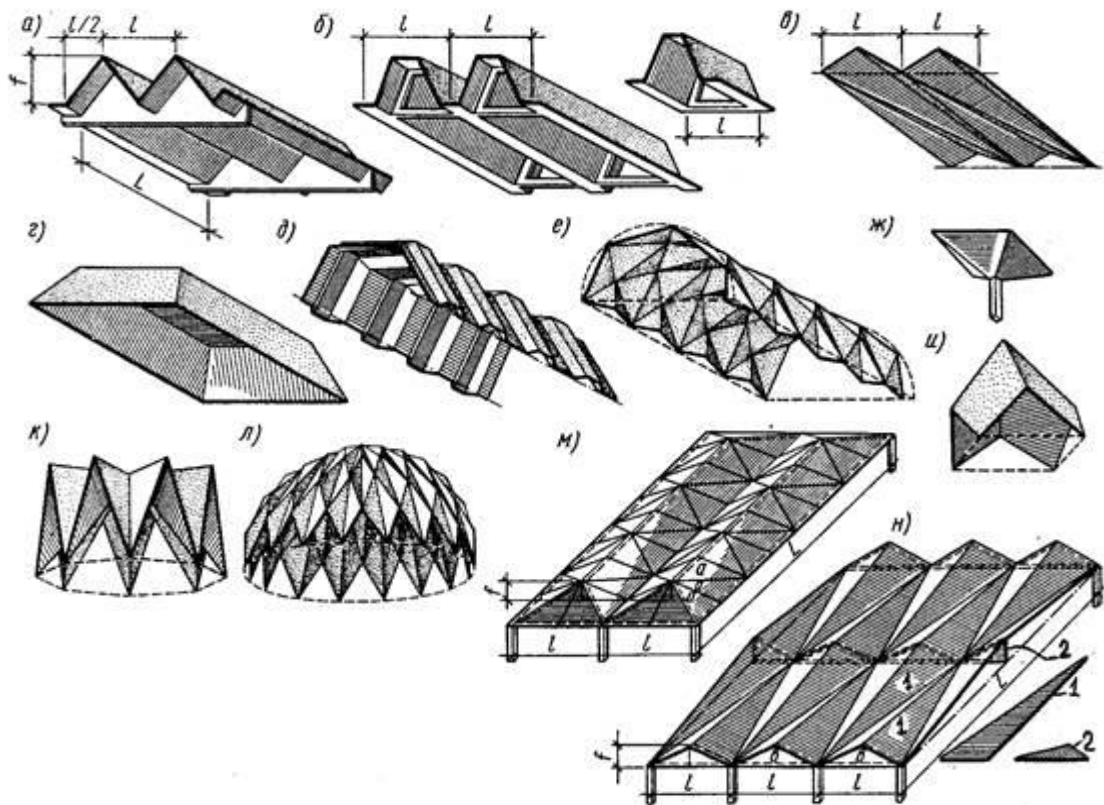


Рис. 9.47. Типи складок

9.7. Типи і особливості висячих покрить

Висячими називають конструкції, в яких основні елементи працюють на розтяг. У більшості випадків несуча висяча конструкція виконується із тросів (вант), тому такі системи називають також *вантовими*.

1. Переваги висячих конструкцій

1) Легкість – висячі конструкції є найлегшими металевими конструкціями. Гнучкі троси працюють на розтяг, і зменшення їх маси пропорційно підвищенню міцності сталі, що має місце тільки при розтягу. Тому у висячих конструкціях найбільш ефективно використовуються високоміцні сталі з межею міцності $\sigma_u = 1200 \dots 2000$ МПа.

2) Економічність, оскільки вартість сталі росте повільніше, ніж міцність, тому при застосуванні високоміцних сталей знижується вартість висячих конструкцій.

3) Зручність і швидкість монтажу; не потрібні риштування, легке збирання.

4) Легкість транспортування: перевозяться щити покрівлі і канати, звернуті у бухти.

5) Архітектурна виразність.

2. Недоліки висячих конструкцій

1) Підвищена деформативність двох типів.

1 тип – *кінематична* деформативність: форма гнучкої ванти залежить від форми навантаження. Через малу власну вагу і гнучкість при великій довжині несучі ванти активно реагують на вплив повітряних потоків, коливань, несиметричних і рухомих навантажень (рис. 9.48).

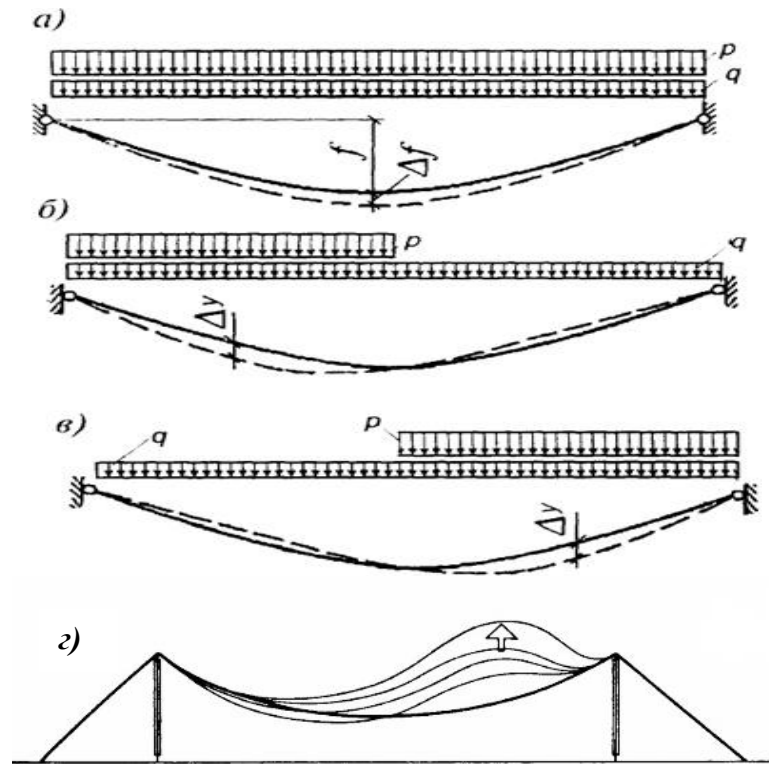
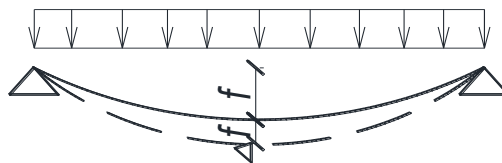


Рис. 9.48. Кінематична деформативність висячих конструкцій:

а – провисання ванти під рівномірним навантаженням; б,в – провисання ванти під несиметричним навантаженням; г – вивертання ванти під вітровим навантаженням

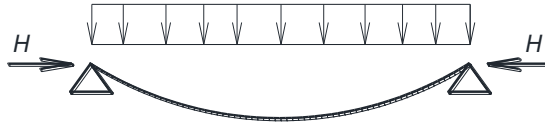
2 тип: *пружна* деформативність: деформації гнучких вант значно більше, ніж звичайних жорстких конструкцій.



Приріст стріли провисання ванти пропорційний її відноському видовженню, яке згідно закону Гука складає $\epsilon = \sigma/E$. Для тросів цей параметр значно більше, оскільки напруження в них (чисельник) у 4...8 разів більше у порівнянні із міцністю прокатної сталі, модуль пружності (знаменник) дещо менше $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа. Тому гнучкі ванти провисають значно більше, ніж звичайні балки.

Для виключення небезпечних надлишкових деформацій висячих конструкцій необхідно їх стабілізувати, що веде до їх ускладнення і подорожчання.

2) Розпірність висячих конструкцій.



Гнучкі ванти, які працюють тільки на розтяг, передають на опори значні розпірні зусилля H , що можуть досягати десятків і навіть сотень тон. Тому треба виконувати потужні опорні конструкції для сприйняття розпору H , які зменшують економію, одержану за розрахунок застосування високоміцних вант.

3) У деяких випадках – складність відведення води з покриття.

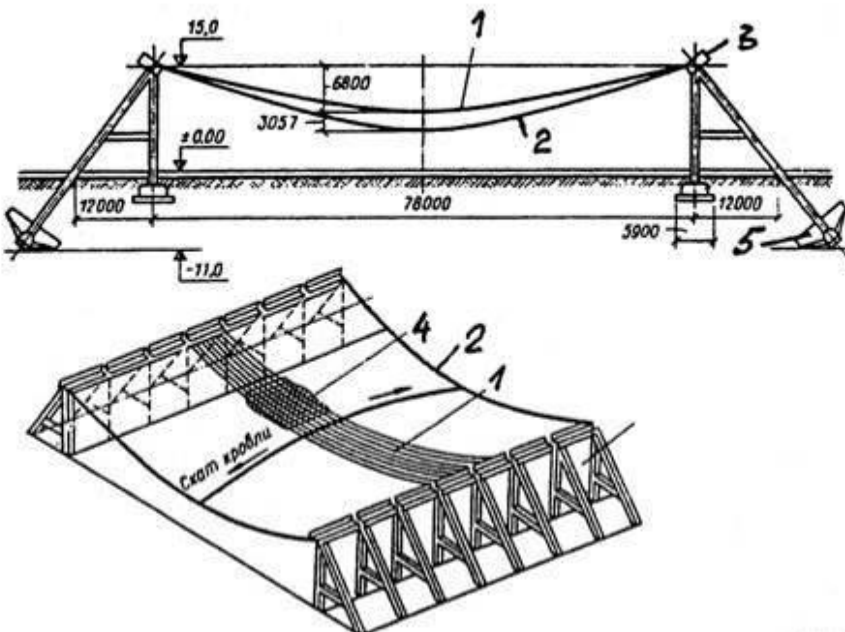
3. Типи висячих конструкцій

- а) однопоясні з гнучкими вантами;
- б) однопоясні з жорсткими вантами;
- в) мембранні покриття;
- г) двопоясні висячі конструкції;
- д) вантові (тросові) ферми;
- е) комбіновані системи;
- є) перехресні (сідловидні) системи.

9.8. Однопоясні висячі конструкції з гнучкими вантами

1. Приклади однопоясних висячих систем

Гараж у Красноярську (Росія)



- 1, 2 – ванти діаметром 40 мм з кроком 1,5 м;
- 3 – з.б. опорні балки;
- 4 – з.б. панелі;
- 5 – анкерний фундамент;

Гараж для автобусів (Дарниця, Київ)

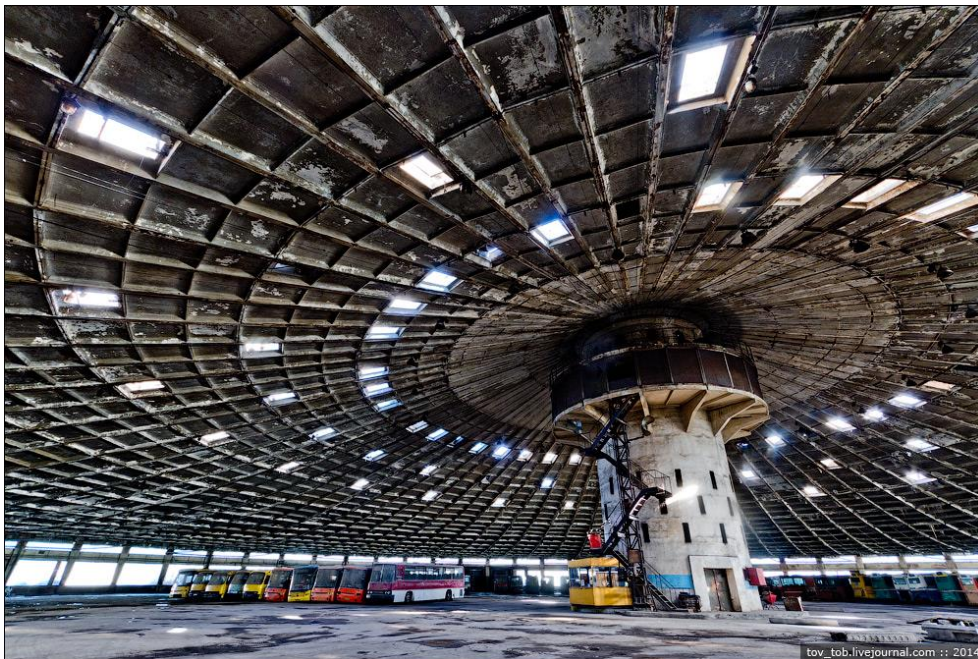
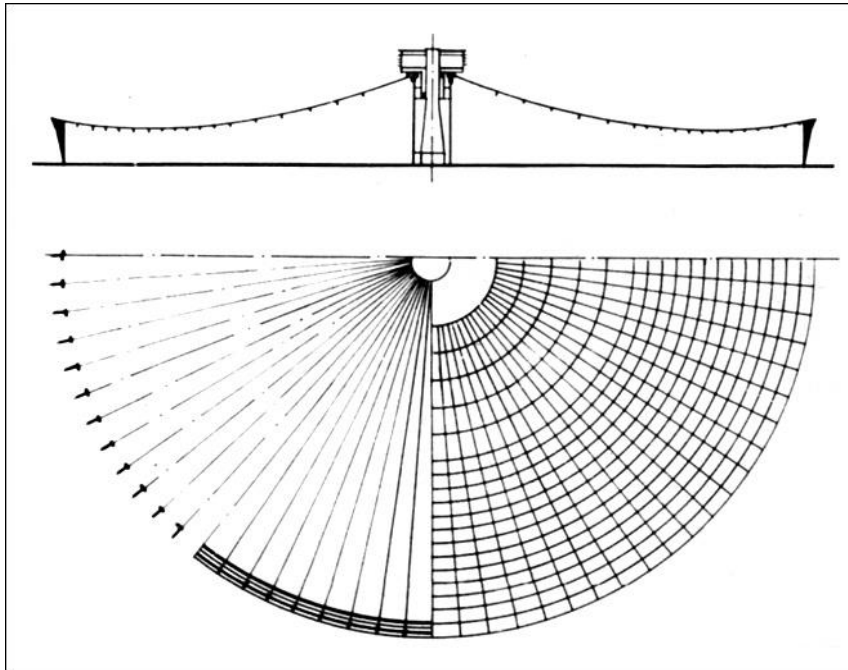


Рис. 9.49. Гараж для автобусів (Дарниця, Київ)

Гараж для автобусів в Дарниці (Київ) круглий в плані, діаметром 160 м. В центрі розміщена залізобетонна вежа висотою 18 м зі сталевим опорним кільцем. Зовнішнє залізобетонне опорне кільце спирається на залізобетонні стояки висотою 8,5 м. Покрівля – залізобетонні панелі по вантам, після привантаження і замонолічування покрівля перетворена у монолітну залізобетонну оболонку.

2. Засоби стабілізації однопоясних висячих конструкцій

Однопоясна висяча конструкція – проста, але деформовативна система, можливе вивертання такого покриття.

Варіанти стабілізації однопоясних систем:

- а) збільшення ваги покрівлі;
- б) попереднє натягнення вант;
- в) перетворення висячої конструкції у залізобетонну оболонку у наступній послідовності:

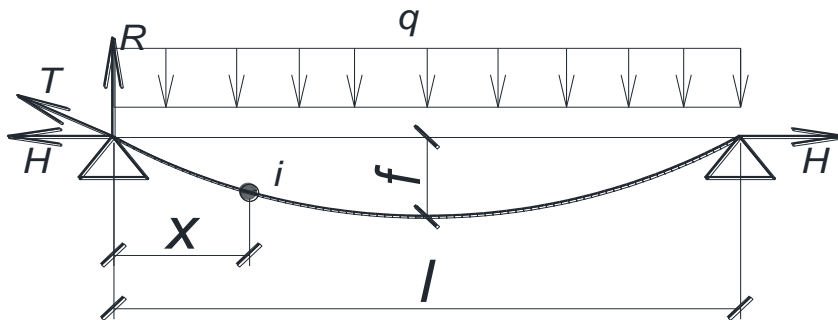
- монтаж вант;
- підвіска залізобетонних панелей;
- привантаження вант (підвіска цегли), розкриття стиків;
- замонолічування стиків;
- після затвердіння бетону – зняття привантаження;
- утворення монолітної попередньо напруженої залізобетонної оболонки, яка практично не деформується під навантаженням.

9.9. Розрахунок гнучких ниток

Розрахунок однопоясних висячих систем зводиться до розрахунку вант як гнучких ниток.

1. Розрахунок без урахування деформацій ниток

(нитки з відносно великим провисанням $\left(\frac{f}{l} > \frac{1}{20}\right)$)



Оскільки нитка працює тільки на розтяг, згинальний момент у будь-якій i -й точці – відсутній

$$\sum M_i = M_x - Hy = 0,$$

де M_x – балочний момент, який визначається як для звичайної балки;
 H – розпір нитки

$$H = \frac{M_x}{y} = \frac{M_{\max}}{f}.$$

Для рівномірно розподіленого навантаження $M_{\max} = ql^2/8$, тоді розпір визначається як

$$H = \frac{ql^2}{8f}.$$

2. Розрахунок з урахуванням деформацій нитки

(нитки з малим провисанням $\frac{f}{l} < \frac{1}{20}$)

$$H^3 + \frac{8EA}{n_0^2 m_0^3} H^2 = \frac{DEA}{2lm_0^3}; \quad n_0 = \frac{l}{f}; \quad m_0 = \frac{L}{l}.$$

Позначення: l – проліт нитки, L – довжина нитки; f – стріла провисання нитки; E – модуль пружності ванти; A – площа перерізу ванти; D – характеристика, що залежить від схеми навантаження.

3. Попередньо напружена нитка (струна)

$$H^3 - NH^2 = \frac{DEA}{2l}$$

Тут N – попереднє напруження нитки.

9.10. Двопоясні вантові системи, вантові ферми, комбіновані вантові системи

1. Двопоясні вантові системи

Стабілізація таких систем забезпечується за рахунок спеціальних стабілізуючих тросів (вант), які йдуть вздовж несучих тросів (вище або нижче) (рис. 9.50).

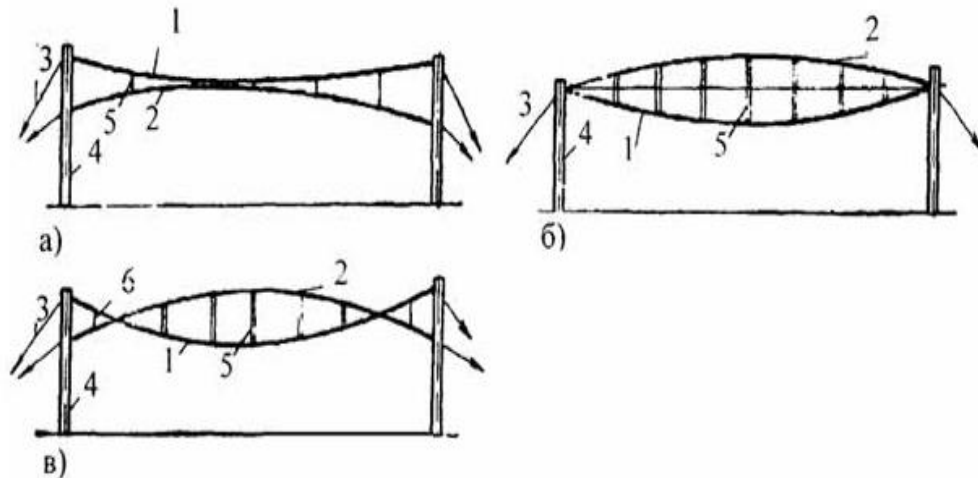


Рис. 9.50. Схеми двопоясних вантових систем

а – ввігнута система; б) випукла система; в) випукло-ввігнута; 1 – несучий трос; 2 – стабілізуючий трос; 3 – розтяжки; 4 – опора; 5 – жорсткі розпірки; 6 – гнучкі затяжки.

Система взагалі відносно важка і складна у монтажі (рис. 9.51).

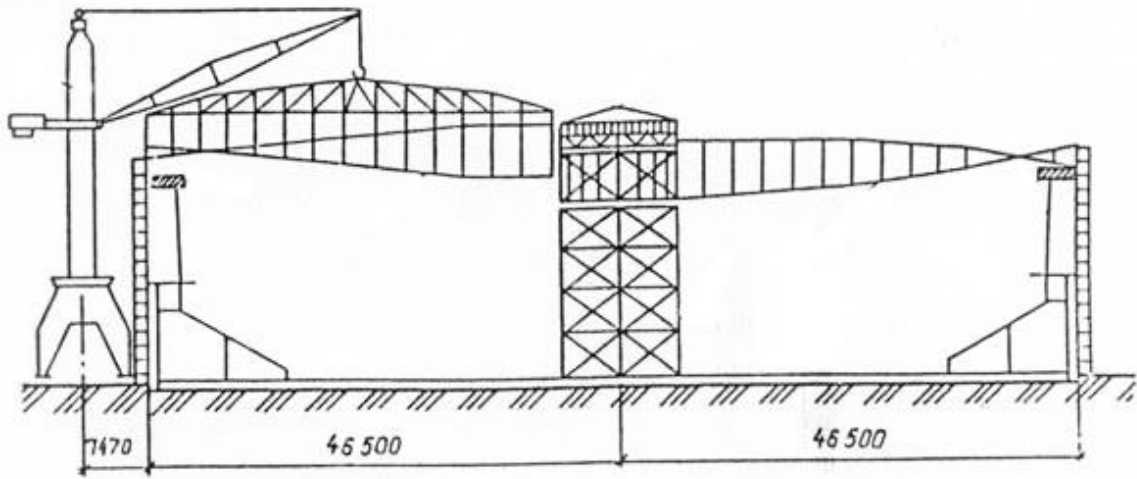


Рис. 9.51. Монтаж двопоясної вантової системи

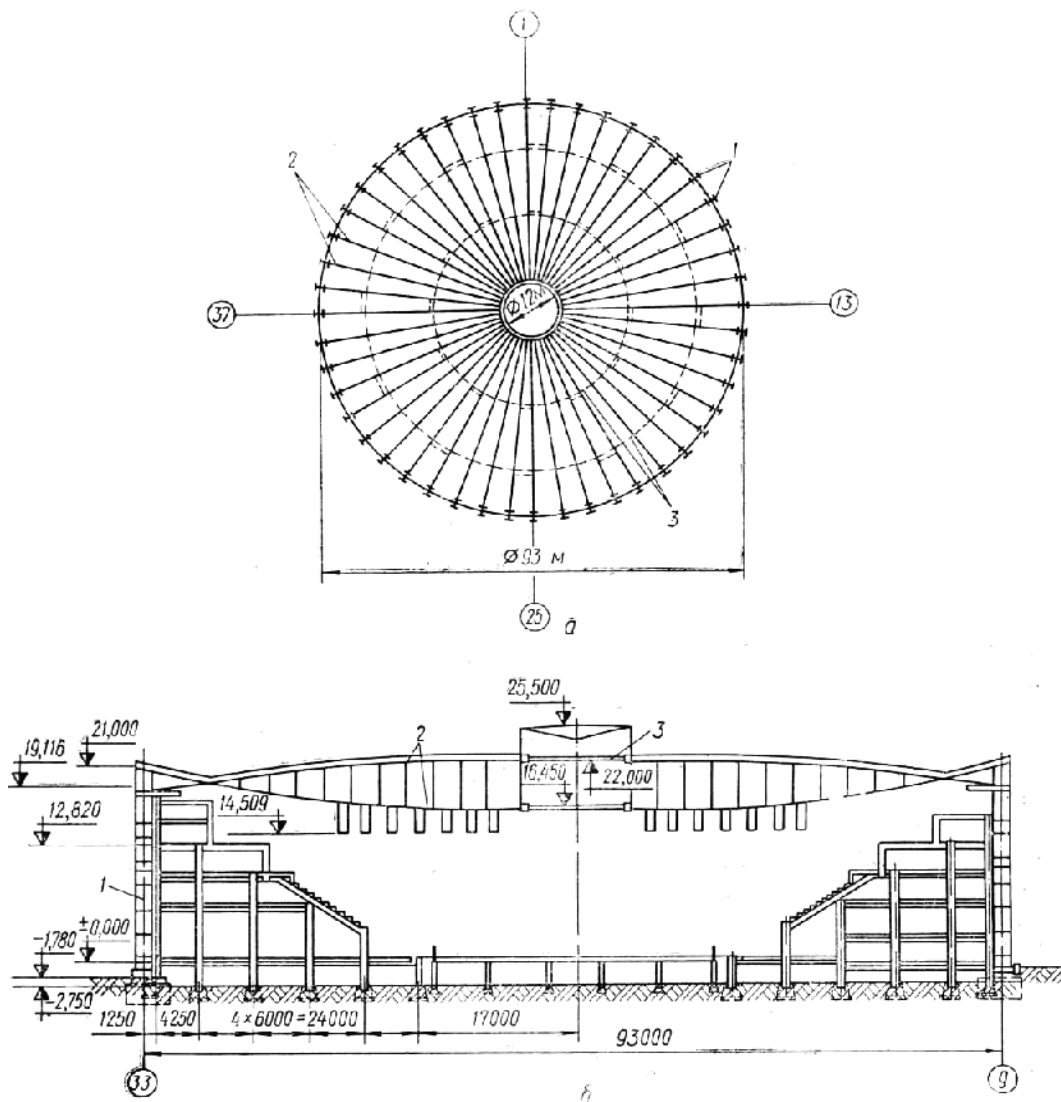


Рис. 9.52. Двопоясна вантова система

(Палац спорту «Ювілейний», С.-Петербург):

- 1 – сталеві колони з кроком 6,0 м; 2 – несучі і стабілізуючі троси;
3 – центральне сталеве кільце (барaban).

2. Вантові ферми (ферми Яверта)

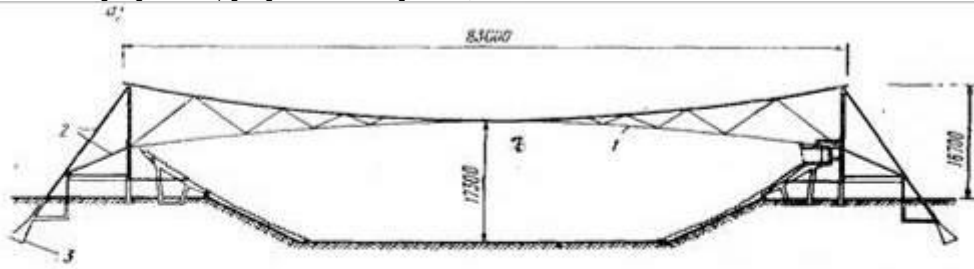


Рис. 9.52. Зимовий стадіон «Юханесхоф» (Стокгольм, Швеція):
1 – тросові ферми, 2 – відтяжки, 3 – анкерні фундаменти

Вантові ферми – удосконалений варіант двопоясної системи. У цих фермах несучі і стабілізуючі ванти (пояси) з'єднані вантами-розкосами, тобто вся ферма виконується з гнучких вант. Щоб така система була працездатною, в ній створюється попереднє напруження, так, щоб в елементах ферми не виникало стиску від зовнішнього навантаження. Розрахунок вантових ферм виконується як звичайних ферм.

3. Комбіновані системи

У склад комбінованих систем звичайно входять високі пілони, до яких за допомогою гнучких вантів-тросів кріпляться балки та інші жорсткі конструкції (рис. 9.53).

Переваги комбінованих систем:

- 1) Підвищена жорсткість конструкції.
- 2) Економічність, можливість регулювання зусиль у тросах.
- 3) Технологічні переваги: легкість виконання воріт, можливість добудови.

Тому такі системи досить широко застосовуються для ангарів, виставкових будівель (павільйон СРСР у Брюсселі, рис. 9.4), покрить і козирків стадіонів (рис. 9.54, в, г), виробничих будівель з частою зміною технології виробництва.

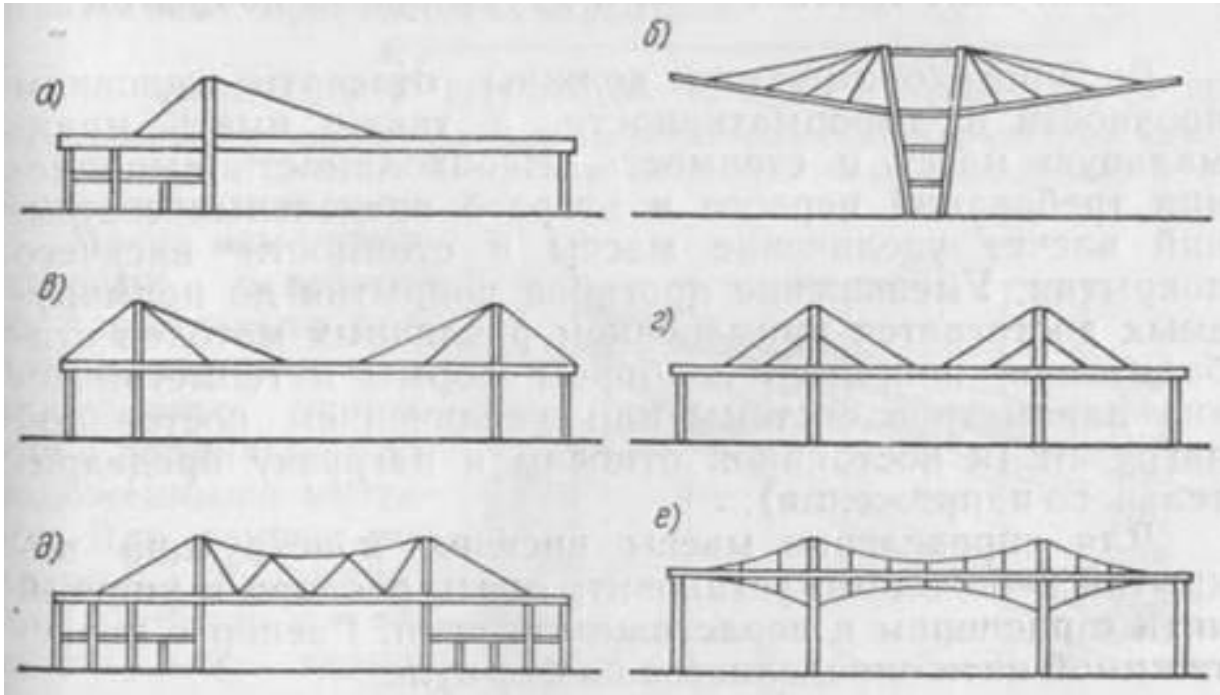


Рис. 9.53. Схеми комбінованих вантових систем



Рис. 9.54. Приклади комбінованих вантових систем:

а – залізнична платформа (Німеччина); б – купол «Millennium» (Лондон, Велика Британія); в – стадіон Боруссія-парк (Німеччина); г – стадіон «Металіст» (Харків)

9.11. Покриття з жорсткими вантами, мембранні покриття

1. Однопоясні системи з жорсткими вантами

У цих системах використовуються прокатні профілі (двотаври), вигнуті по формі гнучких ниток (рис. 9.55). Тому вони працюють в основному на розтяг і реалізують переваги гнучких ниток. З іншого боку, оскільки вони є жорсткими, вони забезпечують стабілізацію покриття. Тому у таких системах можливо застосовувати легку покрівлю.

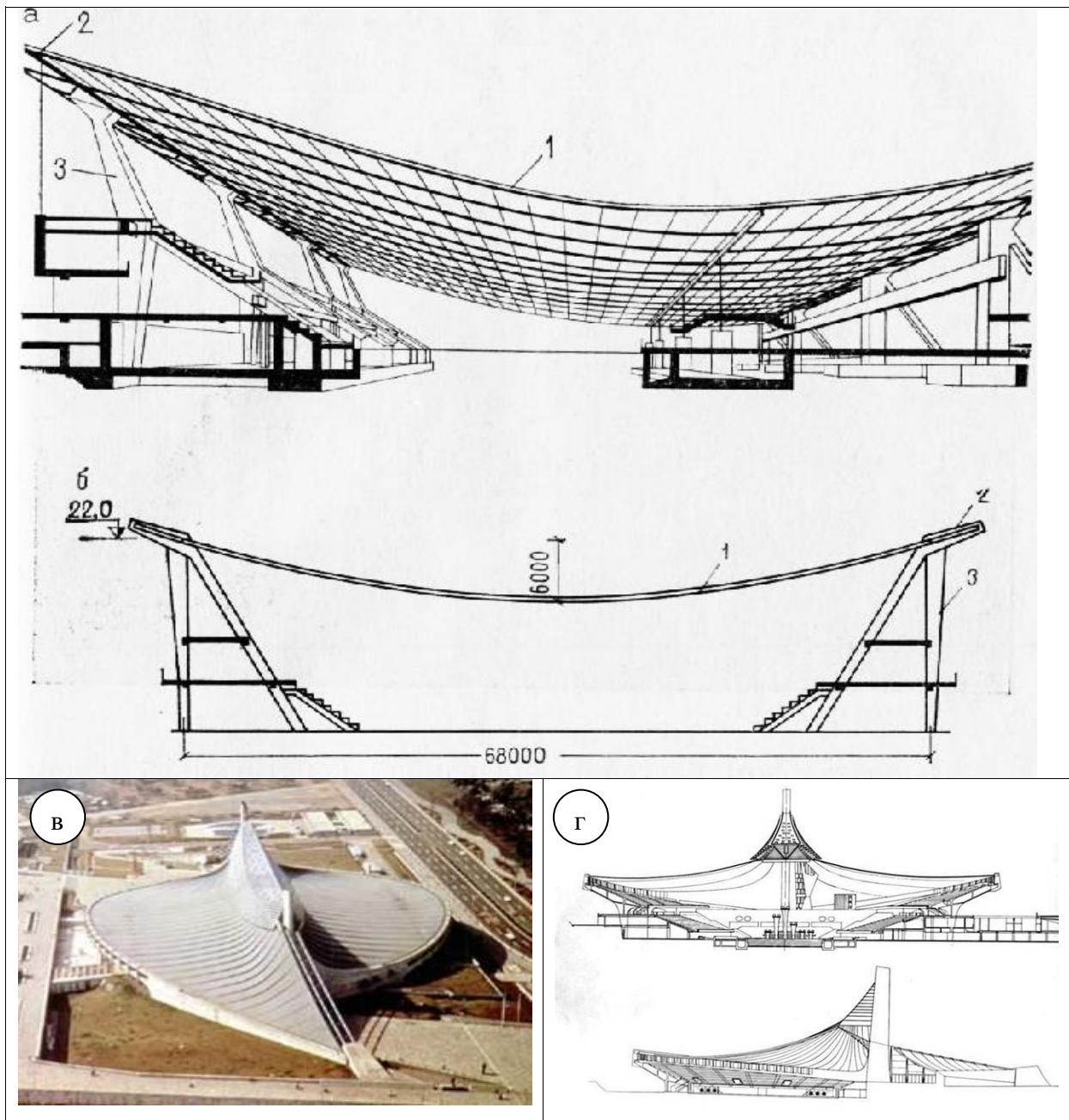


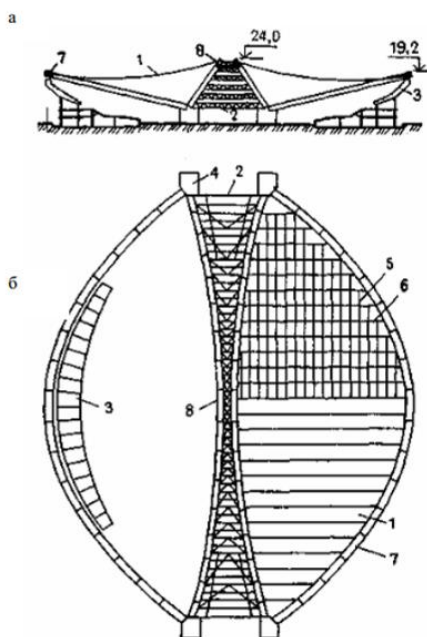
Рис. 9.55. Однопоясні системи з жорсткими вантами

а,б – схеми будівель з жорсткими вантами; в,г – Олімпійський гімнастичний зал (Токіо, Японія): 1 – жорсткі ванти; 2 – бортові опорні елементи; 3 – пілони.

2. Мембранні покриття

Несуча основа таких покриттів – тонкі сталеві оболонки-мембрани, що провисають як гнучкі нитки, працюють також в основному на розтяг і є тому економічними (товщина мембрани 2...5 мм). Перевагами мембран, крім того, є суміщення несучих і огорожуючих функцій, оскільки утеплювач і гідроізоляцію укладають безпосередньо на оболонку-мембрану, й індустріальність: мембрани виготовляють на заводі у вигляді окремих секцій, перевозять у рулонах і збирають на місці без застосування риштувань.

а) Велодром у Крилатському (Москва, Олімпіада-80) (рис. 9.56).
Загальні витрати металу 2770 т, 157 кг/м².



- 1 – мембрана $t = 4$ мм, сталь 10Г2С1;
- 2 – розпірки;
- 3 – трибуни-пілони;
- 4 – залізобетонні опори;
- 5 – направляючі стрічки (50×6 мм);
- 6 – направляючі швелери (поз. 5 і 6 утворюють «ліжко» для мембрани);
- 7 – сталеві арки – зовнішні
- 8 – хребтові арки – сталеві, внутрішні;

Рис. 9.56. Велодром з мембранним покриттям

б) Олімпійський універсальний стадіон (Москва, Олімпіада-80) (рис. 9.57). Розрахований на 45 тис. глядачів, загальні витрати металу 9300 т, 126,2 кг/м². Мембрана товщиною 5 мм підтримується гнучкими радіальними фермами, які мають стабілізуюче значення і спираються на зовнішнє залізобетонне опорне кільце.

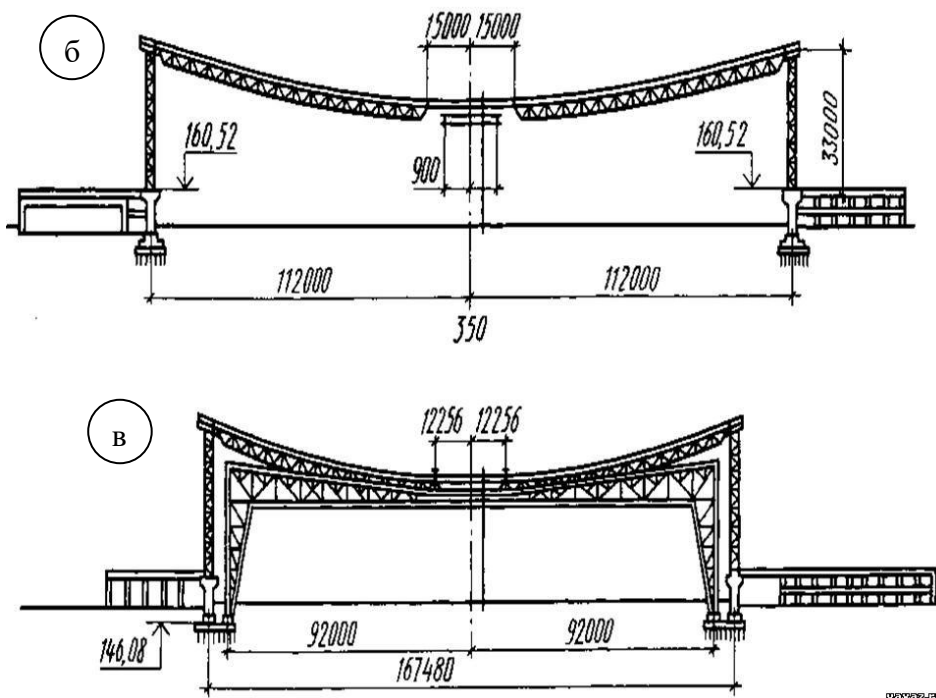


Рис. 9.57. Олімпійський універсальний стадіон з мембранним покриттям:
 а – загальний вигляд зверху; б – поздовжній розріз;
 в – поперечний розріз з рамою для розсувної сцени

9.12. Перехресні вантові системи

У перехресних вантових системах стабілізуючі троси йдуть поперек несучих. Дуже важливе питання у таких системах – вибір опорного контура.

1. Перехресна вантова система з прямокутним опорним контуром (рис. 9.58)

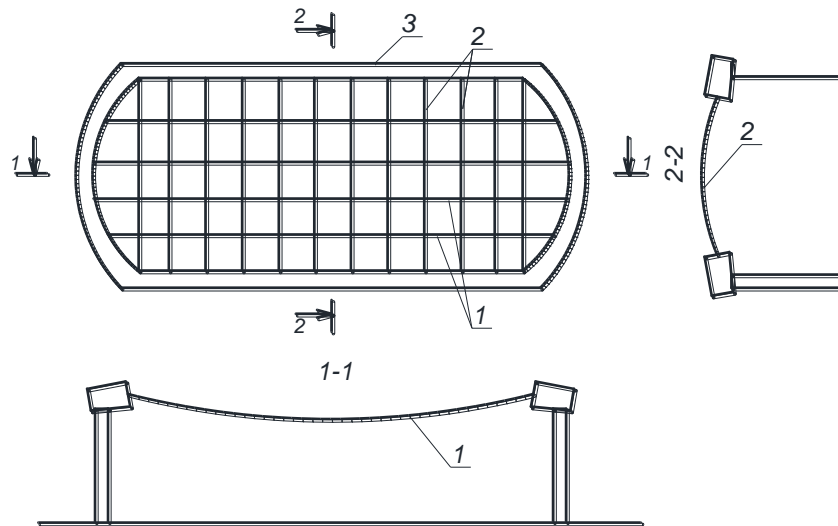


Рис. 9.58. Прямокутна перехресна вантова система;
1 – несучі ванти; 2 – стабілізуючі ванти; 3 – опорний контур (рама)

2. Сідловидне вантове покриття (рис. 9.59)

Опорний контур складають нахилені («падаючі» арки).

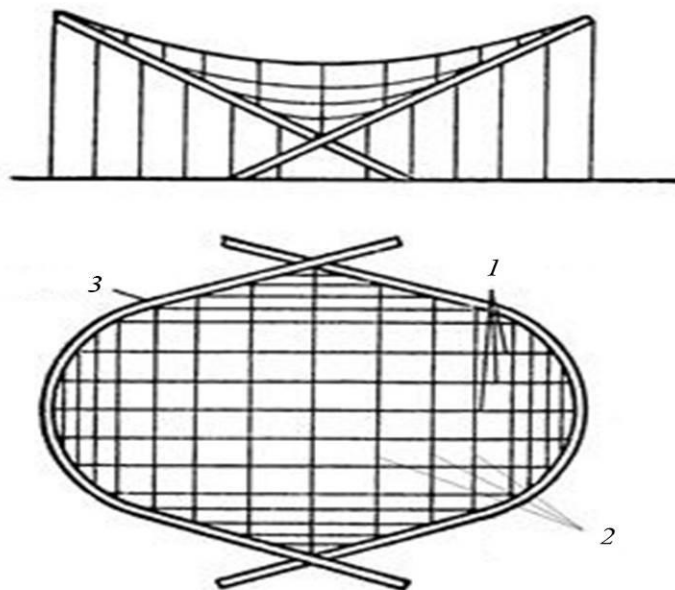


Рис. 9.59. Сідловидна вантова система:
1 – несучі ванти; 2 – стабілізуючі ванти; 3 – опорні («падаючі» арки)

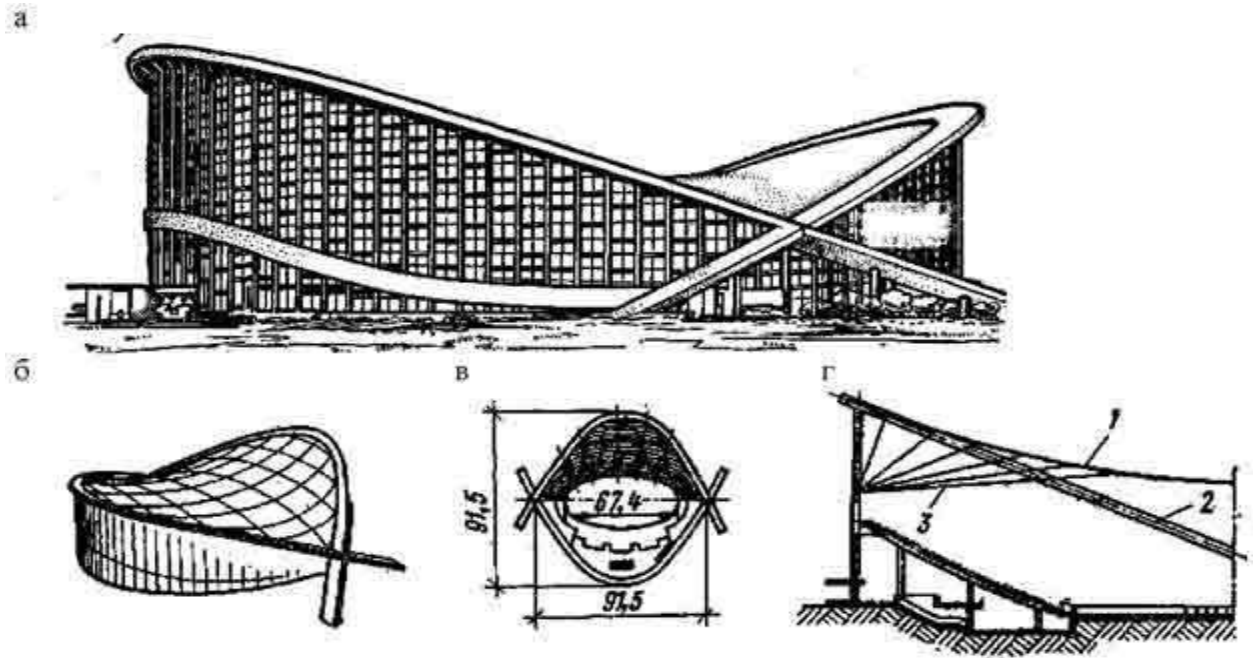


Рис. 9.60. Висяче покриття над стадіоном Релей-Арена (США)
 а – загальний вигляд; б – схема покриття; в – план стадіону;
 г – вітрові відтяжки (поз. 3); 1 – ванти; 2 – арка.

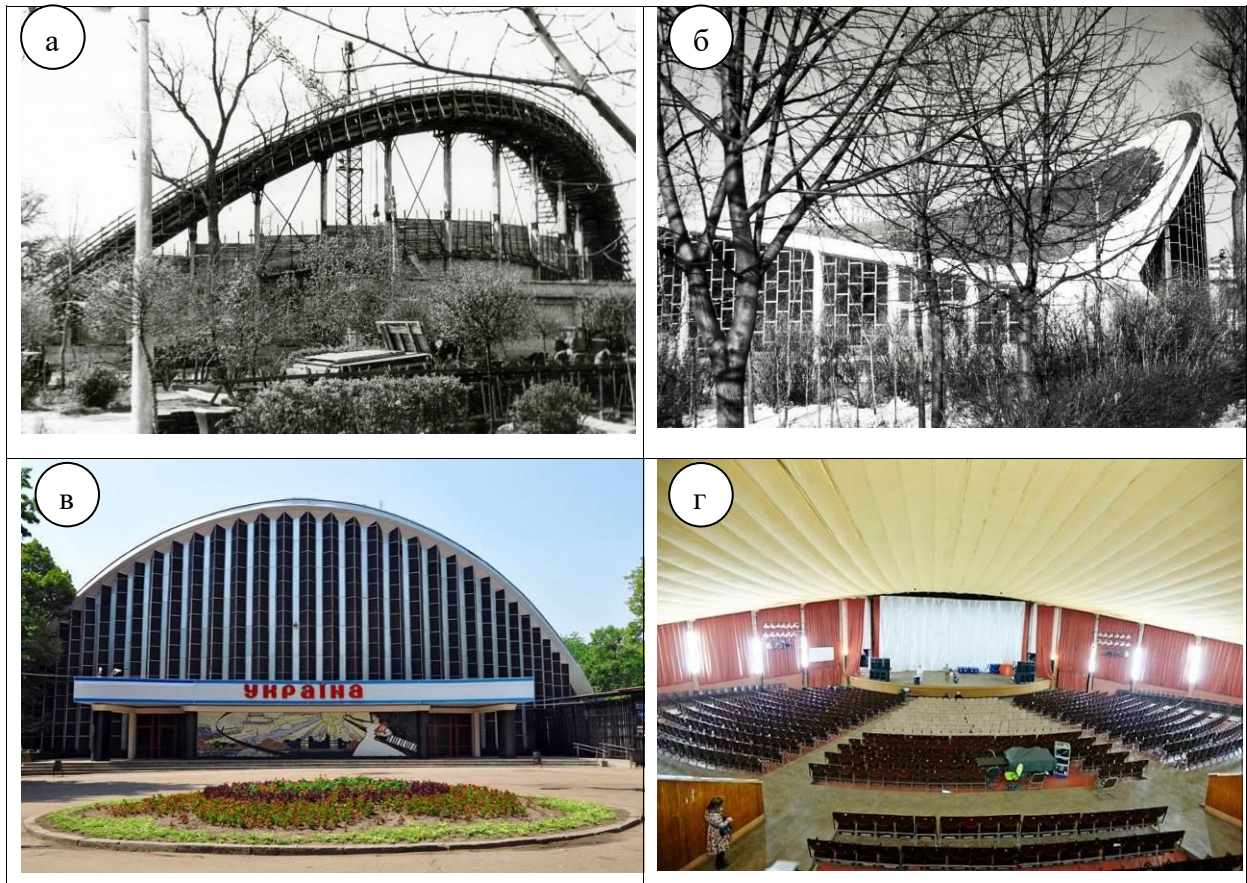


Рис. 9.61. Кіно-концертний зал «Україна» (Харків)
 а, б – епізоди будівництва; в – фасад; г – інтер'єр

3. Вантові системи з гнучкими тросами-підборами

У таких системах опорний контур виконується частково або повністю без жорстких елементів і включає гнучкі троси-підбори (рис. 9.62).

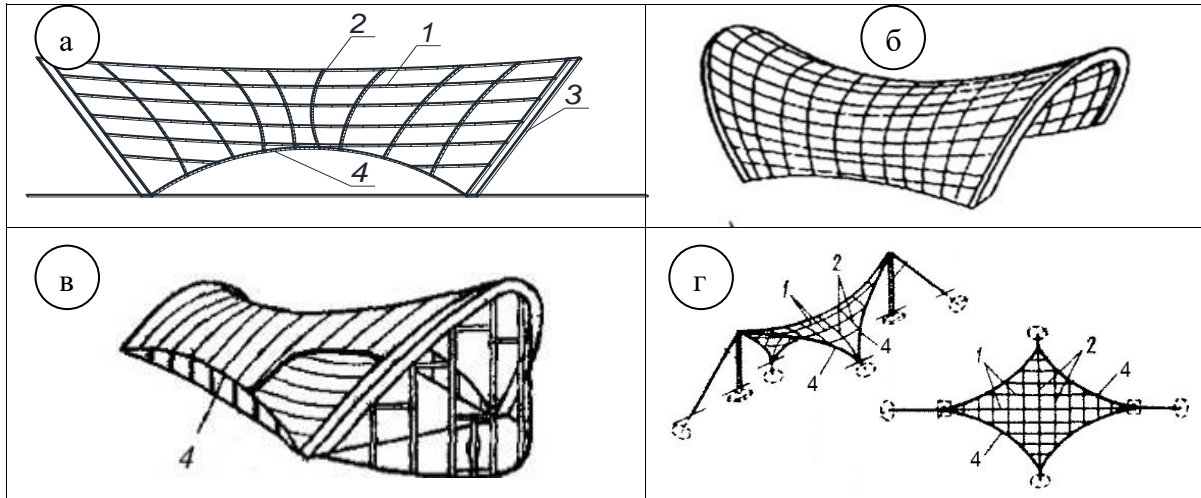
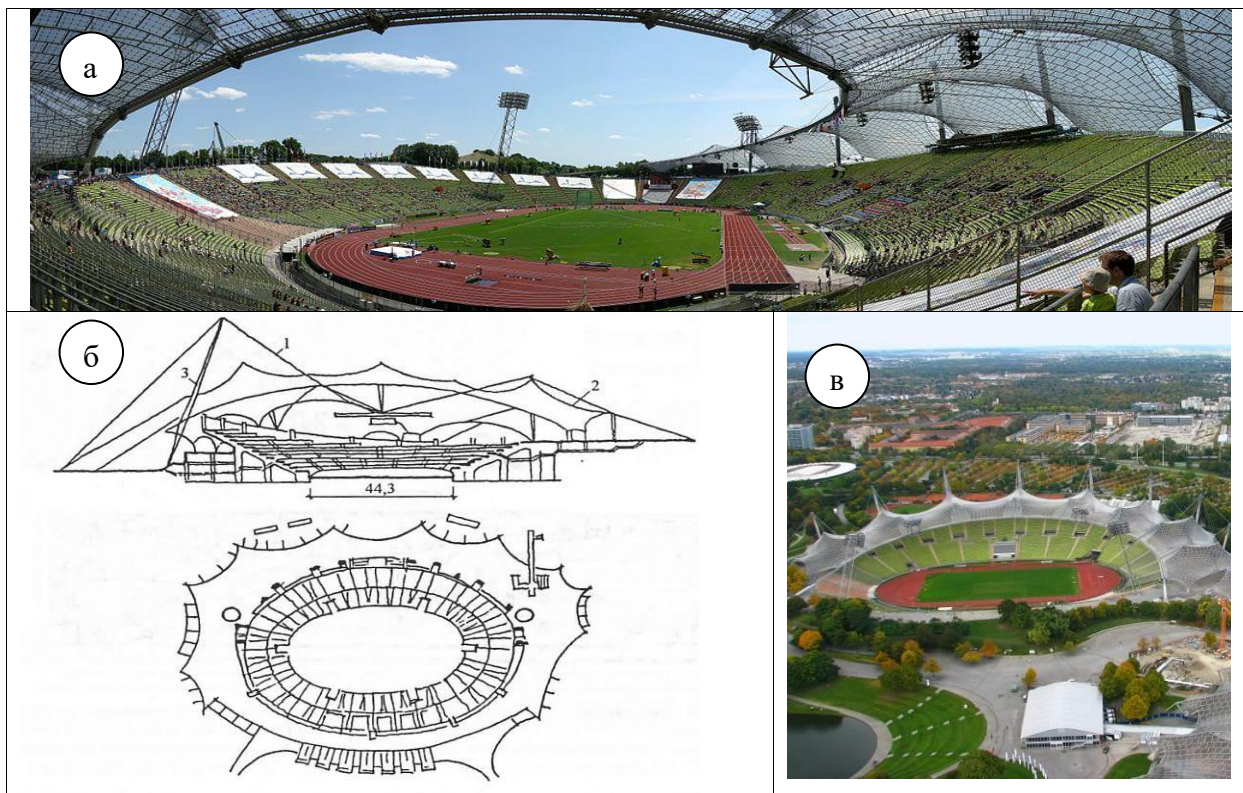


Рис. 9.62. Перехресні вантові системи з тросами-підборами:

а, б – плавальний басейн (Монако): 1 – несучі ванти; 2 – стабілізуючі ванти;
3 – «падаючі» арки; 4 – троси-підбори; в – кінотеатр (Чехія); г – вантова система з тросовим опорним контуром



9.63. Олімпійський стадіон (Мюнхен, Німеччина):

а – загальний вигляд стадіону; б – схема конструкції покриття: 1 – несуча ванта;
2 – трос-підбір; 3 – стійка; в – загальний вигляд зверху

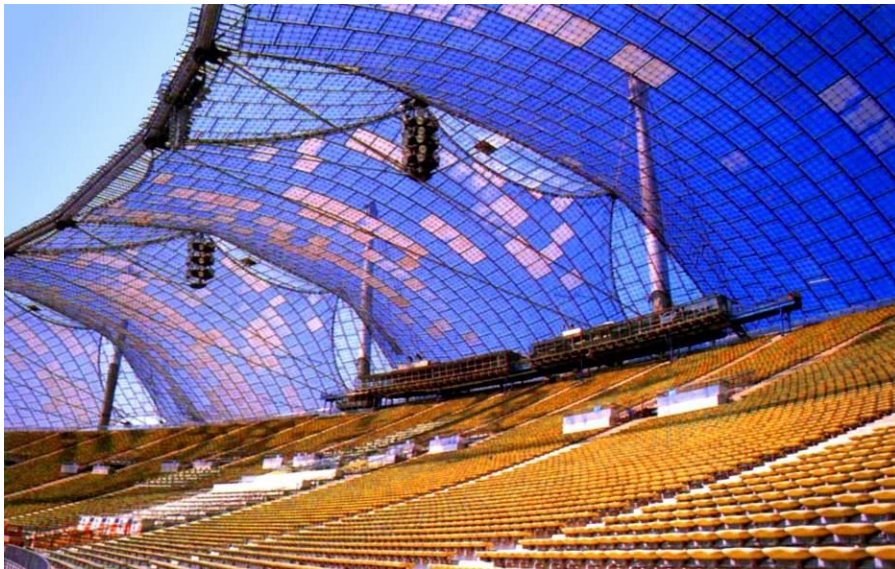


Рис. 9.64. Сігчасто-вантове покриття Олімпійського стадіону (Мюнхен, Німеччина)

Загальна характеристика вантових систем з гнучкими опорними контурами (рис. 9.63, 9.64):

1) Легкість формоутворення, різноманітні оригінальні форми покриттів, архітектурна виразність.

2) Виняткова складність конкретного втілення:

- складність розрахунку, за кордоном застосовується моделювання;
- громіздкість опорних конструкцій;
- деформативність, покриття «дихають».

Контрольні питання

1. Галузь застосування, класифікація, особливості великопролітних конструкцій
2. Балочні конструкції великопролітних покриттів
3. Рамні конструкції великопролітних будівель
4. Арочні конструкції великопролітних покриттів
5. Компоновка великопролітних конструктивних схем
6. Структурні великопролітні конструкції
7. Вузли структурних конструкцій
8. Типи і особливості висячих покритть
9. Однопоясні висячі конструкції з гнучкими вантами
10. Розрахунок гнучких ниток
11. Двопоясні висячі системи
12. Комбіновані вантові системи
13. Вантові ферми
14. Покриття з жорсткими вантами
15. Мембранні покриття
16. Перехресні вантові системи

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.