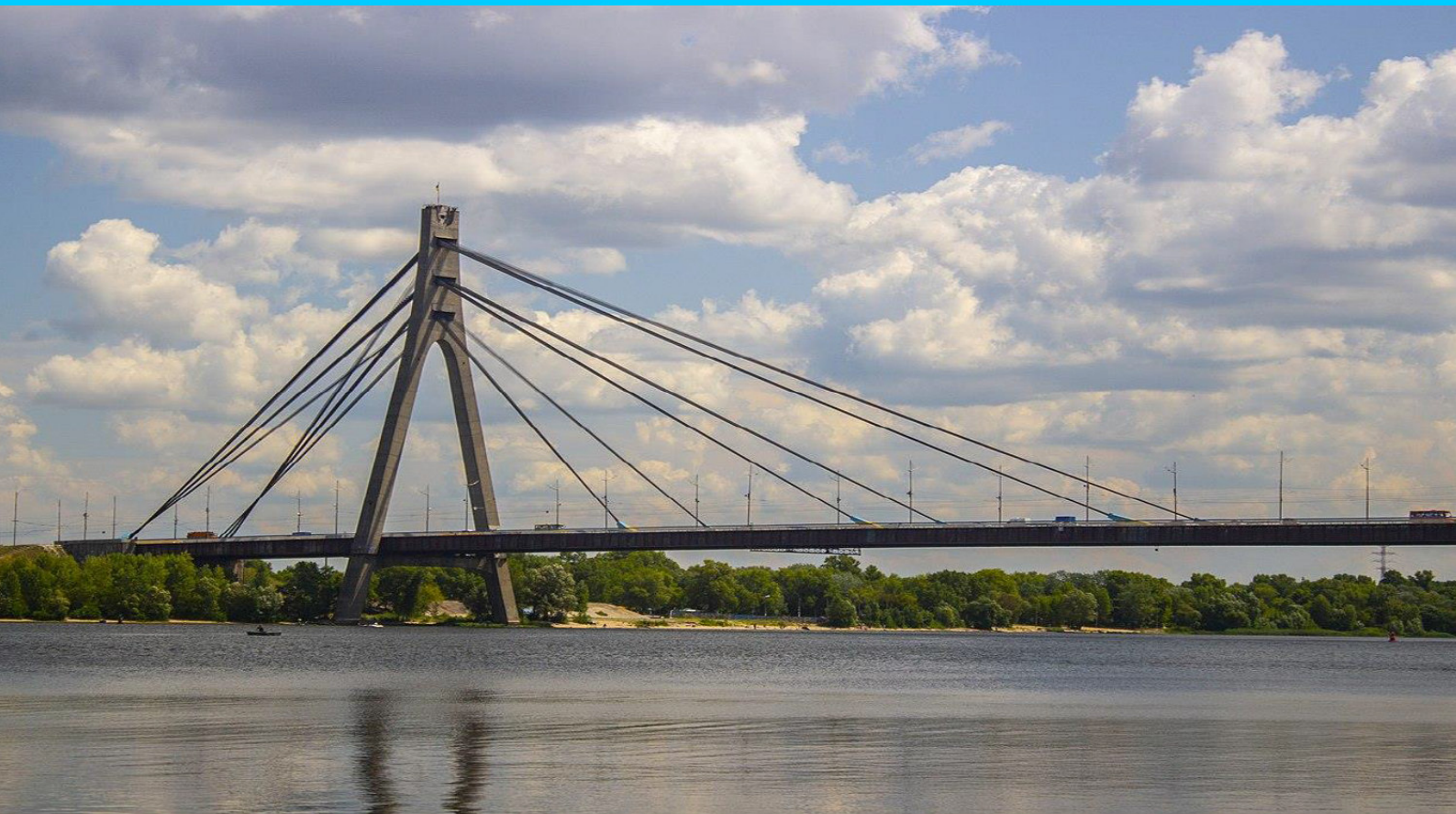


О. Г. Гуртовий

**Конструювання
підвісних і вантових
мостів**

Навчальний посібник



Рівне - 2025

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

О. Г. Гуртовий

**КОНСТРУЮВАННЯ
ПІДВІСНИХ І ВАНТОВИХ
МОСТІВ**

Навчальний посібник

Рівне – 2025

УДК 624.2/8:624.5(075)

Г95

Рецензенти:

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, зав. кафедри металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА, м. Київ;

Філіпчук С. В., доктор технічних наук, професор, зав. кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП, м. Рівне;

Подворний А. В., доктор технічних наук, професор кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки НУВГП, м. Рівне.

*Рекомендовано Вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.
Протокол № 4 від 25 квітня 2025 р.*

Гуртовий О. Г.

Г95 Конструювання підвісних і вантових мостів : навч. посіб. [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2025. – 285 с.

ISBN 978-966-327-658-8

В посібнику розглядаються питання конструювання, ескізного проектування та розрахунку основних конструктивних елементів підвісних і вантових мостів – прогонових будов (балок жорсткості), пілонів, кабелів, вант, підвісок, анкерних опор, заходи з підвищення жорсткості мостів. Розглянуто питання антикорозійного захисту канатів підвісних мостів та вант вантових мостів, питання динамічної стійкості мостів та заходи з її підвищення. Наведено численні приклади вже побудованих мостів з аналізом їх конструктивних особливостей.

Для студентів будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів, що навчаються за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі».

УДК 624.2/8:624.5(075)

ISBN 978-966-327-658-8

© О. Г. Гуртовий, 2025

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2025

З М І С Т

Передмова	4
Практичне заняття 1.	
Класифікація підвісних та вантових мостів	7
Практичне заняття 2.	
Кабелі підвісних мостів	37
Ванти вантових мостів	50
Практичне заняття 3.	
Кінцеві кріплення (анкери) кабелів та вант. Пілони підвісних та вантових мостів	57
Кінцеві (анкерні) опори. Балки жорсткості підвісних та вантових мостів	66
Практичне заняття 4.	
Підвісні мости з балками жорсткості. Одно-, дво- та трьохпрогонові підвісні мости	78
Багатопрогонові підвісні мости та заходи з підвищення їхньої жорсткості	88
Практичне заняття 5.	
Заходи з підвищення жорсткості підвісних мостів.....	98
Практичне заняття 6.	
Вантово-балочні мости.....	108
Практичне заняття 7.	
Двопрогонові та трьохпрогонові вантові мости. Багатопрогонові вантові мости та заходи підвищення їхньої жорсткості.....	118
Практичне заняття 8.	
Схеми розміщення вант у вантових мостах. Системи з малою кількістю вант та багатовантові	131
Заходи з підвищення жорсткості вантових мостів	140
Практичне заняття 9.	
Розрахунок кабелів, підвісок, пілонів, анкерних опор і балок жорсткості підвісних мостів	148
Розрахунок вант, пілонів і балок жорсткості вантових мостів	160
Практичне заняття 10.	
Динамічна стійкість та заходи з її підвищення	166
Додаток А.	
Найдовші та найвідоміші підвісні мости світу	183
Додаток Б.	
Найбільші та найвизначніші вантові мости та екстрадозні мости світу	224
Список літератури	283

ПЕРЕДМОВА

Даний навчальний посібник з навчальної дисципліни «Будівництво мостів (спекурс)» підготовлено для проведення практичних занять з студентами будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Мости і транспортні тунелі». В посібнику пропонується певна методологія проведення практичних занять. До кожної теми запропоновано певну кількість питань та викладено теоретичний матеріал до даної теми практичного заняття. Студентам пропонується в першій половині заняття самостійно опрацювати теоретичний матеріал і знайти відповіді на поставлені питання. В другій половині заняття ці питання обговорюються колективно, формулюються відповіді як за теоретичним матеріалом, так і доповнюються власним баченням студентами даної проблеми.

Весь курс дисципліни розділений на десять практичних занять. На цих заняттях розглядаються наступні питання:

Практичне заняття 1. Класифікація підвісних та вантових мостів за різними параметрами. Екстрадозні мости, їхні особливості в роботі конструкцій.

Практичне заняття 2. Схеми звивки та поперечники кабелів. Кабелі із кручених канатів та канатів із паралельних дротів. Параметри, за якими класифікуються закриті канати. Особливості конструкцій канатів із паралельних дротів. Підвищення корозійної стійкості дроту та захисту його від атмосферних опадів. Захист канатів, запропонований спеціалістами компанії Ді-Сі Браун (DC Braun), та система зневоднення канатів, що має індекс SSI 2000 (D), запропонована швейцарською компанією ВСЛ (VSL). Що собою являє вант CFCC (Carbon Fiber Composite Cable). Жорсткі та гнучкі ванти. Ванти, виготовлені за монострендною технологією.

Практичне заняття 3. Забезпечення анкерування кабелів і вант. Особливості заливних анкерів анкерних стаканів. Анкери із запресуванням дротів. Анкерні колодки. Поділ пілонів за типом жорсткості вздовж мосту. Схеми пілонів за типом будови. Типи поперечного перерізу стійок пілонів. Плюси відсутності опирання балки жорсткості на пілон. Перевірки, які необхідно зробити при визначенні розмірів анкерної опори. Функції, які виконують балки жорсткості підвісних і вантових мостів. Балки жорсткості, які доцільно використовувати для підвісних мостів, для вантових мостів. Сталезалізобетонні балки жорсткості. Критерії, запропоновані американським інженером Д. Штейнманом для визначення висоти балки жорсткості та її згинальної жорсткості у підвісних мостах.

Практичне заняття 4. Основні особливості підвісних мостів. S-подібний прогин підвісної системи, коли він виникає та як можна зменшити його величину. Підвищення економічності підвісної системи. Забезпечення однаковості зусилля в кабелі прогону та відтяжці однопрогонових підвісних мостів. З чим пов'язана знижена економічність двопрогонових підвісних мостів. Переваги трьохпрогонових підвісних мостів. Схеми трьохпрогонового моста з розрізними та з нерозрізними балками жорсткості. Найкраще співвідношення прогонів в трьохпрогоновому мості. Основна конструктивна

особливість багатопрогонних підвісних мостів. Варіанти схем компонування багатопрогонних підвісних мостів та особливості багатопрогонних підвісних мостів. Особливість зовнішньо-безрозпірних (безрозпірних) підвісних систем. Схема безрозпірного мосту із шарнірною балкою жорсткості. Переваги та недоліки безрозпірних мостів.

Практичне заняття 5. Основні заходи щодо підвищення жорсткості багатопрогонних підвісних мостів. Схема з підвищення жорсткості багатопрогонних підвісних мостів об'єднанням вершин пілонів додатковим елементом-затяжкою – кабелем жорсткості. Схема з підвищення жорсткості багатопрогонних підвісних мостів через поділ багатопрогонних підвісних мостів на кілька трьохпрогонних шляхом улаштування проміжних анкерних опор. Схема з підвищення жорсткості багатопрогонних підвісних мостів влаштуванням жорстких пілонів. Гібридні системи мостів. Підвісна система при жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону. Підвісна система моста при застосуванні похилих підвісок. Основні особливості підвісних ферм із трикутними ґратками. Схеми дволанцюгових (двокабельних) мостів. Напрямки вдосконалення форми балок жорсткості для підвищення жорсткості підвісних мостів.

Практичне заняття 6. Які системи мостів називаються вантово-балочними. Забезпечення геометричної незмінності у вантових мостах. Головне призначення балки жорсткості у вантово-балкових мостах. Регулювання зусиль у конструкціях вантово-балкових мостів. Регулювання зусиль до та після запуску споруди в експлуатацію. Способи створення попереднього напруження в вантовій системі. Схема для контролю зусиль, що діють у вантах, по стрілі провисання. Контроль величини зусиль у вантах за частотою коливань каната. Роль додаткових зворотніх кабелів (вітрових ферм). Характеристика підвісної системи при жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону.

Практичне заняття 7. Основні розміри та їх співвідношення, які приймають для двопрогонних вантових споруд. Особливість двопрогонних вантових мостів. Підвищення жорсткості двопрогонних вантових мостів. Схема двопрогонного вантового мосту з нерівними прогонами, основні розміри та їх співвідношення. Особливості двопрогонних вантових споруд з нерівними прогонами порівняно з рівнопрогонними системами. Загальна схема трьохпрогонного вантового мосту, основні розміри та їх співвідношення. Основні особливості трьох- та багатопрогонних вантових споруд. Схема роботи під навантаженням багатопрогонного вантового мосту.

Практичне заняття 8. Які за геометричною схемою розташування вант розрізняють вантові системи. Варіанти розташування вант за схемою «пучок», «віяло», «арфа» та їхні особливості. Варіанти схем мостів з малою кількістю розташування вант. Варіанти схеми моста з паралельним розташуванням вант. Заходи, що приймаються для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів. В чому полягає суть застосування вант відтяжок для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів. Продовження балки жорсткості як нерозрізної в сусідні з вантовою частиною

прогони і до чого це призводить. До чого призводить застосування залізобетонних конструкцій балок жорсткості в прогоновій частині вантово-балкових мостів. Застосування гратчастих балок жорсткості. Як впливає на роботу вант застосування жорстких пілонів. Застосування похилих пілонів.

Практичне заняття 9. За якою схемою розраховують підвісні мости і в чому переваги розрахунку за деформованою схемою. Яке співвідношення навантажень рекомендується для підвісних мостів. Варіант завантаження прогону, який вважається найнебезпечнішим для підвісних мостів. Принципова схема підвісного мосту, прийнята до ескізного розрахунку. Формула для величини розпору в підвісному мості. Формули, за якими знаходять необхідну площу поперечного перерізу кабеля за умовою міцності та за умовою жорсткості, та формула, за якою знаходять необхідну площу поперечного перерізу підвіски. Характеристики згинної та поздовжньої жорсткості пілона. Момент інерції балки жорсткості за умовою міцності та за умовою жорсткості. Обчислення ступеню статичної невизначеності будь-якої вантової системи. Як виконують розрахунок у разі виникнення у ванті зусиль стиску. Зусилля у вантах і відтяжках. Величина поздовжнього зусилля та згинальні моменти в пілоні вантового моста. Перевірка міцності перерізу пілону та його стійкості. Максимальний згинальний момент та максимальна поздовжня сила у балці жорсткості вантового моста. Загальна формула перевірки міцності перерізів балки жорсткості вантового моста для металевої конструкції.

Практичне заняття 10. Основні форми коливань конструкції моста. Оцінка періоду власних вертикальних коливань за основним тоном підвісних мостів. Резонанс. Динамічна стійкість мостів. Причина вертикальних коливань, горизонтальних коливань, крутильних коливань. Межі, в яких не повинні знаходитись розрахункові періоди вертикальних та горизонтальних коливань автодорожніх та пішохідних мостів. Як визначається частота власних коливань двопроганового вантового мосту. Конструктивні заходи та (або) демпфуючі пристрої, які застосовують для зменшення динамічних впливів (гасіння коливань). Що таке аеродинамічна стійкість мостів. Основна причина аеродинамічної нестійкості підвісних та вантових мостів. Коли виникають автоколивання споруди. Приблизне визначення критичної швидкості вітру. Критерій Р. Аммана та критерій Д.Штейнмана для аеродинамічної стійкості підвісних мостів. Шляхи для вирішення проблеми забезпечення аеродинамічної стійкості мостових споруд.

Також дано два додатки, де в додатку А подано найдовші та найвідоміші підвісні мости світу, а в додатку Б розглянуто найбільші та найвизначніші вантові мости та екстрадозні мости світу.

З матеріалом додатків пропонується ознайомитись студентам самостійно.

При підготовці даного навчального посібника використовувались матеріали лекцій Максарьова Євгенія Дмитровича та Барановського Олексія Анатолієвича, доцентів кафедри «Мости» ПГУПС, а також матеріали з літературних джерел, наукових публікацій, наведених у списку літератури, та з інтернет-джерел.

Практичне заняття 1

Класифікація підвісних та вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Які мости називають підвісними?
2. Які мости називають вантовими?
3. Які конструкції називають екстрадозними ?
4. Які найбільші прогони рекомендовані для підвісних та для вантових мостів?
5. Яка класифікація підвісних мостів?
6. Яка класифікація вантових мостів?
7. Які особливості підвісних та вантових мостів?
8. Як поділяються підвісні мости за матеріалом несної нитки?
9. Як поділяються підвісні мости за сприйняттям розпору?
10. Як поділяються підвісні мости за геометричною схемою?
11. Як поділяються вантові мости за сприйняттям розпору?
12. Як поділяються вантові мости за геометричною схемою?
13. Як поділяються вантові мости за схемою розміщення вант?
14. Хто вперше запропонував у підвісних мостах кабель замість цепу?

Матеріали для відповіді:

Підвісними називають мости, у прогонових будовах яких головними несними елементами є розтягнуті гнучкі криволінійні нитки (ланцюги або кабелі), що підтримують за допомогою підвісок балку жорсткості та передають зусилля на пілони (рис. 1.1).

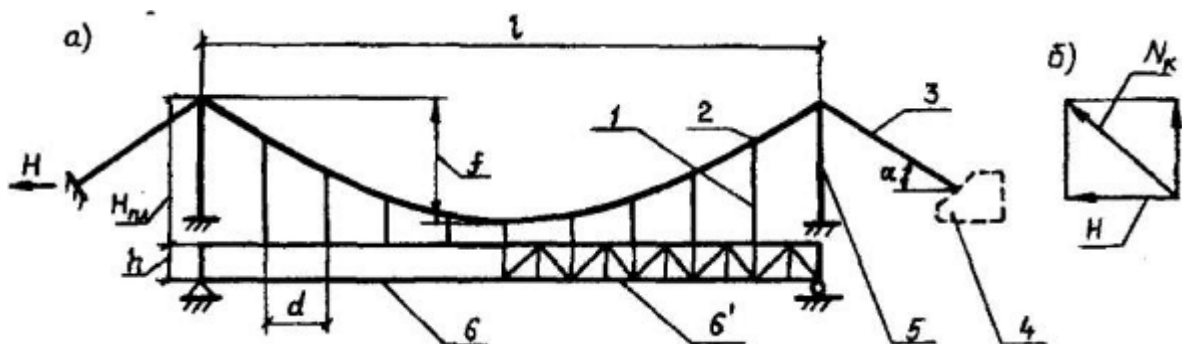


Рис. 1.1. Підвісний міст

1 – підвіска; 2 – нитка; 3 – відтяжка; 4 – анкерна опора;
5 – пілон; 6 – балка жорсткості; 6' – ферма жорсткості

На рис. 1.1 позначено: d – панель; f – стріла провисання кабеля; h – висота балки (ферми) жорсткості; $H_{пл}$ – висота пілона; L – основний прогон моста.

Вантовими називають мости, прогонові будови яких складаються з балок жорсткості та підтримуючих їх розтягнутих гнучких прямолінійних елементів – вант, закріплених на пілонах (рис. 1.2). Термін ванти (want) запозичений з голландської мови: так називали спеціальні канатні конструкції для кріплення щогл та вітрильного оснащення морських суден.

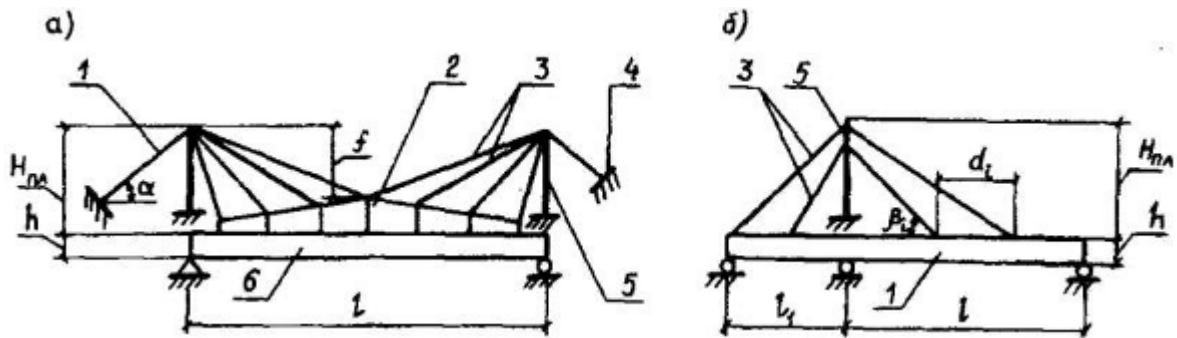


Рис. 1.2. Вантовий міст

1 – відтяжка; 2 – підвіска; 3 – ванти; 4 – анкерна опора; 5 – пілон; 6 – балка жорсткості;
 L – основний (головний) прогон моста; L_1 – бічний (прикриваючий) прогон мосту

Загальним для підвісних та вантових мостів являється наявність балки чи ферми жорсткості, пілонів, відтяжок, анкерних опор та підвісок. Відмінністю їх є форма основного несного елемента: якщо це криволінійна нитка – міст підвісний, якщо прямолінійні ванти – вантовий міст.

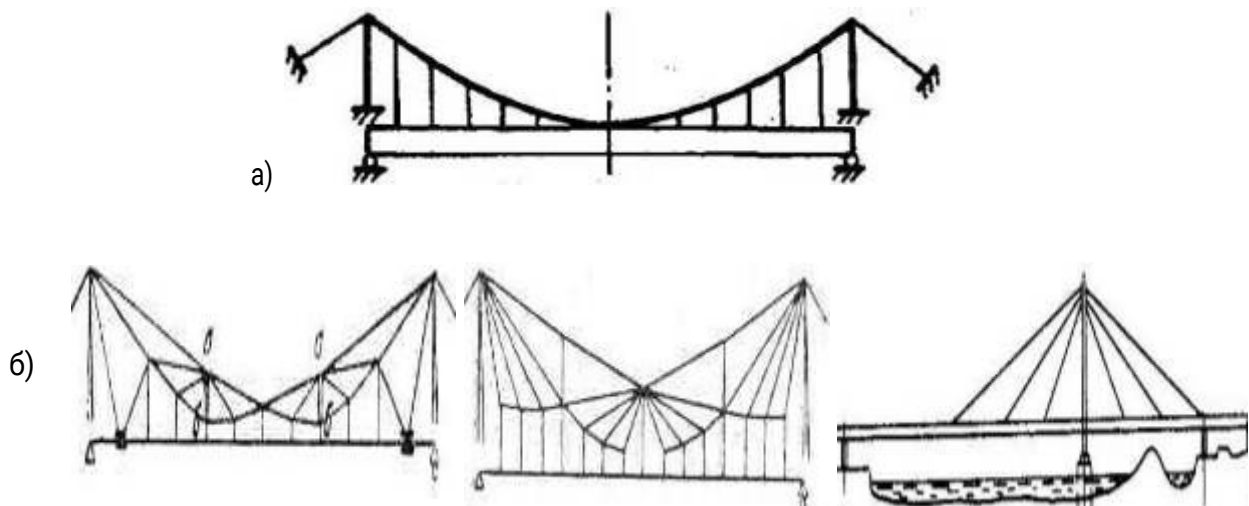


Рис. 1.3. Підвісні (схема а) та вантові (схеми б) мости

Тут варто зазначити, враховуючи схожість підвісних мостів підвищеної жорсткості і вантових мостів з ґратчастими вантовими фермами (рис. 1.3), що

остаточно розрізняють їх за двома ознаками:

- якщо кабель безперервний від пілона до пілона, якщо зусилля в кабелі на порядок перевищує зусилля в висхідних (низхідних) вантах, то міст вважається підвісним;

- якщо прогонова будова складається з окремих вант, зусилля в яких одного порядку, то міст вважається вантовим.

Класифікація підвісних мостів

1. За призначенням розрізняють мости:

- залізничні;
- автодорожні;
- міські;
- пішохідні;
- трубопровідні;
- суміщені.

2. За кількістю прогонів розрізняють мости:

- однопрогонові (рис. 1.4, д, е, ж, з, і, к);
- двопрогонові (див. рис. 1.4, а);
- трьохпрогонові (див. рис. 1.4, б, в, л);
- багатопрогонові (див. рис. 1.4, г).

3. За матеріалом балки жорсткості:

- металеві;
- залізобетонні;
- сталезалізобетонні.

Балка жорсткості дво-, трьох- та багатопрогонових мостів може бути як розрізною, так і нерозрізною системою (див. рис. 1.4, б, в).

4. За матеріалом несної нитки розрізняють мости:

- ланцюгові, що мають нитку, виконану з прокатного металу. Слід зазначити, що такі мости з 40-х років XX століття практично не будують, насамперед через тяжкість ланцюга та трудомісткість його виготовлення;

- кабельні, що мають нитку, виконану з канатів або високоміцного дроту.

5. За сприйняттям розпору розрізняють мости:

- розпірні, у яких зусилля у відтяжці передається на анкерну опору (див. рис. 1.4, в, д, е, ж, з, і, к);

- безрозпірні, у яких розпір сприймається балкою жорсткості (у таких мостах балка жорсткості працює не лише на згин, а й на стиск, що збільшує витрату матеріалу на її виготовлення, однак у схемі мосту відсутні дорогі анкерні опори).

6. За геометричною схемою розрізняють мости:

- класичної системи «нитка – балка» (див. рис. 1.4, а, б, в, г),
- системи підвищеної жорсткості (див. рис. 1.4, д, е, ж, з, і, к, л).

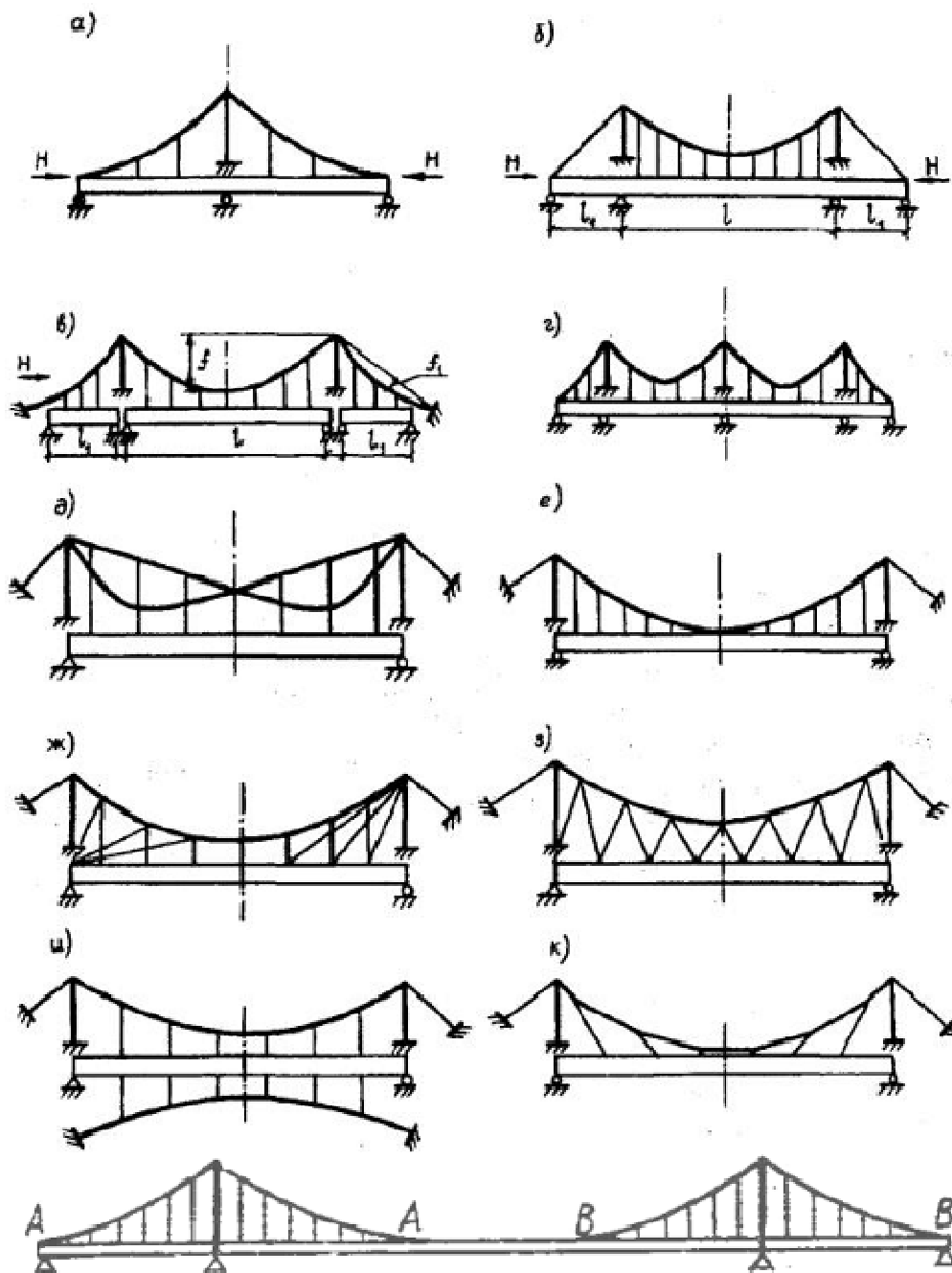


Рис. 1.4. Типи та системи підвісних мостів

Підвісні системи підвищеної жорсткості, як правило, мають величину вертикальних прогинів на 30–50% менші, ніж класичні. Збільшення жорсткості мосту (при будь-якій кількості прогонів моста) добиваються:

- застосуванням двох кабелів (так звана система С.А. Цапліна) (див. рис. 1.4, д);
- прикріпленням кабелю до балки жорсткості (див. рис. 1.4, е, л);

- постановкою додаткових висхідних і низхідних вант (див. рис. 1.4, ж);
- використанням похилих підвісок (див. рис. 1.4, з);
- застосуванням зворотнього, попередньо напруженого кабелю (див. рис. 1.4);
- комбінацією перерахованих вище способів (див. рис. 1.4, к).

Класифікація вантових мостів

1. За призначенням розрізняють мости:

- залізничні;
- автодорожні;
- міські;
- пішохідні;
- трубопровідні;
- суміщені.

2. За кількістю прогонів розрізняють мости:

- однопрогонові (рис. 1.5, а, б);
- двопрогонові (див. рис. 1.5, в, д, е);
- трипрогонові (див. рис. 1.5, г, ж);
- багатопрогонові.

3. За матеріалом балки жорсткості розрізняють мости:

- металеві;
- залізобетонні;
- сталезалізобетонні.

4. За матеріалом вант розрізняють:

- мости з гнучкими вантами, виготовленими із канатів;
- мости з жорсткими вантами, виконаними з прокату або з канатів з оболонкою попередньо напруженого залізобетону.

5. За сприйняттям розпору розрізняють мости:

- зовнішньо-розпірні (див. рис. 1.5, а, б);
- зовнішньо-безрозпірні, так звані вантово-балочні (див. рис. 1.5, в, г, д, е, ж).

6. За кількістю площин вант розрізняють мости:

- з однією площиною вант (див. рис. 1.5, з);
- з двома вертикально поставленими або двома похило поставленими площинами вант (див. рис. 1.5, з);
- з трьома і більше площинами вант.

Останніми роками застосування одноплощинних систем розширюється, так як вони особливо доцільні за наявності широких розділових смуг сучасних автомагістралей.

Системи з двома площинами вант дозволяють створити компактніші розміри прогонових будов, досягти зниження дій крутних моментів, крім того, їм притаманні більш сприятливі аеродинамічні властивості.

7. За геометричною схемою розрізняють мости:

– гратчасті вантові ферми (див. рис. 1.5, а), що мають спеціально підібрану схему розташування вант, що забезпечує їхню постійну роботу на розтяг і геометричну незмінність (такі конструкції були поширені в 30-ті роки ХХ століття, а в даний час через велику трудомісткість і через малу перекривну здатність практично не застосовуються);

– вантово-балочні мости – ці конструкції прості за схемою, ефективні за витратами матеріалів і трудомісткістю, геометрично незмінні за рахунок спільної роботи з балкою жорсткості (див. рис. 1.5, б, в, г, д, е, ж).

8. За схемою розташування вант розрізняють мости з розташуванням за схемою:

- «пучок» або радіальна (див. рис. 1.5, б);
- «арфа» або ярусно-паралельна (див. рис. 1.5, в);
- «віяло» або ярусно-витратна (див. рис. 1.5, г).

Існує також змішана схема розміщення вант, якою є комбінація названих вище (наприклад «арфа-пучок – віяло» – див. рис. 1.5, е або «зірка» – рис. 1.5, д).

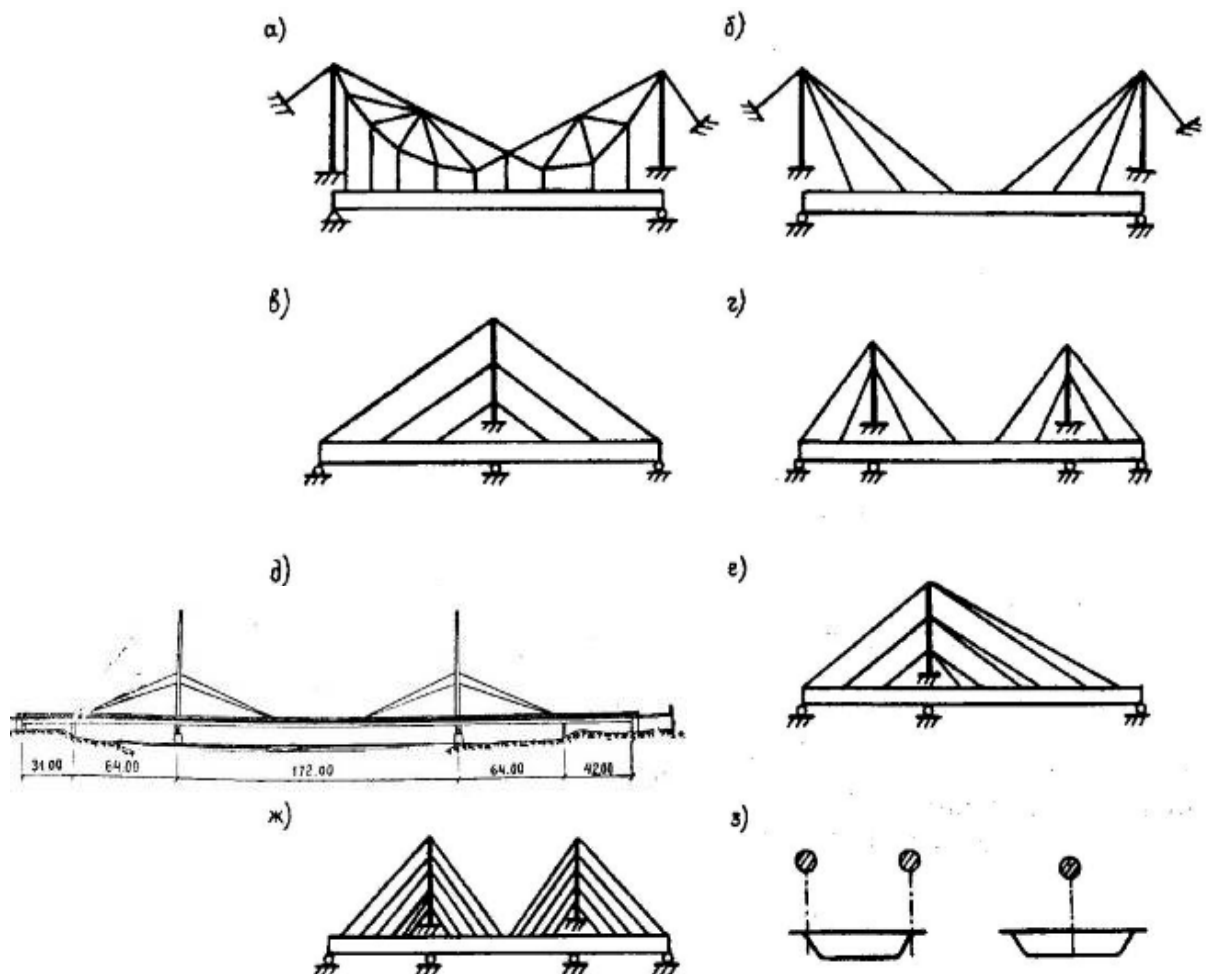


Рис. 1.5. Типи та схеми вантових мостів

Підвісні та вантові мости можуть успішно конкурувати з мостами інших систем при середніх і навіть малих прогонах, проте основне своє застосування вони знаходять в області великих і надвеликих прогонів. Починаючи з довжини прогону 500–600 м, вони не мають конкуренції і є єдиним можливим рішенням.

Необхідність влаштування прогонів надвеликої довжини обумовлена:

- вимогою великих (широких) судноплавних габаритів;
- високою інтенсивністю суднового руху та необхідністю уникнути можливих аварій при навалі суден на опори моста;
- великою загальною довжиною споруди;
- великою висотою опор споруди;
- великими глибинами води;
- мінімізацією впливу споруди на характер протікання водного потоку, а також регулюванням пропуску течій та протіканням великих водних мас;
- складними ґрунтовими умовами тощо.

У табл. 1.1 представлені деякі дані з досвіду мостобудування, проілюстровані можливості перекриття прогонів різної довжини конструкціями різних статичних систем.

Таблица 1.1

Практика застосування мостів різної статичної системи

Назва	Країна	Найбільший прогон, м	Рік відкриття
Балочні мости			
Sava River	Югославія	261,0	1956
р. Піо-Рітера	Бразилія	300,0	1974
Пр. Столмазунд	Норвегія	301,0	1998
Шибанпо	Китай	330,0	2008
Мости з однопрогоновими фермами			
Paducah-Brookpor	США	218,3	1929
Metropolis	США	219,5	1917
Chester	США	227,1	1976
Мости з нерозрізними фермами			
Tenmon -Кьо	Японія	300,0	1966
Francis Scott Key	США	365,9	1977
Astoria	США	375,0	1966
Сталеві арочні мости			
Sydney Harbor	Австралія	503,0	1932
Kill van Kull	США	503,7	1931
New River Gorge	США	518,3	1976
міст Луну	Китай	550,0	2003
Консольні мости			
John Barry	США	501,2	1974
Firth of Forth	Шотландія	518,3	1889
Quebec	Канада	548,8	1917

Як видно з наведених даних, для простих статичних систем діапазон максимальних довжин прогонів обмежений величиною 500–550 м. При подальшому збільшенні довжини прогону ці системи перестають бути раціональними, і потрібен перехід до конструкцій, що мають суттєво-більшу перекривну здатність – до підвісних або вантових.

В даний час у світі існує не менше 25 підвісних та вантових мостів з основним прогоном довжиною понад 1000м (табл. 1.2).

Враховуючи наявний на сьогодні досвід проектування, застосування різних будівельних матеріалів та технологій, а також успішний досвід будівництва великих вантових та підвісних мостів, можна стверджувати, що область використання цих систем, залежно від їх призначення, знаходиться у дуже широкому діапазоні та обмежена величиною прогонів до 1200–3500 м (табл. 1.3).

Таблиця 1.2

Найбільші в світі мости підвісної та вантової систем

Назва	Місцезна- ходження	Найбільший прогон, м	Рік відкриття
Вантові мости			
Stonecutters (міст Каменерізів)	Китай	1018	2008
Sutong (міст Сутонг)	Китай	1088	2008
Російський міст	Росія	1104	2012
Підвісні мости			
Storebalt (міст Сторебелт)	Данія	1624	1998
Xihoumen (міст Шихоумен)	Китай	1650	2008
Akashi Kakyō (міст Акасі)	Японія	1991	1998

Таблиця 1.3

Можливі діапазони прогонів підвісних та вантових мостів, м

Міст	Залізничний	Автомобільний	Пішохідний	Трубопровідний
Вантовий	400–500	100–1200	60–800	100–800
Підвісний	100–1000	500–3500	100–800	100–1500

Примітки:

1 – збільшенням жорсткості системи у підвісних мостах під залізницю намагаються виконати умову значного перевищення постійного навантаження над тимчасовим. Як правило, досягається це лише за довжини прогону понад 500 м.

2 – у вантових автодорожніх мостах перекриття прогонів до 700 м завдовжки можливе при влаштуванні залізобетонних балок жорсткості, а перекриття прогонів до 1500 м – при влаштуванні металевих балок жорсткості.

Сьогодні в стадії реалізації знаходиться проект Мессінського підвісного мосту з основним прогоном 3300м через Мессінську протоку між материковою Італією та Сицилією. Існує також кілька можливих варіантів мосту через протоку Гібралтар, що розділяє Європу та Африку, з проектом надвеликих прогонів.

Особливості підвісних та вантових мостів

1. Можливість перекриття надвеликих прогонів.

2. Різноманітність конструктивних форм, очевидні архітектурно-естетичні переваги, сучасний вигляд.

3. Висока економічність, що визначається мінімальною витратою матеріалів, вагою та вартістю на 1 м^2 корисної площі мосту (економія з витрат матеріалів на прогонову будову складає 4–5 разів у порівнянні з іншими системами).

Економічність підвісних та вантових мостів сприяє зменшенню ваги та витрат на їхні несні конструкції, що обумовлено:

- застосуванням в їх елементах високоміцних матеріалів, які в чотири–п'ять разів міцніші ($R_u = 1500 \dots 2000 \text{ МПа}$, $R_y = 215 \dots 355 \text{ МПа}$) і тільки в два-два з половиною рази дорожчі звичайної конструкційної сталі;

- раціональним використанням матеріалів, так як кабелі та ванти працюють повним перетином і тільки на розтяг від дії зусиль, що діють вздовж осі елемента;

- відсутністю потреби розвивати переріз із умови стійкості, так як у розтягнутих елементах це не потрібно;

- відсутністю ослаблення поперечних перерізів несних елементів, що призводить до мінімуму концентрації напруг і дозволяє повністю використовувати несну здатність матеріалу;

- полегшенням перерізу балки жорсткості, так як кабель з підвісками або ванти можна розглядати як проміжні піддатливі опори (як наслідок цього - мала будівельна висота балок жорсткості).

У підвісних мостах балка жорсткості практично позбавлена роботи на власну вагу і сприймає тільки тимчасове рухоме навантаження. До 80% всього постійного навантаження прогонової будови передається на кабель, тому підвісну систему можна вважати такою, що наближається до системи найменшого об'єму.

4. Можливість використання кабелю та вант для монтажу балки

жорсткості без використання тимчасових опор. В результаті – простота зведення, тобто суттєве скорочення термінів, трудомісткості та вартості будівництва. Тут варто також додати, що при перевезенні головні несні елементи підвісних та вантових мостів, згорнуті в бухти, є досить компактними вантажами.

5. Надійність у разі пошкодження балки жорсткості. Якщо у звичайній прогоновій будові (наприклад, у наскрізній фермі) вихід з ладу одного з основних елементів призведе до руйнування моста, то підвісна система може експлуатуватися при пошкодженні не одного, а кількох елементів балки жорсткості. Це пов'язано з тим, що балка не реагує на введення шарнірів, а ремонтувати її можна без перерви руху мостом.

6. Знижена жорсткість, підвищена деформативність у порівнянні з мостами інших типів.

Мала вертикальна жорсткість, що є наслідком:

- застосування високоміцних матеріалів зі зниженим значенням модуля пружності E ($\varepsilon = \sigma / E$);

- геометричної змінності головних несних елементів (кабелів) підвісних мостів та провисання вант вантових мостів;

- відсутності поперечних зв'язків та можливості самостійних коливань кожного кабелю або ланцюга, причому горизонтальні коливання менш небезпечні, а особливо небезпечні згинальні та згинально-крутильні коливання.

Мала горизонтальна жорсткість, що є наслідком малої ширини моста при суттєвій довжині прогону (відношення B/L у підвісних та вантових мостів сягає 0,02–0,01, що на порядок менше аналогічної величини в інших мостах, де $B/L = 0,1 \dots 0,2$). Балку жорсткості можна порівняти з натягнутою струною – дуже чутливою до будь-яких коливань.

7. Підвищена чутливість до динамічного та вітрового навантаження (динамічна та аеродинамічна нестійкість), що впливає з попереднього пункту розділу.

8. Значна витрата бетону на спорудження анкерних опор у разі створення розпірної підвісної або вантової системи.

9. Мала стійкість проти корозії головних несних елементів – дротів невеликого діаметру в канатах та вантах. Це змушує передбачати спеціальні заходи для запобігання корозії (захист пластмасовими плівками, оцинкування, спеціальні покриття водовідштовхувальними матеріалами), що призводить до здорожчання елементів споруди.

Екстрадозні мости

У 1988 р. французьким інженером Жаком Мотива було запропоновано і на

початку 90-х років стали з'являтися у Франції, Швейцарії, навіть Японії так звані екстрадозні (Extradosed, дослівно – «наддозування», англ.) мости (рис. 1.6 та рис. 1.7). Причому перший міст Одавара (Odawara Bridge) був побудований в 1994 р. в Японії та має рекордну на сьогодні довжину основного прогону, рівну 272 м.

Екстрадозна – це проміжна конструкція між традиційними залізобетонними попередньо-напруженими і вантовими прогоновими будовами.

Поперечний переріз залізобетонних попередньо-напружених прогонових будов залежить від розташування пучків напруженої арматури і часто вимагає збільшення товщини стінок перерізу конструкцій.

Ексцентриситет розташування напруженої арматури в надопорному перерізі балки щодо її нейтральної осі передбачає розташування пучків арматури в межах перерізу, у крайньому випадку, на рівні монолітної залізобетонної плити.



Рис. 1.6. Проекти екстрадозних мостів у Європі



Рис. 1.7. Екстрадозний міст в Угорщині

Екстрадозна система дозволяє розташувати напружену арматуру, що знаходиться в зоні опорних перерізів розрізної балки з таким ексцентриситетом, який буде оптимальним для будь-якого поєднання навантажень. Тобто у вигляді невеликої вантової ферми, що зменшує моменти в надопорних перерізах і забезпечує найкраще використання поздовжніх сил попередньої напруги.

Канати мостів екстрадозних систем відрізняються від канатів вантових мостів тим, що роль перших полягає у забезпеченні горизонтальної попередньої напруги балки прогонової будови, тоді як другі призначені для пружного сприйняття вертикальних навантажень, оскільки величина зміни напруги в канатах невисока. Внаслідок цього канати прогонових будов екстрадозних систем можна напружувати до зусиль, близьких до тих, які можна передавати на традиційні залізобетонні прогонові будови (це близько сотень тонн).

Екстрадозні системи мають у своєму складі невисокий пілон, з якого виходять пучки високоміцного дроту (ванти). У споруді створюється потужне обтиснення перерізу балки, яке гарантує її від утворення тріщин у розтягнутій зоні бетону.

Кріплення вант на вершині пілона відсутнє, ванти перегинають пілон, при цьому пілон опори не торкається – у місці його встановлення під балкою знаходиться опорна частина.

Однією з переваг системи є те, що вона дозволяє вести контроль за станом напружених пучків арматури, а також проводити обстеження, ремонт, дотягування вант, в окремих випадках їх заміну. У разі виготовлення балки із збірного залізобетону створюються сприятливі умови для врівноваженого монтажу з мінімальною кількістю допоміжних споруд, що є важливим при перетині глибоких долин, ярів та ущелин. Блоки балки підвішуються безпосередньо до вант, після чого проводиться їх натяг. Полегшується регулювання зусиль у процесі та після монтажу.

Основною відмінністю системи від вантової є відмінності у величині кута нахилу вант до горизонту. За рахунок малого кута нахилу вант різко зростає горизонтальна складова зусилля в них, що і дає сильне обтиснення нерозрізної балки в надопорних перетинах. Таким чином міст екстрадозної системи – це свого роду балковий нерозрізний міст із винесеною арматурою.

Відмінні риси таких систем від звичайних вантових та балочної системи також полягає у відношенні висоти пілону до довжини найбільшого прогону – в екстрадозних мостах вона становить $1/10$ – $1/15$ довжини, а у вантових – $1/5$ – $1/7$. Відношення висоти балки жорсткості до довжини прогону – $1/34$ – $1/36$; таке відношення забезпечує перекривну здатність до 150–160 м, а у попередньо-напружених нерозрізних балках це відношення становить $1/17$ – $1/21$.

Кут нахилу пологої ванти до горизонту становить до 15 градусів, у вантових мостах – до 20 градусів.

Приведемо також фото побудованих в останні десятиліття підвісних та вантових мостів. Це неординарні мости, основні прогони яких перекривають величезні відстані, або ж вони є носіями рекорду за шириною проїжджої частини моста.



Рис. 1.8. Міст Акасі в Японії

У 1998 р. у Японії було побудовано міст Акасі (Akashi Kaikyo) з основним прогоном 1990,8 м. На сьогодні це найбільший прогон мосту у світі (рис. 1.8).



Рис. 1.9. Міст Сторебелт в Данії

У 1998 р. через протоку Великий Бельт у Данії у складі мостового та тунельного переходів повною довжиною 18км було відкрито міст Сторебелт (Storebelt Bridge), основний прогон якого має величину 1624 м (бічні – по 585 м). Висота пілонів мосту становить 254 м, при цьому, Сторебелт – найдовший і найвищий підвісний міст у Європі (рис. 1.9).



Рис. 1.10. Мостовий перехід через протоку Ересунн між Данією та Швецією довжиною 16,2 км з тунелем та вантовим мостом із основним прогоном 490 м, побудований у 2000 р.

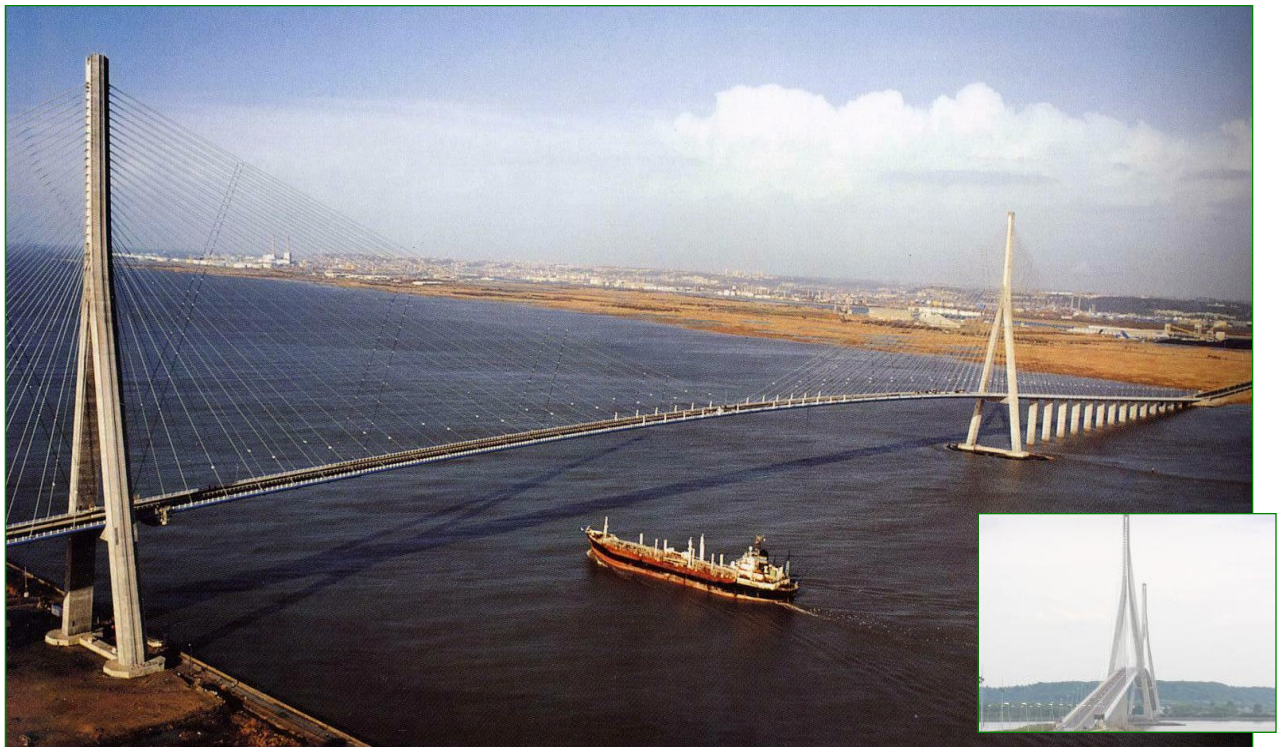


Рис. 1.11. Міст Нормандія (Normandie) з основним прогоном 856 м. Перший великий вантовий міст світу, збудований у 1995 році. Вперше припілонні ділянки балки жорсткості споруджені із попередньо напруженого залізобетону (як анкерні блоки), а центральна частина прогону – зі сталі



Рис. 1.12. Міст Едун (Edong) з основним прогоном завбільшки 926 м у Китаї.
Міст збудований у 2010 році



Рис. 1.13. Міст Закім (Leonard P. Zakim Bunker Hill bridge) через річку Чарлз у Бостоні, США.
Міст має ширину 54 м – найширший вантовий міст у світі. Міст збудований у 2003 році

Вантові мости України

Вантові мости із залізобетонними балками жорсткості та пілонами стали застосовувати нещодавно. Перший був побудований у Венесуелі через озеро Маракайбо 1962 р., другий – в Україні через Київську гавань, ріка Дніпро в 1963 році (**Рибальський вантовий міст**). Споруджений за проектом інституту «Укрпроектстальконструкція». Автори проекту – інженери А. Гольдштейн, В. Кириєнко, Н. Соколова. Загальна довжина мостового переходу 474,3 м (лівобережна естакада – 82,3 м, руслова частина – 275,7 м, правобережна естакада – 116,3 м). Руслову частину моста перекрито трипрогоною нерозрізною вантовою будовою (65,85 + 144 + 65,85 м), симетричною відносно двох залізобетонних пілонів (заввишки 42 м) з радіальним розташуванням вантів, виготовлених зі сталевих канатів діаметром 72 і 55 мм. Прогони перекривають дві головні балки П-подібного перерізу з відстанню між осями 9,6 м. Проїзду частину складено з Т-подібних залізобетонних елементів завширшки 1,5 м, які спираються на внутрішні стінки головних балок.

За своїми архітектурними та конструктивними формами був цінною пам'яткою 1960-х років. З початку 1990-х років, у зв'язку з аварійним станом конструкцій мосту, ним було припинене автомобільне сполучення, а за кілька років під міст було підведено додаткові опори. Останні роки експлуатації був винятково пішохідним.

У травні 2020 року з мосту зрізали ванти та почався активний процес демонтажу аварійних конструкцій мосту.



Рис. 1.14. Міст через Київську гавань (Рибальський міст), ріка Дніпро. Київ

Північний міст (до 2018 року — Московський міст) — міст через Дніпро у Києві, пам'ятка архітектури. Введений в експлуатацію 3 грудня 1976 року. Інженери Г. Б. Фукс, Б. М. Гребень, Є. А. Левинський, Б. С. Романенко, архітектор А. В. Добровольський.

Північний міст почали проектувати в 1968 році. Завданням проектувальників на чолі з Георгієм Фуксом було зробити максимально довгий прогон мосту. Це було потрібно для проходу великих суден. Це завдання вирішили завдяки вантовій конструкції. Будувати міст почали в 1971 році.

Північний міст став першим у СРСР вантовим мостом з одним пілоном. Складається з вантового мосту через Дніпро (довжина 816 м, ширина — 31,4 м), мосту через Десенку — (довжина 732 м) та шляхопроводу через проспект Володимира Івасюка (довжина 55 м).

Судноплавна частина Північного мосту перекрита однопілоною вантовою системою, розміщеною біля лівого берега; правобережна частина моста — естакада з прогонами по 63 м. Сталеву балку жорсткості у вантовому прогоні підтримують ванти із сталевих канатів (по 20–40 канатів у ванті). Загальна довжина вантових канатів 54,6 км. Канати були виготовлені на заводі і привезені до Києва вже в готовому стані. Усі металоконструкції виготовлені підприємством «Воронежстальмост» у Воронежі.

Ванти спираються на А-подібний пілон (висота — 119 м). Висота від проїзної частини до склепіння пілону 53 м. У двох ногах пілону розташовано по одній монтажній шахті із залізними драбинами у 8 прольотів кожна. Над склепінням тунелі сходяться. Усередині пілону є кімнатка площею близько 10 м². Угорі на пілоні — скульптурне зображення герба Києва (скульптори Б. С. Довгань, Ф. І. Юр'єв). З кожного боку від гербу існує по одному балкончику.

Довжина вантового прогону, який розташований біля лівого берега, складає 300 метрів. Він підвішений за пілон висотою 119 м вантами зі сталевих канатів. Правобережна частина мосту через Дніпро — естакада з прогонами по 63 м.



Рис. 1.15. Північний міст. Київ

Південний міст — вантовий міст через Дніпро в Києві. Найвищий міст Києва (висота пілону 133 м). Розташований в Голосіївському та Дарницькому районах.

Довжина мосту — 1256 м, ширина — 41 м. Мостом проходить Сирецько-Печерська лінія київського метрополітену. Міст сполучає Саперно-Слобідську вулицю та Столичне шосе (правий берег) із проспектом Миколи Бажана (житловий масив Позняки) на лівому березі річки Дніпро, є частиною автошляху міжнародного значення М03Е40.

Проектувати Південний міст почали незабаром після відкриття Північного моста. Він мав з'єднати центр Києва з лівобережними районами, які активно розбудовувалися, лінією метро й автомагістраллю. Крім того, міст мав стати більш зручним автошляхом до аеропорту в Борисполі.

Будівництво було започатковано 1983 року, автомобільний рух мостом відкрито 25 грудня 1990 року, рух поїздів метро — 30 грудня 1992 року. Автор проекту та головний інженер — Заслужений будівельник України Фукс Георгій Борисович. Це третій міст через Дніпро в Києві, участь у проектуванні якого брав Георгій Фукс. Міст вважався найсучаснішим на території СРСР, на будівництво було витрачено близько 112 мільйонів карбованців (близько 200 мільйонів доларів). Це перший вантовий міст із рейковим транспортом, збудований у СРСР. Інженери вирішили зробити Південний міст вантовим, однопілоновим, щоби забезпечити великий проліт для річкового транспорту.



Рис. 1.16. Міст Південний. Київ



Рис. 1.17. Кріплення вант Південного мосту у Києві

Вантова частина мосту виконана зі сталі, вона підвішена на вантах за 133-метровий пілон. Коли проєкт моста тільки розробляли, у пілоні моста хотіли відкрити ресторан. Але зрештою від ідеї відмовилися. Оскільки пілон стоїть посередині моста, то відвідувачам довелося б йти туди пішки. До того ж були проблеми з підведенням комунікацій.

Довжина судноплавного прогону складає 271 м. З правого берега до неї веде балкова естакада зі збірного залізобетону. Загальна довжина мосту 1256 м. Ширина мосту 41 м. Кількість смуг руху – 3+3.

Новий міст через Дніпро та Старий Дніпро – споруджуваний автомобільний мостовий перехід у Запоріжжі. Генпроектувальник мостового переходу – АТЗТ «Київсоюзшляхпроект», Київ. Головний інженер проекту – Іван Панасюк, головний архітектор проекту – Олег Заварзін, інженер-конструктор мостових споруд – Михайло Корнієв, інженер-конструктор наземних естакад – Ольга Сергєєва, інженер електротехнічного забезпечення – Леонід Етніс. Офіційна назва – Під'їзд до острова Хортиця (автотранспортна магістраль через р. Дніпро у м. Запоріжжі).

Складається із двох мостів та автомагістралі безперервного руху завдовжки 9,1 км, що складається з шести транспортних розв'язок та 27-ми штучних споруд, частиною яких є два позакласні мости з окремими спорудами під кожний напрямок руху. Будівництво розпочате 30 серпня 2004 року. Перспективний план введення в експлуатацію першої черги – 2021 рік. Вартість будівництва раніше становила \$460 млн, станом на 2020 рік загальна вартість оцінюється у 11,9 млрд ₴ (з ПДВ).

Висота найвищого пілону мосту становитиме 151 м, що робить запорізький міст найвищим в Україні.

25 квітня 2021 року почали монтувати перший прогон вантового моста через Дніпро. Весь прогон, який складається з 6 секцій, було заплановано змонтувати на початку травня. За допомогою плавучого крану LK-800 «Захарій» змонтована перша секція на тимчасові опори. Вага однієї секції – 720 т, довжина – 84 м.

6 травня 2021 року плавучий кран Lifting LK-800 «Захарій» під час виконання робіт натрапив на підводну скелю, в результаті чого у нього було пошкоджено днище. Кран тимчасово призупинив свою роботу з будівництва вантового моста.

21 липня 2021 року до Запоріжжя доставили першу партію нових вант для низової частини вантового моста. Нові ванти виробництва швейцарської компанії «Fatzner AG», яка спеціалізується на виготовленні сталевих тросів.

26 липня 2021 року плавучий кран «Захарій» встановив п'яту секцію мостової балки вагою 504 т – найлегшу з усіх секцій, які вже були встановлені на верхову частину моста, а вже 28 липня 2021 року завершено монтаж останньої шостої секції вагою близько 700 т і довжиною 80 м верхової гілки вантового моста з лівого берега річки Дніпро на острів Хортиця. Загалом було змонтовано 660 м верхової частини моста.

10 серпня 2021 року мостобудівники приступили до бетонування пілонів вантового мосту. Після завершення робіт міст стане найвищим в Україні –

висота пілонів становить 151 м. У бетонуванні пілонів задіяний кран «Terex», висота якого становить близько 190 м.

Станом на 6 жовтня 2021 року об'єднані всі секції верхової частини споруди № 10 (першого вантового мосту), що сполучили два береги річки Дніпро, також тривали роботи з монтажу вант.

30 жовтня 2021 року розпочався монтаж перших вант на верховій споруді № 10. Таким чином мостобудівники запланували монтаж по три ванти на день під наглядом геодезистів.

2 грудня 2021 року на споруді № 10 автотранспортної магістралі через Дніпро у місті Запоріжжі відбулася історична подія – змонтовано всі 48 вантових канатів. Останній, як і попередні три, найдовші. Довжина їх, при закріпленні на найвищі вуха, 220 м, вага – 12,65 т. Монтаж останнього вантового каната зайняв близько двох годин. Спочатку ванта, за допомогою крана «TEREX», була заведена у монтажний відсік пілону, потім другий кінець був закріплений до вуха прогонової будови мосту.

У грудні 2021 року служба автомобільних доріг України презентувала проєкт архітектурного прикрашання пілону, вант та інших елементів мосту сучасною та яскравою LED-підсвіткою у національному стилі.

16 грудня 2021 року, після завершення будівельних та дорожніх робіт на підходах до вантового мосту, що входить до складу автотранспортної магістралі через річку Дніпро, проведені дослідження несної здатності конструкцій. Експериментальні дослідження несної здатності конструкцій споруд № 13 та № 14 проводились за участі інженерів та геодезистів підрядної організації – компанії «Онур», а також експертів державного підприємства «ДерждорНДІ», які здійснюють науково-технічний супровід будівництва.

17 грудня 2021 року мостобудівники змонтували останню секцію низової частини вантового мосту, що монтується з води. Несамохідний плавучий кран LK-800 «Захарій» доставив секцію з будівельного майданчику № 1, що в районі Кривої бухти, до споруди № 10 (вантовий міст) автотранспортної магістралі через річку Дніпро. Це була остання робота крану LK-800 «Захарій» на запорізьких мостах.

22 грудня 2021 року стало відомо, що проїзд вантовим мостом буде відкрито на початку 2022 року.

На початку січня 2022 року мостобудівники розпочали передостанній етап робіт – монтаж деформаційних швів. Вони призначені для вільного переміщення прогонових будов у місцях з'єднання споруд (плити проїзної частини). Шви забезпечують плавний проїзд автомобільного транспорту. Деформаційні шви MAURER DS560 німецького виробництва в Україні застосовуються вперше. Унікальність цих конструкцій полягає в тому, що вони здатні приймати поздовжні, поперечні та вертикальні переміщення від

навантаження транспорту та температури. Усього передбачено змонтувати два таких деформаційних шва, вагою 16,750 тонн кожен. Один з боку лівого берега – на місці з'єднання споруди № 10 з спорудою № 11, інший – з боку острова Хортиця, де прогонова будова мосту з'єднується із спорудою № 9.

12 січня 2022 року оприлюднено документ про дату відкриття проїзду автотранспорту верховою частиною вантового мосту – 22 січня 2022 року, у День соборності України.

18 січня 2022 року вантовий міст пройшов перевірку на міцність.

За контрактом мости повинні бути побудовані до 2024 року. Проте планувалось завершення будівництва до кінця 2022 року.



Рис. 1.18. Будівництво вантового мосту у Запоріжжі, 2015 рік



Рис. 1.19. Вантовий міст у Запоріжжі. Квітень 2020 року



Рис. 1.20. Вантовий міст у Запоріжжі 11 січня 2022 року

Міст у Чугуєві на Харківщині – вантовий пішохідний міст з оглядовим майданчиком (повідомлення про завершення реконструкції та відкриття пішохідного мосту, який з’єднує центральну частину міста з районом Зачугівка

від 11.11.2021 р.). Розташований він на км 538+800 автомобільної дороги М-03 Київ-Харків-Довжанський. Довжина пішохідного мосту становить 65 метрів, а ширина – 2,8 метра.



Рис. 1.21. Вантовий міст у Чугуєві

Міст у м. Коростень Житомирської області через річку Уж – вантовий пішохідний міст, побудований в 70-ті роки 20-го століття.



Рис. 1.22. Вантовий міст, м. Коростень

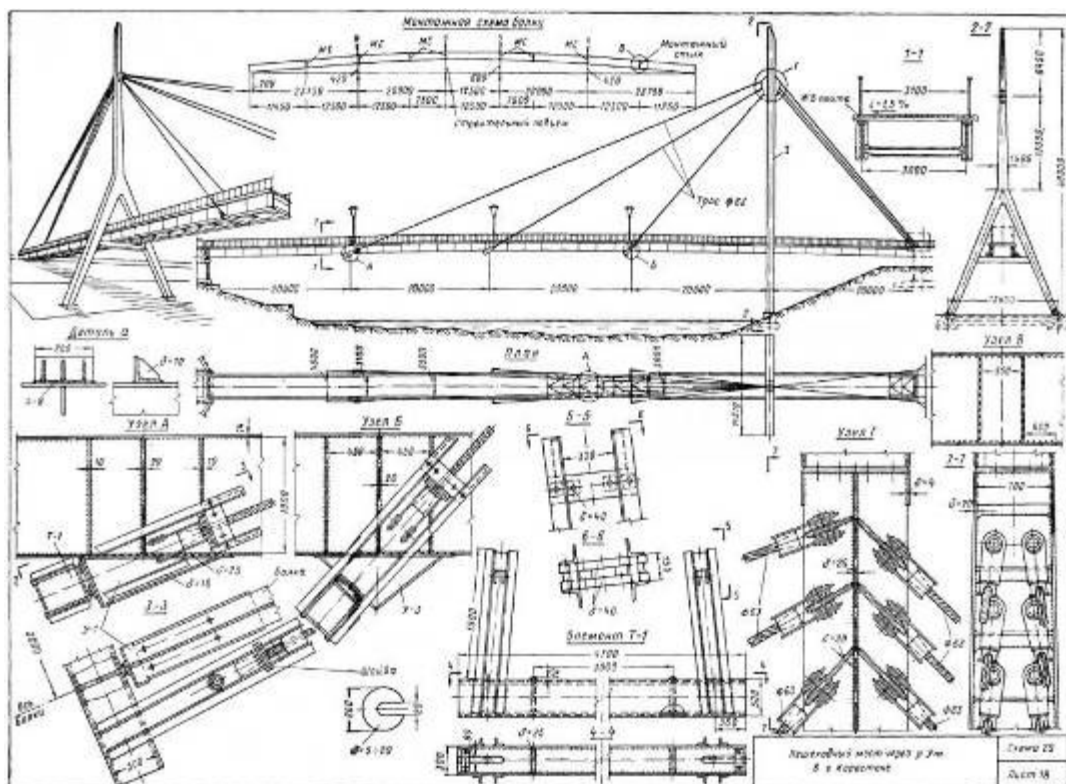


Рис. 1.23. Проект вантового моста, м. Коростень

Підвісні мости України

Парковий міст через Дніпро – це пішохідний суцільнозварний підвісний міст, збудований у 1956–1957 роках. Зведений міст за проєктом інституту «Укр-проектстальконструкція» за участю Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона. Автори проєкту – інженери А. О. Гомін, В. І. Кириєнко, В. О. Сич, Г. П. Фень, О. Шумицький, М. М. Константинов, Б. П. Петров та архітектори О. І. Заваров, В. Суворов. Парковий міст сполучає правий берег Києва із Трухановим островом, де розташовуються пляжі, паркова зона.

Довжина моста 429 м, ширина пішохідної частини – 7 м. Складається з трьох центральних прогонів підвісної будови і берегових ділянок балкової конструкції. Центральні прогони за схемою $60 + 180 + 60$ м підняті над рівнем річки на 26 м, що забезпечує прохід суден при найвищих рівнях води. Параболічні за абрисом та жорсткі за конструкцією ланцюги (зварені з металевих листів) закріплені на двох пілонах рамної форми заввишки 32 м. Вертикальні підвіски обабіч дороги з кроком 10 м зроблені зі сталевих кутників. Дорожнє полотно із залізобетонних плит спирається на дві двотаврові зварні балки (висота 2,4 м). Берегові частини вирішені у вигляді балкових сталезалізобетонних прогонових будов: на лівобережній ділянці – три прогони по 36 м, на правобережній – один прогон 17,9 м. Опори моста – залізобетонні, рамної конструкції. Основи всіх опор – залізобетонні забивні палі (переріз 35×35 см, довжина від 9 до 13 м). З висоти 26 метрів над водою з моста є можливість милуватися краєвидами Дніпра, узбережжям з низкою пам'яток.



Рис. 1.24. Підвісний Парковий міст через Дніпро

На підвісному мості в Шептицькому тривають роботи. Підвісний міст через Західний Буг намагаються реконструювати з 2021 року. Працівники підрядної організації ПП «Промтехвод-Ч» продовжують роботи на підвісному мості. Наразі один із канатів уже приведено в проектне положення, і спеціалісти закріплюють підвіси та талрепи. Ці елементи з'єднують металеву прогонову частину моста з канатами, забезпечуючи її надійну фіксацію.



Рис. 1.25. Підвісний міст в Шептицькому через Західний Буг

Пішохідний підвісний міст через річку Тетерів (Житомир) у парку. Побудований у 1982 році. Розташований на висоті близько 43 метри над землею. Його довжина 350 м.

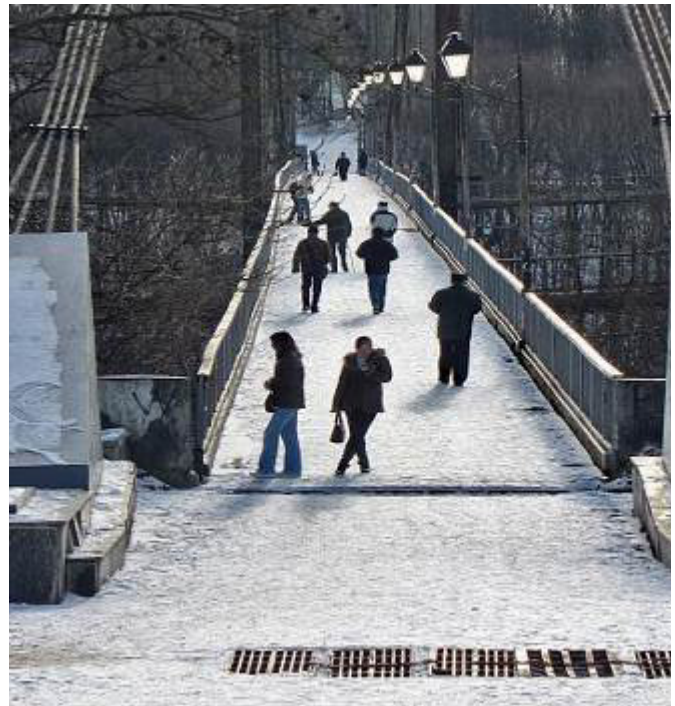


Рис. 1.26. Пішохідний підвісний міст через річку Тетерів

Підвісний пішохідний перехід через річку Рось в Богуславі Обухівського району. Довжина мосту 80 м.



Рис. 1.27. Пішохідний підвісний перехід через річку Рось в Богуславі



Рис. 1.28. Пішохідний підвісний перехід через річку Рось, Городище-Пустоварівське, Щербаки

І дещо з історії мостобудування в Києві.

Миколіївський ланцюговий міст — перший капітальний міст через Дніпро у Києві, що існував у 1853—1920 роках.

Міст споруджений за проєктом і під керівництвом британського інженера Чарльза Вінйоля. Будівництво мосту було розпочате 30 серпня (11 вересня)

1848 року після затвердження проєкту імператором Миколою I, на честь якого міст й отримав свою назву. Металеві конструкції моста було виготовлено в Бірмінгемі.

На п'яти облицьованих гранітом опорах-«биках» були споруджені портали у вигляді напівкруглих арок з баштами в стилі англійської готики. На опори помістили спеціальні короби, через які провели ланцюги з залізних ланок. Мостове полотно складалося з ґратчастих балок, які кріпилися до ланцюгів за допомогою залізних прутів. Фундаментом проміжних опор служив бетонний масив, закладений прямо на ґрунті в огороженій перемичками улоговині.

Міст ланцюговий, шестипрогоновий завдовжки 776 м і завширшки 16 м був одним з найбільших архітектурних досягнень свого часу. Це найбільший ланцюговий міст Європи середини XIX століття. Довжина найближчого конкурента – моста Сечені в Будапешті – 375 м. Срібна модель мосту була виставлена у Лондоні на Всесвітній виставці 1851 року. Освячення моста збіглося з датою освячення пам'ятника князю Володимирі і відбулося 28 вересня (10 жовтня) 1853 року.

9 червня 1920 року за наказом генерала Е. Ридза-Сміглого міст був підірваний відступаючими польськими військами, відновити його за старим проєктом не вдалося.



Рис. 1.29. Вигляд на Ланцюговий міст з лівого берега Дніпра, між 1890 та 1898 роками

10 травня 1925 року був відкритий новий міст балкової конструкції (за проєктом Є. О. Патона) на опорах колишнього Ланцюгового мосту, що був

названий на честь функціонерки окупаційного більшовицького уряду Євгенії Бош.



Рис. 1.30. Міст імені Євгенії Бош

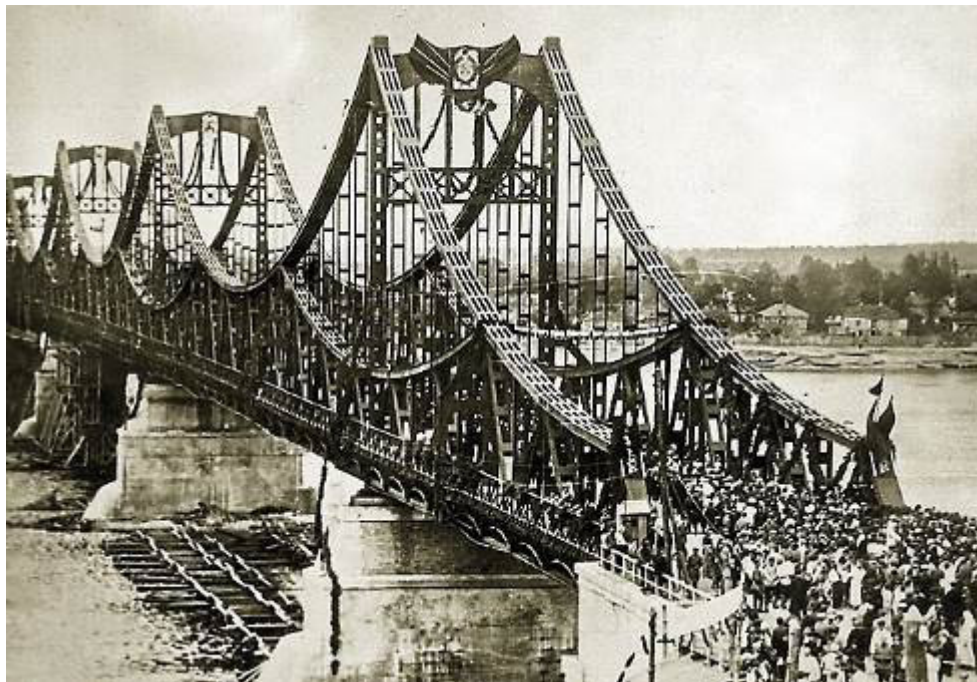


Рис. 1.31. Міст імені Євгенії Бош

19 вересня 1941 року міст був зруйнований остаточно, підірваний відступаючою Червоною армією. Після Другої світової війни не відновлювався.

Практичне заняття 2

Кабелі підвісних мостів

Питання для відповіді:

1. Які фізичні параметри та особливості кручених спіральних канатів одинарної звивки?
2. Як виглядають схеми звивки та поперечники кабелів із кручених канатів та канатів із паралельних дротів?
3. Які фізичні параметри та особливості кручених спіральних канатів подвійної звивки (багатопрядних)?
4. Які фізичні параметри та особливості кручених закритих канатів?
5. За якими параметрами класифікуються закриті канати?
6. Які вимоги до довжини кроку звивки кручених канатів?
7. Яким виготовляють канат, якщо довжина кабелю перевищує 500–600 м?
8. Які основні особливості конструкцій канатів із паралельних дротів?
9. Що застосовується для підвищення корозійної стійкості дроту та захисту його від атмосферних опадів?
10. В чому полягає система захисту канатів, запропонована спеціалістами компанії Ді-Сі Браун (DC Braun)?
11. Які рівні захисту має система зневоднення канатів, що має індекс SSI 2000 (D), запропонована швейцарською компанією ВСЛ (VSL)?

Матеріали для відповідей:

До основних елементів мостів великих прогонів зазвичай відносять кабелі підвісних мостів, ванти вантових мостів, кінцеві кріплення або анкери кабелів та вант, пілони, анкерні опори та балки жорсткості.

Кабелі підвісних мостів є головними несними елементами підвісного мосту. Підтримуючи за допомогою підвісок балку жорсткості, вони передають зусилля на пілони. Вперше кабель замість ланцюга був запропонований швейцарським інженером Анрі Дюфором у 20-х роках XIX ст.

В даний час можливе застосування кабелів двох типів:

- з кручених канатів заводського виготовлення (рис. 2.1);
- із паралельних дротів (рис. 2.2).

Кабелі з кручених канатів заводського виготовлення (рис. 2.1) поділяють на:

– **кручені спіральні канати одинарної звивки** (рис. 2.1, а), утворюються лише з круглих дротів, осі яких мають у просторі форму простої спіралі.

Максимальний діаметр канатів досягає 30 мм, а модуль нормальної пружності матеріалу – $E_K = (1,5...1,7) \times 10^5 \text{ МПа}$;

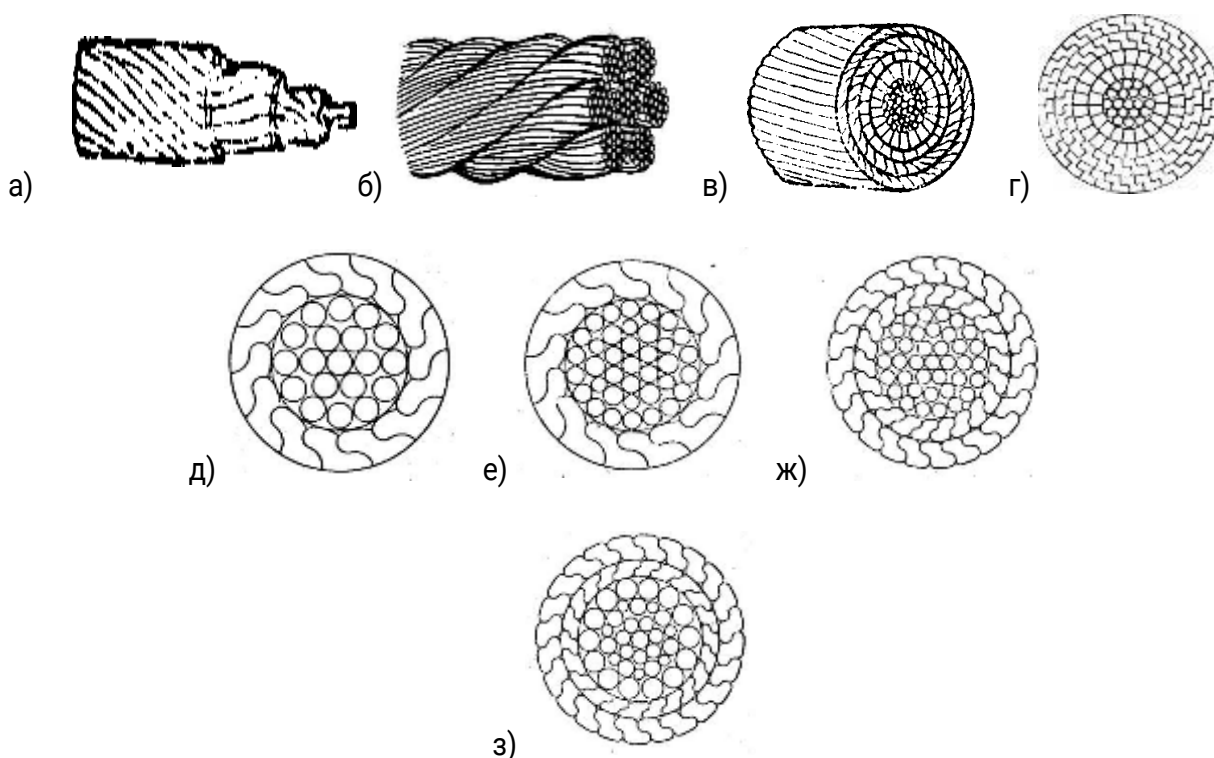


Рис. 2.1. Кабелі із кручених канатів
(канати закриті несні: д, е – з одним шаром зетоподібного дроту та сердечником;
ж, з – з двома шарами зетоподібного дроту та сердечником)

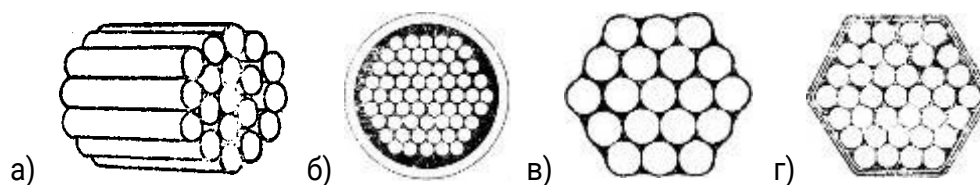


Рис. 2.2. Кабелі із паралельних дротів

– **кручені спіральні канати подвійної звивки (багатопрядні)** (див. рис. 2.1, б), утворюються з спіральних канатів невеликого діаметра (пасм), одне пасмо (сердечник) у центрі, інші за спіральними лініями. Максимальний діаметр цих канатів досягає 45 мм, розривне зусилля – 960 Кн, $E_K = (1,3...1,5) \times 10^5 \text{ МПа}$.

У зарубіжній практиці спіральні канати виготовляють діаметром до 100 мм, (8–9 концентричних шарів дротів), їхнє розривне зусилля досягає 9000 Кн.

Виті спіральні канати відрізняються пухкою структурою, наявністю великої

кількості порожнин (25–42%), що сприяє проникненню в порожнини води та розвитку корозії дротів, унаслідок чого такі канати, як правило, використовують лише у тимчасових спорудах. Крім того, для них характерна помітна повзучість (витягування) під постійним навантаженням, що призводить до подовження каната та надмірних прогинів прогонових будов.

– **закриті канати** (див. рис. 2.1, г, д, е, ж, з), формуються з використанням у декількох зовнішніх шарах фасонних дротів клиноподібного та зетоподібного перерізу.

Закриті канати мають підвищену (порівняно з крученими спіральними канатами) корозійну стійкість. Через скручену структуру ці канати відносно гнучкі і можуть добре працювати при перегибах. Максимальний діаметр таких канатів до 70 мм, $E_K = (1,6...1,8) \times 10^5 \text{ МПа}$.

Для збільшення модуля пружності E_K канати попередньо витягують протягом півтори – двох годин зусиллям 50–60% від розривного (навантаженням, що у 1,5–2 рази перевищує розрахункове). За допомогою зняття непружних деформацій та ущільнення пасм величина E_K стабілізується на рівні $E_K = (1,75...1,85) \times 10^5 \text{ МПа}$. Повна відносна деформація повзучості канатів становить для невитягнутих канатів 1,5–2 мм на 1 м, для витягнутих – не більше 0,3–0,5 мм на 1 м.

Питома вага сталевих закритих канатів становить близько 70 Кн/м^3 .

Загальний тимчасовий опір крученого каната загалом менший від сумарного тимчасового опору дротів, що входять у канат, на 5–20%.

Канати закритого типу мають переваги порівняно зі спіральними витими: по-перше, закритий тип зовнішніх шарів дротів забезпечує механічний водонепроникний бар'єр, який створюється завдяки більшій площі зіткнення між сусідніми дротиками; по-друге, використання не захищених чохлами канатів закритого типу дозволяє легко вести огляд всієї поверхні кожного з них. Внутрішній корозійний захист забезпечується гарячим цинкуванням кожного дроту, а також використанням складу з цинкового пилу під час плетіння. Зовнішню поверхню каната на будмайданчику обробляють малоінтенсивним піскоструминним очищенням, а потім покривають одним шаром епоксидного складу і трьома шарами поліуретану. На останньому етапі канати покривають шаром поліуретану, колір якого може бути вибраний з архітектурних міркувань.

Площа перерізу дротів у канаті закритого типу становить до 88% від геометричної площі кола з діаметром, рівним номінальному діаметру каната. Як зазначалося вище, цей же показник для спіральних кручених канатів становить не вище 75%, відповідно. При однаковому зусиллі канат закритого типу матиме менший діаметр.

Використання канатів закритого типу вимагає особливих умов транспортування. Висока осьова жорсткість і наявність зовнішньої звивки вимагають, щоб діаметри бухт для транспортування становили 30 діаметрів каната, а не 24, як у канатів спіральної звивки. Це обумовлює використання спеціальних трейлерних платформ для перевезення та більших площ складування на об'єкті, причому бухти необхідно розмотувати у горизонтальному положенні. Ціна таких канатів вища, ніж звичайних, приблизно на 10%.

При монтажі канати натягують у три стадії: перша – при встановленні чергового блоку прогонової будови; друга – після укладання монолітного бетону проїжджої частини на блоках; третя – після закінчення монтажу прогонової будови. Величину натягу каната також перевіряють у три етапи: за показаннями манометра на насосній станції домкратів; по висотному положенню змонтованої прогонової будови; по зовнішньому огляду витяжки опорної гайки на склянці циліндричного анкера.

На заводах закриті канати виготовляють:

а) **за способом звивки:** такі, що не розкручуються (зовнішній шар фасонних дротів зберігає своє положення після зняття перев'язок з кінця каната), позначаються – Н; і такі, що розкручуються (круглі та фасонні дроти не зберігають свого положення в канаті після зняття перев'язок з кінця каната), позначаються – Р;

б) **за напрямом звивки:** правого напрямку, лівого напрямку – Л (причому напрямок звивки каната визначається напрямком звивки дротів зовнішнього шару);

в) **за механічними властивостями дроту:** марки В – високої якості, марки І – нормальної якості, марки ІІ (причому, для «вантажолюдського» призначення застосовують канати тільки марки В);

г) **за виглядом покриття поверхні дротів:** світлі – зі світлого дроту, оцинковані – з оцинкованого дроту – позначення – ЛС.

Канати виготовляють, як правило, з правим напрямком звивки дротів зовнішнього шару, напрям звивки дротів у двох верхніх суміжних шарах повинен чергуватись (на замовлення споживача канати можуть виготовлятися з лівим напрямком звивки). Довжина кроку звивки каната не має перевищувати 10-кратного діаметра каната. Довжина кроку звивки сердечника точкового торкання повинна бути не більше 11-кратного діаметра відповідного звитого шару. Довжина кроку звивки сердечника лінійного дотику – не більше 9-кратного діаметра сердечника (на замовлення споживача крок звивання каната може бути збільшений до 12-кратного діаметра каната). Канат повинен мати по всій довжині однакову кратність кроку звивки.

У канатах не повинно бути обірваних, перекручених та заламаних дротів.

Поверхня каната не повинна мати дротів, що виступають або запалих дротів, поверхня дротів повинна бути гладкою, без тріщин та іржі; на дроті не повинно бути зрізаних ділянок.

Діаметр центральних дротів у канатах із сердечником точкового торкання має бути товщим від основних на 0,2–0,4 мм.

При звиванні каната дроти повинні мати рівномірний натяг. Всі дроти в канаті повинні щільно прилягати до дротів нижнього шару. Зетоподібні дроти у шарі повинні прилягати один до одного, утворюючи з'єднання замком. Між фасонними дротами допускається зазор, що не порушує замок каната.

Дроти каната з'єднують за допомогою високотемпературного паяння або контактного стикового електрозварювання. Як припой застосовують латунь. Місця з'єднань не повинні бути крихкими та потовщеними. Відстань між місцями з'єднань окремих дротів у кожному шарі має становити щонайменше п'ять кроків звивки.

Характеристики сталевих канатів заводського виготовлення – в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики канатів

Діаметр канату, мм	Розрахункова площа перерізу всіх дротів, мм^2	Розрахункова маса 100 м канату, кг	Нормативне зусилля розриву канату в цілому, Н
30,5	617	524,98	846300
32,0	674	573,71	924800
34,0	740	630,06	1015000
36,5	800	681,03	1098000
38,5	1016	869,20	1393000
40,5	1128	964,81	1545000
42,5	1224	1046,84	1677000
45,0	1359	1162,01	1863000
47,0	1476	1262,58	2025000
50,0	1714	1469,51	2349000
52,0	1846	1582,83	2530000
54,0	1988	1704,37	2726000
55,0	2016	1728,06	2765000
60,0	2409	2063,60	3305000
65,0	2764	2367,31	3790000
70,0	3232	2767,12	4433000
72,0			4639000

Примітка. Нормативне зусилля розриву канату приведенне для маркіровочної групи за тимчасовим опором розриву дротів не меншого за 1300–1400 МПа.

У зарубіжній практиці закриті канати виготовляють більших діаметрів. Зокрема, канати німецької компанії «Bridon International» мають діаметр до 120 мм і розривне зусилля до 14000 Кн. Даний вид канатів також складається з сердечника у вигляді спірально крученого каната з декількох шарів круглих дротів, оточеного декількома шарами дротів S або Z-подібного перерізу (див. рис. 2.1), спірально звитих у протилежному напрямку. Тут слід додати, що на даний час у деяких країнах у всіх нових автодорожніх та залізничних мостах обов'язкові для застосування саме закриті канати.

Канати, що утворюють кабель (або канати у складі ванти), розташовують вільно в одному горизонтальному ряду у вигляді щільного прямокутного пучка, шестигранного пучка або інакше (див. рис. 2.3).

Якщо довжина кабелю перевищує 500–600 м, то його роблять із паралельних дротів (рис. 2.2).

Вихідним матеріалом для всіх типів кабелів є високоміцний сталевий дріт діаметром 2,5–7 мм з тимчасовим опором 1000–2400 МПа, який в процесі виготовлення піддається спеціальній термічній та холодній обробці, з одночасним нанесенням на нього антикорозійного покриття (найчастіше цинкового).

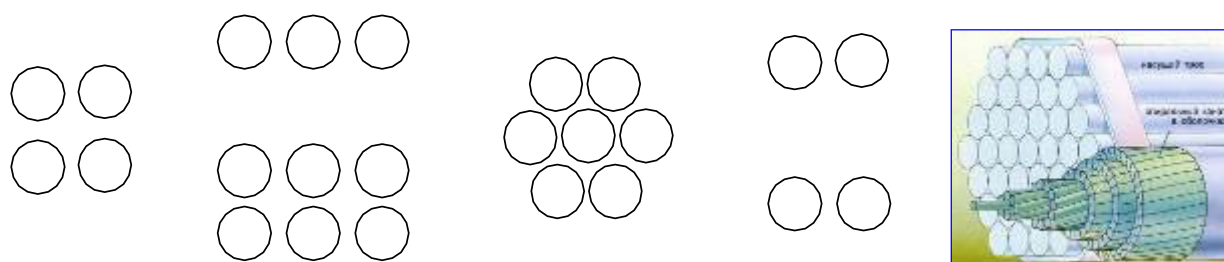


Рис. 2.3. Способи розміщення канатів в кабелях та вантах

Нарощування дротів у кабелі відбувається за допомогою муфт, що мають зворотну нарізку в лівій та правій половині. Діаметр муфт всього в півтора рази більший за діаметр дротів, тому стик виходить досить компактним.

Дріт (або дротяні пасма) укладають у канат (формує правильний шестигранник) навколо сердечника – центрального дроту – за схемою $1+6+12+18+24+\dots+n$. Після опресовування кабель набуває круглої форми.

Загальна кількість дротів у канаті не менше 91, так наприклад у кожному з чотирьох кабелів мосту Верразано Нерроуз – 26108 дротів діаметром 5 мм, загальна їх довжина становить 230 000 км, а сумарна довжина дротів кабелів моста Акасі становить більше 300 000 км.

Так як дроти розташовують по лініях, що повторюють обрис осі кабелю, в них, як у кручених канатах, не виникає додаткових напруг. Тому кабелі можуть бути виготовлені великих діаметрів (діаметр кабелів мосту Золоті ворота становить 92 см, а діаметр кабелів Мессінського мосту передбачається величиною до 120 см). Крім того, кабелі з паралельних дротів є жорсткішими, їх модуль пружності не відрізняється від модуля пружності окремих дротів і може бути прийнятий рівним $E_K = (1,85 \dots 2,1) \times 10^5$ МПа.

Проте, слід зазначити, що плетіння кабелю з паралельних дротів, яке зазвичай виконується на місці будівництва, пов'язане зі значними

технологічними труднощами. Принципова схема плетіння кабелю показана на рис. 2.4.

До основних особливостей конструкцій канатів із паралельних дротів можна віднести:

- близькість величини розривного зусилля канату до сумарного розривного зусилля дротів;
- відсутність звивальних напруг;
- високу згинну жорсткість;
- високу втомну міцність;
- неможливість різких перегинів;
- складність виготовлення;
- відносно низьку корозійну стійкість (як наслідок цього – необхідність спеціальних заходів для захисту від корозії).

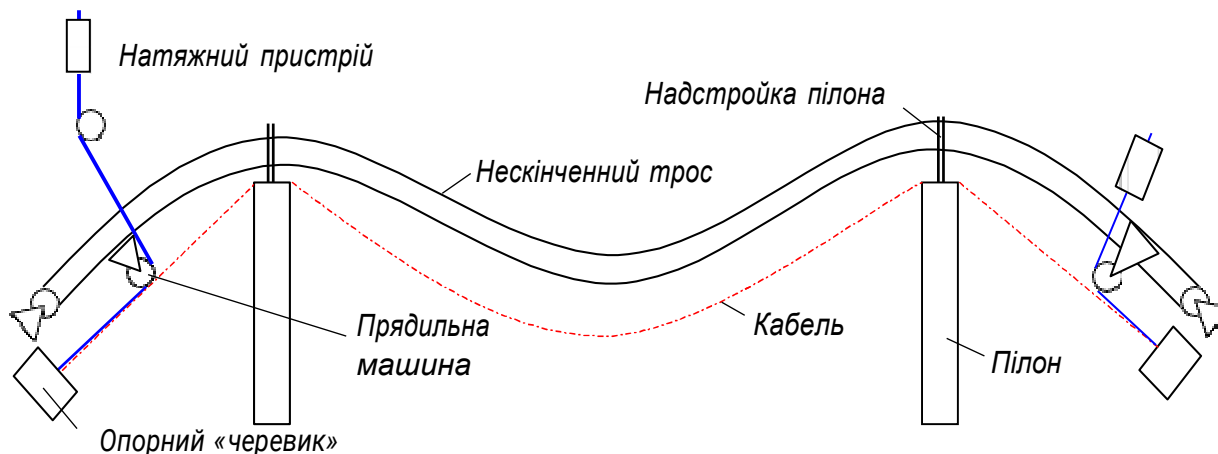


Рис. 2.4. Принципова схема плетіння кабелю підвісного мосту (якщо в ободі прядильної машини (прядильного колеса) зробити два жолоби, за один прохід вона укладатиме чотири дроти)

Слід зазначити, що тонкий дріт, що формує кабелі та ванти, дуже чутливий до атмосферних впливів, тому для підвищення його корозійної стійкості та захисту від атмосферних опадів застосовується:

- оцинковування (та інші гальванічні покриття);
- заповнення порожнин між дротами полімерним складом, синтетичним каучуком, або цементним розчином, просочення рослинними або нафтовими маслами з добавкою графіту (при цьому суміш подається під великим тиском і повинна потрапити у всі проміжки між дротами);
- використання обплетення з полівінілфторидних стрічок та поліетиленових труб (заповнених або незаповнених), нейлонових оболонок, посиленних

скловолокнистою сіткою з наступною обмоткою металевою стрічкою із нержавіючої сталі різної товщини;

- застосування покриття у вигляді епоксидної смоли з цинковим порошком, промазування пасмів кабелю водостійкою пастою з свинцевого суріку з подальшим фарбуванням фарбами, що містять свинець;

- подача сухого, теплого повітря під оболонку канатів та ін.

На рис. 2.5 показані деякі способи захисту кабелів і вант від корозії.

Потрібно додати, що основні несні канати нових споруд по всій довжині, а також у зонах анкерування повинні бути оснащені, як мінімум, двома надійними системами захисту. Внутрішній бар'єр – мастила, захисні панчохи, епоксидні або гальванічні покриття – повинні повністю оберігати всю довжину канату та ділянки анкерування. Зовнішній бар'єр – неметалічні матеріали, поліетиленові труби, полівинілфторидні стрічки та інші обмотувальні матеріали.



Рис. 2.5. Антикорозійний захист канатних елементів моста

Як приклад системи захисту можна назвати запропоноване у 90-х роках ХХ ст. спеціалістами компанії Ді-Сі Браун (DC Braun) застосування еластичної обмотувальної стрічки «Кейблгард», що застосовується як під час ремонту, так і при зведенні нових мостів. Матеріал стрічки екологічно чистий і не вимагає особливої підготовки поверхні та очищення її розчинниками. Стрічкою можна обмотувати оголені канати та канати, захищені поліетиленовими трубами. Стрічка складається з трьох шарів: полімер – армотканина – полімер. Полімер є сполукою поліетилену хлорсульфанату. Для надання необхідного кольору до складу матеріалу антикорозійного захисту включають світлостійкі барвники, завдяки чому відпадає необхідність фарбування вручну. Номінальна товщина стрічки 1,14 мм ($\pm 0,08$ мм). Таким чином, при 50%-вому перехльості стрічки (при намотуванні) на канат товщина захисного покриття становитиме приблизно 2,28 мм. Стрічку «Кейблгард» можна намотувати на канат поверх існуючого фарбування або гальванічного покриття. Для цього використовують обмотувальну машину. При обмотці стрічка натягується з чималим зусиллям (міцність на мембранний розрив – понад 425 Н, при випробуванні на відрив клаптика за методикою стандарту ASTM D-751 – понад 40 Н), що відповідає відносному подовженню від 3 до 10%. У першу добу після обмотки стрічку

необхідно нагріти протягом 5–7 хв до температури 150° С, щоб спаяти перехльостування та забезпечити усадку стрічки. Завдяки цьому відбудеться обтискання каната. Незважаючи на щільне обтиснення канату в результаті усадки стрічки, вона не приварюється до канату і не прилипає до нього, що в майбутньому забезпечує можливість видалення стрічки для огляду каната.

Для ілюстрації конструкції та роботи системи зневоднення канатів з метою стримування або запобігання корозії дротів може бути розглянута система, що широко застосовується в даний час при спорудженні великих підвісних та вантових мостів і має індекс SSI 2000 (D), запропонована швейцарською компанією ВСЛ (VSL).

Дана система використовується для канатів, що складаються з набору індивідуальних пасм по всій довжині, укладених у повітронепроникний захисний кожух з поліуретану високої щільності (HDPE), який одним кінцем приєднують до пілону, а іншим – до анкера на прогоновій будові. При цьому обдуванням сухим повітрям від корозії захищається не тільки сам канат та його анкери, а й системи гасіння коливань.

Зазвичай установку зневоднення розміщують усередині пілону (рис. 2.6), вона має вентилятори, які створюють невисокий за величиною постійний тиск сухого повітря по всій довжині канатів, а також в анкерній камері пілона, де повітря переміщається, доходячи, у разі потреби, до анкерів у балці жорсткості, зневоднюючи об'єм замкнутих порожнин прогонової будови. Простір між пасмами всередині кожуха канатів сприяє циркуляції сухого повітря навколо пасм, тиск залишається дещо вищим за атмосферний, а це виключає проникнення води з навколишнього середовища до канатів.

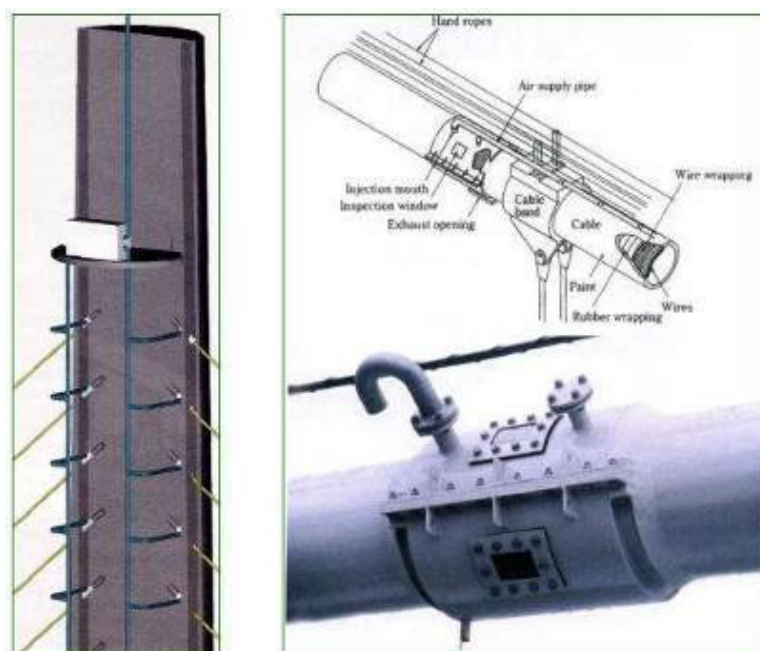


Рис. 2.6. Схеми та загальний вигляд установок зневоднення повітря для захисту вант і кабелів мостів від впливу атмосферної вологи

Дана система має три рівні захисту: перший – суцільне металізоване

покриття пасм; другий – потік сухого повітря, що оточує пасмо і створює суцільну оболонку; третій – повітронепроникний кожух, в якому укладено весь вантовий канат.

Всередині оболонки канатів закріплюють датчики для вимірювання вологості, тиску повітря та його температури, забезпечуючи отримання всіх необхідних для контролю над процесом зневоднення даних. У разі потреби, для ведення моніторингу під час експлуатації мосту захисну кришку анкера можна влаштувати таким чином, щоб забезпечувати постійне візуальне спостереження за станом пасм без необхідності розкривати замкнуту систему (рис. 2.6, рис. 2.7).

Систему зневоднення обдувом сухим повітрям з метою захисту металоконструкцій та канатів підвіски у різних країнах застосовують уже кілька десятків років. Принципи роботи системи зрозумілі, корисність очевидна, величина витрат на технічне обслуговування не велика, а надійність висока.

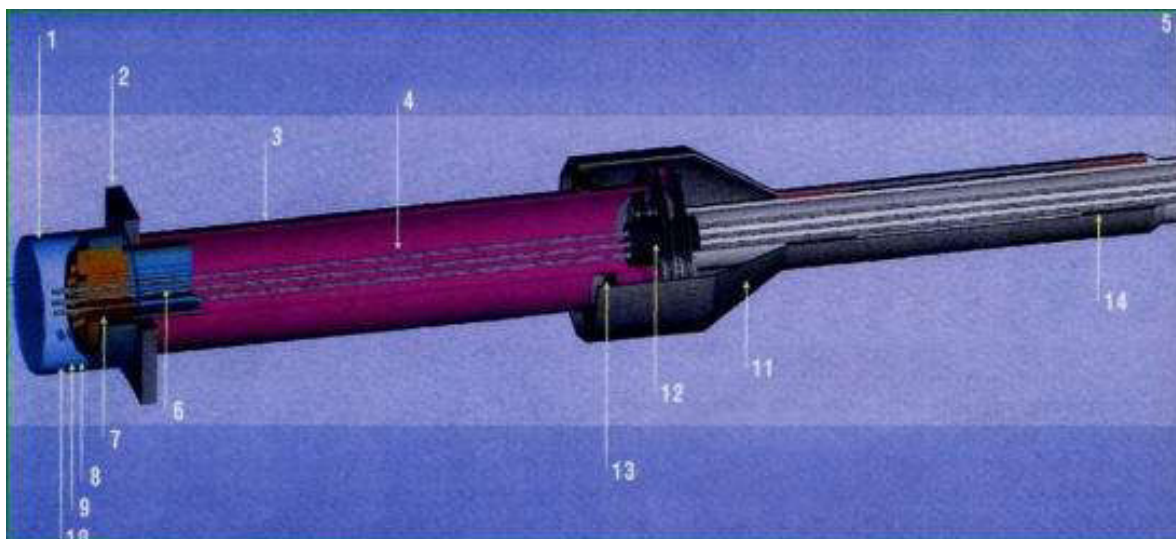


Рис. 2.7. Деталь системи зневоднення вант SSI 2000 (D):

1 – захисна кришка, що закупорює весь анкер; 2 – опорна плита; 3 – напрямна труба; 4 – незахищене панchoю пасмо системи VSL із захисним гальванічним покриттям, діаметр 15,7 мм, 1770/1860 МПа; 5 – захисний чохол каната зменшеного діаметра, виготовлений з HDPE методом екструзії, з нанесеним на поверхню гвинтовим буртиком; 6 – перехідна коробка; 7 – активний анкер, оснащений системою реєстрації даних; 8 – датчик температури; 9 – датчик вологості; 10 – датчик тиску повітря; 11 – захисна антивандальна труба; 12 – фрикційний демпфер системи VSL; 13 – металевий конічний ущільнювальний конічний сальник; 14 – з'єднання із захисним кожухом

Як правило, основні проблеми в канатних елементах мостів виявляються при проведенні моніторингу (рис. 2.8), а заходи з ремонту обмежуються заміною захисних покриттів обмотки та зачеканкою хомутів підвісок, однак іноді виникає необхідність у ремонті або навіть повній заміні самих канатів.



Рис. 2.8. Моніторинг кабелів і підвісок підвісних мостів

Отруйний для працюючих і небезпечний для навколишнього середовища свинцевий сурик нині витісняється новими матеріалами – зокрема, Crikote ZN та Elettrometal (що містять цинк та окис цинку). Основою для них є антикорозійні термоактивні полімери або поліуретани. У порівнянні зі свинцевим суриком вони мають ряд переваг: присутність в них цинку сприяє утворенню на дротах гальванічного покриття; вони менш токсичні; їхні базові складові мають більш тривалі терміни затвердіння.

Як заключний елемент захисту канатів зазвичай застосовується багатшарове фарбування. Оскільки всі елементи конструкції підвісних мостів і, особливо, несних канатів мають високу гнучкість, матеріал фарбування повинен мати високу пластичність. Протягом останніх років були випробувані кілька систем захисту головних канатів. Найкращі результати до теперішнього часу дає використання матеріалу Noxide – акрилового водного покриття, що містить високопластичні полімери. Переваги цього матеріалу полягають у його здатності при розтягуванні подовжуватися на 200% без розриву; крім того, він не втрачає еластичності від ультрафіолетової радіації. Досвід експлуатації в промислових установках підтвердив його довговічність протягом 20-річного періоду. У нових проектах ремонту канатів підвісних мостів можливе застосування цього нового матеріалу замість традиційного багатшарового фарбування.

І краплинка історії про появу сталевих канатів і початок будівництва підвісних мостів.

Перш за все згадаємо Джона (Йоганна) Роблінга (нім. Johann August Röbling, англ. John Augustus Roebling; 12 червня 1806, Мюльгаузен, Німеччина – 22 липня 1869, Нью-Йорк, США) – німецький і американський інженер та мостобудівник. Автор проекту Бруклінського моста, винахідник

сталевого троса.

Коли Роблінг влаштувався у столиці штату Пенсільванія, Гаррісбергу на посаду інженера-будівельника, на роботі йому в голову прийшла ідея замінити прядив'яні канатні буксири дрововими кабелями. Умовивши транспортне начальство каналу, інженер розробив свій власний метод плетіння і зв'язки кабелів, які виявилися надзвичайно міцними і довговічними, як Роблінг і передбачав. Незабаром попит на його кабелі став настільки великий, що заповзятливий інженер вирішив відкрити фабрику (на якій отримав каліцтво руки) з їх виробництва у Трентоні (Нью-Джерсі). Фабрика стала основою великого промислового комплексу, який виробляв все – від дроту до міцних 36-дюймових кабелів. Дане підприємство стало власністю сім'ї Роблінгов. Після того як до роботи Роблінга приєднався його старший син, вони разом в середині XIX століття побудували чотири підвісних мости: два в Піттсбурзі, один на Ніагарських водоспадах і ще один через річку Огайо між Цинциннаті і Ковінгтоном, що мав довжину 320 метрів.

Згодом Роблінг був призначений головним інженером проекту з будівництва підвісного моста через протоку Іст-Ривер між Брукліном і Мангеттеном. Основний прогон мосту мав бути довжиною 486 метрів. Будівництво почалося в 1870 році. Зведення Бруклінського моста було закінчене у 1883 році. Нині це найстаріший з діючих підвісних мостів. На момент завершення будівництва це був найбільший підвісний міст у світі і перший міст, у конструкції якого використовувалися сталеві канати (троси). Кожен трос мосту складався з 19 окремих жил, а ті, своєю чергою, з 278 окремих дротів, що дозволило мосту витримувати дуже великі навантаження. Мостове полотно завширшки понад 25 метрів дозволяє розмістити три смуги руху в одному напрямку та пішохідний міст. Загальна довжина Бруклінського мосту становить 1825 метрів. Над мостом височіють дві гранітні опори в неоготичному стилі, що здіймаються на максимальну висоту 84,3 метри. Ці опори потрібно було оперти на твердий скельний ґрунт. Геологічні вишукування показали, що він залягає на глибині 25 метрів нижче від рівня дна річки, тому було потрібне рішення щодо виймання м'яких порід завтовшки 25 метрів. Для цього Джон Роблінг застосував кесони.



Рис. 2.9. Бруклінський підвісний міст



Рис. 2.10. Панорама Бруклінського мосту

Найвідомішим сучасним підвісним мостом вважається Акасі-Кайке – підвісний міст, що перетинає протоку Акасі і з'єднує місто Кобе на острові Хонсю з містом Авадзі на острові Авадзі в Японії. Він відомий також під іншою назвою, дуже органічною і влучною – Перлинний міст або Pearl Bridge. Міст Акасі-Кайке двічі був відзначений у книзі рекордів Гіннеса: як найдовший підвісний міст (його повна довжина становить 3911 метрів) і як найвищий міст (його пілони мають висоту 298 м, що вище за 90-поверховий будинок). Акасі Кайке стійкий до поривів вітрів швидкістю до 80 м/с та впливу найсильніших підводних течій. Він здатний витримувати землетрус до 8,5 балів. Ця підвищена стійкість забезпечується завдяки використанню особливо міцного, посиленого металевих троса. Для троса, який мав утримувати міст вагою 160 000 тонн, японці створили дріт міцніший, ніж ті, які зазвичай використовувалися при будівництві підвісних мостів. Трос був зібраний за спеціальною системою – з безлічі пучків сталевих дротів, причому кожен такий пучок складається з 127 дротів діаметром 5,23 мм. Потім 290 таких пучків збирали в трос. В результаті трос складається з 36 830 дротів, а загальна довжина дроту в ньому склала

300000 км. Якщо витягнути в довжину всі сталеві нитки несних тросів мосту Акасі-Кайку, то ними можна оперезати земну кулю більше семи разів. В загальному на будівництво моста було задіяно майже два мільйони робочих, інженерно-технічних працівників, іншого персоналу, а сумарні витрати склали 5 мільярдів доларів.

Ванти вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Що собою являє вант CFCC (Carbon Fiber Composite Cable) ?
2. Хто розробник вант CFCC?
3. В скільки разів вартість вант CFCC перевищує вартість попередньо напруженої арматури?
4. Які можуть бути ванти?
5. Що собою являють жорсткі ванти?
6. Де переважно застосовуються жорсткі ванти? В яких випадках?
7. Що являють собою гнучкі ванти?
8. В чому переваги вантових систем, що поставляються швейцарською компанією ВСЛ (VSL) та французькою – Фрейссіне (Freyssinet)?
9. Що являють собою ванти, виготовлені за монострендною технологією?
10. Який новий матеріал для використання в канатах і вантах запропоновано англійською фірмою ICI?

Матеріали для відповідей:

Ванти вантових мостів є головними несними елементами моста, що підтримують балку жорсткості та передають зусилля на пілони.

Ванти можуть бути двох типів:

- **гнучкі** – що виготовляються аналогічно кабелям підвісних мостів, зі спіральних, багатопрядних або закритих канатів, або з паралельних дротів.

В останні роки широкого поширення набули так звані вантові системи, виготовлені за **монострендною (Mono Strand) технологією**. Ванти в них складаються з окремих пасм – стрендів, кожна з яких включає сім гальванізованих високоміцних дротів діаметром (наприклад) 5,2 мм, укладених в оболонку з поліетилену високої щільності, заповнену спеціальним мастилом. Кількість таких пасм у вантах, зазвичай, від 10 до 100 штук і більше (рис. 2.11).

В останні роки найбільш поширені вантові системи, що поставляються швейцарською компанією ВСЛ (VSL) та французькою – Фрейссіне (Freyssinet). Важливою їхньою перевагою є відносна простота виконання робіт з

поєднанням поелементним встановленням окремих пасм до складу конструкції ванти за допомогою спеціальних пристроїв, а також, у разі потреби, заміна окремих пасм або всієї ванти в процесі експлуатації.

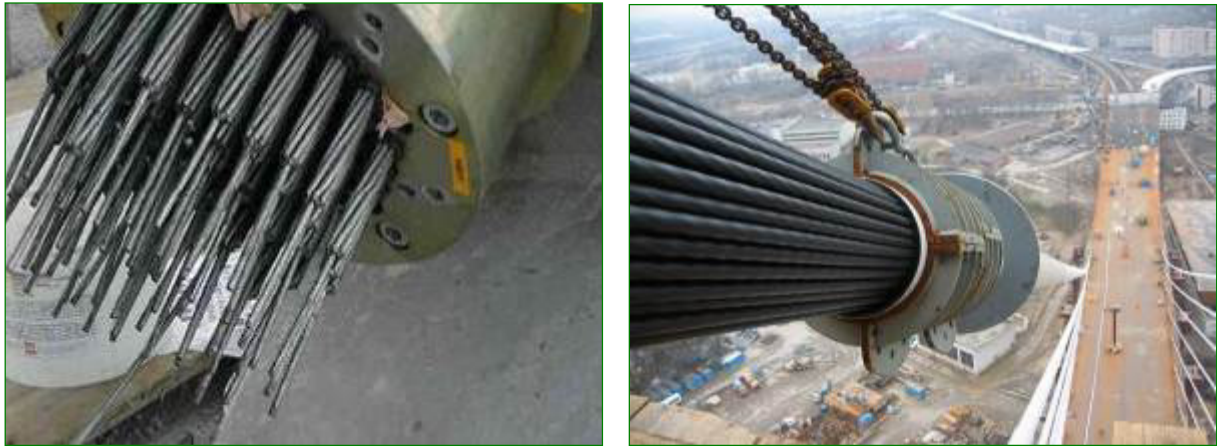


Рис. 2.11. Пасма (стренди) встановлені у ванту Великого Обухівського мосту через Неву в Санкт-Петербурзі

- **жорсткі** – являють собою або сталеві стрижні великого діаметру, або канати або пучки дроту, оточені попередньо напруженою залізобетонною оболонкою (рис. 2.12, рис. 2.13) з подальшим ін'єктуванням внутрішньої порожнини цементним розчином під великим (60–100 атмосфер) тиском.

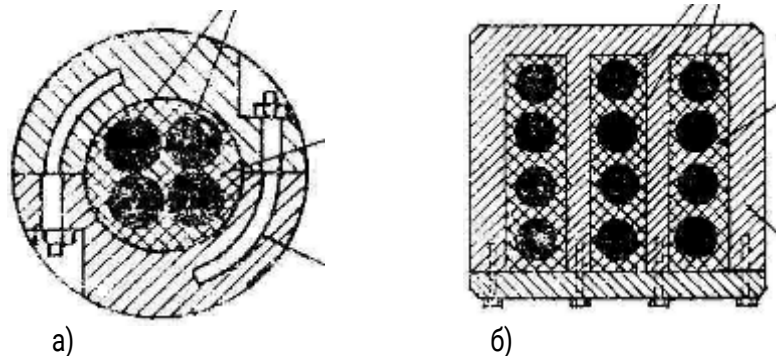


Рис. 2.12. Жорсткі ванти

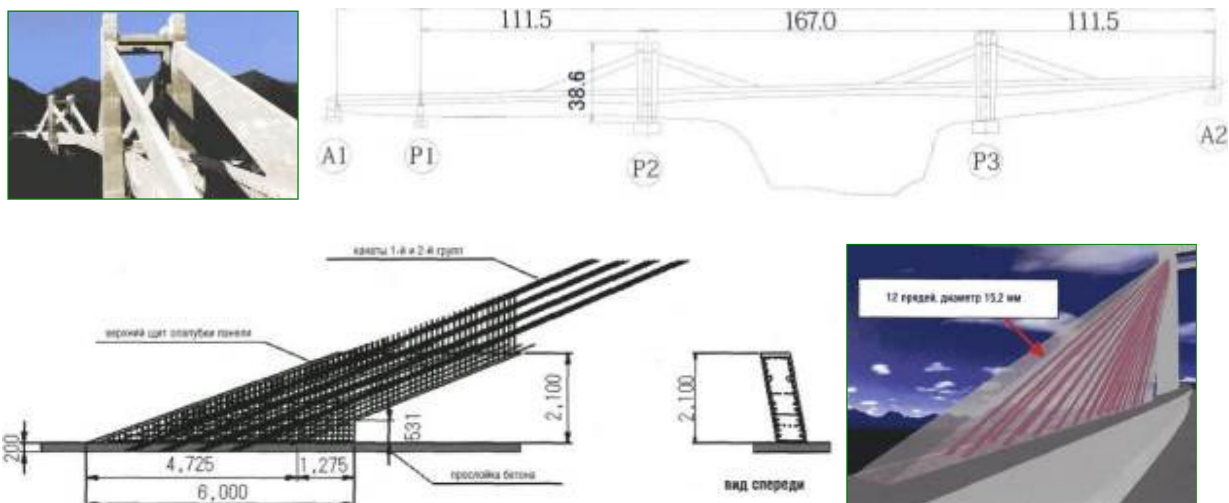


Рис. 2.13. Залізничний міст із жорсткими вантами в Японії

Вихідним матеріалом для всіх типів кабелів і вант є високоміцний сталевий дріт, проте відносно недавно англійською фірмою ICI для використання в канатах і вантах запропоновано новий матеріал з синтетичного волокна Парафіл (Parafil). Матеріал не боїться корозії, легший за воду, за міцністю загалом не поступається сталі (рис. 2.14), проте схильний до руйнування від лугів та ультрафіолетових сонячних променів, крім того, має досить високу вартість.

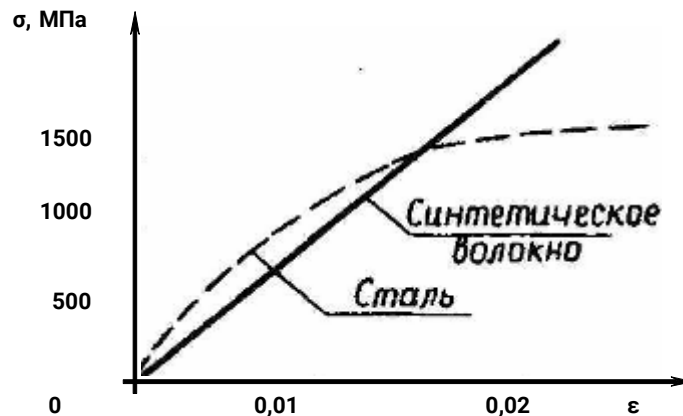


Рис. 2.14. Основні характеристики міцності синтетичного волокна

Певні перспективи у мостобудуванні мають так звані карбонопластики (Carbon Composite). Дані сучасні високотехнологічні композити з ниток вуглецевого волокна використовуються для виготовлення легких, але міцних деталей, що витримують великі навантаження. Вперше метод їх отримання розроблено в Японії, якій належить ідея застосування карбонових виробів в мостобудуванні, в тому числі і при виготовленні вант. Компанія Токіо Руп (Tokyo Rope) пропонує продукт, званий CFCC (Carbon Fiber Composite Cable), рис. 2.15.

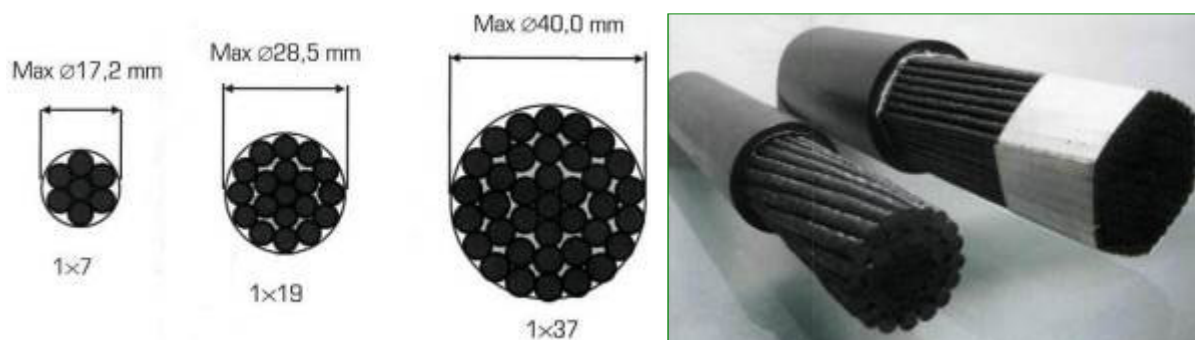


Рис. 2.15. Канатні конструкції із вуглецевого волокна

CFCC є композитним тросом, що складається з переплетених пасм. Матеріал містить вуглецеві волокна, створені на основі ПАН (поліакрилонітрил) і розташовані в матриці з епоксидних смол. Самі властивості карбонопластика дають кінцевому продукту цілу низку важливих переваг:

- мала вага – становить приблизно 20% від ваги сталі;
- висока міцність на розрив – у карбонопластиків вона така ж, як у сталі;
- висока корозійна стійкість – матеріал практично не піддається корозії, в тому числі і в агресивних середовищах;
- кислотостійкість та лугостійкість;
- висока пружність при розтягуванні – майже така ж, як у сталі;
- стійкість до втоми вища, ніж у сталі;
- низька релаксація – майже така ж, як у сталі;
- низьке лінійне розширення – його коефіцієнт становить приблизно 1/20 коефіцієнта лінійного розширення сталі;
- немагнітність – карбонопластики не мають магнітних властивостей;
- гнучкість – трос легко можна змотати та транспортувати на будь-які відстані;
- пошкодження не поширюються на інші пасма, якщо якесь із них було пошкоджене.

Деякі із зазначених характеристик проілюстровані в табл. 2.2 і рис. 2.16.

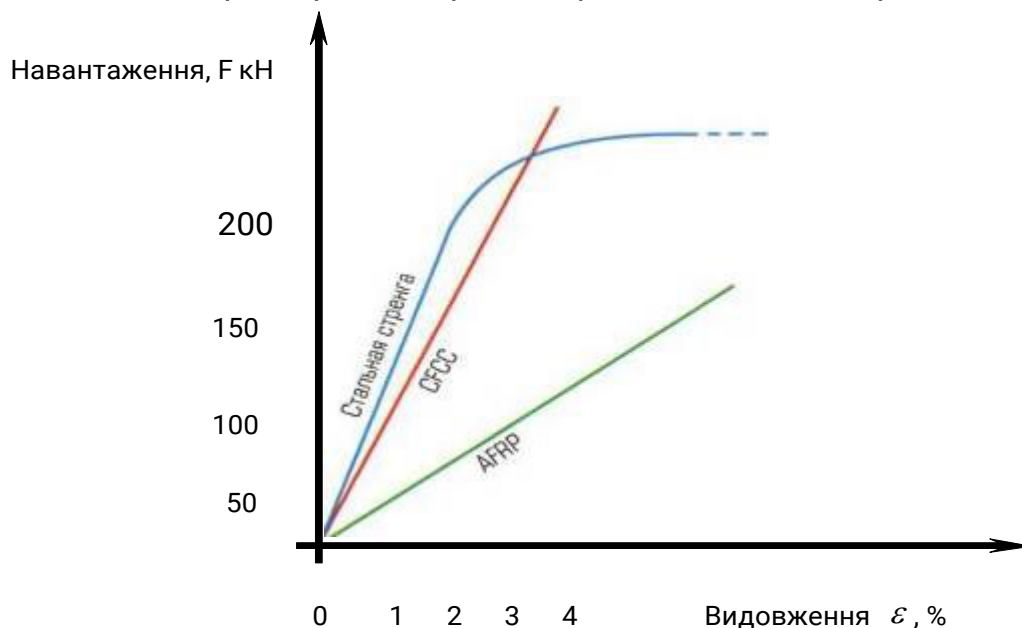


Рис. 2.16. Основні показники міцності CFCC

На сьогодні загальна вартість матеріалів CFCC перевищує ціни на сталеві хомути та звичайну арматуру у 3–7 разів, на попередньо напружену арматуру – у 5 та більше разів. Тобто на початковому етапі використання CFCC при будівництві мостових споруд є витратним, але надалі використання цього продукту потребує мінімального технічного обслуговування. Талант проектувальника – зважити всі «за» і «проти» і прийняти оптимальне рішення.

Порівняння вагових показників CFCC та сталі

Назва продукту	Довжина, м	Вага, кг
CFCC 1x7 діаметром 15,2 мм	2000	450
Стальний стренд діаметром 15,2 мм	2000	2200

На закінчення варто зазначити, що тенденціями сучасного мостобудування в галузі вдосконалення кабелів та вант, насамперед, є вдосконалення конструкції у частині її компактності та вдосконалення антикорозійного захисту.

Як приклад, можна навести приклад вант моста на острів Російський (ванти виготовлені та встановлені за технологією фірми Фрейсіне). Для конструкцій вант було отримано:

1. Компактну конфігурацію – за рахунок більш щільного розміщення пасм в оболонці, що дозволило на 25–30% зменшити вітрове навантаження, знизивши при цьому витрату матеріалів на спорудження пілонів, балки жорсткості та фундаменти на 35–40%;

2. Особливий антикорозійний захист – дозволив заявити гарантійний термін експлуатації вант – 100 років. Як зазначається представниками фірми, при монтажі вант інших технологій через кожні 15–20 років їх, можливо, доведеться замінювати, що, з урахуванням непрофільних витрат, призведе до суттєвого зростання сукупної вартості вант (зупинка або суттєве обмеження руху, спеціальні пристрої для демонтажу старих конструкцій та установки нових, інші додаткові складності тощо).

Однак, при цьому не слід забувати, що вартість вант моста становить близько 8–12% від загальної вартості об'єкта.



Рис. 2.17. Автодорожний віадук у Швейцарії

І на завершення – фото вантового мосту з жорсткими вантами (рис. 2.17).

В табл. 2.3 приведено порівняння переваг та недоліків різних конструкцій гнучких вант.

Таблиця 2.3

Порівняння різних конструкцій вант

Назва	Переваги	Недоліки
Канати повної заводської готовності із паралельних дротів. За сучасною класифікацією: PWS (Parallelwiresystem) ; (Створено в СРСР у 1972-76 рр. для двох мостів: Північний міст в м. Київ 1976 р. однопілонний, прогоном 300 м; в м. Рига, 1981 р., однопілонний, прогоном 312 м).	Загальний діаметр каната 60 мм (91 високоміцний оцинкований дріт діаметром 5 мм), несна здатність – 1200 Кн. За рахунок паралельних дротів модуль пружності практично дорівнює металевому прокату: $E_K = 2 \times 10^5$ МПа. Заводський антикорозійний захист: чохол з подвійної склотканини, що утримує всередині силіконовий компаунд, оболікає дроти і здатний до «самолікування» при перегибах каната; оцинкована металева стрічка товщиною 0,3 мм у два шари для механічного захисту, покрита силіконовим компаундом із алюмінієвою пудрою. Новий тип анкерної склянки («анкер ЦНДІС»), що закріплює дроти в опорній плиті шляхом розплющування їх кінців (з гарним захистом від корозії).	Малий діаметр каната і мала несна здатність (1200 Кн), що призводить до значної кількості канатів у кожній ванті (наприклад, у мостах у Києві та Ризі до 48 канатів в одній ванті). Щоб намотати на барабан розміром 4×15 м канат із паралельних дротів, його доводилося на заводі попередньо закручувати на певний кут, а на будмайданчику назад розкручувати та віброрихтувати, перевіряти отриману довжину, антикорозійний захист тощо.
Закриті канати повної заводської готовності, що складаються з кількох зовнішніх рядів оцинкованих фасонних дротів клиноподібного або Z-подібного перерізу (всередині звичайні круглі дроти одинарної звивки). Застосовані в однопілонному мості через Об у Сургуті з прогоном 408 м (2000 р.) Канати фірми Bridon діаметром 72 мм та несною здатністю 2600 Кн.	Реалізація ідеї: «Один вант – один канат», що дозволяє суттєво скоротити час монтажу. Висока щільність каната дозволяє отримати більшу несну здатність при відносно малій погонній масі (2600 Кн при масі 31 кг/пог. метр каната повної заводської готовності) Відносно прості пристрої натягу канатів при гарному антикорозійному заводському захисті та надійності заводських анкерів.	Низький модуль пружності каната за рахунок розкручування звитих дротів (непаралельних) $E_K = 1,55 \times 10^5$ МПа. Необхідність попередньої витяжки канатів на будмайданчику для підвищення модуля пружності. Необхідність покриття канатів після монтажу спеціальною мастикою Bridon Metal Coat для антикорозійного захисту.

продовження табл. 2.3

Назва	Переваги	Недоліки
Ванти з паралельних монострендів: PSS - Parallelstrandsystem фірми «Фрейсіне» та VSL (стрендова технологія). Вантові мости в м. Запоріжжя, 2021 р., «Нормандія», 1998р., віадук Мійо, 2004 р., в Петербурзі, 2004 р.; Муромі, 2009 р.; Срібний Бір у Москві, 2008 р. та інші.	Заводський антикорозійний захист моностренду (каната одинарної звивки): високоміцні дроти (7 штук діаметром 5 мм) оцинковані, захищені парафіном і покриті жорсткою HDPE оболонкою. Зовнішній захист ванти, що складається з 10-60 монострендів, а також жорсткої HDPE оболонки. Висока якість, гідроізоляція анкерів. Натяг йде по одному моностренду, тому потрібні домкрати невеликої потужності. Можливість заміни окремих монострендів у ванті із застосуванням обладнання невеликої потужності.	Формування ванти по одному моностренду – вимагає багато часу та трудовитрат (хоча процес досить уніфікований). Формування зовнішньої HDPE оболонки відбувається на будмайданчику шляхом зварювання окремих блоків. Формування та монтаж анкера на будмайданчику.
Ванти-канати повної заводської готовності із паралельних дротів. За сучасною класифікацією: NEW-PWS (NEW-Parallelwiresystem) Фірма « TOKYOROPEMFG » Вантові мости Татару, Йокогама, (Японія); 2-й Юндо (Корея), Мубарака (Єгипет) та інші.	Заводське виготовлення цільної ванти-каната з паралельних оцинкованих дротів діаметром 5 або 7 мм кількістю від 19 до 499 штук, тобто з несною здатністю від 1170 Кн до 34560 Кн. Заводська гідроізоляція канату та анкера високої якості (стрічка з волокон, жорстка HDPE оболонка та герметична муфта). Транспортування та натяг за принципом: «одна ванта – один канат», що знижує час та трудовитрати до мінімуму. Немає необхідності у зворотному розкручуванні каната на певний кут на будмайданчику після його розмотування.	Достатньо важкий канат-ванта при транспортуванні та монтажі (погонна маса від 30 до 157 кг на погонний метр). Використання потужного гідравлічного обладнання для натягу цільної ванти-канату.

За підсумками цього порівняння можна сказати, що у вітчизняному мостобудуванні доцільно застосовувати такі типи вант:

1. PSS (Parallelstrandsystem) (стрендова технологія): наявність досвіду спорудження ряду вантових мостів у світовому мостобудуванні;
2. NEW-PWS (NEW-Parallelwiresystem): можливість забезпечення подальшого прогресу вітчизняного мостобудування за рахунок освоєння перспективних конструкцій та технологій.

Практичне заняття 3

Кінцеві кріплення (анкери) кабелів та вант. Пілони підвісних та вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Що забезпечують анкери кабелів і вант?
2. В чому особливість заливних анкерів анкерних стаканів?
3. З використанням яких матеріалів виготовляють анкери з холодно-твердіючими сумішами (анкери із запресуванням дротів)?
4. В яких випадках застосовують анкерні колодки?
5. Які особливості конструкції з анкерними колодками?
6. Що використовують для дотягування канатів вант?
7. Як поділяються пілони за типом жорсткості вздовж мосту? Які їхні особливості?
8. Які бувають пілони за типом будови? Покажіть схеми.
9. Які типи поперечного перерізу стійок пілонів застосовуються на практиці?
10. Як поділяються пілони за розміщенням балки жорсткості? В чому плюси відсутності опирання балки на пілон?

Матеріали для відповідей:

Кінцеві кріплення (анкери) кабелів та вант забезпечують взаємозв'язок канатних елементів з іншими частинами споруди – пілонами, балками жорсткості чи фундаментами (рис. 3.1). Тут варто зазначити, що у всіх випадках конструкція кінцевого анкера повинна бути влаштована рівномірною кабелю підвісного моста або канату вантового моста.

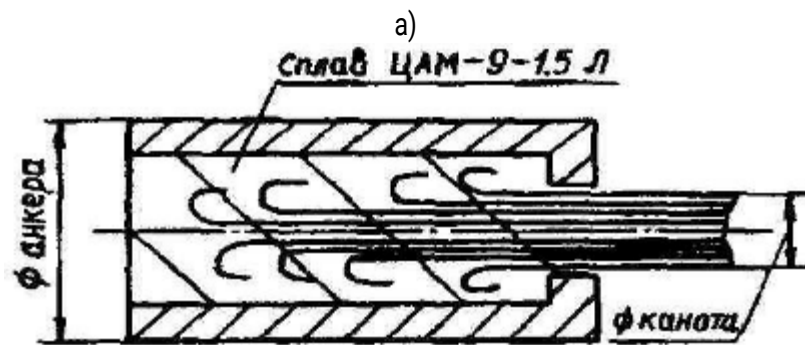
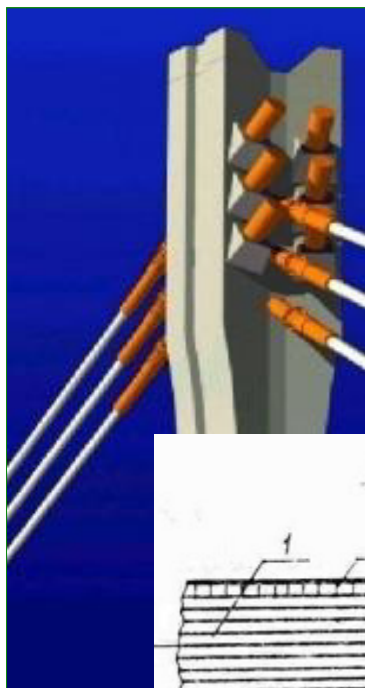
Можливими рішеннями кінцевих анкерів можуть бути анкерні стакани з циліндричною чи конічною порожниною та **анкерні колодки**.

В якості **анкерних стаканів** використовуються:

– **заливні анкери** (рис. 3.1, а) – де розплетений кінець каната заливається легкоплавким але досить міцним сплавом кольорових металів – олова, сурми та свинцю, або цинку, алюмінію, міді та магнію. До переваг використання таких анкерів відносять їх високу жорсткість, а до недоліків слід віднести складність технології, витрату дорогих компонентів, небезпеку під час виконання робіт (температура плавлення становить 460–480° С).

– **анкери з холоднотвердіючими сумішами** (анкери із запресуванням дротів) та анкерувальною сумішшю на основі епоксидної смоли (рис. 3.1, б, рис. 3.2). Такі анкери позбавлені недоліків заливних анкерів (зокрема

температура твердіння суміші близько $+20^{\circ}\text{C}$), проте вони мають підвищену деформативність.



б)

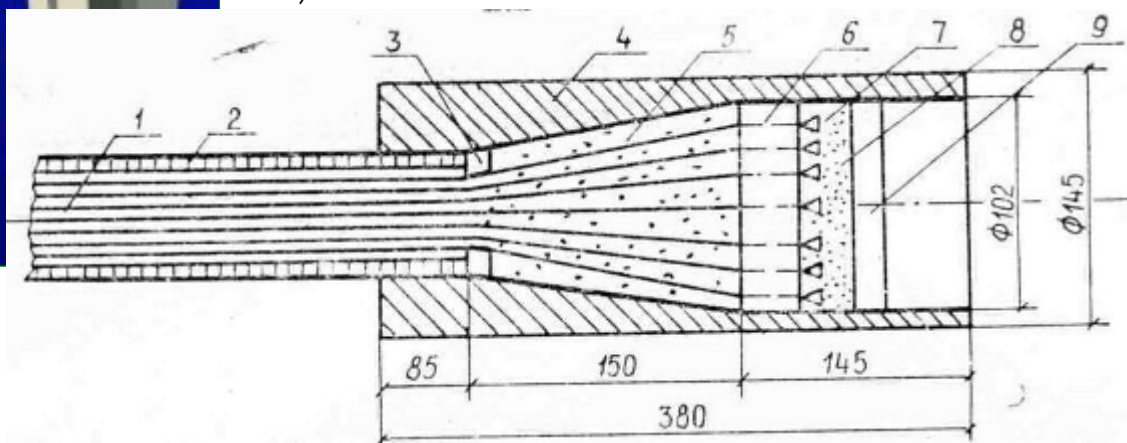


Рис. 3.1. Конструкції анкерів:

а) заливний циліндричний анкер; б) анкер із запресуванням головок

- 1 – канат (кручений або з паралельних дротів); 2 – запобіжна трубка;
3 – втулка; 4 – обойма; 5 – анкеруюча суміш холодного твердіння (епоксидна смола);
6 – опорна плита; 7 – кінці дротів; 8 – протикорозійний матеріал; 9 – заглушка

Анкерні колодки (рис. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) застосовують у разі використання вант, виготовлених за монострендною технологією. При цьому кожен стренд (пасмо) закріплюється в колодці за допомогою спеціальних конусних клинів, що не допускають прослизання та зміщення пасма каната. Сама анкерна колодка спирається на опорну плиту, що підтримується опорною трубою з пропущеними через неї пасмами вант. У конструкції також є напрямна труба, що підтримує антивандальну трубу та забезпечує закріплення демпферів вант.

Після кріплення кінці вант і конусні клини анкера закривають захисними кришками, порожнини під захисними кришками герметизують спеціальними матеріалами за допомогою обладнання для нагнітання розчину.



Рис. 3.2. Анкери з холоднотвердіючими сумішами

У зв'язку з тим, що ванти складаються з окремих пасм, технічно складно, у разі потреби, робити їхню дотяжку до розрахункового зусилля. Тому на одному з кінців ванти, як правило, на пілоні, ставлять спеціальну рухливу муфту (так звану регульовану (активну) вантову систему), що дозволяє дотягувати всі канати вант як одне ціле.



Рис. 3.3. Анкерна колодка та конусні клини



Рис. 3.4. Кінцевий анкер та опорна плита вант

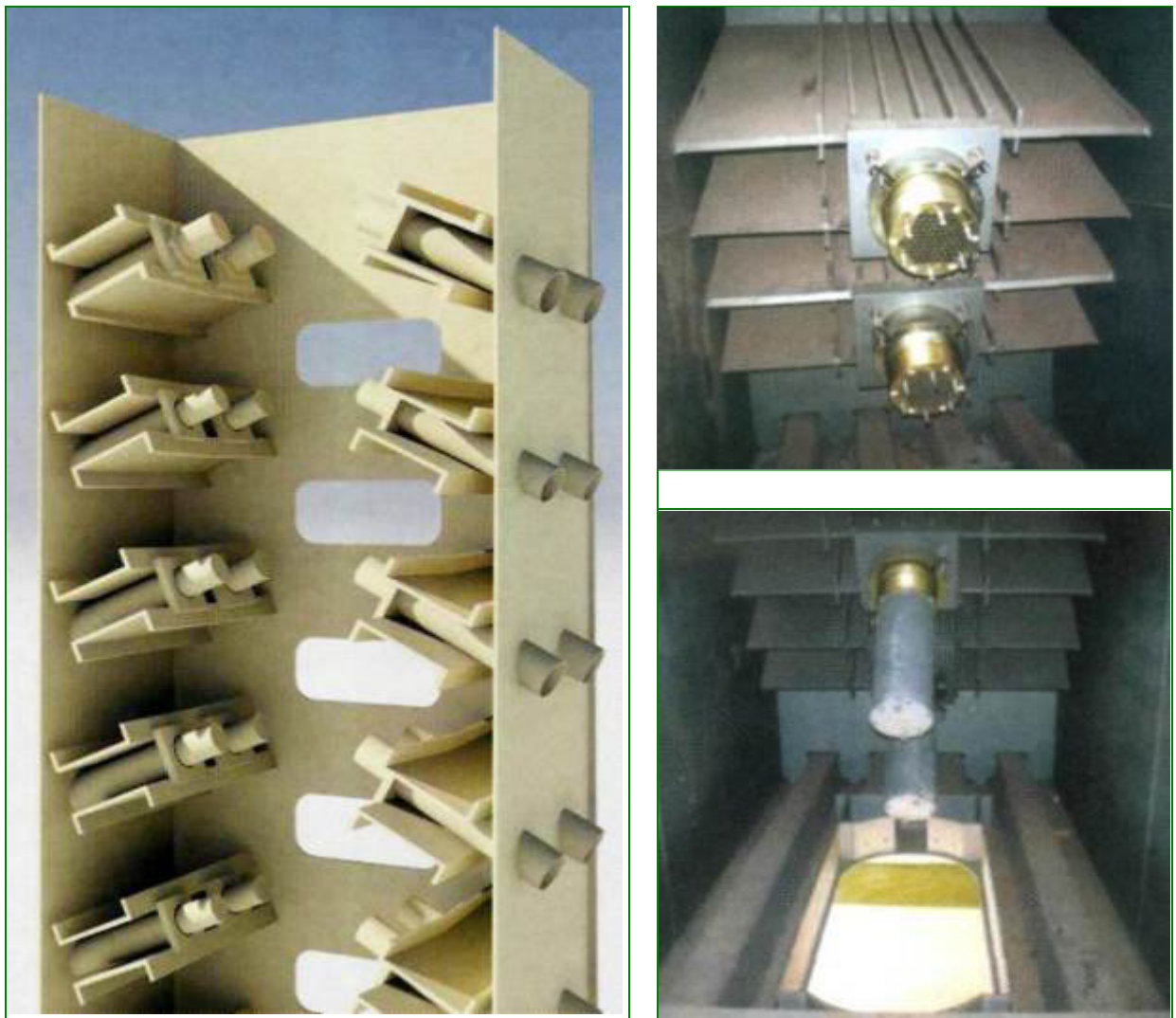


Рис. 3.5. Можливі види вузлів опирання анкерів та анкерних колодок на опорні листи та елементи пілонів та балок жорсткості (вузли кріплення вант)



Рис. 3.6. Кінцевий анкер, опорна плита, напрямна та антивандальна труби вант мосту Ріон–Антиріон у Греції

Пілони підвісних і вантових мостів в даний час мають найрізноманітніші за матеріалом, типом жорсткості, типом поперечного перерізу і розташування балки жорсткості види та конструкції.

При цьому пілони розрізняють:

- **за матеріалом** пілони мостів бувають залізобетонні або металеві (раніше застосовувалися і кам'яні, проте в останні десятиліття вони практично не зустрічаються). З досвіду проектування відомо, що при прогонах довжиною до 300 ... 350м економічнішими виявляються залізобетонні пілони, при великих прогонах- металеві пілони.

- **за типом жорсткості** вздовж мосту пілони бувають гнучкі, жорсткі або шарнірно оперті. Останні використовуються лише за невеликих навантажень (рис. 3.7).

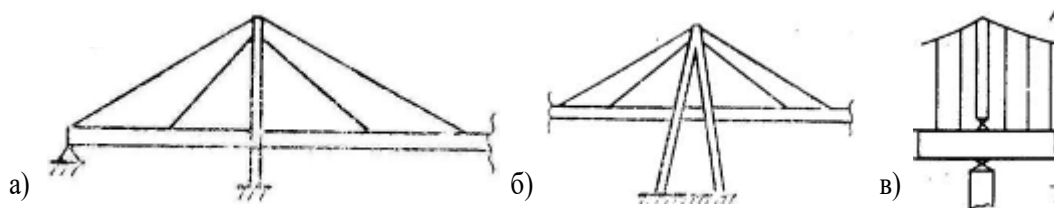


Рис. 3.7. Типи пілонів
а – гнучкий, б – жорсткий, в – шарнірно опертий

Гнучкі пілони роблять залізобетонними чи металевими, шарнірно оперті – металевими. Жорсткі пілони виконуються, як правило, залізобетонними, тому вони добре сприймають згин при несиметричному завантаженні прогонової будови, однак їм потрібні широкі проміжні опори, тому особливого поширення такі конструкції не отримали.

Слід зазначити, що у підвісних мостах для забезпечення постійної величини розпору по всій довжині кабеля необхідно забезпечити поздовжньо-рухливе спирання кабелю на пілоні. При жорстких пілонах поздовжньо-рухливе

спирання кабелю забезпечується за рахунок постановки на його вершині рухомих опорних частин, у гнучких пілонах – за рахунок гнучкості самого пілона, а у шарнірно опертих – за рахунок хитання стійок пілона.

- **за типом поперечного перерізу** пілони бувають одностійочні, двостійочні, рамні або ґратчасті, що визначається, виходячи з довжини прогону (останнє визначає висоту пілона і величину зусилля в ньому), ширини моста, кількості площин вант і характеру їх розташування.

Найпростішими схемами пілонів є одностійочні, які мають мінімальні розміри опор, та двостійочні (рис. 3.8, а, б, в). При великій довжині прогону та ширині моста основу пілонів складає плоска або просторова рама – П-подібна (рис. 3.8, г, рис. 3.9), А-подібна (рис. 3.8, д), ромбічна (ромбоподібна або «алмазна») або ґратчаста (рис. 3.8, е), що мають значно більшу стійкість.

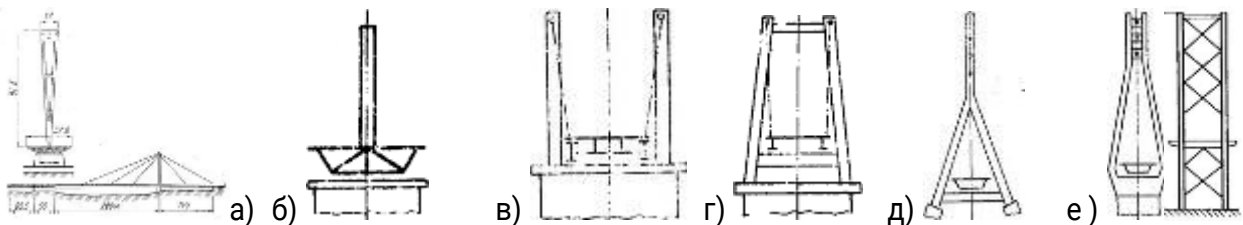


Рис. 3.8. Схеми пілонів підвісних та вантових мостів:
а, б – одностійковий, в – двостійковий, г – рамний П-подібний, д – рамний А-подібний,
е – ґратчастий



Рис. 3.9. П-подібна плоска рама пілону моста Джорджа Вашингтона в США та просторова А-подібна рама пілону вантового моста Ріон-Антиріон в Греції

Прийнято вважати, що відмінність А-подібних та ромбічних пілонів виявляється співвідношенням відстаней a та b (рис. 3.10). Якщо $a < 0,38 \times b$, то пілон А-подібний, якщо $a = (0,38 \dots 0,83) \times b$ – пілон ромбічний.



Рис. 3.10. Ромбічні плоскі рами пілонів моста (показано співвідношення відстаней a та b)

– **за типом поперечного перерізу** стійок пілони поділяють залежно від матеріалу, що застосовується, і діючих у пілоні зусиль.

Стійки пілонів найчастіше є конструкцією прямокутного перерізу із співвідношенням розмірів 1:1 ... 1:2, з більшим розміром, орієнтованим уздовж осі моста.

Для залізобетонних пілонів мостів невеликих прогонів характерні прямокутні суцільні або двотаврові перерізи стійок (рис. 3.11, а, б), в мостах великих прогонів – залізобетонні коробчасті стійки (рис. 3.11, в, 3.12).

Для металевих пілонів стійки, як правило, зварені або клепані коробчасті, посилені ребрами жорсткості (рис. 3.11, г, д, рис. 3.12).

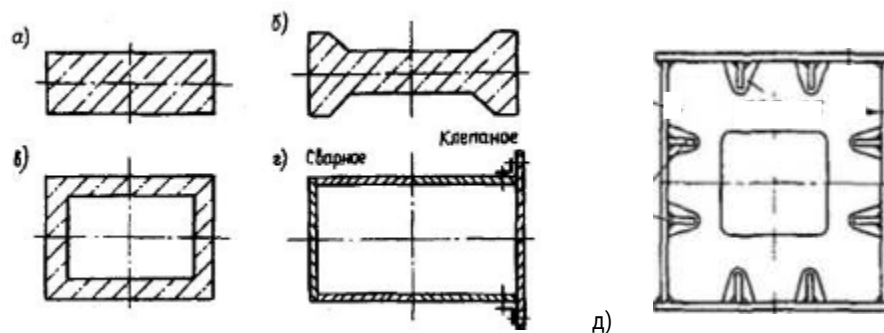


Рис. 3.11. Можливі поперечні перерізи стійок пілонів

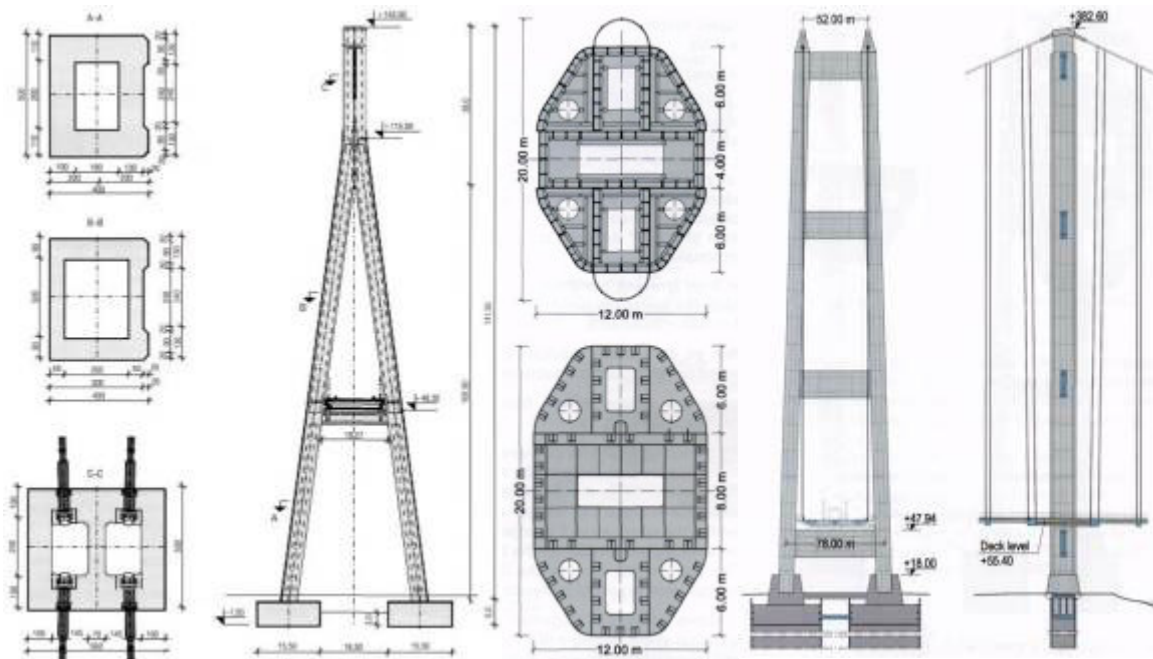


Рис. 3.12. Стійки залізобетонного пілону вантового мосту в Хорватії (ліворуч) та стійки металевого пілону підвісного Мессінського мосту в Італії (праворуч)

- **за розташуванням балки жорсткості** розділяють пілони, в яких:

а) балка не перериваючись проходить крізь отвори в стійках. При цьому конструкція пілонів ускладнюється, проте балка безперервна і зусилля в ній вирівняні по довжині. Сам пілон спирається на балку (рис. 3.8, б). У цьому випадку він не торкається пілонної опори;

б) балка розташована між стійками пілонів і спирається (або не спирається) на них (рис. 3.8, г, д, е; рис. 3.9).

Відсутність спирання балки на пілон сприяє вирівнюванню та зниженню згинальних моментів у балці. При цьому поздовжні сили гальмування транспорту сприймаються вантами та нерухомою опорною частиною на одному з кінців мосту (рис. 3.13).



Рис. 3.13. Мости у Швеції та Греції без спирання балок на пілони (повністю ізольовані від пілонів балки жорсткості, пов'язані з ними лише пружними демпферами, призначеними для сприйняття сейсмічного навантаження)

Існують також конструкції мостів із **похилими пілонами**.

Прикладом такої конструкції може бути міст через річку Дунай у Братиславі (рис. 3.14). Пілон даного мосту нахилений у бік меншого прогону, що дозволяє розвантажити відтяжку та її закріплення в устої, проте це призводить до збільшення довжини вант в основному прогоні моста.

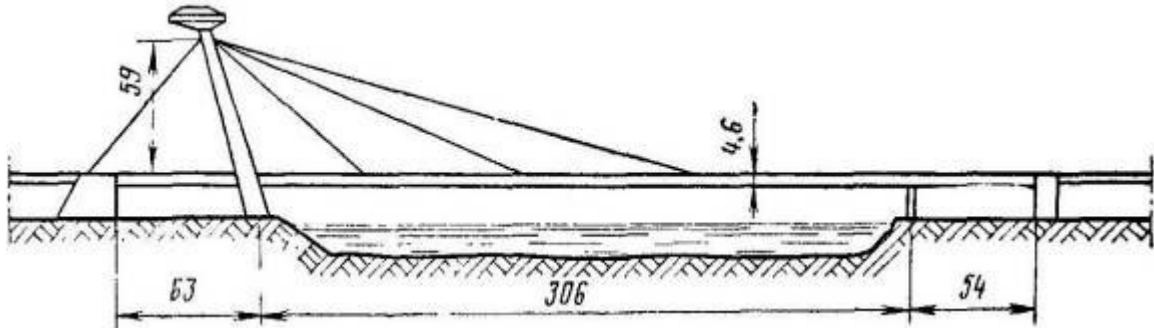


Рис. 3.14. Схема мосту через річку Дунай у Братиславі

Нахил пілона у бік великого прогону, як у моста через р. Томар (рис. 3.15), дозволяє зменшити річковий проліт, спираючи пілон одночасно на скелю поза руслом, а також поставити більш круто ванти. В результаті цього сталося збільшення довжини та пологості відтяжок, а також значно ускладнилися умови монтажу пілону.

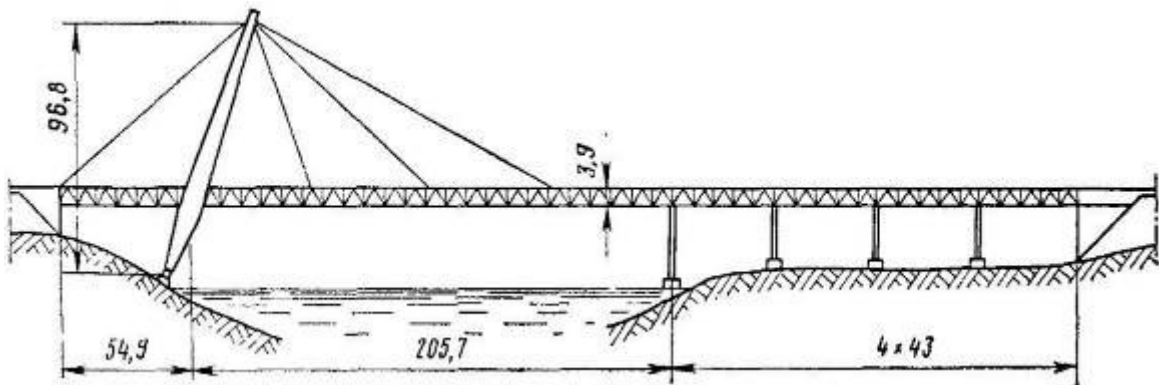


Рис. 3.15. Міст через річку Томар

До сказаного вище слід додати, що конструкції пілонів не мають специфічних особливостей, тому завжди проектується індивідуально, а при виборі схеми пілону в першу чергу потрібно керуватися економічними та архітектурними міркуваннями, а також забезпеченням його несної здатності.

Для захисту пілонів сучасних великих мостів від навалу суден біля них насипають острівці (штучні мілини), влаштовують так звані бамперні системи – підводні демпфери (поплавці) і т.п. (рис. 3.16).

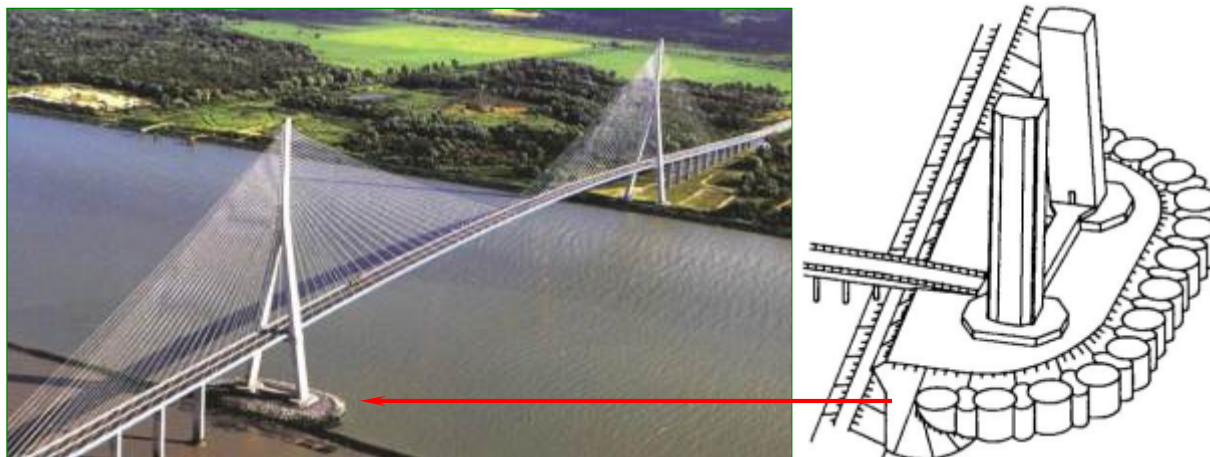


Рис. 3.16. Схема захисного огородження пілона вантового мосту Нормандія (палі-оболонки діаметром 8,9 м заповнені бетоном ($13\,000\text{ м}^3$) і гарантують захист від зіткнення з судном масою до 100 000 т)

Кінцеві (анкерні) опори. Балки жорсткості підвісних та вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Які перевірки необхідно зробити при визначенні розмірів анкерної опори?
2. Які функції виконують балки жорсткості підвісних і вантових мостів?
3. На які навантаження працюють балки жорсткості підвісних і вантових мостів?
4. Які за матеріалом бувають балки жорсткості?
5. Які балки жорсткості доцільно використовувати для підвісних мостів?
6. Які балки жорсткості доцільно використовувати для вантових мостів?
7. За яких прогонів застосовуються сталезалізобетонні балки жорсткості?
8. Що являє собою сталезалізобетонна плита?
9. За якими конструктивними формами виготовляють балки жорсткості?
10. Як виконують балку жорсткості при односторонньому завантаженні прогонової будови по ширині моста?
11. Від чого залежить ширина при призначенні розмірів балок жорсткості?
12. Як залежить висота балки жорсткості від прогону моста?
13. Якою має бути балка жорсткості при прогонах більших за 400–500 м?
14. Які критерії запропонував американський інженер Д. Штейнман для визначення висоти балки та її згинальної жорсткості у підвісних мостах?

Матеріали для відповідей:

1. Кінцеві (анкерні) опори мостів, як і пілони, не мають специфічних особливостей і проектується залежно від архітектурних міркувань та необхідної несної здатності. Під час визначення розмірів анкерної опори необхідно підтвердити виконання трьох основних перевірок: стійкість від перекидання; горизонтальний зсув плити основи опори по ґрунту; відсутність напруг розтягу по підшві фундаменту.

На рис. 3.17–3.21 показані принципові схеми, а також загальні види анкерних опор підвісних та вантових мостів.

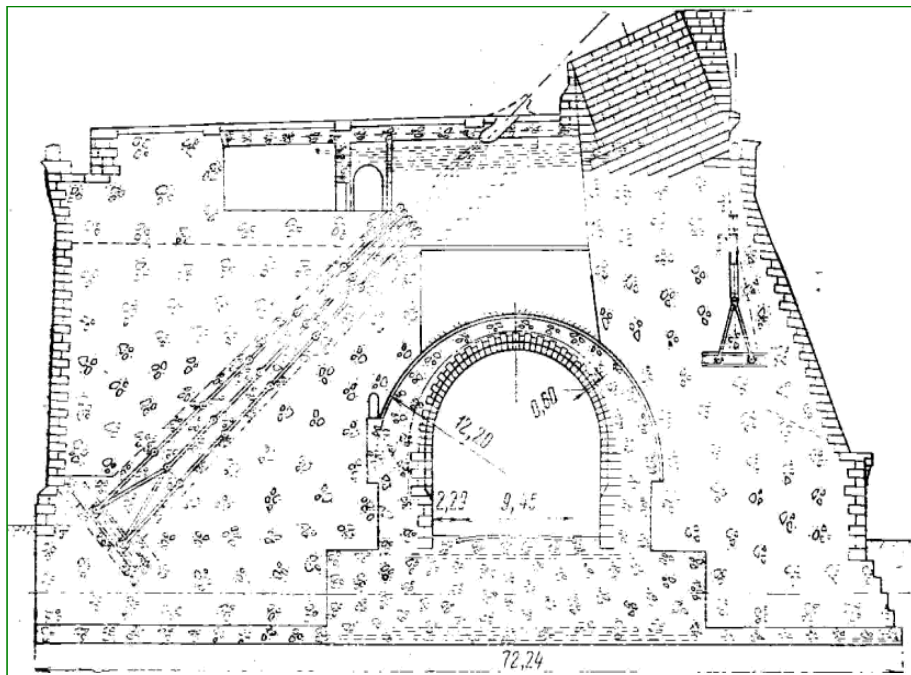


Рис. 3.17. Принципова схема анкерної опори великого підвісного мосту



Рис. 3.18. Анкерна опора багатопрогенового підвісного мосту Тайджоу (Китай) у процесі будівництва



Рис. 3.19. Анкерні опори підвісного мосту Сторелбелт

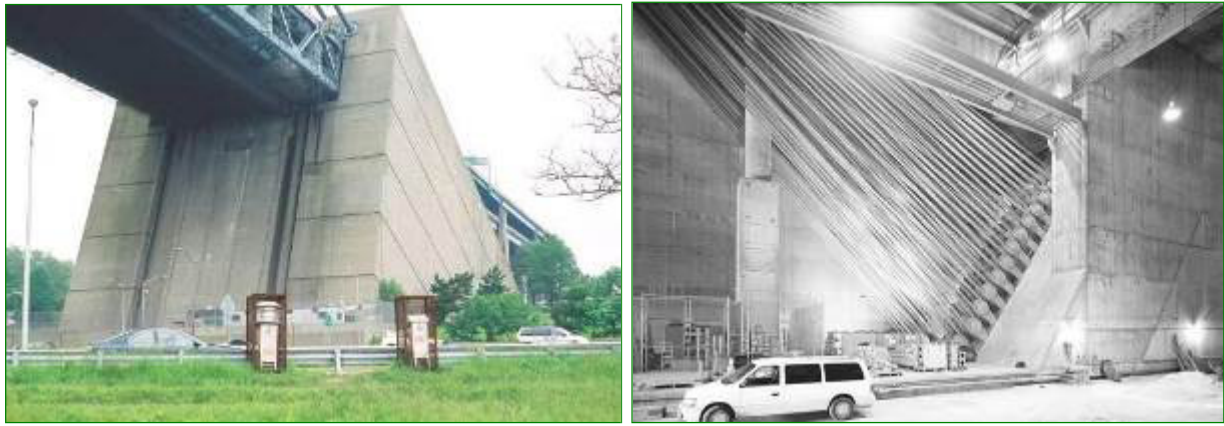


Рис. 3.20. Анкерна опора моста Веразано Нерроуз

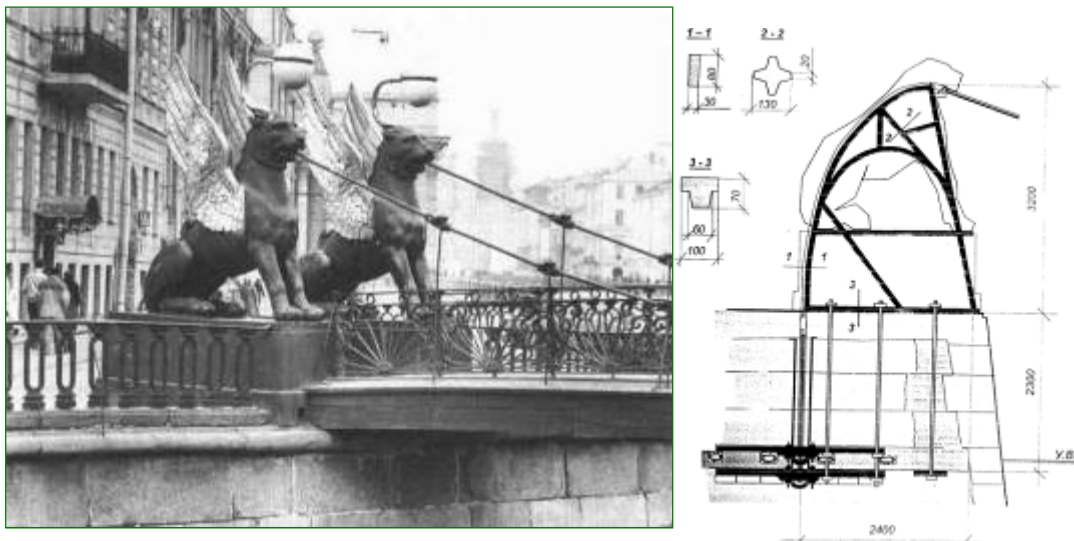


Рис. 3.21. Загальний вигляд та конструкція закладання ланцюгів в анкерній опорі Банківського мосту в Санкт-Петербурзі

2. Балки жорсткості підвісних та вантових мостів виконують кілька важливих функцій: сприймають тимчасове навантаження, передаючи зусилля на ванти чи кабель; працюють у складі всієї системи, збільшуючи її жорсткість; сприймають розпір у безрозпірних конструкціях.

Балки жорсткості працюють на згин, розтягування (стиснення) і кручення від вертикальних і горизонтальних навантажень і від аеродинамічних впливів.

За матеріалом балки жорсткості проектують металевими, залізобетонними або сталезалізобетонними (рис. 3.22).

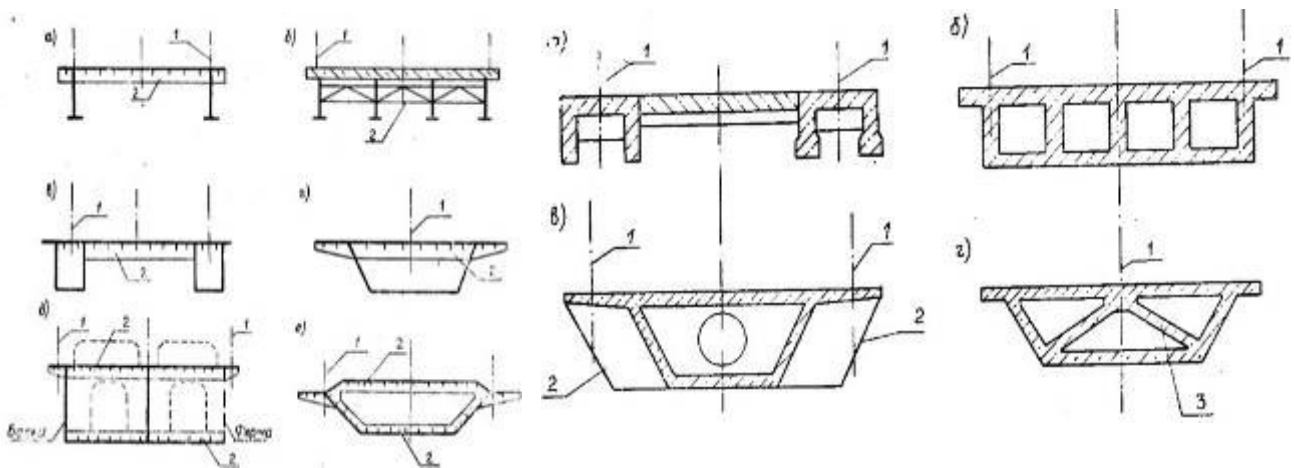


Рис. 3.22. Типи балок жорсткості за матеріалом:

1 – площина вант; 2 – поперечні та консольні балки-діафрагми, ребристі плити;
3 – розподільча ферма

Для підвісних мостів доцільним є застосування **металевих балок**, як легших, що призводить до зниження ваги кабелю, пілонів та анкерних опор.

Для вантових мостів при відносно невеликих прогонах 150–250 м доцільні **залізобетонні балки** жорсткості, що добре сприймають стискаючі зусилля від вант, проте при прогонах завдовжки 250–450 м економічнішими виявляються металеві балки жорсткості. При сталевих балках жорсткості проїзда частина, як правило, влаштовується у вигляді сталевої ортотропної плити або включеної в роботу головних балок залізобетонної плити.

Сталезалізобетонні балки дозволяють об'єднати переваги металевих (невелика власна вага) та залізобетонних (висока жорсткість) конструкцій. Вони застосовні при прогонах 200–300 м. Однак, складність представляє забезпечення роботи залізобетонної плити в зоні негативних моментів у разі виникнення S-подібного прогину підвісної конструкції.

Останнім часом у мостобудуванні успішно застосовують сталезалізобетонну плиту, в якій поверх ребристої сталевої ортотропної плити – піддону, укладають монолітну залізобетонну плиту невеликої товщини, що дає зменшення постійного навантаження порівняно із звичайною залізобетонною плитою та зменшення витрати сталі порівняно із звичайною металевою ортотропною плитою.

За конструктивними формами балки жорсткості виготовляють: у вигляді **двох суцільно-стінчастих сталевих** або **залізобетонних балок**, об'єднаних через 2–4 м поперечними балками, на які спирається плита проїжджої частини (рис. 3.23, а); у вигляді жорстких на кручення сталевих або залізобетонних коробчатих балок, розташованих з обох боків проїжджої частини (рис. 3.23, б, в) або посередині моста (рис. 3.23, г, д); у вигляді **коробчастих балок** із похилими стінками (рис. 3.23, в, е, ж, рис. 3.24, рис. 3.25); у вигляді **ґратчастих ферм**.

Тут необхідно відзначити, що коробчасті балки мають велику крутильну і згинальну жорсткість, однаково добре пристосовані до сприйняття як позитивних, так і негативних моментів, мають хороші аеродинамічні якості (особливо при похилих стінках), архітектурно сучасні, монтажні блоки зручні (стійкі) як при транспортуванні, так і при монтажі.

Ванти або підвіски прикріплюють безпосередньо до балки жорсткості (див. рис. 3.23, а, б, д, ж) або до спеціальних бортових балок (рис. 3.23, в, г, е).

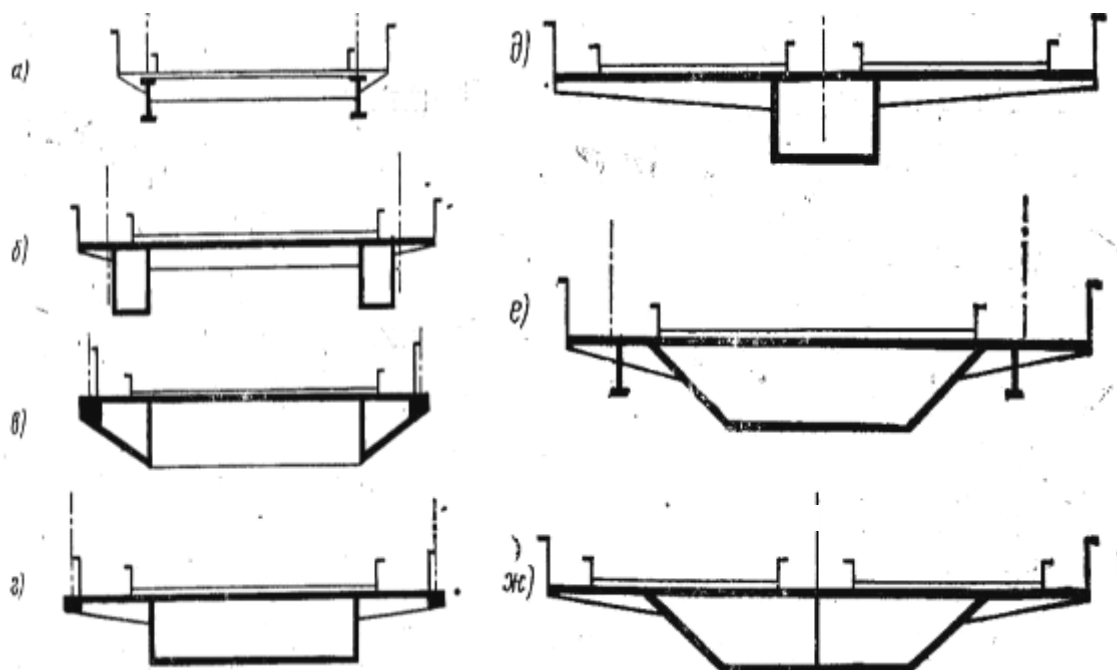


Рис. 3.23. Балки жорсткості підвісних та вантових мостів:
а – дві плоскі балки; б, в – дві коробчасті балки; г – одна коробчаста балка з двома площинами підвісок чи вант; д – одна коробчаста балка з однією площиною вант;
е, ж – коробчасті балки з похилими стінками

Види балок жорсткості дано також на рис. 3.24, рис. 3.25, рис. 3.26 та рис. 3.27.

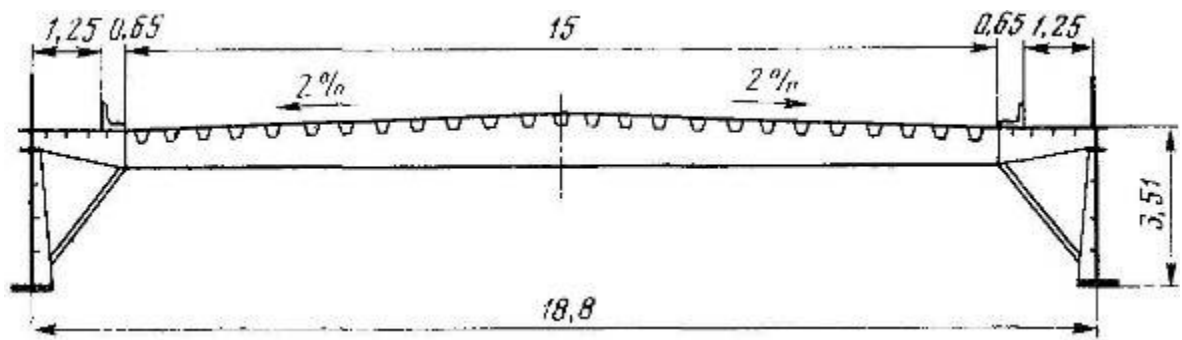


Рис. 3.24. Поперечний переріз балки жорсткості з ортотропною плитою

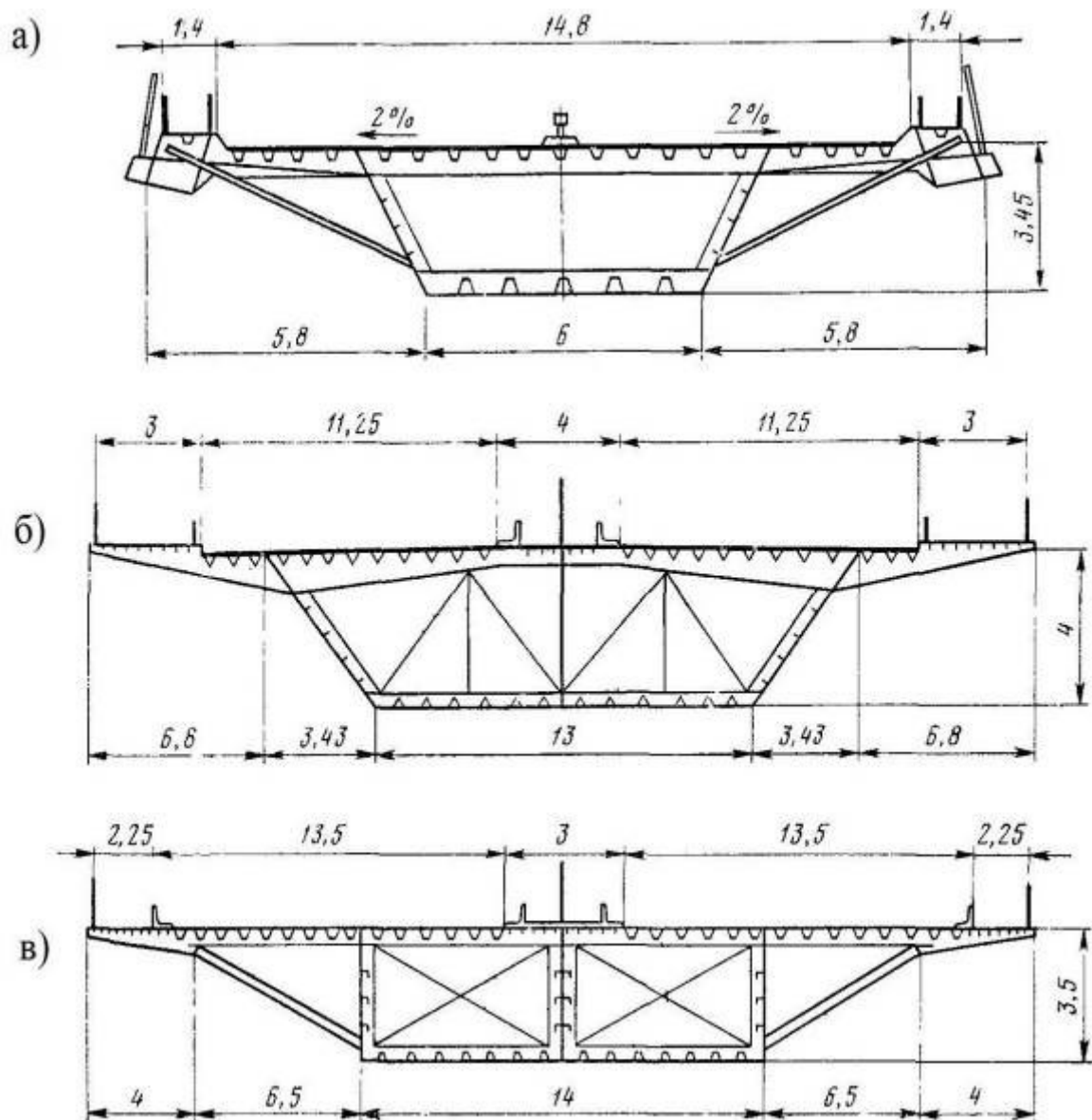


Рис. 3.25. Конструкції поперечного перерізу балки жорсткості коробчастого перерізу

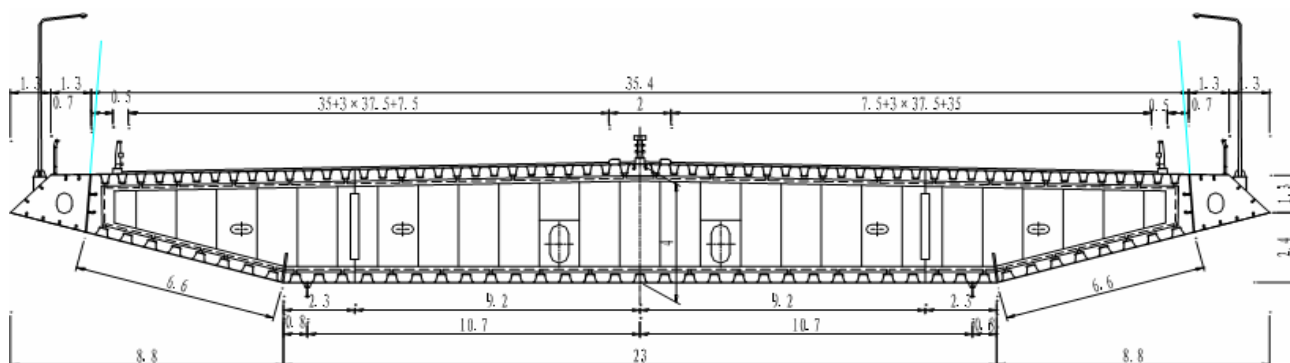


Рис. 3.26. Коробчаста балка жорсткості мосту Сутонг у Китаї (основний прогон мосту довжиною 1088 м, висота коробчастої балки жорсткості – 4,0 м)



Рис. 3.27. Секція балки жорсткості мосту через Босфор Східний

Форми поперечних перерізів балок жорсткості, розрахованих на **два несні кабелі (дві площини вант)** і на одну площину, як правило, істотно відрізняються одна від одної (див. рис. 3.23).

При односторонньому завантаженні прогонової будови по ширині моста (рис. 3.28) реакції з боку підвісок або вант не можуть врівноважувати зовнішнє навантаження, сили реакцій зовнішніх навантажень q складають момент, що скручує (з плечем s). Дві окремі балки погано сприймають такий момент, тому система з двох несних балок жорсткості, з'єднаних проїжджою частиною, замінюється однією коробкою.

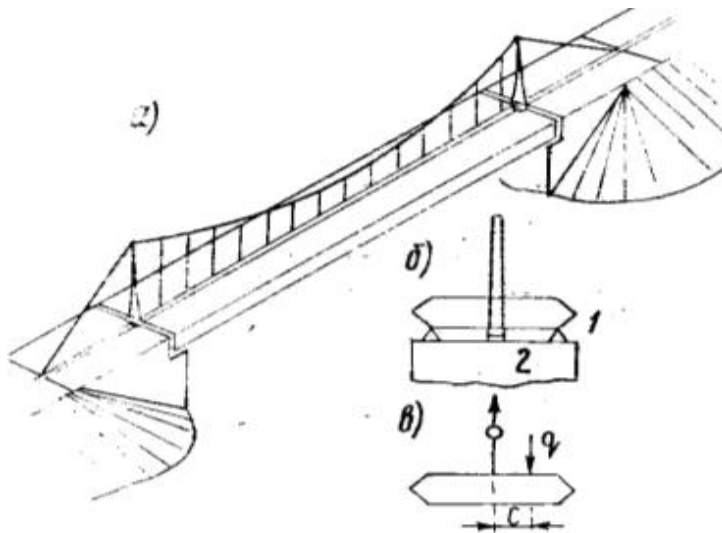


Рис. 3.28. Схема одностороннього завантаження прогонової будови

При призначенні розмірів балок жорсткості ширина визначається габаритом проїзду, шириною тротуарів, шириною огорож, шириною розділової та захисних смуг, шириною вант (підвісок) – не менше 0,5 м, а в деяких випадках і шириною стійок пілонів. Ванти (підвіски) кріплять до балки жорсткості поза межами проїздної частини в межах роздільної смуги, між тротуарами та огорожею проїзду або за поручнями.

Вважається, що у підвісних та вантових мостах **висота балок жорсткості** щодо основного прогону може становити:

- 1/60...1/80 – при прогонах 100–150 м та одностінчастих металевих балках із залізобетонною плитою проїздної частини;
- 1/80–1/100 – при прогонах 150–250 м і суцільнометалевих суцільностінчастих балках з ортотропною плитою;
- 1/100–1/120 і менше – при прогонах 250–350 м та балках замкнутого коробчастого перерізу обтічної форми;
- при прогонах понад 400–500 м балки можна робити ґратчастими.

Постійне навантаження у великих підвісних мостах може суттєво перевищувати тимчасове, створюючи значний натяг головних несних елементів. У цих умовах тимчасовому навантаженню стає важче змінити форму рівноваги системи, а тому зі зростанням прогону моста відносну висоту балки жорсткості можна приймати меншою.

Американський інженер *Д. Штейнман* для підвісних мостів запропонував наступні критерії призначення висоти балки та її згинальної жорсткості:

$$h_0 \geq 0,001 \times L \times (8,33 + 0,0033L),$$

$$EI \geq \frac{0,737 \ B \ L^4}{10000 \ \sqrt{f}}.$$

Тут L – основний прогон моста; B – відстань між крайніми балками (фермами) уперек мосту, м; f – стріла провисання кабелю, м.

Тут варто все ж таки враховувати, що для призначення висоти балок жорсткості підвісних мостів немає будь-яких суворо встановлених рекомендацій, а співвідношення висоти балки жорсткості та величини основного прогону може коливатися від 1/20 до 1/358 (рис. 3.29).

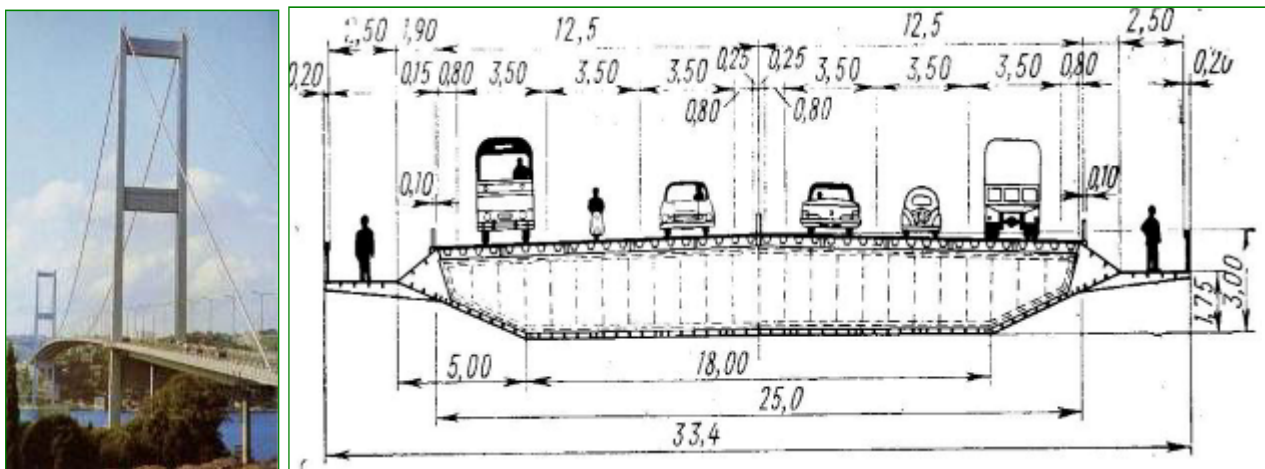


Рис. 3.29. Підвісний міст через протоку Босфор (величина прогону, що перекривається, 1090 м)

На думку експертів у галузі мостобудування, зараз розвиток великих підвісних та вантових мостів йде досить повільно, без особливих проривів. При цьому однією зі світових тенденцій тут називається вдосконалення форм балок жорсткості. Якщо балка жорсткості досить довга, а співвідношення її довжини до ширини наближається до критичного, треба розділяти її перемичками посередині, як, наприклад, це було на мосту Каменерізів і планується на Мессінському мосту (рис. 3.30). Хоча це і призводить до збільшення потужності балок, але покращує їх показники в плані кручення та аеродинамічні характеристики щодо поперечних переміщень.

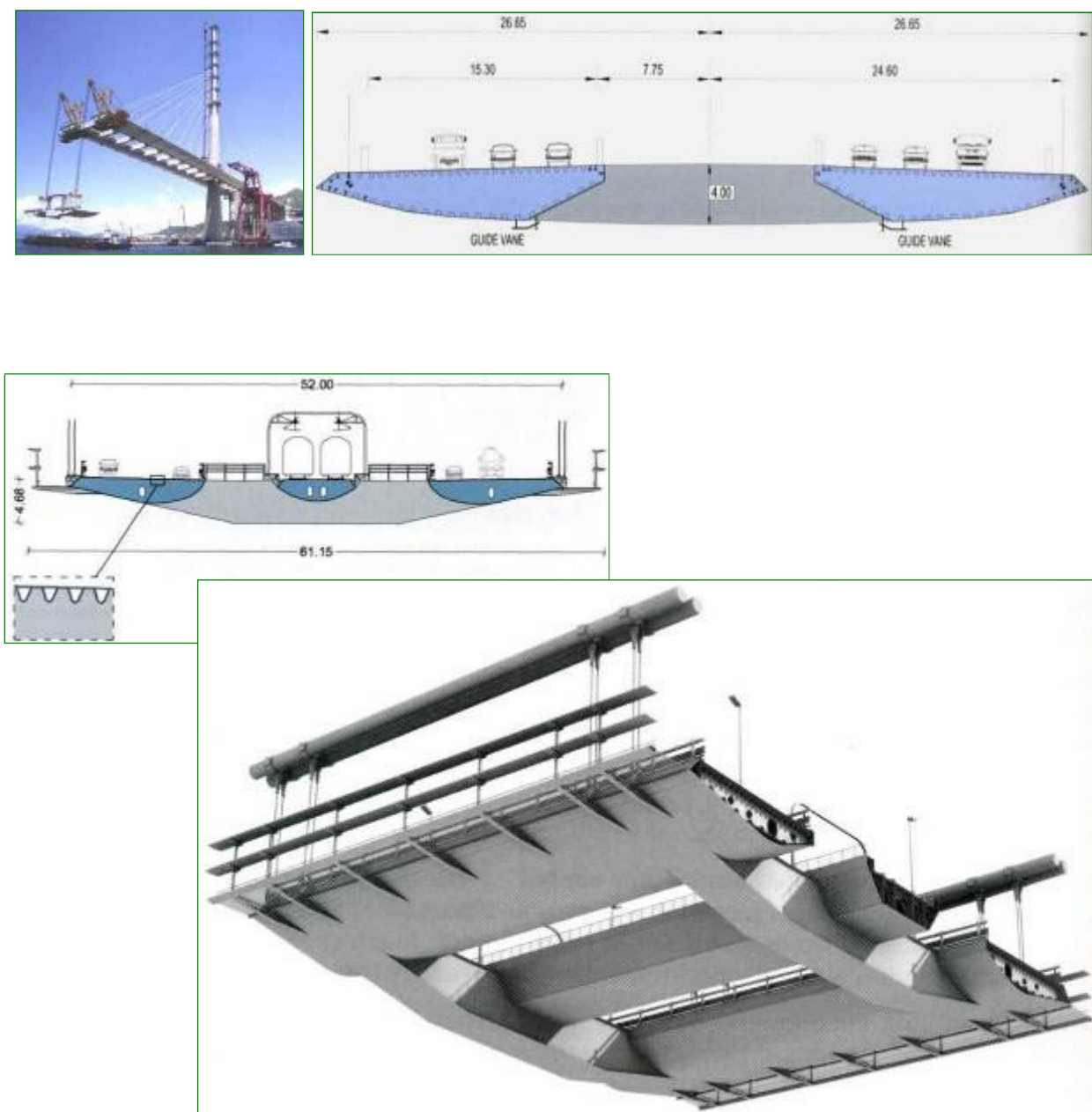


Рис. 3.30. Форми балок жорсткості вантового мосту Каменерізів у Китаї та підвісного Мессінського мосту в Італії

Покажемо також приклад процесу і етапів монтажу балок жорсткості вантового мосту на острів Російський (рис. 3.31) зі схемою моста $60+72+3 \times 84+1104+3 \times 84+72+60$ м та основним прогоном 1104 м.

Конструкція центрального прогону має аеродинамічний перетин для сприйняття навантажень від шквального вітру. Конфігурацію перерізу прогонової будови визначено на підставі аеродинамічних розрахунків та оптимізовано за результатами експериментальної обробки масштабної моделі на стадії робочого проектування.

Монтажні з'єднання на зварюванні використовуються для поздовжніх та поперечних стиків покриваючого листа ортотропної плити та нижньої ребристої

плити. Для стиків вертикальних стін блоків, поздовжніх ребер, поперечних балок та діафрагм застосовані монтажні з'єднання на високоміцних болтах.

Крупнозбірні секції для монтажу центральної прогонової будови у спеціально відведені вікна доставляються баржами до місця збирання і піднімаються краном на 76-метрову позначку. Тут багатотонні елементи стикуються і до них кріпляться ванти.



Рис. 3.31. Монтаж балок жорсткості вантового моста на острів Російський

Практичне заняття 4

Підвісні мости з балками жорсткості. Одно-, дво- та трьохпрогонові підвісні мости

Питання для відповіді:

1. Що називають підвісними мостами?
2. Що являється основною особливістю підвісних мостів?
3. На користь яких навантажень потрібно мати співвідношення навантажень в підвісних системах?
4. Що таке S-подібний прогин підвісної системи, коли він виникає та як можна зменшити його величину?
5. Яким чином підвищують економічність підвісної системи?
6. Які можуть бути прийняті параметри для величини прогону та довжини панелі однопрогонових підвісних мостів?
7. Який обрис осі кабеля однопрогонового підвісного моста?
8. Які можуть бути прийняті параметри для висоти пілону та його ширини по фасаду моста для однопрогонових підвісних мостів?
9. Як забезпечують однаковість зусилля в кабелі прогону та відтяжці однопрогонових підвісних мостів?
10. Які особливості стрічкових підвісних мостів?
11. З чим пов'язана знижена економічність двопрогонових підвісних мостів?
12. В чому переваги трьохпрогонових підвісних мостів?
13. Покажіть схеми трьохпрогонового моста з розрізними балками жорсткості.
14. Покажіть схеми трьохпрогонового моста з нерозрізними балками жорсткості.
15. Яке найкраще співвідношення прогонів в трьохпрогоновому мості?

Матеріали для відповідей:

1. Підвісними називають мости, у прогонових будовах яких головними несними елементами є розтягнуті гнучкі криволінійні (вільно провисаючі) «нитки» (кабелі), що підтримують за допомогою підвісок балку жорсткості та передають зусилля на пілони (рис. 4.1).

Основною особливістю підвісних мостів є те, що їхній головний несний елемент – кабель – є системою геометрично змінюваною і не може сприймати стискаючих зусиль, тому що при цьому втрачає стійкість. Насамперед через цю обставину підвісні системи мають знижену жорсткість.



Рис. 4.1. Підвісний однопрогоновий міст Сі Ду в Китаї
(висота моста 496 м – один із найвищих мостів у світі, довжина прогону 900 м)

Аналізуючи роботу головних несних елементів підвісних мостів під навантаженням, потрібно зазначити деякі особливості:

1. Завантаження кабелю зосередженою силою та завантаження рівномірно розподіленим за довжиною навантаженням дає в результаті різні форми рівноваги підвісної системи (рис. 4.2).

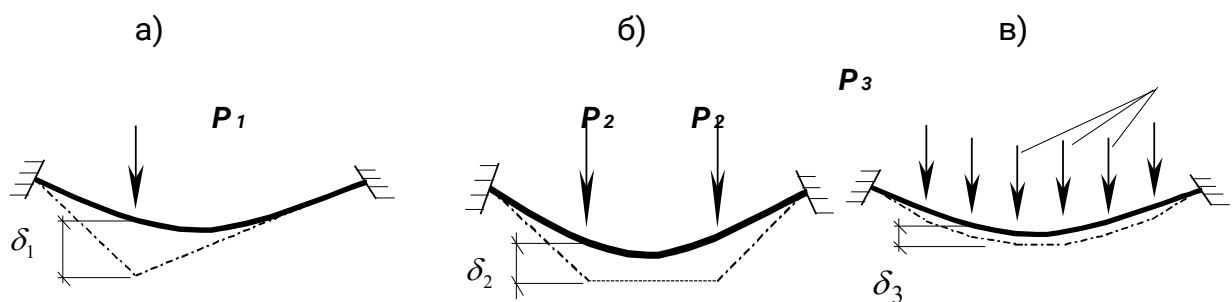


Рис. 4.2. Схеми роботи кабелю під різними навантаженнями:
а, б – модель зосередженого впливу тимчасового навантаження,
в – модель впливу розподіленого навантаження від власної ваги

Враховуючи зменшення загальних переміщень кабелю при рівномірному розподілі навантаження за його довжиною (рис. 4.2), можна зробити висновок про те, що у підвісних спорудах необхідно мати співвідношення навантажень на користь рівномірно розподілених, до яких насамперед потрібно віднести власну вагу. Тобто при великих прогонах і, отже, великій вазі споруди, частка зосередженого тимчасового навантаження буде відносно мала і їй буде

складніше змінити геометрію всієї підвісної системи. Крім того, у рівні проїжджої частини підвісних мостів слід застосовувати балку жорсткості, що сприяє більш рівномірній за довжиною передачі постійних і тимчасових навантажень на кабель. Тут необхідно додати, що вплив балки на кабель залежить від її жорсткості: чим вища жорсткість, тим менше переміщення кабелю. Проте дуже жорсткі балки застосовувати недоцільно, так як це є витратним рішенням і призводить до зниження економічності підвісної системи в цілому.

2. Завантаження тимчасовим навантаженням половини прогону підвісної системи викликає її S-подібний прогин (рис. 4.3).

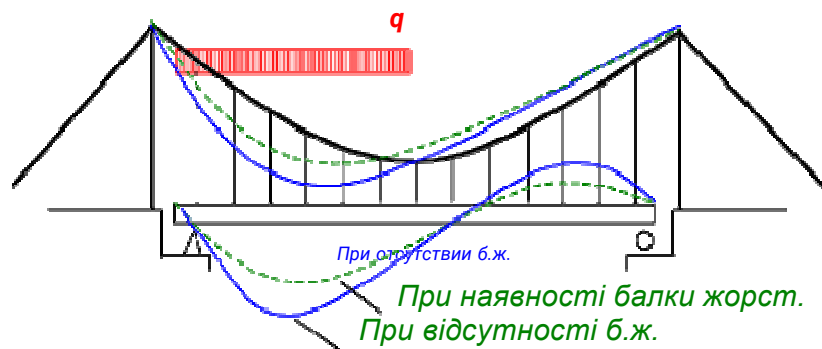


Рис. 4.3. Схема S-подібного прогину підвісної системи

Під впливом навантаження ліва частина моста (балки жорсткості) прогинається, за нею опускається вниз ліва частина кабелю. У цей час спрацьовує так званий «ефект нитки»: права частина кабелю розпрямляється, піднімається вгору і через підвіски змушує згинатися вгору балку жорсткості.

При застосуванні балки жорсткості вдається знизити величину S-подібного прогину (рис. 4.3). Причому тут також, як і в попередньому випадку, необхідно зазначити, що вплив балки на кабель залежить від її жорсткості на згин: чим вища жорсткість, тим менше переміщення кабелю, проте дуже жорсткі балки застосовувати недоцільно, оскільки це дорого.

З урахуванням того, що застосування потужних і жорстких балок є витратним і дорогим рішенням, збільшити економічність системи можна, розвантаживши балку жорсткості від дії постійного навантаження, передавши її власну вагу на кабель цілком. Для цього на період будівництва в конструкцію



Рис. 4.4. Схема звільнення балки від дії постійного навантаження під час будівництва



Рис. 4.5. Складання залізобетонної балки жорсткості підвісного мосту в Китаї (введення тимчасових шарнірів)

вводять тимчасові шарніри (рис. 4.4 і рис. 4.5), а після закінчення будівництва шарніри заглушають. При такому рішенні на балку, як правило, передається не більше 2–5% власної ваги, а решта сприймається кабелем.

Враховуючи зазначені вище корисні особливості роботи балки у складі підвісної системи, на сьогоднішній день підвісні мости з балкою жорсткості (так звані комбіновані) є найпоширенішим типом підвісних мостів.

Одно-, дво- та трьохпрогонові підвісні мости

Однопрогонові підвісні мости є найбільш наочною і простою (класичною) схемою підвісної споруди і можуть мати при цьому практично будь-яку величину прогону, що перекривається (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Однопрогоновий автодорожний підвісний міст через Босфор в Туреччині (величина прогону, що перекривається, 1090 м)

Принципову схему та позначення основних розмірів однопрогонового підвісного мосту проілюстровано на рис. 4.7.

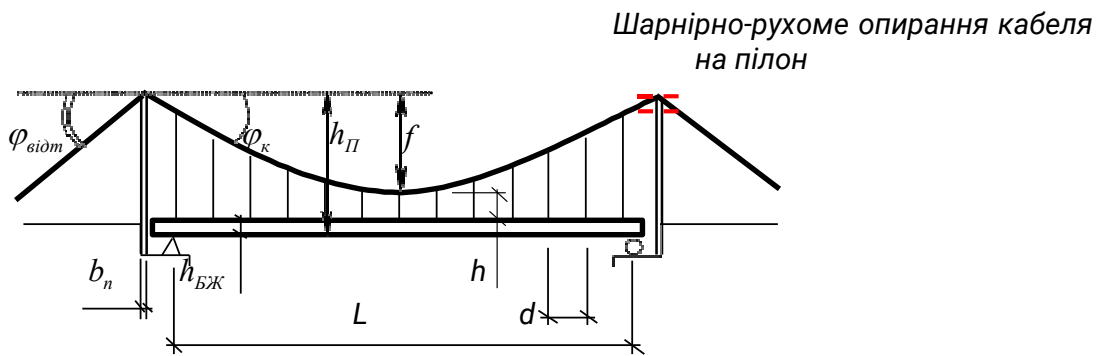


Рис. 4.7. Схема та позначення основних розмірів однопрогонового мосту

Для однопрогонових підвісних споруд можуть бути прийняті такі основні розміри та їх співвідношення:

величина прогону – $L_{\max} = 100 \dots 3500$ м;

стріла провисання кабелю – $f = (1/8 \dots 1/12)L$ м;

обрис осі кабелю – квадратна парабола – $y_i = 4f x_i L^{-2} (L - x_i)$;

довжина панелі – $d = (1/20 \dots 1/25)L$;

висота балки жорсткості – $h_{БЖ} = (1/60 \dots 1/350)L$.

Залежно від довжини прогону та матеріалу прогонової будови довжину панелі призначають: для залізобетонних балок жорсткості – рівною 5–10 м, для металевих 10–35 м. При цьому слід враховувати, що зростання довжини панелі призводить до скорочення числа вузлів кабелю та підвісок, проте при цьому зростають зусилля у підвісках, і обтяжується балка жорсткості (проїздна частина).

З досвіду проектування та будівництва великих підвісних мостів видно, що зі збільшенням довжини прогону (і, отже, збільшенням власної ваги конструкцій) відносна висота балки жорсткості, як правило, зменшується. Крім того, як відомо, балки жорсткості можуть бути різних конфігурацій та конструкцій. Так Сівернський міст в Англії при прогоні 988 м має коробчасту балку заввишки 3,04 м ($1/325 \times L$), прогон Фортського мосту в Англії – 1006 м – майже дорівнює прогону Сівернського, при цьому Фортський міст має ґратчасту балку жорсткості у вигляді двох ферм заввишки 8,25 м (що в 2,7 рази вище, ніж коробка Сівернського мосту), проте вертикальна жорсткість цих мостів однакова.

Назначають також ширину пілону по фасаду моста – $b_{\Pi} = (1/25 \dots 1/35)h_{\Pi}$;

висоту пілона – $h_{\Pi} = h_{Б.Ж.} + h + f$, де $h = (0,05 \dots 0,1)f$, але не менше 2,5–3 м – в мостах з вертикальними підвісками та $h = (0,2 \dots 0,25)f$ – з підвісками

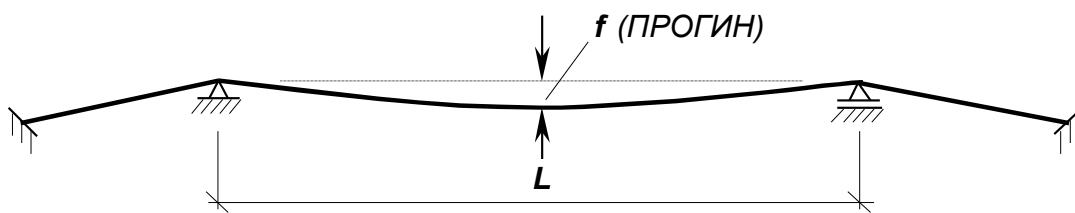
похилими.

Однакове максимальне зусилля в кабелі та відтяжці забезпечується рівністю їх кутів опирання на пілони – $\varphi_k = \varphi_{відм}$ (при цьому тангенс кута нахилу відтяжки до горизонту дорівнює $\operatorname{tg} \varphi_{відм} = 4f / L$) та шарнірним опиранням кабеля і відтяжки.

У практиці мостобудування є приклади однопрогонових безпілонних мостів, які також відносять до підвісних систем – це стрічкові підвісні мости, де проїзду частину поєднано з основними несними елементами.

На цей час у світі побудовано щонайменше двадцять мостів-стрічок капітального типу, більшість із них – це пішохідні мости. Рекордний прогон довжиною 127 м має міст через річку Сакраменто. Найдовший в даний час багатопрогоновий міст-стрічка довжиною 261 м розташований біля міста Німбурк в Чехії.

Для влаштування проїзду (проходу) прогонова будова мостів-стрічок має дуже невелику стрілу прогину $(1/200 \dots 1/300) \times L$. Тут варто зазначити, що чим менша стріла прогину, тим більша величина розпору в системі і тим більші напруги розтягу. Тому стрічкові системи, як правило, характеризуються дуже великим розпором. Нижче дана схема такого мосту.



У підсумку потрібно зазначити, що основною особливістю однопрогонових підвісних систем є те, що вони завжди є розпірними, вимагають влаштування анкерних опор і більшою мірою можуть бути рекомендовані для конструкцій легких, невеликих прогонів.

Двопрогонові підвісні мости не набули широкого поширення, так як мають менш прийнятний зовнішній вигляд і є менш економічними в порівнянні з однопрогоновими підвісними системами.

Загальна схема та деякі конструктивні особливості двопрогонового підвісного мосту показані на рис. 4.8. Приклад збудованого підвісного двопрогонового мосту наведено на рис. 4.9.

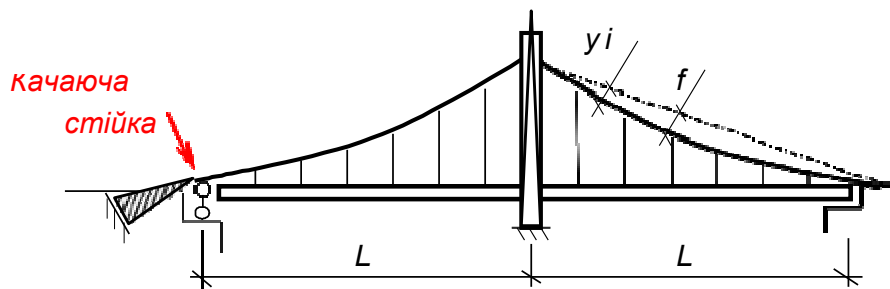


Рис. 4.8. Загальна принципова схема двопрогонового підвісного мосту

Знижена економічність двопрогонових підвісних мостів, перш за все, пов'язана з тим, що в них природним чином зменшено стрілу провисання кабеля, внаслідок чого величина згинального моменту в балці жорсткості має більші в порівнянні з іншими підвісними системами значення.



Рис. 4.9. Міст Окленд Бей Брідж через Затоку Сан-Франциско (США)

Трьохпрогонові підвісні мости є найбільш поширеною схемою підвісної споруди і можуть мати величину прогону, що перекивається, до декількох кілометрів. Ці мости прийнято розрізняти, відповідно до типу балок жорсткості, як розрізні, або нерозрізні, та за співвідношенням довжин прогонів, а також за способом їх закріплення на кабелі.

Трьохпрогонові підвісні мости з розрізними балками жорсткості можуть бути:

– з підвішеними до кабелю бічними прогонами – влаштовуються при співвідношенні довжин прогонів $0,25 \times L_2 < L_1 \leq 0,5 \times L_2$ (рис. 4.10).

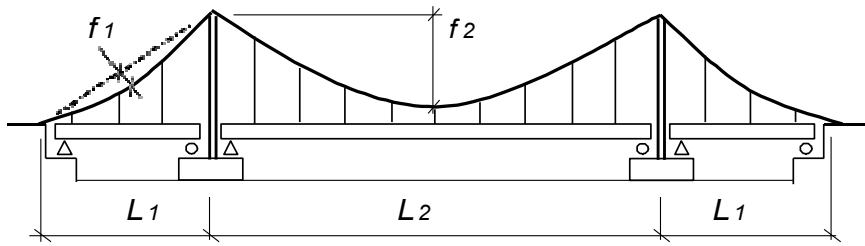


Рис. 4.10. Схема мосту з підвішеними бічними прогонами

Для забезпечення рівності розпору в кабелі в основному та бічних прогонах ($H_1=H_2$) необхідна рівність кутів спирання на пілоні кабелю та відтяжки, шарнірно-рухоме їх спирання та виконання умови: $f_1 = f_2 L_1^2 / L_2^2$, де L_1 та L_2 – довжина, відповідно, бічних та середнього прогонів; f_1 та f_2 – стріли провисання кабелю, відповідно, у бічних та середньому прогонах.

- з не підвішеними до кабелю бічними прогонами – влаштовуються при співвідношенні довжин прогонів $L_1 \leq 0,25 \times L_2$ (рис. 4.11). Слід зазначити, що з погляду статичної роботи підвісна частина трьохпрогонової системи аналогічна однопрогонової підвісній схемі (бо бічні прогони моста до підвісної системи не мають відношення).

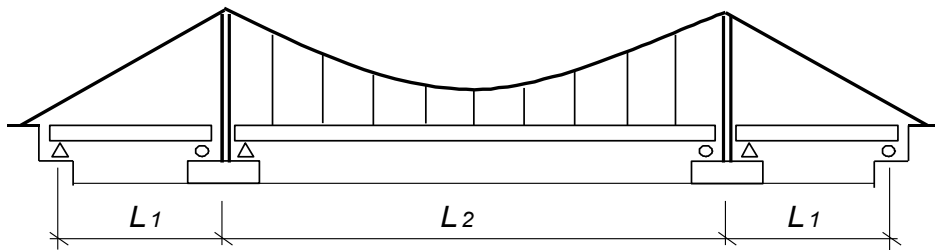


Рис. 4.11. Схема мосту з не підвішеними боковими прогонами

Трьохпрогонові мости с нерозрізними балками жорсткості також можуть бути:

- з підвішеними до кабелю бічними прогонами – влаштовуються при співвідношенні довжин прогонів $0,25 \times L_2 < L_1 \leq 0,5 \times L_2$ (рис. 4.12 та рис. 4.13).

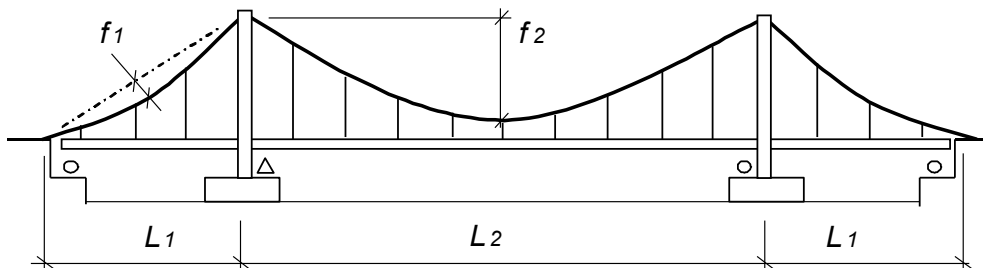


Рис. 4.12. Схема мосту з підвішеними бічними прогонами



Рис. 4.13. Трьохпрогоновий підвісний міст Лі Сун Шина в Кореї (величина основного прогону 1545 м – один з найбільших за величиною прогону міст у світі)

- з не підвішеними до кабелю бічними прогонами – влаштовуються при співвідношенні довжин прогонів $L_1 \leq 0,25 \times L_2$ (рис. 4.14).

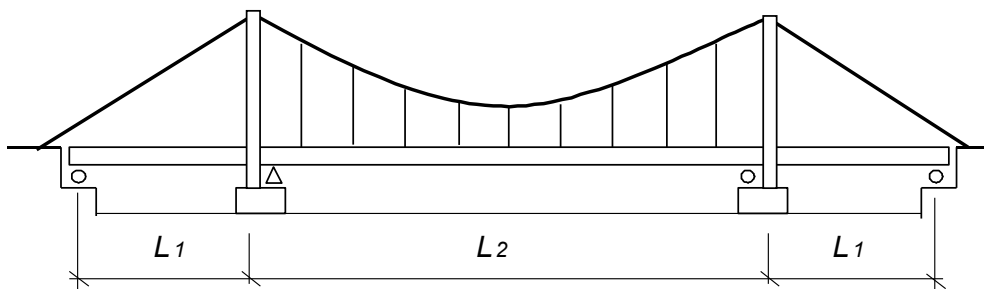


Рис. 4.14. Схема мосту з не підвішеними бічними прогонами

Порівнюючи запропоновані вище схеми трьохпрогонових підвісних мостів за співвідношенням прогонів та способом їх закріплення, можна зробити такі висновки:

- за співвідношенням довжин прогонів краще, якщо $L_1 \leq 0,25 \times L_2$, так як при цьому кабель у бічних прогонах прямолінійний, деформації його пружні, а отже, жорсткість підвісної системи в цілому вища;

- якщо є можливість, то бічні прогони не підвішують на кабель, так як при цьому конструкція моста спрощується внаслідок скорочення кількості елементів та вузлів;

- бічні прогони можуть мати різну довжину (хоча зазвичай по довжині вони однакові).

Порівнюючи запропоновані вище схеми, на кшталт балки жорсткості, як розрізні і нерозрізні, також можна зробити кілька висновків:

- нерозрізність балок дозволяє дещо зменшити ширину проміжних опор через те, що на опорі встановлюється лише одна опорна частина;

- нерозрізність балок дозволяє зменшити кількість деформаційних швів на споруді (у деяких випадках їх може бути лише два).

Крім зазначеного вище, нерозрізність балок жорсткості підвісних мостів практично нічого не дає, а загалом навіть погіршує їх техніко-економічні показники. Пов'язано це з наступними обставинами:

- нерозрізні балки дещо жорсткіші, тому «беруть на себе» більшу частку тимчасового навантаження, розвантажуючи при цьому кабель і знижуючи при цьому економічність системи;

- при збільшенні довжини прогону (при великих прогонах) відносна жорсткість балки в цілому зменшується, тому нерозрізність не приносить істотного зменшення прогинів (порівняно з розрізною системою), але в той же час у балці жорсткості збільшуються температурні та силові деформації;

- нерозрізність мостових балок приносить найбільший (відчутний) економічний ефект лише від дії постійного навантаження, а балки жорсткості підвісних мостів для підвищення їх економічності від дії постійних навантажень намагаються звільнити.

Багатопрогонові підвісні мости та заходи з підвищення їхньої жорсткості

Питання для відповіді:

1. Коли застосовуються багатопрогонові підвісні мости?
2. Яка основна конструктивна особливість багатопрогонових підвісних мостів?
3. Вкажіть можливі варіанти схем компонування багатопрогонових підвісних мостів?
4. Які особливості мають багатопрогонові підвісні мости?
5. Що відносять до основних заходів щодо підвищення жорсткості багатопрогонових підвісних мостів?
6. Покажіть схему з підвищення жорсткості багатопрогонових підвісних мостів об'єднанням вершин пілонів додатковим елементом-затяжкою - кабелем жорсткості.
7. Покажіть схему з підвищення жорсткості багатопрогонових підвісних мостів через поділ багатопрогонових підвісних мостів на кілька трипрогонових шляхом улаштування проміжних анкерних опор?
8. Покажіть схему з підвищення жорсткості багатопрогонових підвісних мостів влаштуванням жорстких пілонів, здатних сприймати одностороннє навантаження та які мають на вершині нерухоме закріплення кабелю.
9. Які основні особливості роботи кабеля жорсткості?
10. Що роблять для підвищення ефективності роботи кабеля жорсткості?
11. Як працює пристрій рухомої анкерної протитяги для підтримки натягу кабелю жорсткості та усунення його пружних деформацій?
12. В чому особливість зовнішньо-безрозпірних (безрозпірих) підвісних систем? Покажіть схему передачі зусиль від кабелю в мостах із нерозрізними балками жорсткості.
13. Покажіть схему безрозпірного мосту із шарнірною балкою жорсткості.
14. Що відносять до переваг безрозпірних мостів?
15. Що відносять до недоліків безрозпірних мостів?
16. Які основні особливості залізобетонних балок жорсткості в безрозпірних мостах?

Матеріали для відповідей:

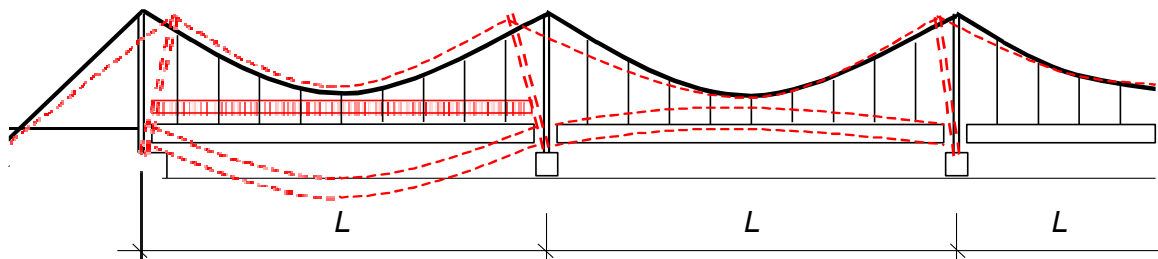
1. Багатопрогонові підвісні мости можуть застосовуватися при перетині широких водних перешкод (де необхідна велика довжина споруди) або у разі перетину великих просторів при слабких ґрунтах (тут потрібна велика кількість

складних опор). Проте в останні роки в практиці мостобудування такі системи застосовуються досить рідко.

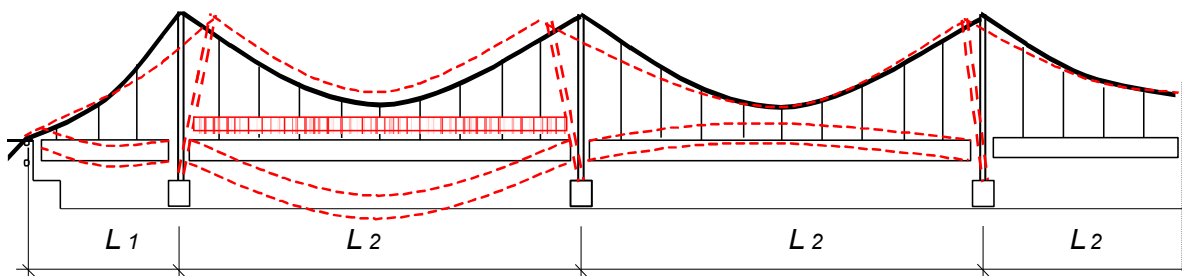
Основною конструктивною особливістю цих споруд є те, що їхній головний несний кабель пропускається через усі прогони та закріплюється в анкерних опорах.

Нижче на рис. 4.15 представлені деякі можливі варіанти схем компонування багатопрогонових підвісних мостів, а на рис. 4.16 показано приклад мосту, побудованого в останні роки.

а) При рівних прогонах (без бокового прогону)



б) При $0,25 \times L_2 < L_1 \leq 0,5 \times L_2$ (з підвішеним бічним прогоном)



в) При $L_1 \leq 0,25 \times L_2$ (з не підвішеним бічним прогоном)

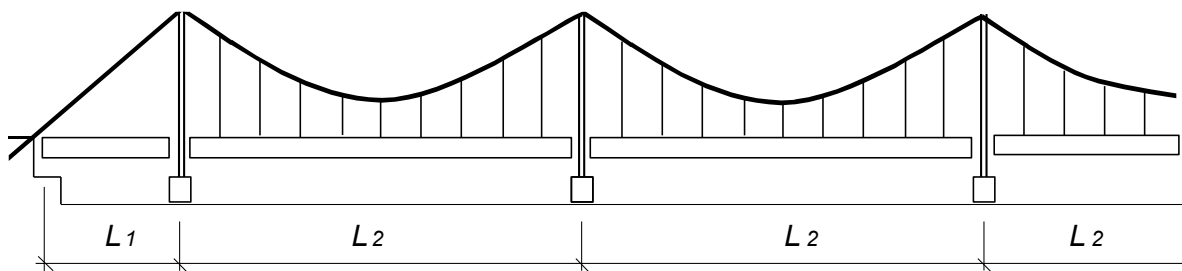


Рис. 4.15. Схеми компонування багатопрогонових підвісних мостів

До особливостей багатопрогонових підвісних мостів можна віднести:

- велику перекривну здатність, що дозволяє значно скоротити кількість проміжних опор та створення при будівництві менших перешкод для судноплавства у створі мосту, а також (надалі) покращення умов навігації;

- можливість монтажу прогонової будови за досить гнучкими технологічними схемами, без заняття великих берегових територій та з

використанням суднових ходів, з раціональним урахуванням топографічних, геологічних, гідрологічних та екологічних особливостей переходу, а також виходячи з вимог навігації;

- врівноваженість розпору від постійного навантаження за однакових прогонів моста;

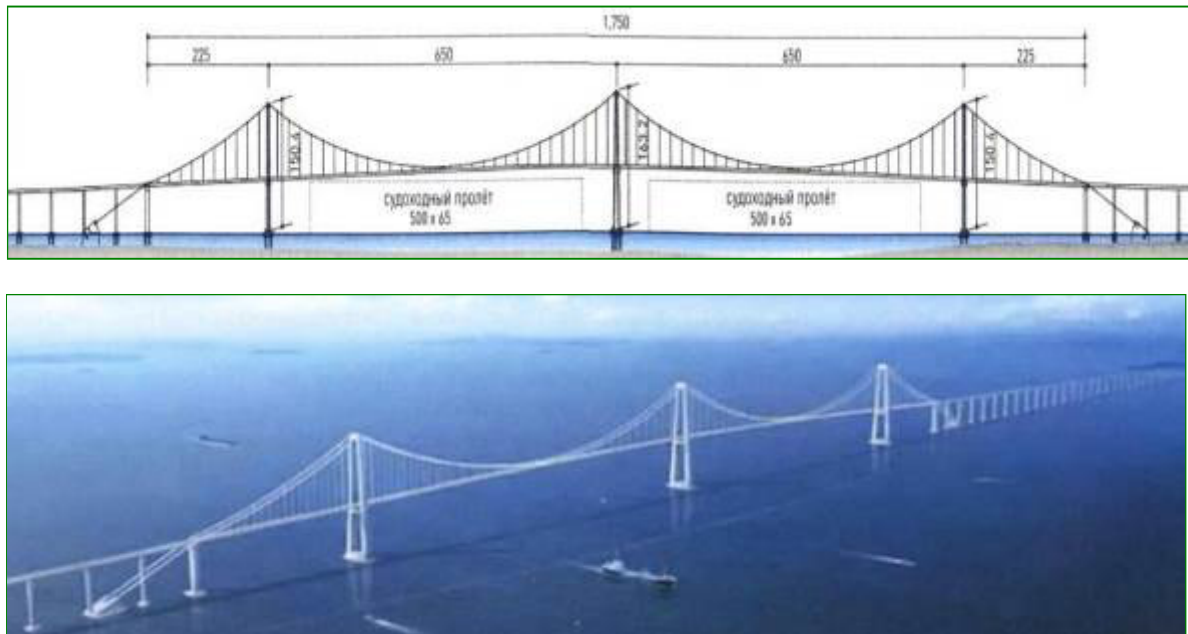


Рис. 4.16. Багатопрогоновий підвісний міст в Кореї

- суттєве зменшення зусиль у головних несних кабелях (порівняно з традиційною трьохпроговою схемою) і, як наслідок, скорочення розмірів анкерних опор та інших елементів конструкції, що дозволяє здійснити будівництво моста з наддовгими прогонами на більш слабких ґрунтах та з відносно меншими фінансовими витратами;

- досить низьку економічність, пов'язану зі зменшенням (при зростанні числа прогонів) величини розпору і збільшенням, у зв'язку з цим, згинального моменту в балці жорсткості;

- застосування (як правило) розрізних балок жорсткості;

- знижену вертикальну жорсткість (див. випадок завантаження одного з прогонів на рис. 4.15) і те, що зі збільшенням кількості прогонів загальна жорсткість системи продовжує знижуватися.

Дослідження дозволяють зробити висновок, що застосування багатопрогонових підвісних мостів без вживання спеціальних заходів, що підвищують їхню жорсткість, практично неможливе.

До основних заходів щодо підвищення жорсткості багатопрогонових підвісних мостів відносять:

- влаштування жорстких пілонів, здатних сприймати одностороннє навантаження та які мають на вершині нерухоме закріплення кабелю (див. рис. 4.16 і рис. 4.17);

- поділ багатопрогонових підвісних мостів на кілька трьохпрогонових шляхом улаштування проміжних анкерних опор, що працюють при односторонній дії тимчасових навантажень на перекидання (рис. 4.18, рис. 4.19 та рис. 4.20);

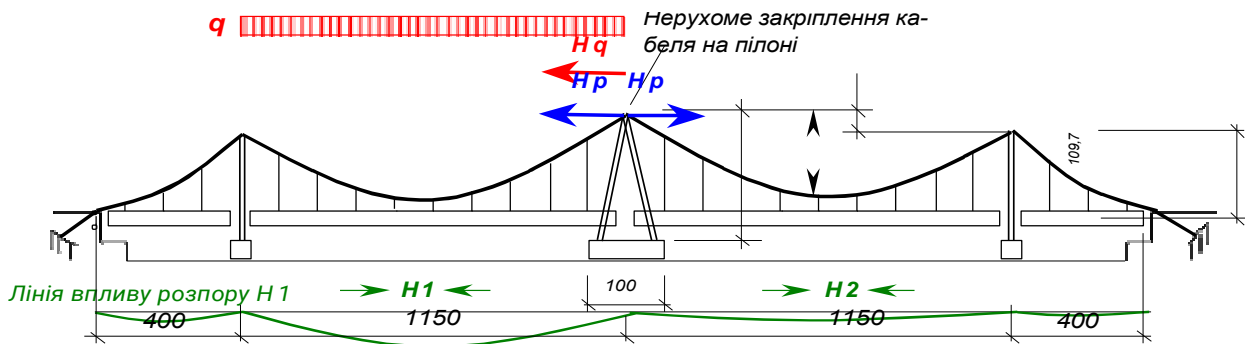


Рис. 4.17. Проектні опрацювання моста Акасі в Японії.

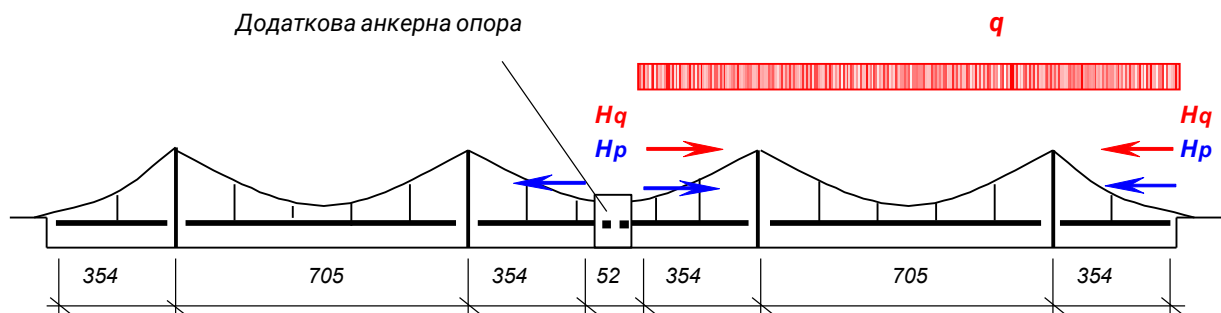


Рис. 4.18. Схема роботи анкерної опори у складі багатопрогонового підвісного мосту (на прикладі Оклендського мосту США)



Рис. 4.19. Загальний вигляд та проміжна анкерна опора Оклендського мосту

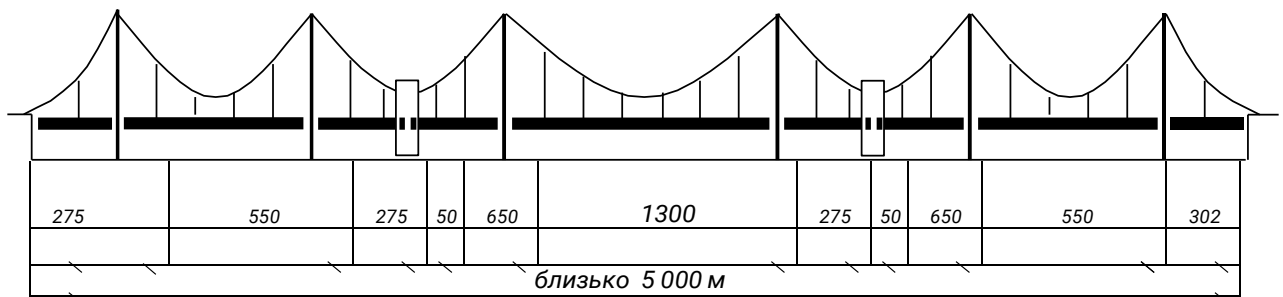


Рис. 4.20. Проектні опрацювання моста Акасі в Японії

- об'єднання вершин пілонів додатковим елементом-затяжкою - кабелем жорсткості (рис. 4.21).

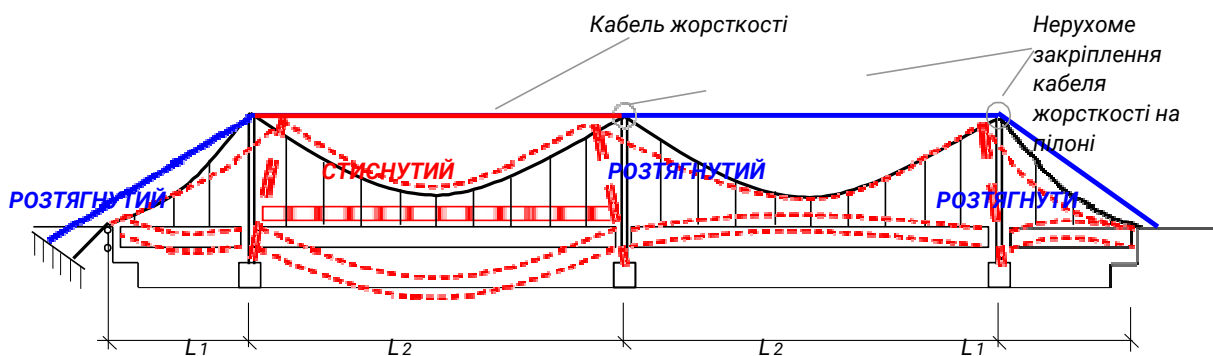


Рис. 4.21. Схема роботи кабелю жорсткості у складі мосту

До основних особливостей роботи кабелю жорсткості відносяться:

- кабель повинен витримувати розпир, що викликається тимчасовим навантаженням;
- кабель повинен бути здатний чинити опір великим переміщенням;
- найефективніше кабель працює при завантаженні одного прогону;
- негативно на роботі кабелю позначаються температурні впливи, що створюють в ньому і в усіх конструкціях споруди додаткові напруги.

Для підвищення ефективності роботи кабелю жорсткості (збільшення його приведеної жорсткості, зменшення провисання та усунення температурних деформацій) при встановленні його попередньо натягують на величину розпору від тимчасового навантаження. Якщо кабель прямолінійний, деформації його пружні, то переміщення вершин пілонів і прогини завантаженого прогону будуть невеликі. Після попереднього натягу в завантаженому тимчасовим навантаженням прогоні кабель працює як розпирка, а в незавантажених не змінює свого натягу і, отже, не деформується.

Для підтримки натягу кабелю жорсткості та усунення його пружних деформацій у незавантажених прогонах можливе влаштування рухомої анкерної протизаги, так званого «важеля другого роду» або устою-балансиру (пропозиція Н.С. Стрелецького). У цьому випадку витрати на анкерні пристрої можуть виявитися дещо нижчими (рис. 4.22).

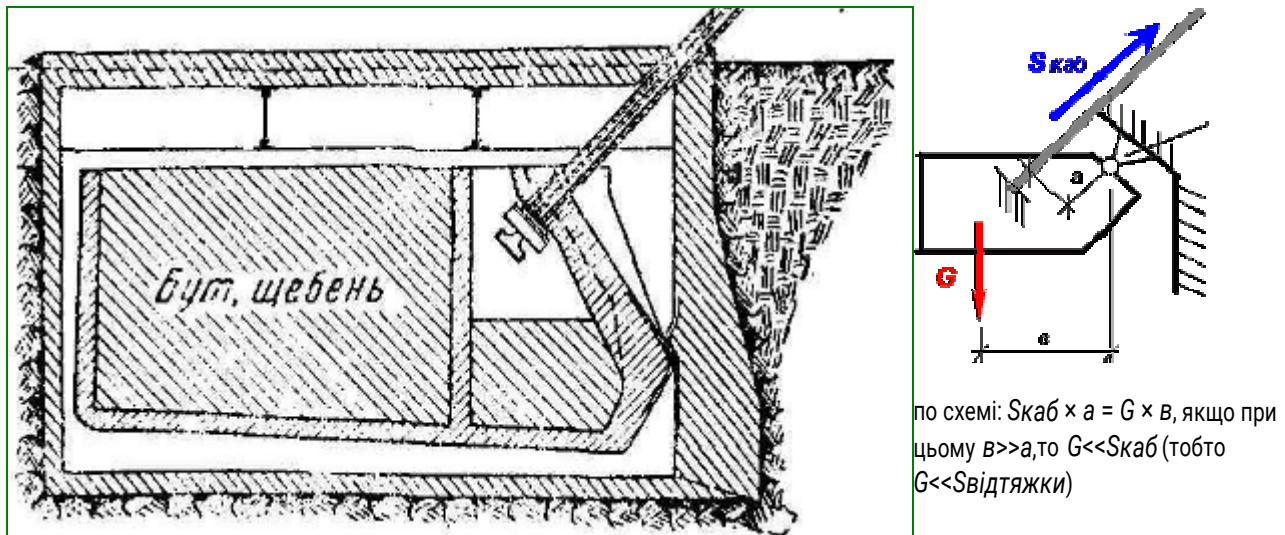


Рис. 4.22. Принципова схема рухомої протизаги для кабелю

2. Зовнішньо безрозпирні підвісні мости

Якщо необхідно уникнути будівництва важких і дорогих анкерних опор, можна використовувати так звані зовнішньо безрозпирні (безрозпирні) підвісні системи (рис. 4.23), основна особливість яких полягає в тому, що щодо опорних реакцій вони подібні до безрозрізних балок (рис. 4.24), а розпир від кабелів у них не передається за межі моста.



Рис. 4.23. Єлизаветинський міст у Будапешті (схема: 57+290+57м). Міст має стійки пілонів, що гойдаються, шарнірно прикріплені до опор; при цьому балка жорсткості пропущена крізь отвори у стійках пілонів

Балки жорсткості в таких мостах можуть бути нерозрізними, будучи розпірною, або консольними; шарніри повинні допускати передачу стискаючих зусиль від розпору (рис. 4.25).

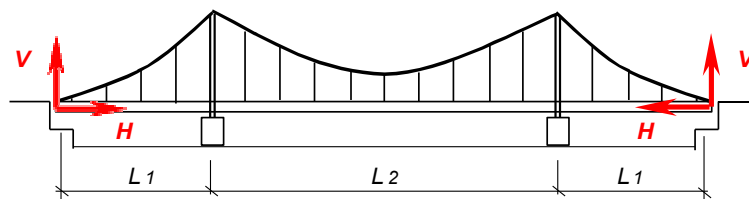


Рис. 4.24. Схема передачі зусиль від кабелю в мостах із нерозрізними балками жорсткості

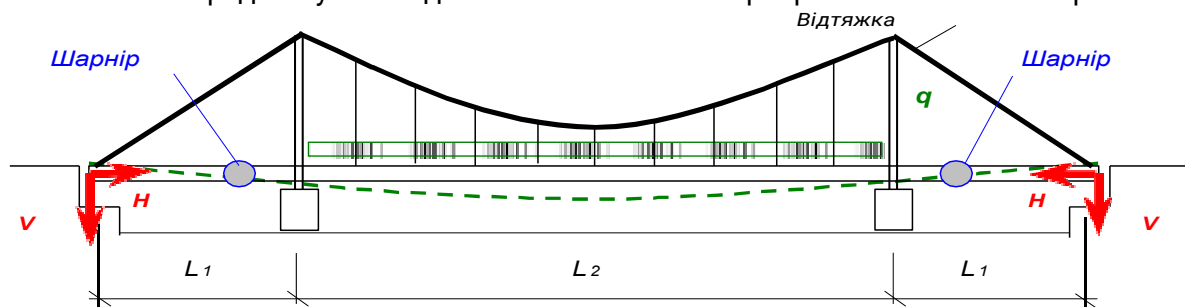


Рис. 4.25. Схема безрозпірного мосту із шарнірною балкою жорсткості

До переваг безрозпірних мостів відносять:

- відсутність необхідності у влаштуванні дорогих анкерних опор та спеціальних анкерів для закріплення несних кабелів;
- меншу чутливість до температурних впливів, так як у цих спорудах немає додаткових «зовнішніх» температурних зусиль;
- наявність сприятливих умов для застосування залізобетонних балок жорсткості.

До недоліків безрозпірних мостів відносять:

- необхідність монтажу балки на риштованнях (при цьому відіграє роль глибина води, наявність і потужність льодоходу, забезпечення безперервного судноплавства і т.п.) або за допомогою монтажних вант, так як балка має бути змонтована до підвішування кабелю, а спорудження її навісним способом суттєво утруднене. Тут варто зазначити, що монтаж балки жорсткості навісним способом все ж таки можливий, але тільки при початковому жорсткому закріпленні бічних прогонів (рис. 4.26);

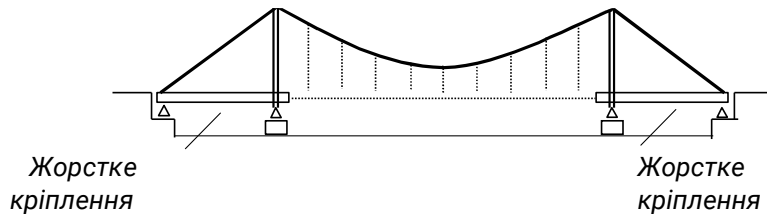


Рис. 4.26. Складання в навіс центральної прогонової будови моста при початковому жорсткому закріпленні крайніх прогонів

- необхідність більш потужних балок жорсткості, пов'язана з їх додатковою роботою на стиск;

- знижена, за інших рівних умов, вертикальна жорсткість системи, пов'язана з тим, що точки закріплення кабелю на кінцях балки жорсткості не можна вважати нерухомими за рахунок стиснення балки.

Як наслідок зазначених вище недоліків, безрозпірні підвісні мости мають деякі обмеження по довжині основного прогону. Найбільшим прогоном, величиною 315м раніше був міст через Рейн у Кельні. На жаль, міст був зруйнований під час другої світової війни і не відновлювався, проте його центральний прогон і на сьогоднішній день є рекордним для таких систем.

Раніше, як переваги безрозпірних підвісних мостів, відзначалася наявність сприятливих умов для застосування в них залізобетонних балок жорсткості (рис. 4.27).



Рис. 4.27. Підвісний міст із залізобетонною балкою жорсткості в Китаї

При цьому **основними особливостями залізобетонних балок є:**

- можливість використання місцевих матеріалів при їх виготовленні;
- конструктивно більш потужні перерізи, у яких, зазвичай, не потрібно спеціальне посилення перерізів на міцність і стійкість;
- підвищена корозійна стійкість;
- відносно невисока вартість у порівнянні з металевими конструкціями, так як вартість залізобетону суттєво менша від вартості металу;
- підвищена загальна жорсткість балок за рахунок значної власної ваги, так як у відсотковому відношенні до сумарних впливів частка впливу від тимчасового навантаження стає невелика;
- менша, порівняно з металевими конструкціями, чутливість до можливих перспективних змін величини тимчасового навантаження;
- швидше в 2–3 рази згасання коливань і, отже, підвищена аеродинамічна стійкість;
- можливість регулювання (раціоналізації) зусиль обтиснення балки зміною стріли провисання кабелю;
- залежність у підвісних системах розмірів поперечних перерізів балок не від довжини прогону, а від довжини панелі і, отже, можливість використання при однакових панелях постійних перерізів балок незалежно від величини прогону (тобто можливість виготовлення стандартних залізобетонних блоків довжиною в одну панель та складання з них прогонів різної довжини).

З урахуванням представлених вище позитивних особливостей, слід зазначити, що в останні роки частина підвісних та вантових мостів за кордоном проектується та будується із застосуванням залізобетонних балок (у всіх побудованих мостах із залізобетонною балкою жорсткості пілони також виконані із залізобетону). При цьому накопичений досвід свідчить про те, що величина прогону 50–150 м є для залізобетонних балок раціональною, а економічно доцільні рішення підвісних мостів із залізобетонною балкою жорсткості можна пропонувати при прогонах до 350–500 м.

Ідею про доцільність застосування залізобетону у підвісних системах було висловлено ще 1926 року проф. Г. Меланом, проте він головним чином вбачав у цьому лише можливість підвищення загальної жорсткості підвісних конструкцій.

Особливо корисна можливість використання розпору підвісних систем для створення попереднього обтиснення бетону балки жорсткості, так як саме підвісні системи з сприйнятим розпором, в яких кабель зі сталі працює на розтягування, а бетон балки жорсткості - на позацентрове стискання, найбільше відповідають природі роботи кожного з матеріалів.

Залізобетонні підвісні мости можна розглядати як перетворені попередньо напружені балки, в яких елементи попередньої напруги винесені з тіла балки в окремий шпренгельний пояс.

Порівняно зі звичною попередньо напруженою системою, така перетворена конструкція має низку переваг. Збільшення робочої висоти її та, відповідно, плеча внутрішньої пари сил призводить до зменшення зусиль у системі від розрахункового навантаження. Незалежність величини розпору в системі від пластичних деформацій бетону дозволяє краще використовувати кожен із матеріалів конструкції та створює передумови для економії високоміцного дроту. Так як попереднє обтиснення бетону створюється за рахунок його власної ваги, то відпадає необхідність у дорогих операціях з попереднього натягу канатів.

Однак, тут потрібно нагадати, що підвісні прогонові будови з сприйнятим розпором можуть монтуватися, як правило, тільки на суцільних риштуваннях, що, в більшості випадків, зводить нанівець весь економічний ефект, який отримується за рахунок застосування залізобетону. Якщо ж відмовитися від передачі розпору на балку жорсткості, то застосування для неї залізобетону втрачає сенс.

Практичне заняття 5

Заходи з підвищення жорсткості підвісних мостів

Питання для відповіді:

1. Які підвісні системи мостів називаються гібридними?
2. Яку роль відіграють додаткові зворотні кабелі (вітрові ферми)?
3. Чим характеризується підвісна система при жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону?
4. Де виникають максимальні згинальні моменти та прогини при поєднанні кабелю з балкою жорсткості?
5. Покажіть схему жорсткого прикріплення кабелю до балки в середині її прогону, а також лінію впливу розпору.
6. Покажіть схему підвісної системи при поєднанні кабелю з балкою.
7. Чим характеризується підвісна система моста при поєднанні кабелю з балкою на частині прогону?
8. Чим характеризується підвісна система моста при застосуванні похилих підвісок?
9. Які основні особливості підвісних ферм із трикутними ґратками?
10. Що застосовують для усунення такого недоліку підвісних ферм із трикутними ґратками, як те, що при великих прогонах вони мають більшу панель проїжджої частини?
11. Покажіть схеми мостів з трикутними ґратками та з хрестовими ґратками.
12. Покажіть схему дволанцюгових (двокабельних) мостів.
13. Чим характеризується мостова споруда при влаштуванні дволанцюгової підвісної системи?
14. В яких напрямках вдосконалюють форми балок жорсткості для підвищення жорсткості підвісних мостів?

Матеріали для відповідей:

Заходи з підвищення жорсткості підвісних мостів:

1. Постановка похилих висхідних і низхідних вант, розтяжок та зворотних кабелів

Системи з висхідними і низхідними додатковими вантами, що виникли в середині XIX ст., називають гібридними. В них вертикальні ванти обмежують вертикальні переміщення системи, а горизонтальні (пологі) – перешкоджають горизонтальним переміщенням (рис. 5.1).

Як зазначалося раніше, при завантаженні половини прогону балка жорсткості має S-подібний прогин, найбільші переміщення при цьому виникають в чверті прогону. Для зменшення цих переміщень і застосовують похилі висхідні ванти поблизу опор, які є додатковими пружними опорами. Встановлені в системі висхідні ванти натягнуті і фіксують контур кабелю. Через свій несприятливий зовнішній вигляд і складність конструкції гібридні системи широкого поширення не отримали.

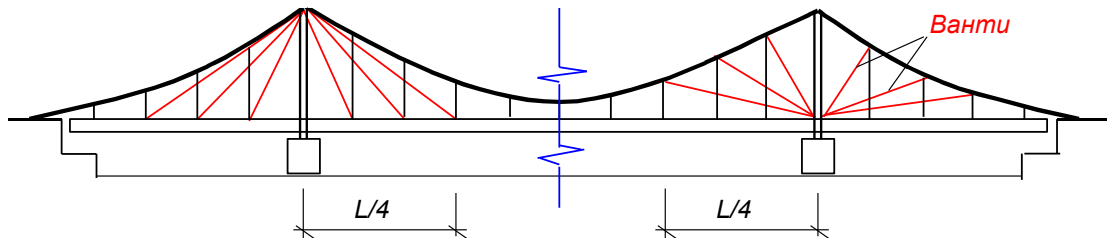


Рис. 5.1. Постановка похилих висхідних і низхідних вант

До найбільш відомих прикладів прийнято відносити побудовані Джоном А. Роблінгом мости - Бруклінський (рис. 5.2) та Ковінгтонський, відкритий у 1867 році в США, а також побудовані пізніше мости: міст імені 25 квітня через річку Тахо в Португалії (рис. 5.3 та рис. 5.4), міст Султана Селіма Явуза (рис. 5.5) та нещодавно збудований міст біля міста Оріо в Іспанії (рис. 5.6).



Рис. 5.2. Панорама Бруклінського мосту

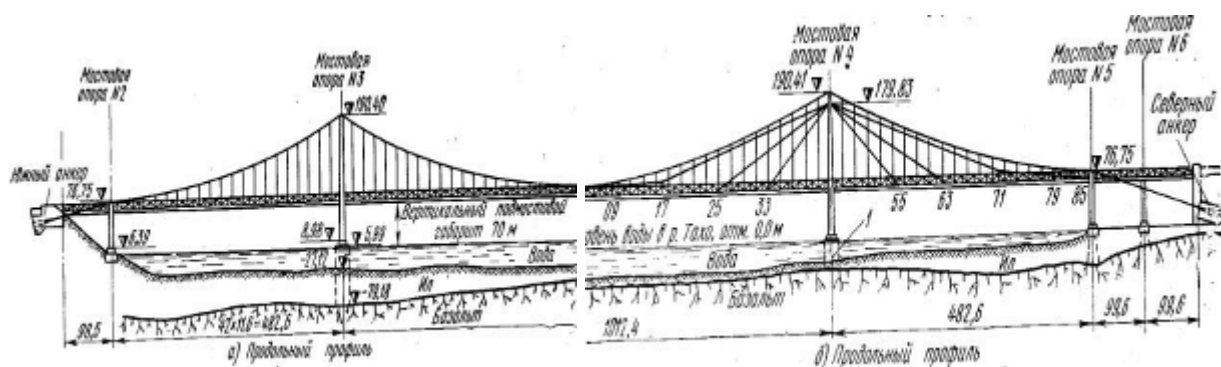


Рис. 5.3. Загальна схема мосту через річку Тахо

На рис. 5.3 показано загальну схему мостового переходу через річку Тахо. На лівій частині малюнка зображена схема моста, яким відкрито автомобільний рух. На правій частині показано схему мосту після завершення другої черги будівництва. На цьому малюнку видно ванти та додатковий кабель, які збільшують вантажопідйомність мосту і забезпечують пропуск залізничного транспорту. Додатковий кабель запроектований з 20 канатів діаметром 75 мм, що попередньо звиваються зі сталевого дроту. Короткі ванти складаються з 8 попередньо звитих сталевих канатів, кожен діаметром 67мм. Довгі ванти складаються з 12 канатів того ж діаметра.



Рис. 5.4. Загальний вигляд мосту через річку Тахо



Рис. 5.5. Міст Султана Селіма Явуза



Рис. 5.6. Гібридний міст біля міста Оріо прогоном 180 м (Іспанія)

Крім постановки описаних вище висхідних і низхідних вант, для підвищення вертикальної і горизонтальної жорсткості підвісних мостів можуть бути встановлені додаткові зворотні кабелі (вітрові ферми), що фіксують

положення балки як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Мости зі зворотним попередньо напруженим кабелем

2. Жорстке прикріплення кабелю до балки в середині прогону (рис. 5.8)

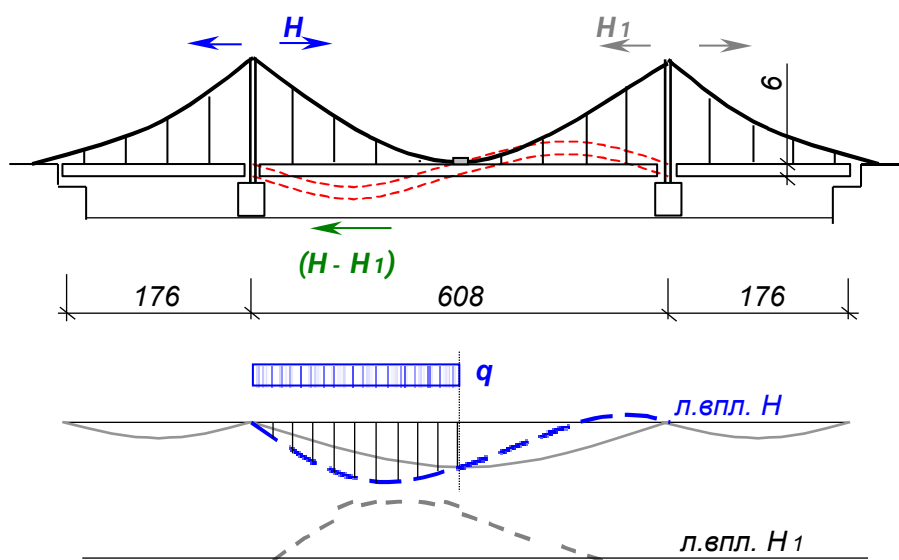


Рис. 5.8. Схема роботи мосту із прикріпленням кабелю до балки (розміри відповідають розмірам Танкервільського мосту у Франції)

При жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону підвісна система характеризується:

- збільшенням загальної жорсткості системи в цілому;
- зменшенням прогинів у чверті прогону (в середньому в кілька разів);
- зменшенням зсувів прогонової будови від впливу поздовжніх сил;
- відсутністю несиметричних форм коливань;
- відсутністю постійної величини розпору по довжині моста;

- необхідністю роботи балки на поздовжнє зусилля, викликане різницею величин розпору $H - H_1$, що виникає при несиметричних завантаженнях;
- необхідністю влаштування спеціальних закріплень балки для сприйняття негативних опорних реакцій;
- підвищеною чутливістю системи до змін температури.

Загальні види та можливі конструкції прикріплення кабелю до балки жорсткості в середині основного прогону моста показані нижче на прикладі мосту Раньянг у Китаї (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Кріплення кабелю до балки жорсткості мосту Раньянг

Побудований у період з 2000 по 2005 роки через річку Янцзи підвісний міст Раньянг з основним прогоном 1490 м є четвертим за величиною підвісним мостом світу. Повна довжина мостового переходу із підходами становить 7,4 км. За статичною схемою міст є однопрогоновим підвісним мостом.

Висота пілонів моста близько 210 м, пілони розташовані на основі з паль діаметром 2,8 м. Анкерні опори мають габаритні розміри $63,94 \times 57,70 \times 42,59$ м, загальний обсяг їх кладки складає близько $44\,000\text{ м}^3$.

Головний несний кабель моста має діаметр 0,9 м і складається з 184 паралельно покладених кручених пасмів заводського виготовлення. Кожне пасмо складається з 127 дротів діаметром 5,3 мм з тимчасовим опором 1670 МПа. Довжина кожного з пасм 2580 м, а вага 58 т. У цілому загальна вага кабелю становить 21 000 т. Для захисту дроту кабелю від корозії на мосту передбачена система примусового сушіння (вентиляції) кабелю. Стріла підйому кабелю в середині прогону становить 1/10 до величини прогону. Як зазначено вище, кабель моста з'єднаний з балкою жорсткості в середині основного прогону для збільшення загальної вертикальної жорсткості підвісної системи.

3. Об'єднання кабелю з балкою в єдине ціле на частині довжини прогону

При об'єднанні кабелю з балкою у конструкції утворюється ферма, що має найбільшу висоту в чвертях основного прогону, тобто там, де виникають максимальні згинальні моменти та прогини (рис. 5.10). При цьому розтягування всіх елементів ферми забезпечується постійним навантаженням.

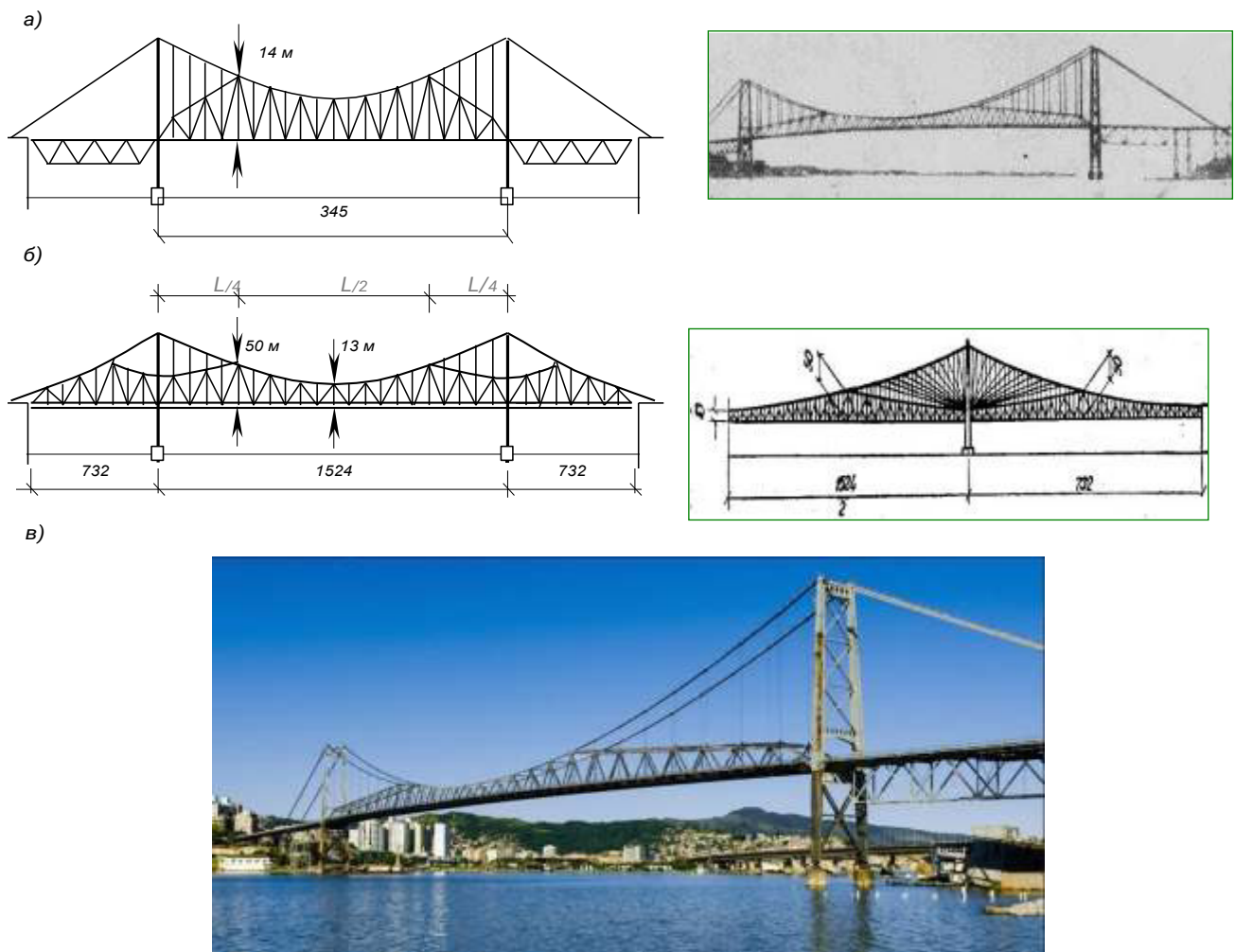


Рис. 5.10. Схеми мостів та загальні види мостів при об'єднанні кабелю з балкою
а – міст Флоріанополіс у Бразилії, б – проект мосту у США, в – фото моста у Бразилії

При об'єднанні кабелю (ланцюга) з балкою на частині її прогону підвісна система характеризується:

- суттєвим підвищенням жорсткості системи (в середньому в 2 рази) при можливому зменшенні висоти балки жорсткості;
- усуненням взаємних переміщень кабелю і балки на ділянці, що дорівнює половині прогону, так як ці конструкції становлять єдине ціле;
- усуненням поздовжніх переміщень кабелю в середині прогону (обмеженням зміни форми рівноваги);
- можливою суттєвою економією металу (до 30%) та, відповідно, зростанням економічності системи.

4. Застосування похилих підвісок

При застосуванні похилих підвісок підвісна система характеризується збільшенням загальної жорсткості (зниженням згинальних моментів) за рахунок перетворення системи на комбіновану ферму. У загальних вузлах похилих підвісок акумулюється енергія, необхідна для гасіння вимушених коливань з допомогою гістерезису.

Підвісні ферми з трикутними ґратками утворюються з головного несного кабелю, що спирається на пілони, канатних розкосів, підвішених до головного кабелю, та нижнього поясу.

Пояс може бути або з попередньо напружених канатів, що створюють попереднє розтягування розкосів (рис. 5.11), або з жорстких конструкцій – підвісної балки жорсткості. Можливе також проміжне рішення – з канатним нижнім поясом та балкою жорсткості, прикріпленою за допомогою вертикальних підвісок до вузлів розкосів. Розпір канатів сприймається анкерними опорами (рис. 5.12).



Рис. 5.11. Схема гнучкого підвісного мосту з ґратчастими фермами

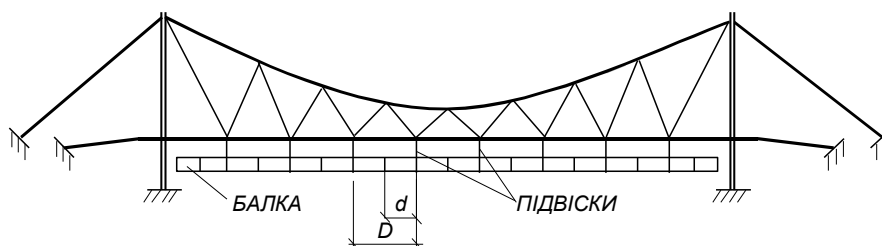


Рис. 5.12. Підвісний міст із ґратчастими фермами та балкою жорсткості

Натяг нижнього поясу в таких фермах забезпечує запас розтягування у всіх її елементах. Іноді для створення запасу по розтягуванню достатньо лише постійного навантаження, особливо у разі великих довжин панелей.

Основними особливостями підвісних ферм із трикутними ґратками є те, що:

- вони конкурентоспроможні класичним підвісним системам за величиною прогону, що перекривається;
- вони є геометрично незмінними та досить жорсткими конструкціями (у разі забезпечення у розкосах запасу з розтягування);

- їх розрахунок може вестись без урахування геометричної нелінійності (без урахування деформованого стану);
- монтаж їхніх елементів досить простий (навіть у разі великої довжини прогонів);
- їхнім конструкціям притаманні високі аеродинамічні характеристики (висока аеродинамічна стійкість);
- їх конструкції можна монтувати методами навісного монтажу;
- їм потрібна менша (в 8–10 разів) потужність балок жорсткості;
- їх розкоси завжди важчі за підвіски, відповідно для даних ферм характерна складна конструкція вузлів;
- для них характерна підвищена чутливість до зміни температури;
- їм притаманний високий ступінь статичної невизначеності;
- для їх елементів потрібна висока точність регулювання зусиль;
- при великих прогонах вони мають більшу панель проїздної частини.

Для усунення останнього зазначеного недоліку можливо:

- влаштування балки жорсткості (рис. 5.12), що також збільшує запас міцності конструкції на розтяг;
- постановка підвісок або використання дворешітчастих ферм з хрестовими ґратками, крім іншого зменшуючих постійне навантаження, що передається на розкоси (рис. 5.13 та рис. 5.14);
- постановка розкосів під великими (крутішими) кутами (рис. 5.15).

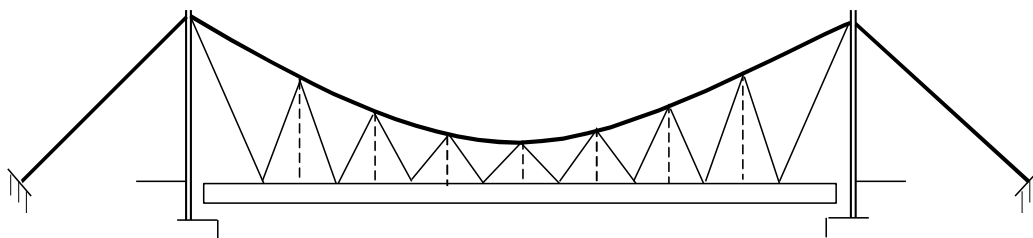


Рис. 5.13. Схема пішохідного мосту через Ангару на Братській ГЕС (величина основного прогону моста 900 м)

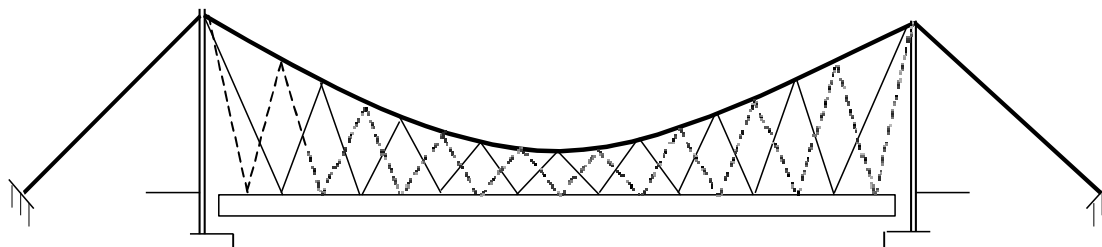


Рис. 5.14. Підвісний міст із хрестовими ґратками в Сальвадорі (схема мосту 76+158+204+158+76)

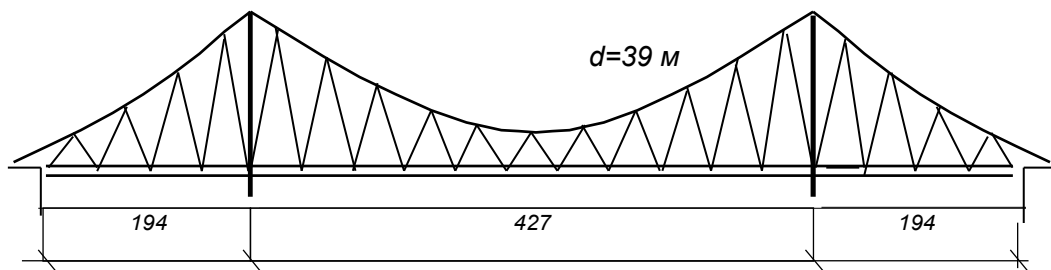


Рис. 5.15. Проект мосту через Волгу в Ярославлі

Як зазначалося вище, використання похилих підвісок дозволяє перекривати досить гнучкими, легкими конструкціями прогони завбільшки до 800–900 м.

5. Застосування дволанцюгових (двокабельних) мостів

Проекти дволанцюгових (двокабельних) мостів були запропоновані інженером С.А. Цапліним у 30-х–40-х роках ХХ століття. Така конструкція, в цілому, має збільшену загальну вертикальну жорсткість за рахунок надання положенню несних кабелів певної геометричної форми – нижні ділянки кабелю окреслені за параболою, верхні ділянки кабелю – прямолінійні. При цьому верхні прямолінійні ділянки кабелю можна розглядати як своєрідну податливу опору, встановлену в середині прогону та пов'язану з анкерними конструкціями моста (рис. 5.16).

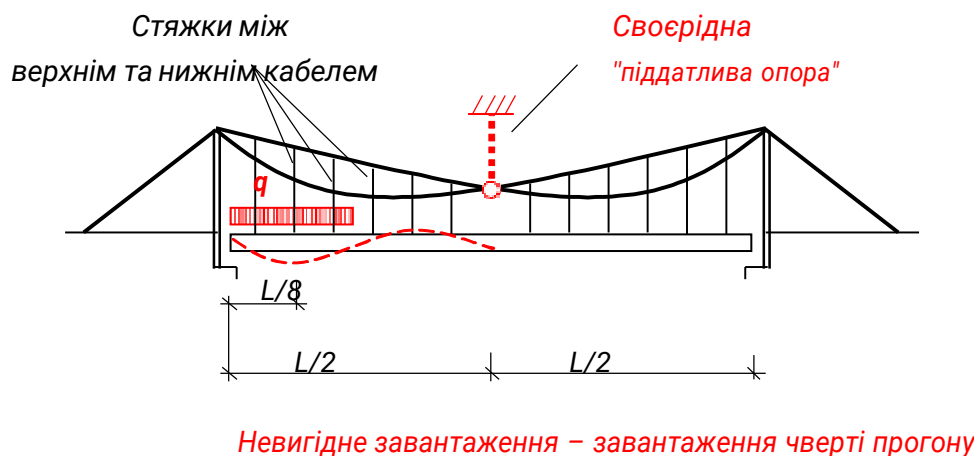


Рис. 5.16. Загальна схема дволанцюгового підвісного мосту

При влаштуванні дволанцюгової підвісної системи мостова споруда характеризується:

- збільшенням загальної вертикальної жорсткості (зниженням негативних згинальних моментів у балці);
- можливістю зниження висоти балки в середньому на 30–40%;
- збільшеною витратою матеріалу на ланцюги (кабелі);

- певною складністю конструкції та збільшенням кількості вузлів;
- менш сприятливим зовнішнім виглядом.

Першим у світі дволанцюговим підвісним мостом став міст через річку Катунь на Алтаї. Однак, надалі зазначені вище негативні особливості системи, а також її відносно невисока здатність перекривати великі прогони вплинули на досить рідке використання таких мостів.

6. Вдосконалення форм балок жорсткості

До цього способу підвищення жорсткості підвісних мостів, перш за все, слід відносити підвищення крутильної жорсткості балок, яке досягається, зокрема, переходом до наскрізних балок (ферм) жорсткості, а також різні методи поліпшення аеродинамічних характеристик балок влаштуванням обтічних коробчастих конструкцій, влаштуванням елементів проїжджої частини повністю проникними для потоків повітря та ін.

У висновку слід зазначити, що зазначені вище заходи підвищення загальної жорсткості широко використовуються в більшості запроектованих і збудованих останніми роками малих, середніх і великих підвісних мостах, причому застосовуються вони як окремо, так і комплексно.

Практичне заняття 6

Вантово-балочні мости

Питання для відповіді:

1. Які системи мостів називаються вантово-балочними?
2. Де і коли був побудований перший вантово-балочний міст?
3. Як забезпечується геометрична незмінність у вантових мостах?
4. Що є можливим в сучасних вантових мостах через наявність у них балки жорсткості з відносно великою згинною жорсткістю?
5. Яким є головне призначення балки жорсткості у вантово-балкових мостах?
6. До чого призводить регулювання зусиль у конструкціях вантово-балкових мостів?
7. Для чого в вантових системах проводять регулювання зусиль до запуску споруди в експлуатацію?
8. Для чого в вантових системах проводять регулювання зусиль після запуску споруди в експлуатацію?
9. Які є способи створення попередньої напруги у вантовій системі?
10. Як проводять регулювання зусиль у вантах?
11. Покажіть схему для контролю зусиль, що діють у вантах, по стрілі провисання ванти.
12. За якою формулою визначається розпір у ванті H за стрілою провисання ванти, а також зусилля у ванті?
13. Як проводять контроль величини зусиль у вантах за частотою коливань каната?
14. Яку роль відіграють додаткові зворотні кабелі (вітрові ферми)?
15. Чим характеризується підвісна система при жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону?

Матеріали для відповідей:

Вантово-балочні (вантові) мости – це відносно легкі прогонові балки, що підтримуються в ряді точок прогону розтягнутими гнучкими прямолінійними канатними елементами – вантами, закріпленими на пілонах і передаючими зусилля на пілони. Основне застосування вони знайшли у міських та автодорожніх мостах, де на сьогодні є найпоширенішим типом вантових мостів.

Перший вантово-балковий міст був збудований через фіорд Стрьомсунд у Швеції (рис. 6.1). Міст був сенсаційним, коли його урочисто відкрили в 1956 році

– на той час це був найдовший вантовий міст у світі. Основний прогон 182 м, загальна довжина 332 м. Висота двох опор становить 28 м, а ширина проїжджої частини 14,3 м. Міст Стрьомсунд був спроектований німецьким піонером вантових мостів Францем Дішінгером (1887–1953) і побудований компанією Demag AG, Дуйсбург, протягом 1953–1955 років.



Рис. 6.1. Міст через Стрьомсунд

Прообразом сучасних вантових мостів стали мости з радіально-вантовими променевими фермами підвісної системи (рис. 6.2).

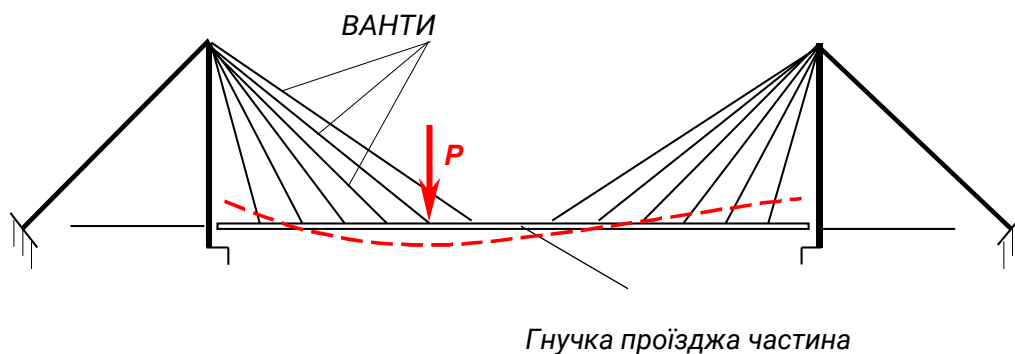


Рис. 6.2. Міст з радіально-вантовою променевою фермою

Основною особливістю таких споруд була відсутність у них проїзду у рівні балки жорсткості. Відсутність балки призводила до труднощів забезпечення (особливо при великому навантаженні) необхідного запасу з розтягу вант, а, отже, до можливості появи в слабо натягнутих вантах стискаючих зусиль і

виключення їх з роботи, а також недостатньої вертикальної і горизонтальної жорсткості споруди в цілому. Крім того, наявність великої кількості вант та вузлів їх кріплення призводило до складності конструкції, а велика довжина вант сприяла їх провисанню.

Сучасні вантові мости, що з'явилися в кінці XX століття, і які мають балку жорсткості, частково виявилися позбавлені зазначених недоліків.

Тут варто зазначити, що роль балки жорсткості у вантових мостах інша, ніж у підвісних, де балка безумовно необхідна, оскільки забезпечує геометричну незмінність системи. У вантових мостах геометрична незмінність від балки жорсткості не залежить, а забезпечується трикутною структурою вантової ферми (при введенні у вузли прикріплення вант шарнірів, геометрична змінність системи залишається такою ж).

Наявність в сучасних вантових мостах балки жорсткості, що має відносно велику величину згинальної жорсткості (EJ), дозволяє:

1. Збільшувати панель вантової ферми без збільшення панелі проїздної частини ($d_1 \gg d$, рис. 6.3).

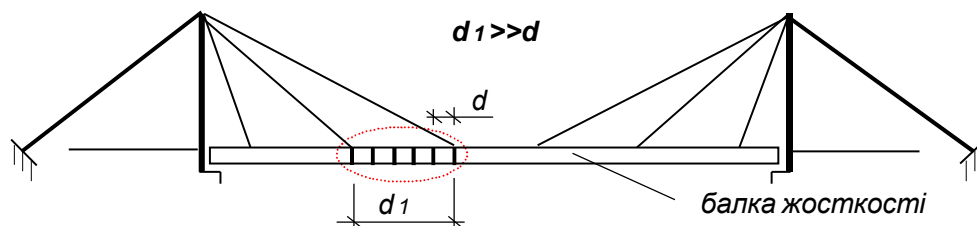


Рис. 6.3. Вантово-балковий міст
(d – панель проїздної частини, d_1 – панель вантової ферми)

2. Зменшити (за потреби) число вант у системі (рис. 6.3) з перерозподілом балкою зусиль на сусідні ванти.

3. Створювати у вантах зусилля розтягу за рахунок опору балки згину.

4. Створювати у вантах додаткові зусилля розтягу (так званий запас на розтяг), так як сама балка (маючи солідну вагу) збільшує постійне навантаження.

5. Натягом чи ослабленням вант регулювати розподіл згинальних моментів у балці – істотно зменшувати значення розрахункових моментів, отримуючи економічне рішення для системи (тобто проводити так зване регулювання зусиль).

6. В дво-, трьох-, та багатопрогонових мостах передавати горизонтальну складову зусиль в вантах на балку, перетворюючи систему в балочну – зовнішньо-безрозпірну (рис. 6.4). Це дозволяє відмовитись від дороговартісних анкерних опор (при цьому, однак, балка жорсткості буде в більш важких умовах, додатково працюючи на стиск).

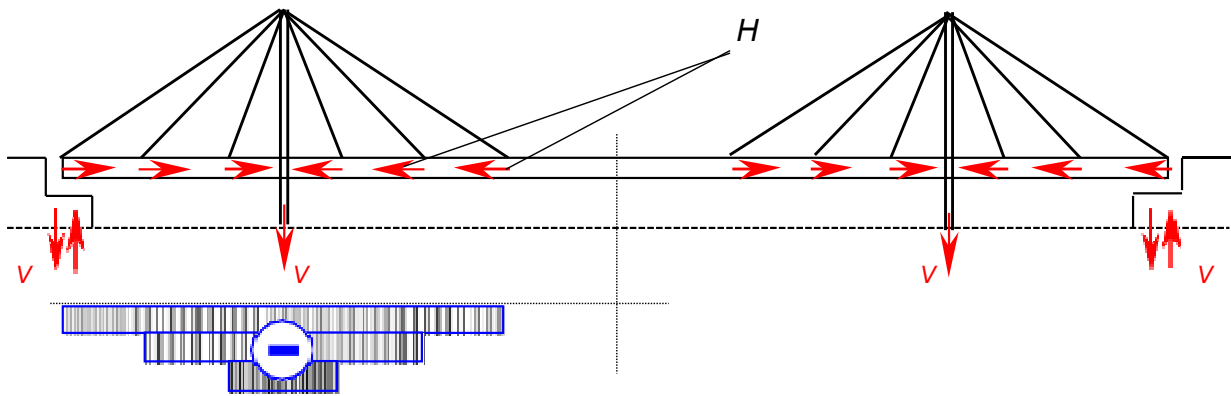


Рис. 6.4. Зовнішньо-безрозпірний вантовий міст

Таким чином, основним призначенням балки жорсткості у вантово-балкових мостах є сприйняття згину в межах панелі вантової ферми (тобто робота на місцеве навантаження) і рівномірний розподіл навантаження між сусідніми вантами. При цьому, однак, не слід забувати, що з економічної (вартісної) точки зору балку слід застосовувати якомога менш жорсткою.

Для балок жорсткості вантових мостів вище було зазначено можливість регулювання зусиль – тобто проведення сукупності заходів, що забезпечують оптимальне розподілення внутрішніх зусиль в елементах конструкції.

Регулювання зусиль, зазвичай, зводиться до створення кращого обрис згинальної епюри моментів в балці, так як зміни зусиль у вантах, одержувані після регулювання, невеликі.

Регулювання зусиль у конструкціях, знижуючи згинальні моменти та забезпечуючи їх рівномірність по довжині, дозволяє раціонально розташувати матеріал і знизити його витрату, призводячи до істотного зменшення вартості споруди.

Стосовно підвісних систем регулювання зусиль зводиться до того, щоб при середній розрахунковій температурі балка жорсткості не працювала на згин від дії постійного навантаження, для чого систему збирають спочатку як статично визначувану, влаштовуючи в балці жорсткості тимчасові шарніри.

Стосовно вантових систем регулювання зусиль виконують для:

1. Збільшення натягу вантових елементів з метою створення можливості сприймати стискаючі зусилля.

2. Збільшення натягу для підвищення приведеної жорсткості вантових елементів.

3. Перерозподілу внутрішніх зусиль. Наприклад, для зміни епюри моментів у згинальних елементах системи, для чого в головному прогоні балку вигинають вгору (за рахунок вертикальних складових зусиль у вантах), надаючи їй додатковий негативний момент (рис. 6.5). Однак при цьому не слід

забувати, що таким чином дещо збільшуються зусилля у вантах та пілоні.

Зазвичай регулювання зусиль проводять до запуску споруди в експлуатацію. Подальше регулювання зусиль може знадобитися:

1. Якщо при монтажі не вдалося досягти оптимального напруженого стану в балці жорсткості.

2. Якщо треба проводити додаткове регулювання після процесу усадки та повзучості бетону (для залізобетонних балок).

3. Якщо після закінчення монтажу виявлено неточності в зусиллях у вантах та балках у порівнянні з проектними.

Способи створення попередньої напруги в системі досить різноманітні, проте їх можна розбити на дві групи, що принципово відрізняються одна від одної:

1. Створення попередньої напруги, яка зберігається в ненавантаженому стані за рахунок самонапруження, що можливо у статично невизначеній системі. У цьому випадку напруга створюється шляхом регулювання довжин, кутів повороту, положень опор і т. п., або за рахунок тимчасового привантаження різних елементів незібраної ще системи і замикання її під навантаженням (тимчасовий вантаж після замикання системи, як правило, видаляється).

2. Створення попереднього натягу шляхом включення в систему деякого постійного навантаження, найчастіше власної ваги конструкції або спеціального баласту.

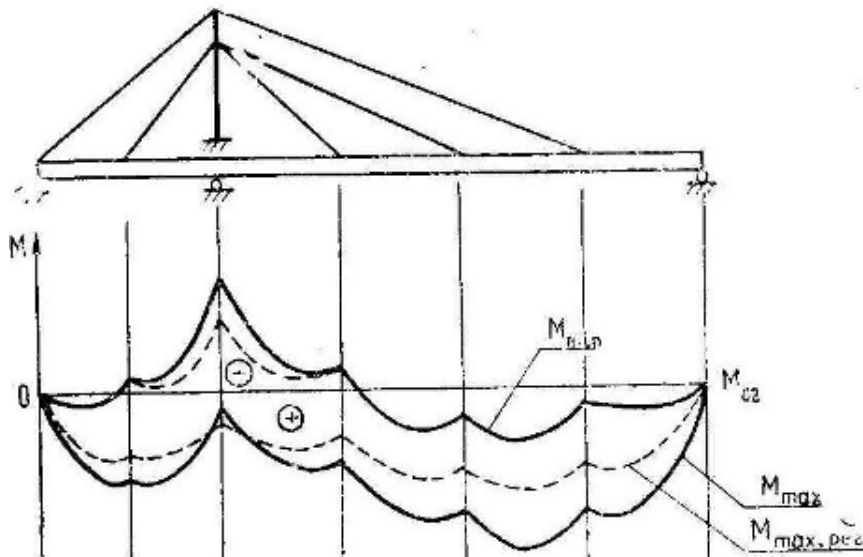


Рис. 6.5. Регулювання зусиль у балці жорсткості

Створення попередньої напруги шляхом використання прийомів першої групи можливе тільки для статично невизначених систем, у той час як прийоми другої групи можуть застосовуватися для будь-яких систем. Проте недоліком є те, що при цьому виникає перевантаження, створюване системою баластних

вантажів.

Зазвичай регулювання зусиль у вантових системах домагаються підтяжкою вант домкратами (див. рис. 6.6), що знаходяться на пілоні або на балці жорсткості, або піддомкрачуючи балку тимчасовими опорами.

Контроль величини зусиль в канатах проводять таріровочними манометрами, включеними в мережу маслопроводу домкратів, за провисом (стрілою провисання) канатів або за власною частотою коливань каната.

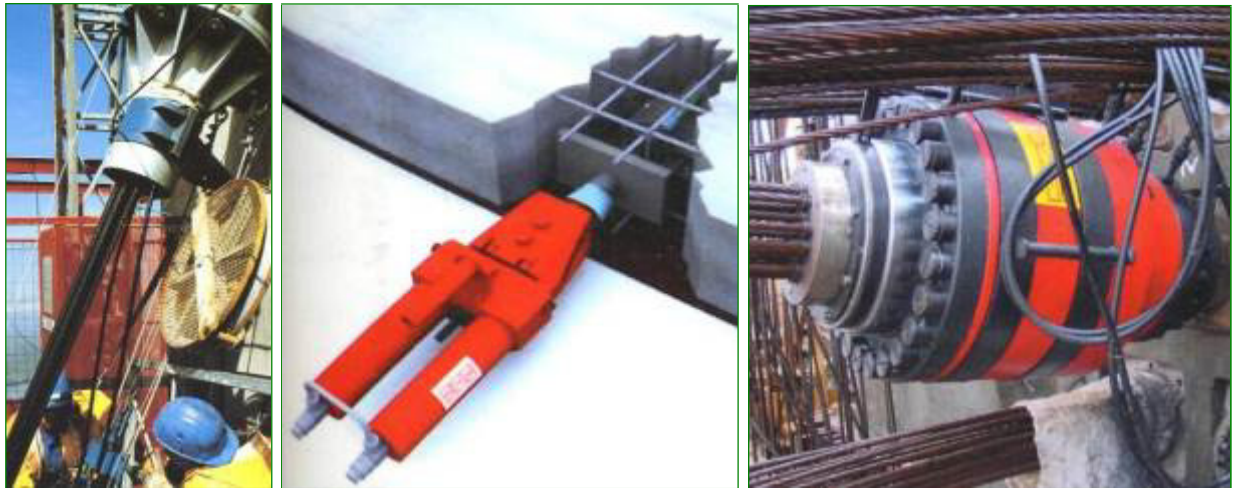


Рис. 6.6. Натяг канатних елементів. Домкрати для натягу елементів вант

Схема для контролю зусиль, що діють у вантах, за стрілою провисання, що вимірюється геодезичними приладами в точці, яка закріплена на ванті, показана на рис. 6.7. Необхідна для спостережень точка має бути закріплена на оболонці ванта до його монтажу. Прилад для вимірювання стріли провисання має бути надійно встановлений на спеціально підготовленому майданчику. Відстань від приладу до точок вимірювання на мосту не повинна змінюватися і бути заздалегідь відомою.

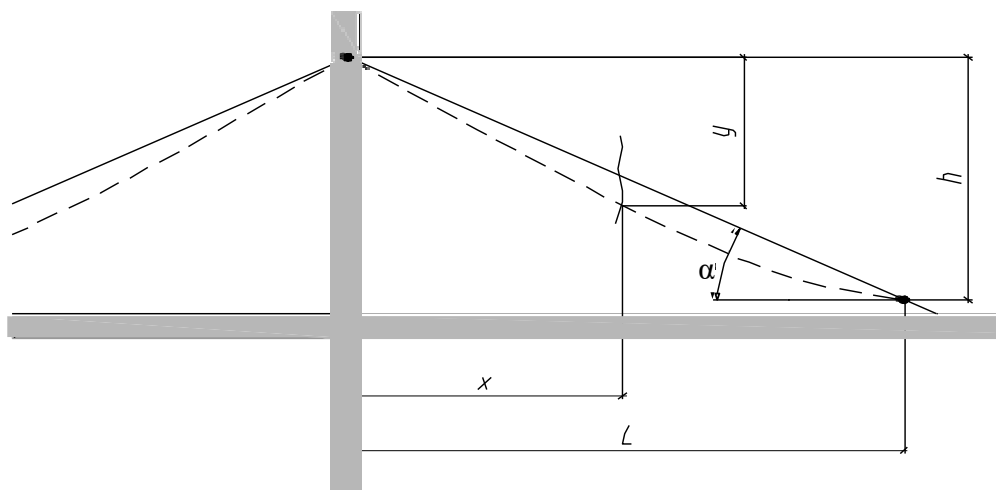


Рис. 6.7. Схема для визначення зусиль у вантах за стрілою провисання

Розпір у ванті H визначається провисанням ванти y у довільній точці з відстанню x від лівого кінця ванти за формулою:

$$H = \frac{q L x (L - x)}{2 (y L - h x)},$$

де q – погонне навантаження від власної ваги ванти; L – горизонтальна проекція ванти (інші позначення наведено на рис. 6.7).

Повне зусилля у ванті визначається за формулою:

$$S = \frac{H}{\cos \alpha},$$

де α – кут нахилу ванти до горизонту.

Контроль величини зусиль за частотою коливань каната проводять за формулою:

$$\tau = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{N}{m}},$$

де n – число напівхвиль збуджуваних коливань на весь проліт каната $n = 1$; L – довжина каната між закріпленнями мінус один – два метри для виключення жорстких ділянок біля опор; N – зусилля натягу каната; $m = P/g$ – погонна маса канату ($m \times \text{сек}^2 / \text{м}^2$); P – погонна вага канату ($\text{м} / \text{м}$); g – прискорення сили тяжіння.

Враховуючи, що величина зусилля натягу каната за попередньою формулою

$$N = 4 \tau^2 L^2 m,$$

та якщо відрахувати час t_k для певної кількості повних коливань (звичайно $k=50$), отримаємо:

$$N = \frac{1}{t_{50}^2} 10^4 L^2 m,$$

де t_{50} – заміряний час 50 коливань каната, сек.

Надамо деякі приклади вантових мостів

Північний міст – вантовий міст через Дніпро у Києві, названий свого часу Московським, збудований у 1976 році, має однопілонну асиметричну віялову схему з величиною основного прогону 300 м.

Ширина моста 31,4 м, розрахована під шість смуг автомобільного руху та укладання трубопроводів великого діаметру.

Міст розташований на вертикальній кривій радіусом 15000 м при висоті підмостового габариту 16 м.

Металева балка жорсткості із сталі 10ХСНД постійної висоти, що становить 3,5 м, має три рухомі металеві опорні частини та защемлена кінцем в устої. Складається балка з двох коробок $5,0 \times 3,5$ м і поперечних балок, що їх з'єднують (рис. 6.8). Проїздна частина – у вигляді ортотропної плити із фрикційними з'єднаннями елементів.



Рис. 6.8. Міст через Дніпро у Києві (нині Північний міст) з основним прогоном 300 м. Перший у СРСР великий вантовий міст. Побудований 1976 р.

Залізобетонний пілон моста висотою 90 м над пустотілою балкою жорсткості має товщину стінок 75 см.

Ванти з канатів з паралельними дротами діаметром 5 мм та міцністю 1500 МПа виготовлені на місці будівництва. Кожен канат закріплений самостійно. У місцях виходу з балки жорсткості та устою-противаги канати зібрані разом і розходяться до місць закріплення на пілоні.

Віадук Мійо (рис. 6.9) – вантовий дорожній міст, що проходить понад долиною річки Тарн поблизу міста Мійо в південній Франції. Авторами проекту моста є французький інженер Мішель Вірложе (фр. Michel Virlogeux), відомий також проектом другого за довжиною вантового мосту у світі, – міст Нормандії – і англійський архітектор Норман Фостер. Міст був урочисто відкритий 14 грудня 2004 року. Складається з восьми прогонових сталевих конструкцій, що підтримуються сімома сталевими пілонами. Прогонова конструкція важить 36 000 тонн, має довжину 2 460 м, ширину 32 м і висоту 4,2 м. Кожен з шести центральних прольотів має довжину 342 м, два крайніх – по 204 м завдовжки. Зараз це найвищий транспортний міст у світі, одна з його опор має висоту 341 метр. Дорога має невеликий ухил у 3% (нахилена з півдня на північ) і радіус викривлення 20 км, що дає водіям кращий огляд, дозволяє машинам рухатися по точнішій траєкторії, ніж якби це була

пряма лінія, та додає віадуку ілюзію нескінченності. Рух здійснюється в дві смуги в кожному напрямку.

Кожна опора стоїть у чотирьох колодязях глибиною 15 м і діаметром 5 м.

Висота опор						
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7

94,501 м 244,96 м 221,05 м 144,21 м 136,42 м 111,94 м 77,56 м

Діаметр найвищої опори P2 – 24,5 м біля основи та 11 м на рівні прогонової конструкції. Кожна опора складається із 16 секцій, кожна секція важить 2 230 т. Секції збиралися на місці з частин масою 60 т, 4 м завширшки і 17 м завдовжки.

Кожна з опор підтримує пілони заввишки 97 м. Спочатку були зібрані проміжні опори разом з тимчасовими опорами, потім зібрана прогонова конструкція, яка насувалася на опори зі швидкістю 600 мм кожні 4 хвилини за допомогою гідравлічних домкратів, керованих з супутника.



Рис. 6.9. Віадук Мійо у Франції, побудований в 2004 році, найвищий вантовий міст у Європі

Міст Нормандії (рис. 6.10) – вантовий міст, прокладений через гирло Сени, що сполучає міста Гавр (Приморська Сена) та Онфлер (Кальвадос), розташовані на правому (північному) та лівому (південному) берегах відповідно. Архітектор Michel Virlogeux. Міст виступає складовою ділянкою автомагістралі A29. Загальна довжина мосту становить 2141,25 метрів, причому

довжина центрального прогону між двома пілонами становить 856 метрів. Висота 214,77 м. Транспортна завантаженість мосту на 2007 рік становила 6,14 млн автомобілів.

У вантовому мості Нормандія, першому великому вантовому мості світу, побудованому в 1995 році (початок будівництва в 1988 році), вперше припілонні ділянки балки споруджені із попередньо напруженого залізобетону (як анкерні блоки), а центральна частина прогону – зі сталі.

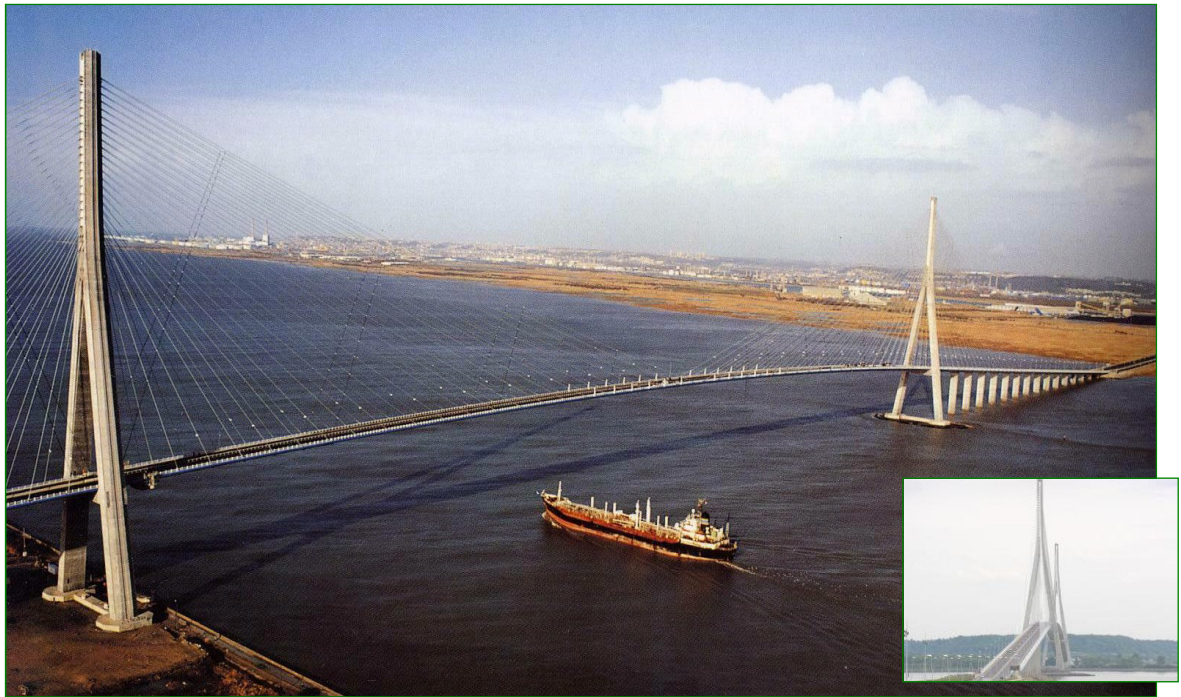


Рис. 6.10. Міст Нормандії (Normandie) з основним прогоном 856м. Перший великий вантовий міст світу, побудований в 1995 році

Практичне заняття 7

Двопрогонові та трьохпрогонові вантові мости. Багатопрогонові вантові мости та заходи підвищення їхньої жорсткості

Питання для відповіді:

1. Які основні розміри та їх співвідношення приймають для двопрогонових вантових споруд?
2. Яка особливість двопрогонових вантових мостів?
3. Як підвищують жорсткість двопрогонових вантових мостів?
4. Які особливості схеми вантової частини моста Ветеранів в США?
5. Які особливості балки жорсткості моста Ветеранів в США?
6. Покажіть загальну схему двопрогонового вантового мосту з нерівними прогонами.
7. Які основні розміри та їх співвідношення приймають для двопрогонових вантових споруд з нерівними прогонами?
8. Які основні особливості двопрогонових вантових споруд з нерівними прогонами порівняно з рівнопрогоновими системами?
9. Покажіть загальну схему трьохпрогонового вантового мосту.
10. Які основні розміри та їх співвідношення приймають для трьохпрогонових вантових споруд?
11. Які основні особливості трьох- та багатопрогонових вантових споруд?
12. Покажіть схему роботи під навантаженням багатопрогонового вантового мосту.
13. Які особливості параметрів багатопрогонового вантового міста Мійо у Франції?
14. Які системи мостів називаються вантово-балочними?

Матеріали для відповідей:

1. Двопрогонові вантові мости

Загальний вигляд і схема двопрогонового вантового мосту з рівними прогонами на прикладі мосту Сент-Флоран-ле-В'єн через Луару у Франції показані на рис. 7.1.

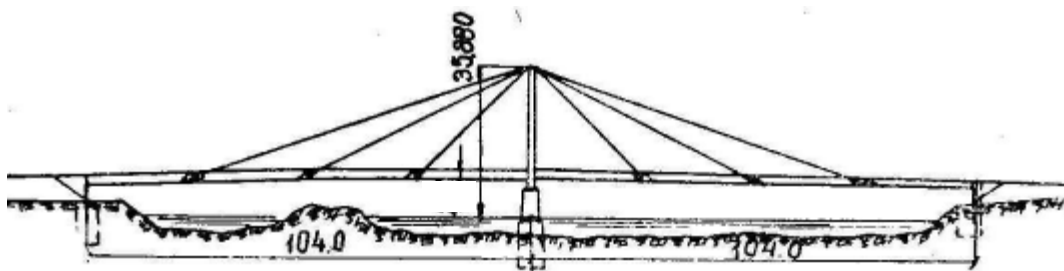


Рис. 7.1. Міст через Луару у Франції (побудований у 1965 р.)

Принципова схема, загальний вигляд завантаження та робота споруди під навантаженням показані на рис. 7.2.

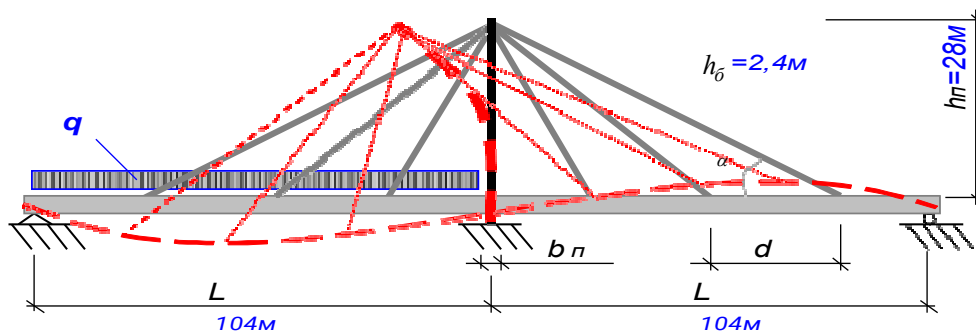


Рис. 7.2. Схема двопрогонового вантового мосту з рівними прогонами

Для двопрогонових вантових споруд можуть бути прийняті такі основні розміри та їх співвідношення:

- величина основного прогону – $L = 100 \dots 300$ м;
- висота пілону – $h_{II} = (1/3 \dots 1/4) \times L$;
- ширина стійок пілону по фасаду мосту – $b_{II} = (1/12 \dots 1/15) \times h_{II}$;
- висота балки жорсткості – $h_{БЖ} = (1/50 \dots 1/120) \times L$ (тут слід зазначити, що за умовами перевезення недоцільна висота балок понад 3,6м для будь-яких

величин прогонів та навантажень);

- число вант з одного боку пілону – три і більше;
- величина панелі залізобетонної балки жорсткості – $d = 5...15$ м та $10...40$ м (для багатовантової системи та системи з малим числом вант, відповідно);
- величина панелі металевої балки жорсткості – $d = 10 ... 20$ м та $50 ... 80$ м (для багатовантової системи та системи з малим числом вант, відповідно);
- кути нахилу вант (як правило) – 20–80 град. (мінімальний кут нахилу крайніх вант, зазвичай, призначають не менше 22–25 град.).

Особливістю системи, що показана на рис. 7.2, є наявність всього однієї проміжної опори, проте відсутність в ній відтяжки, інтенсивна робота пілона на вигин (при завантаженні одного з прогонів) дає збільшені прогини балки жорсткості.

При великій величині прогону та постановці вант-відтяжок (тобто закріпленні пілону), див. рис. 7.3, особливого ефекту досягти не вдається, так як відтяжки є довгими гнучкими елементами, що провисають під власною вагою і включаються в роботу «із запізненням», внаслідок чого системі властива підвищена геометрична змінність (нелінійність).

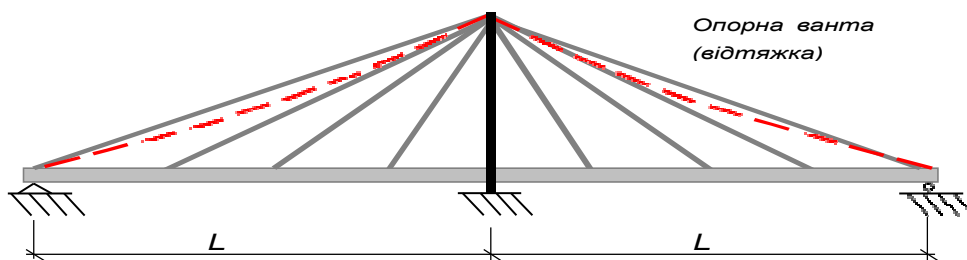


Рис. 7.3. Схема двопрогону мосту за наявності вант-відтяжок

Збільшення загальної жорсткості таких мостів досягається влаштуванням залізобетонної балки жорсткості (що має велику власну вагу і довантажує пілон) та жорсткого пілона, що забезпечує мінімальні зміщення. Однак при цьому суттєво підвищується складність та матеріаломісткість конструкції мосту.

Одним із прикладів є побудований у США у 2007 р. міст Ветеранів (рис. 7.4).

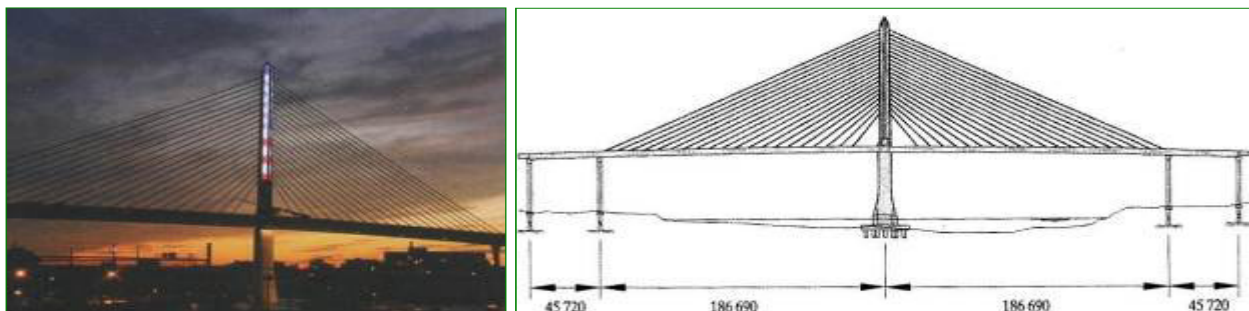


Рис. 7.4. Загальний вигляд та схема вантової частини мосту Ветеранів

Міст має загальну довжину 468,8 м, з основними прогонами завдовжки близько 187 м та пілоном загальною висотою 132,8 м (80,7 м щодо рівня проїжджої частини). У кожену сторону від пілона відходять по 20 вантових канатів. Ванти знаходяться в одній площині, центрально розташованій щодо стійки пілона і підтримують балку прогонової будови зі збірних залізобетонних блоків..

Балка жорсткості складається з двох збірних залізобетонних трапецієподібних коробчастих балок. У місцях розміщення анкера вантового каната коробчасті балки з'єднані жорсткою залізобетонною збірною дельтаподібною рамою (рис. 7.5). Використання дельтаподібних рам для з'єднання коробчастих балок значно скоротило розміри та вагу збірних залізобетонних елементів прогонової будови.

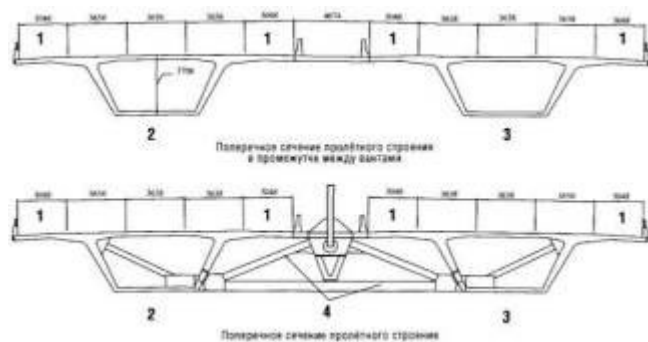


Рис. 7.5. Схеми перерізів балки твердості. Етап монтажу дельтаподібної рами

Систему вант моста характеризує низка унікальних особливостей. Головний елемент системи, що напружується, являє собою 7-ми дріт'яне пасмо діаметром 15мм, укладене в захисну панчоху з полімерного матеріалу на епоксидній основі. Такі пасма числом від 82 до 156 формують вантовий канат. Вантовий канат із 156 пасм є найбільшим з відомих у світі. Пасма кожного каната без розрізання огинають вершину пілона, анкеруючись в однойменних точках протилежних консолей балки жорсткості на рівні проїжджої частини. У тілі пілона анкерів немає. Таке компонування вантового каната стало можливим завдяки застосуванню вперше в практиці мостобудування системи встановлених у тілі пілону сідлоподібних лоткових конструкцій, усередині кожної з яких напрямки всіх пасм абсолютно ідентичні, залишаючись розділеними власними металевими трубками. У межах одного каната пасма взаємно паралельні до входу кожної в анкер. Переваги, властиві такій системі натягу монопрядів, останніми роками справили революцію у технології встановлення та натягу вантових канатів. Ця система усунула будь-які обмеження на розмір вантового каната, які накладалися великими габаритними розмірами і складністю експлуатації установок домкратного обладнання для натягу багатопрядових канатів.

Загальну схему двопрогонового вантового мосту з нерівними прогонами

показано на рис. 7.6.

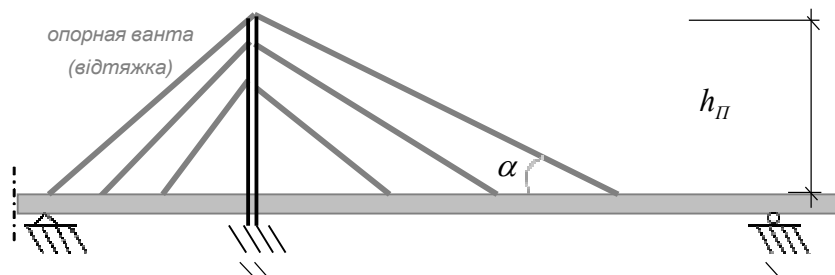


Рис. 7.6. Схема вантовой части

Для споруд такого типу можуть бути прийняті такі основні розміри та їх співвідношення:

- величина основного прогону – $L_2 = 100 \dots 450$ м;
- величина бокового (прикриваючого) прогону – $L_1 = (0,2 \dots 1,0) \times L_2$, частіше $L_1 = (0,6 \dots 0,7) \times L_2$ (таке співвідношення основного та бічного прогонів забезпечує необхідний запас по розтягу у відтяжці, причому при величині бічного прогону $L_1 < 0,25 \times L_2$ його, як правило, не підвішують на ванти);
- висота пілону – $h_{\Pi} = (1/3 \dots 1/4) \times L_2$;
- ширина стійок пілону по фасаду моста – $b_{\Pi} = (1/20 \dots 1/35) \times h_{\Pi}$;
- висота балки жорсткості – $h_{БЖ} = (1/50 \dots 1/120) \times L_2$ (тут слід також зазначити, що за умовами перевезення недоцільна висота балок понад 3,6м для будь-яких величин прольотів та навантажень);
- число вант з одного боку пілону – три і більше;
- величина панелі металевої балки жорсткості – $d = 10 \dots 20$ м та $50 \dots 80$ м (для багатовантової системи та системи з малим числом вант, відповідно), при цьому величина панелі – $d_1 = (1,2 \dots 1,3) \times d$, де d – відстань між точками закріплення вант на балці жорсткості, а d_1 – відстань від крайньої ванти до мостової опори;
- величина панелі залізобетонної балки жорсткості – $d = 5 \dots 15$ м та $10 \dots 40$ м (для багатовантової системи та системи з малим числом вант, відповідно), при цьому величина панелі – $d_1 = (0,7 \dots 0,8) \times d$ – це пов'язано з відсутністю в цій частині балки жорсткості поздовжньої сили, що вимагатиме для залізобетонної конструкції потужного армування;
- кути нахилу вант (як правило) – $20\text{--}80^\circ$ (мінімальний кут нахилу крайніх вант, зазвичай, призначають не менше $22\text{--}25^\circ$).

Особливістю таких мостів є досить велика перекривна здатність, наявність всього однієї проміжної опори і більш висока вертикальна жорсткість

порівняно з рівнопрогоновими системами.

Тут також слід зазначити, що за рахунок концентрації матеріалів, зменшення обсягу дорогих опорних частин, канатів (вант) та їх закріплень, а також більш вигідної просторової роботи конструкції, у несиметричних вантових прогонових спорудах з одним пілоном та просторовим розташуванням вант можна суттєво покращити техніко-економічні показники споруди.

Серед прикладів двопрогонових вантових мостів з нерівними прогонами слід назвати мости через Саву в Белграді, Московський (тепер Північний) міст через Дніпро у Києві, мости через Даугаву в Ризі та через Шексну в Череповці, а також найбільший у світі однопрогоновий вантовий міст через Об біля Сургути.

2. Трьохпрогонові вантові мости

Загальна схема **трипрогонового вантового моста** показана на рис. 7.7.

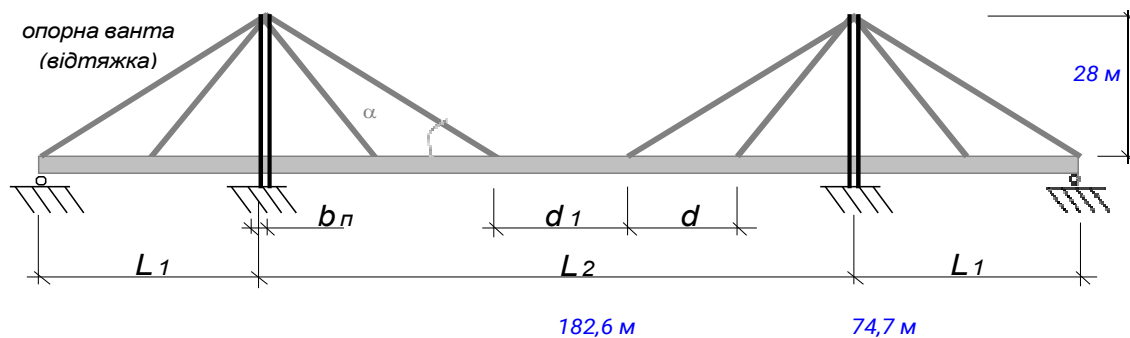


Рис. 7.7. Схема вантового мосту
на прикладі мосту через протоку Штремзунд у Швеції

Для споруд такого типу можуть бути прийняті такі основні розміри та їх співвідношення:

- величина основного прогону – $L_2 = 100 \dots 1200$ м – найбільше значення для мостових вантових систем;
- величина бічного прогону – у загальному вигляді – $L_1 = (0,4 \dots 0,45) \times L_2$ (таке співвідношення також як і для двопрогонових мостів забезпечує необхідний запас розтягу у відтяжці, причому при величині бічного прогону $L_1 < 0,25 \times L_2$ його, як правило, не підвішують на ванти);
- висота пілонів – $h_{II} = (1/5 \dots 1/7) \times L_2$;
- висота балки жорсткості – $h_{БЖ} = (1/50 \dots 1/350) \times L_2$ – може бути прийнята істотно меншою, ніж для двопрогонових вантових систем.

Ширина пілонів по фасаду мосту, довжини панелей, число вант і кути їх нахилу можуть бути прийняті аналогічно двопрогоновим вантовим системам.

Потрібно додати, що можливе також влаштування трьохпрогонових вантових мостів з різною довжиною бічних прогонів.

Основними особливостями трьохпрогонових вантових мостів є їх сприятливий зовнішній вигляд, висока перекривна здатність і вища вертикальна жорсткість, особливо у разі влаштування в них коротких бічних прогонів, що не підвішуються на ванти.

В даний час у світі існує велика кількість мостів трьохпрогонової вантової схеми. Серед найбільш відомих прикладів потрібно назвати побудований у 1957 році міст через Рейн у Дюссельдорфі, Німеччина, який є одним із перших мостів такого типу.

Ще одним прикладом великих трьохпрогонових вантових споруд є автодорожній залізобетонний міст Бротон через р. Сену у Франції, що будувався з 1973 по 1977 р. та має величину основного прогону 320 м (рис. 7.8).



Рис. 7.8. Загальний вигляд мосту Броттон у Франції

До найбільш цікавих з вантових трьохпрогонових споруд слід віднести міст Татару в Японії, що близько десяти років тримав рекорд для вантових систем за величиною прогону, що перекривається (рис. 7.9, рис. 7.10). Повна довжина моста становить 1480м, а величина центрального вантового прогону - 890м. Будувався міст із 1990 по 1999 роки.

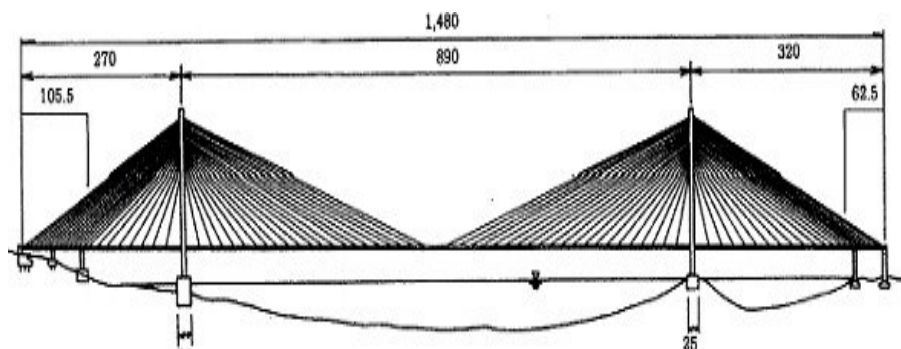


Рис. 7.9. Загальний вигляд та схема мосту Татару в Японії



Рис. 7.10. Вид та монтаж прогону мосту Татару в Японії

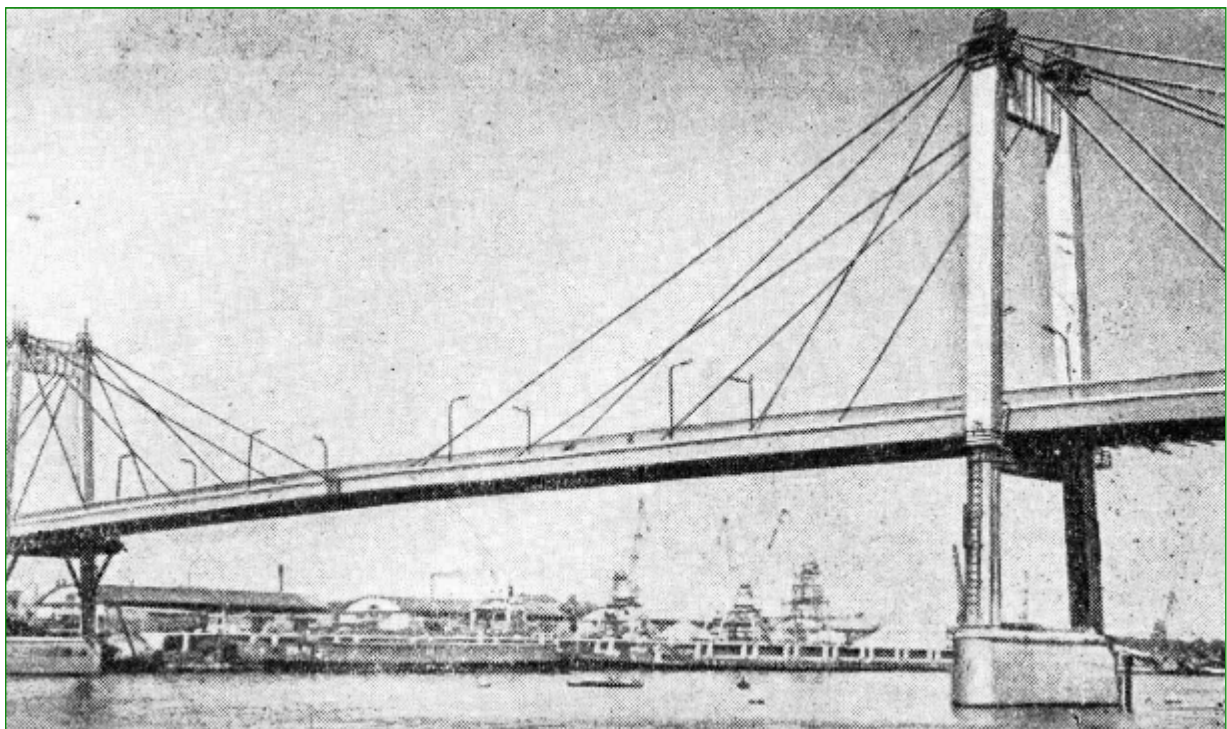


Рис. 7.11. Міст через гавань Дніпра у Києві з основним прогоном 144 м
Перший у світі вантовий міст із залізобетонною балкою жорсткості
Побудований у 1963 р.

Вантова залізобетонна прогонова будова мосту через гавань Дніпра в Києві (рис. 7.11, рис. 7.12), розроблена та здійснена в експериментальному порядку у 1963 році, стала першою у світовій практиці мостобудування. Дана

конструкція поєднує стиснуті залізобетонні балки прогонової будови та стискаючі їх натягнуті ванти – що повністю відповідає специфіці роботи зазначених матеріалів.

Міст є нерозрізною вантовою фермою з величиною прогонів $65,85+144+65,85$ м і призначений для міського транспорту. Ширина моста 10м, при цьому проїжджа частина 7 м та два тротуари – по 1,5 м (рис. 7.12).

У поперечному перерізі моста дві балки П-подібної форми заввишки 1,5 м ($1/100L$) з відстанню в осях 9,6 м. Проїжджа частина, включена в спільну роботу з головними балками на всю ширину, складена з Т-подібних блоків, що спираються на суцільні полиці на поверхнях зовнішніх вертикальних стінок головних балок.

Пілони мосту залізобетонні у вигляді двоярусних рам, жорстко замурованих у їх нижній масивній частині. Прогонова будова пропущена між стійками пілонів та опирається на горизонтальну розпірку. Повна висота пілонів 42 м, у тому числі пілони вищі від осі балки жорсткості на 27 м ($1/5,5L$).

Ванти виготовлені з пучків сталевих канатів закритого типу із дроту з розрахунковим опором 1200 МПа – спираються на пілони через сталеві опорні частини та жорстко защемлені на них за допомогою міцних болтів. Всі конструкції балки – збірні з бетону марки М400, пілони – монолітні, з жорсткими арматурними каркасами.

Досвід будівництва мосту та отримані при цьому високі техніко-економічні показники дозволили вважати застосування комбінованих вантових систем із залізобетонною балкою жорсткості вдалим технічним рішенням, що розширює сферу застосування залізобетону в мостах великих прогонів.

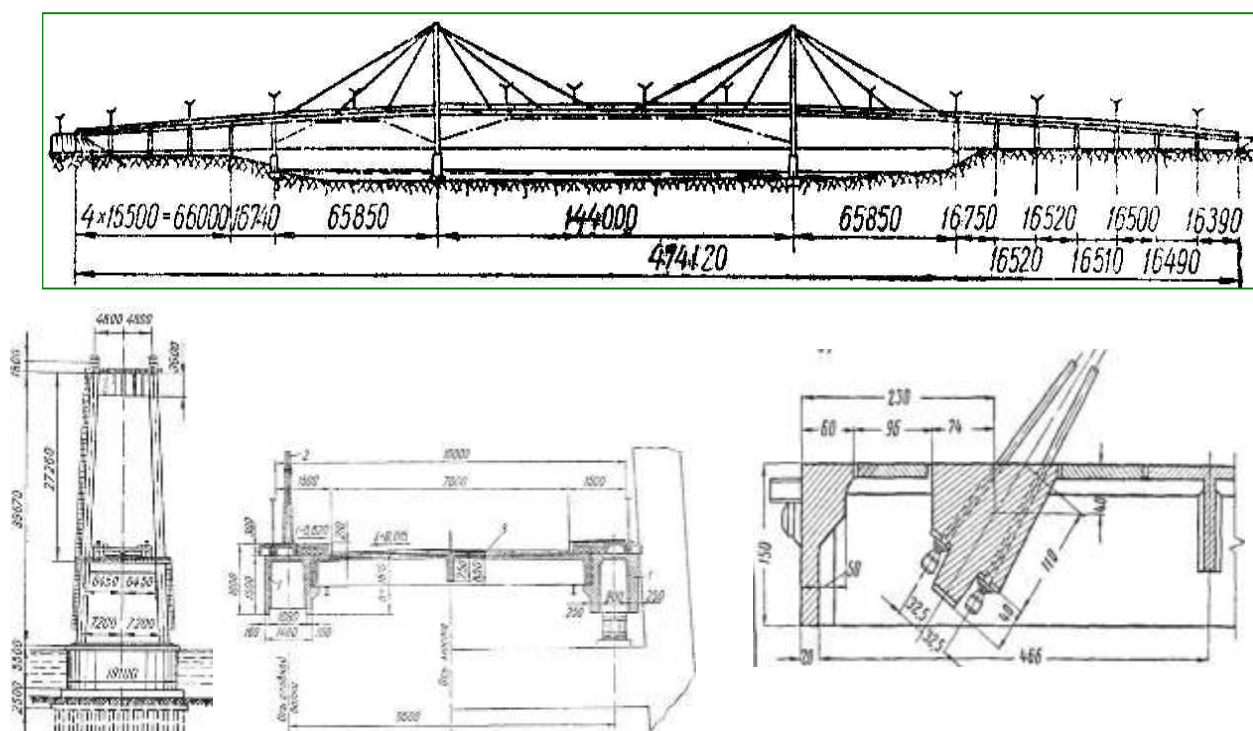


Рис. 7.12. Схеми та деталі мосту через гавань Дніпра у Києві

3. Багатопрогонові вантові мости та заходи підвищення їх жорсткості

В останні роки **багатопрогонові вантові мости** набувають все більшого поширення. Так на початку 21 століття було здано в постійну експлуатацію кілька споруд, до найвідоміших серед яких слід віднести мости Ріон – Антіріон у Греції (рис. 7.13), міст-віадук Мійо у Франції (рис. 7.14), міст через Оку біля Мурому, міст Золоті Консолі в Канаді та інші.



Рис. 7.13. Багатопрогоновий вантовий міст Ріон – Антіріон через затоку Корінфа біля міста Патри в Греції довжиною 2290 м і шириною 26,3 м (2004 р.)
Розмір основних прогонів моста по 560 м



Рис. 7.14. Міст Мійо у Франції

Багатопрогоновий вантовий міст Мійо, на автодорозі Париж – Барселона в районі долини річки Тарн біля міста Тарна, побудований в 2004 р. Остаточний варіант проекту розроблений в 1996 році англійським архітектором Норманом

Фостером у співпраці з французьким інженером Мішелем Вірложо.

Міст Мійо має на своєму рахунку три світові рекорди: найвища опора до балки жорсткості – 244,96 м; найвища опора моста з пілоном – 343 м (що вище за Ейфелеву вежу Парижа); найвище розташування балки жорсткості над землею – 270 м. Повна довжина мосту становить 2460 м (сім прогонів завдовжки по 350 м). Ширина автопроїзду на мосту близько 27 м (по дві смуги руху у кожному напрямку).

Сім пілонів моста мають висоту 88,92 м та масу близько 700 т кожен. До пілонів кріпляться 11 пар вант, розроблених співтовариством Фрейссіне, і мають потрійний захист від корозії (гальванізація, покриття захисним воском та екструдована поліетиленова оболонка). Усього вант на мосту 154 штуки.

Будівництво моста здійснювалося поздовжнім насунанням з двох протилежних сторін, при цьому найскладнішим виявилось спорудження металевої балки жорсткості (рис. 7.15) загальною масою 36000 т, що вимагало зведення п'яти додаткових тимчасових опор. Коли консолі балки зустрілися одна з одною, їхня розбіжність склала менше 1 см.

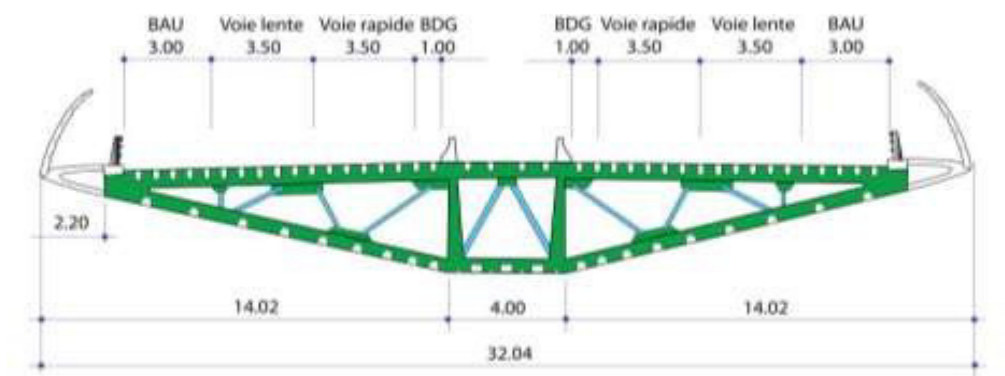


Рис. 7.15. Схема поперечного перерізу балки жорсткості мосту Мійо у Франції

Опори, балка, пілони та ванти забезпечені приладами постійного моніторингу, що дозволяють робити до сотні вимірів в секунду, відстежуючи найменші коливання, зрушення і деформації, що виникають в процесі експлуатації споруди, і контролювати їх вплив на конструкції. З їх допомогою ведеться спостереження за реакцією мосту на критичні погодні умови.

До відкриття мосту були проведені його випробування. Загальна вага випробувального навантаження становила понад 900 т (28 вантажівок). При завантаженні середини одного з прогонів прогин балки становив трохи більше 26 см.

Загалом на будівництво було витрачено 85000 m^3 бетону та 36000 т сталі. Загальна вага споруди становить 242000 т. Міст будувався близько 39 місяців.

Згідно з технічним завданням, міст розрахований на 120 років експлуатації. Вартість будівництва склала близько €400 млн., при тому протягом 75 років компанія підрядник отримала право стягувати плату за проїзд (зараз це €4,6).

Для багатопрогонових споруд величина основного прогону може бути рекомендована від 100 до 600 і більше метрів. При цьому величина бічних прогонів, висота пілонів і балки жорсткості, ширина пілонів по фасаду моста, довжини панелей, кількість вант і кути їх нахилу можуть бути прийняті аналогічно трьохпрогоновим вантовим системам, розглянутим вище.

Принципова схема і схема роботи при завантаженні одного з прогонів багатопрогонового вантового моста представлені на рис. 7.16.

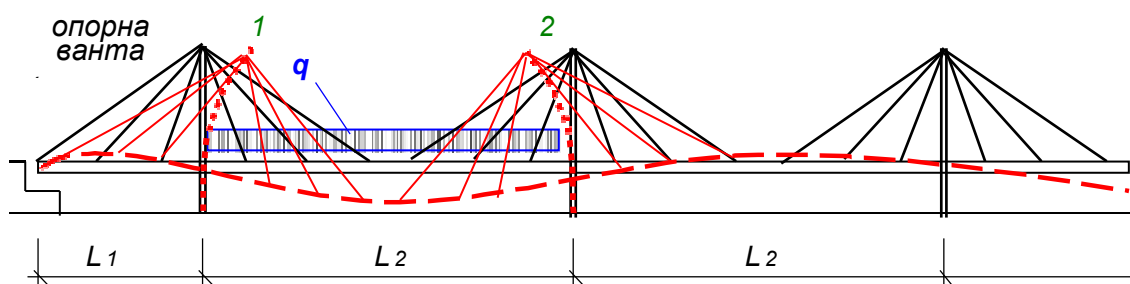


Рис. 7.16. Схема роботи під навантаженням багатопрогонового вантового моста

Основними особливостями багатопрогонових вантових мостів є:

- багаторазова статична невизначеність – труднощі забезпечення роботи гнучких елементів у суворій відповідності до розрахунку – складність контролю розрахункових зусиль у вантах;
- великі температурні переміщення та напруги в конструкціях;
- труднощі забезпечення необхідної вертикальної жорсткості конструкції при використанні гнучких пілонів – ці системи загалом гнучкі (рис. 7.16).

Зважаючи на високу гнучкість багатопрогонових вантових систем, їх, як правило, не застосовують без вживання спеціальних заходів щодо збільшення жорсткості конструкції. Заходи щодо підвищення жорсткості багатопрогонових вантових мостів, загалом, аналогічні тим, які використовують для підвісних мостів:

- розподіл багатопрогонових вантових систем за допомогою проміжних анкерних опор на кілька трьохпрогонових;
- застосування жорстких пілонів;
- застосування горизонтальних та похилих попередньо напружених кабелів жорсткості та вант, що з'єднують пілони та балку;
- перехід до консольно-вантових (рамно-вантових) систем Моранді (рис. 7.17, рис. 7.18) та інше.

Рамно-вантові системи Моранді, що володіють підвищеною жорсткістю, але при цьому мало економічні через велику витрату залізобетону на рамні елементи та фундаменти опор широкого поширення не набули.

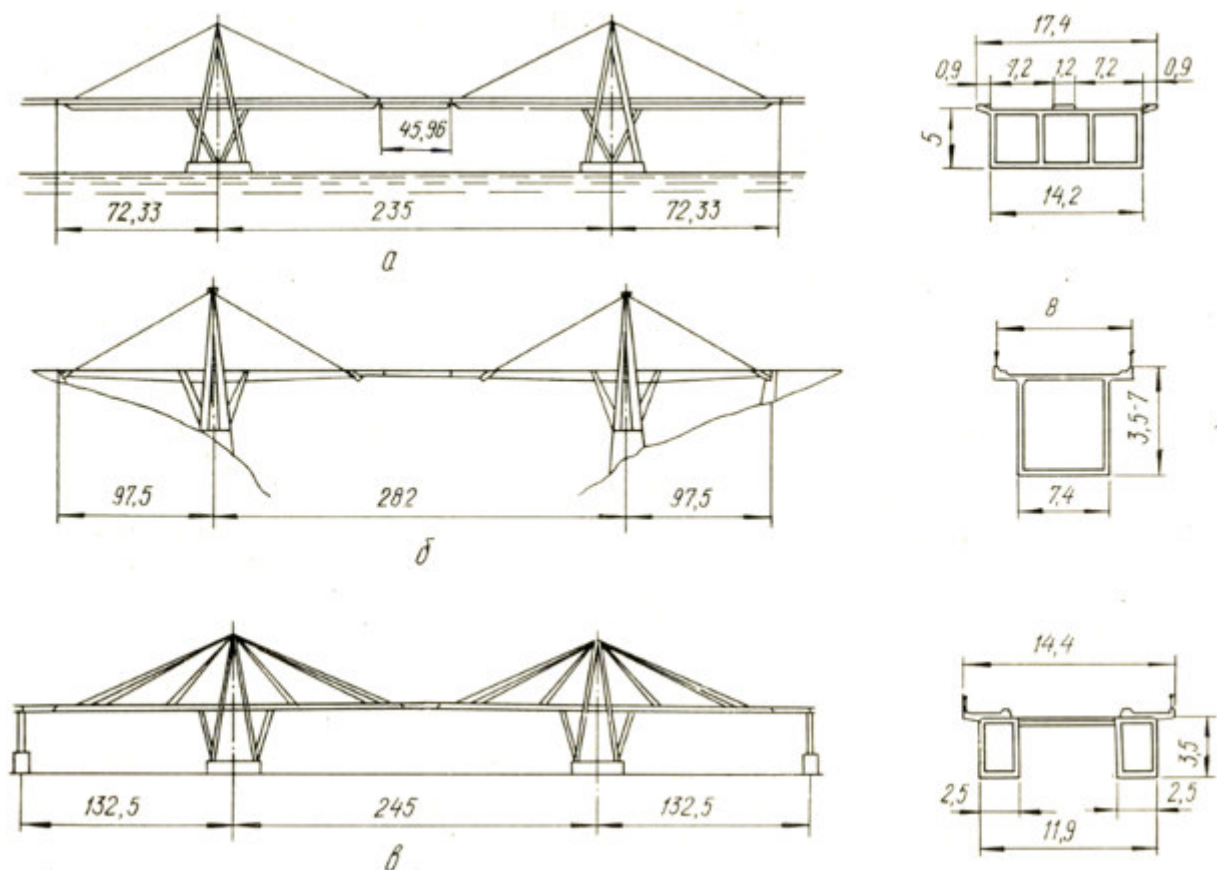


Рис. 7.17. Схеми рамно-вантових систем Моранді а — міст через озеро Маракайбо (Венесуела); б — міст через ущелину Ваді-Куф (Лівія); в — міст через р Парану в Корієнто (Аргентина)



Рис. 7.18. Рамно-вантова система Моранді – загальний вигляд вантових прогонових будов мосту через озеро Маракайбо (Венесуела)

Практичне заняття 8

Схеми розміщення вант у вантових мостах. Системи з малою кількістю вант та багатовантові

Питання для відповіді:

1. Які за геометричною схемою розташування вант розрізняють вантові системи?
2. Покажіть варіанти розташування вант за схемою «пучок».
3. Що відносять до основних особливостей схеми розташування вант «пучок»?
4. Покажіть варіанти розташування вант за схемою «арфа».
5. Що відносять до основних особливостей схеми розташування вант «арфа»?
6. Покажіть варіанти розташування вант за схемою «віяло».
7. Які основні особливості схеми розташування вант «віяло»?
8. Покажіть варіанти схем мостів з малою кількістю розташування вант.
9. Покажіть варіант схеми моста з паралельним розташуванням вант.
10. Покажіть схему мосту через гавань Дніпра у Києві.

Матеріали для відповідей:

1. Схеми розміщення вант у вантових мостах

За геометричною схемою розташування вант розрізняють кілька вантових систем, основні (найчастіше використовувані) з них:

- із загальним опиранням вант на пілоні та радіальним їх розташуванням – схема «пучок»;
- з роздільним опиранням та паралельним розташуванням вант – ярусно-паралельна схема «арфа»;
- з роздільним опиранням вант на пілонах і непаралельним їх розташуванням – ярусно-розбіжна схема «віяло».

У разі розташування вант не паралельно між собою і за наявності загального вузла їхнього спираючого на пілоні вантова схема називається «пучок». На рис. 8.1 показані принципові схеми мостів з таким розташуванням вант при симетричній та несиметричній щодо пілону кількості канатів.

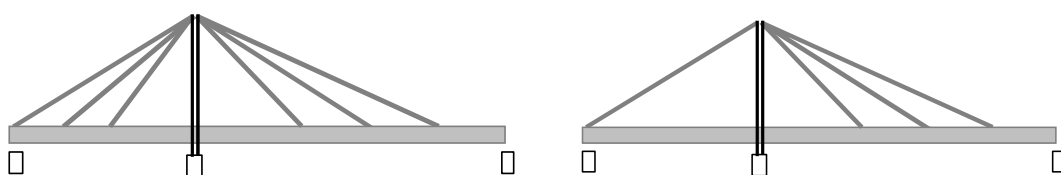


Рис. 8.1. Варіанти розташування вант за схемою «пучок»

До основних особливостей схеми «пучок» прийнято відносити:

- розташування всіх вант по відношенню до верхньої (крайньої) під великим кутом, а отже, їх менша довжина (завдяки чому підвищена їх жорсткість і зменшений переріз), тобто схема відрізняється досить високою загальною жорсткістю порівняно з іншими вантовими схемами;
- відносно невеликі зусилля стиску, що передаються на балку при вантах, розташованих під великими кутами;
- суттєве спрощення роботи пілона (вона близька до роботи центрально-стисненого стрижня);
- можливість несиметричного розташування вант щодо пілону без суттєвого ускладнення та подорожчання конструкцій;
- певні ускладнення конструкції пілонного вузла;
- менш сприятливий зовнішній вигляд у порівнянні з іншими вантовими схемами.

На рис. 8.2 показані вантові споруди зі схемою розташування вант «пучок» із закордонного досвіду.



Рис. 8.2. Вантовий пішохідний міст у США та шляхопровід у Франції

У разі розташування вант паралельно між собою та за відсутності загального вузла їх спирання на пілоні вантова схема називається «арфа». На рис. 8.3 показана принципова схема моста з таким розташуванням вант.

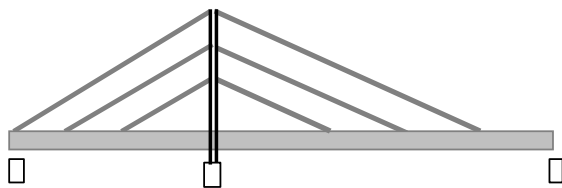


Рис. 8.3. Розташування вант за схемою «арфа»

До основних особливостей схеми «арфа» прийнято відносити:

- сприятливий зовнішній вигляд (оскільки при будь-якому куті погляду на споруду ванти не створюють хаотичного перетину ліній);
- деяке спрощення конструкції вузлів опирання вант на пілоні порівняно з попередньою схемою «пучок»;
- однакову пологість всіх вант, при якій на балку передаються великі стискаючі зусилля, а вантові канати мають меншу жорсткість;
- певну складність несиметричного щодо пілона розташування вант;
- більш складні умови роботи на згин пілона та балки жорсткості.

Одним з перших прикладів застосування вантових мостів зі схемою розташування вант «арфа» є пішохідний міст на Всесвітній виставці в Брюсселі, побудований в 1958 р., в якому за задумом архітекторів та інженерів конструкція повинна була мати більше архітектурне значення, а також відображати ідею прогресу інженерних споруд.

На рис. 8.4 показаний приклад вантової споруди зі схемою розташування вант «арфа».



Рис. 8.4. Вантовий міст через Рейн у Німеччині

У разі розташування вант не паралельно між собою і за відсутності загального вузла їхнього спирання на пілоні вантова схема називається «віяло». На рис. 8.5 показані принципові схеми мостів з таким розташуванням вант при симетричному та несиметричному щодо пілону розміщенні канатів.

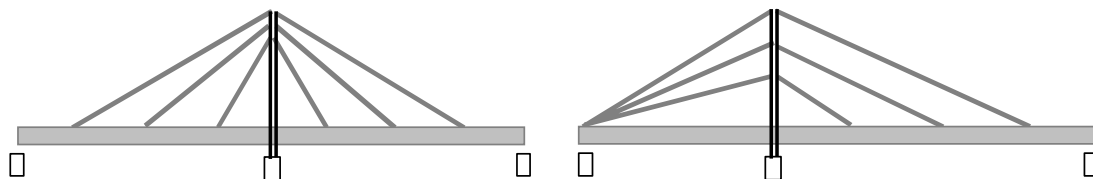


Рис. 8.5. Варіанти розташування вант за схемою «віяло»

До основних особливостей схеми «віяло» прийнято відносити:

- сприятливий зовнішній вигляд – головна позитивна риса схеми;
- розташування всіх вант по відношенню до верхньої (крайньої) під великим кутом (порівняно зі схемою «арфа»), отже, наростання (збільшення) кутів нахилу вант при наближенні до пілона, їх менша довжина (завдяки чому підвищена їх жорсткість і зменшено перетин), тобто, схема відрізняється досить високою загальною жорсткістю;
- відносно невеликі стискаючі зусилля, що передаються на балку при вантах, розташованих під великими кутами;
- деяке спрощення роботи пілона (вона близька до роботи центрально-стисненого стрижня);
- деяке спрощення конструкції вузлів опирання вант на пілоні порівняно зі схемою «пучок»;
- пологість багатьох вант (так як кут нахилу змінюється мало), при цьому на балку передаються великі стискаючі зусилля, а вантові канати мають меншу жорсткість;
- певну складність несиметричного щодо пілона розташування вант;
- більш складні умови роботи на згин пілона та балки жорсткості.

На рис. 8.6 та рис. 8.7 показані приклади вантових споруд зі схемою розташування вант «віяло».

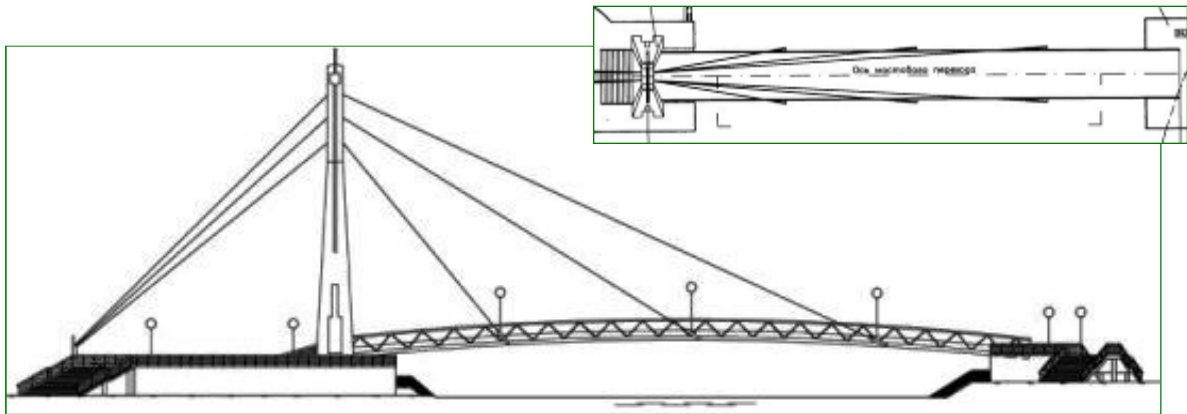


Рис. 8.6. Загальний вигляд балки жорсткості, пілонів та вант мосту через Ельбу



Рис. 8.7. Пішохідний вантовий міст прогоном 68м через Затон у Краснодарі

На закінчення варто додати, що існуючі інші схеми розташування вант є комбінуванням представлених вище і називаються **змішаними** (рис. 8.8).

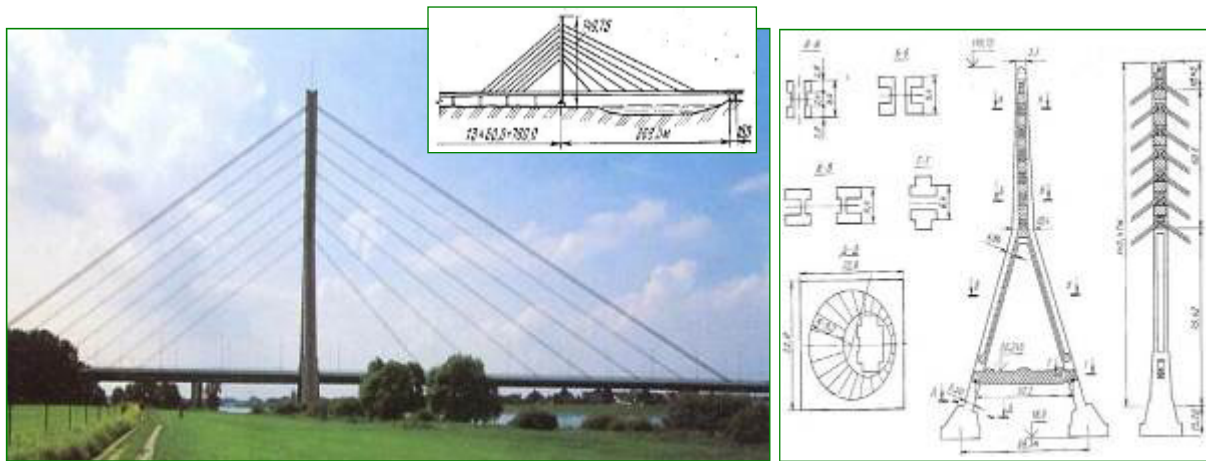


Рис. 8.8. Загальний вигляд та схема мосту Флеє у Німеччині

2. Системи з малою кількістю вант та багатовантові

Якщо кількість вант з одного боку пілону не перевищує трьох – чотирьох – система називається системою з малою кількістю вант (рис. 8.9).

Основними особливостями таких систем є:

- просте регулювання зусиль у вантах;
- невелика кількість вузлів;
- відносна простота монтажу основних несних елементів;
- великі силові дії в елементах;
- потужні балки жорсткості;
- складність конструкції вузлів;
- складність конструкції вант.

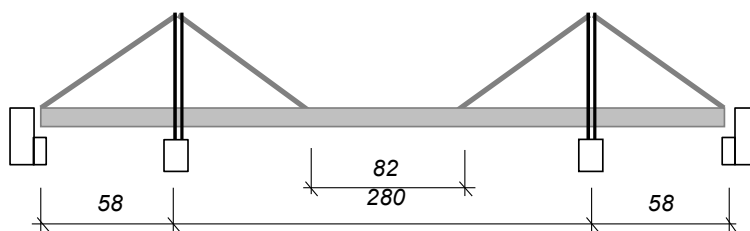


Рис. 8.9. Схема моста з малою кількістю вант в Канаді

Як ілюстрацію мостів з малим числом вант можна навести мости через Дніпро в Києві (рис. 8.11), а також кілька споруд із зарубіжного досвіду – міст через Даугаву в Ризі, через Шексну в Череповці та інші (рис. 8.10, рис. 8.12).

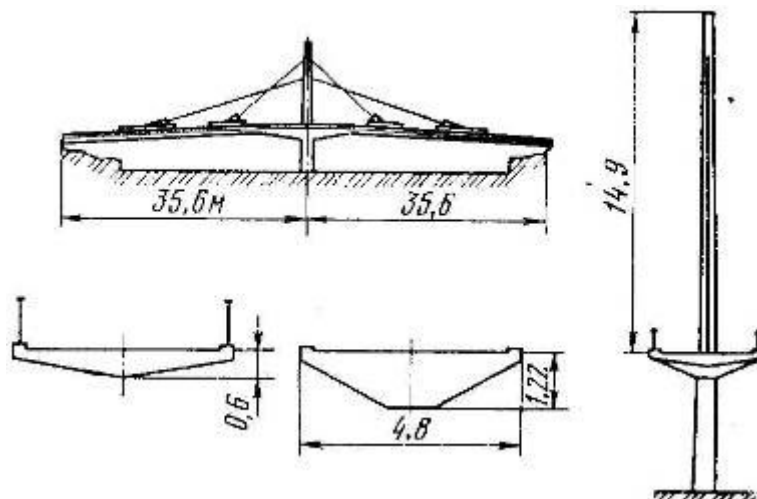


Рис. 8.10. Схема мосту з малою кількістю вант в Австралії

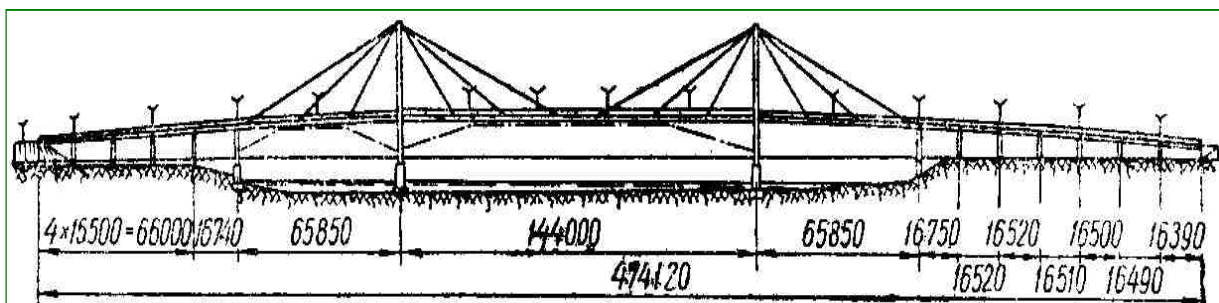


Рис. 8.11. Схема мосту через гавань Дніпра у Києві



Рис. 8.12. Залізничний міст через річку Неккар у Німеччині

Прикладом мосту з малим числом вант є побудований в 1973 р. міст через річку Ваал біля міста Тіл в Нідерландах. Міст має загальну довжину 1419м .

Ванти мосту виконані з попередньо напруженого залізобетону, який виконує дві функції – захищає пучки, що напружуються, і підвищує поздовжню жорсткість вант, так як жорсткість вант в залізобетонній обоймі вчетверо перевищує жорсткість простих вант. Поперечний переріз довгих вант моста 0,9–1 м, а коротких – 0,65–1 м (рис. 8.13).

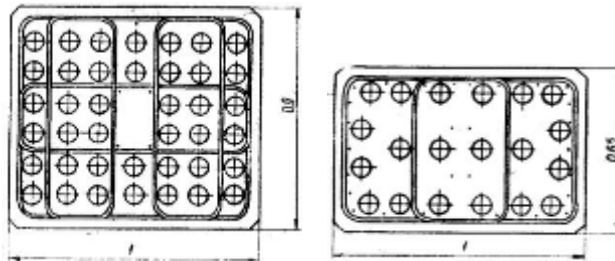


Рис. 8.13. Поперечний переріз вант моста через річку Ваал біля міста Тіл в Нідерландах

Якщо кількість вант з одного боку пілону більша трьох – чотирьох, то така система називається багатовантовою (рис. 8.14).

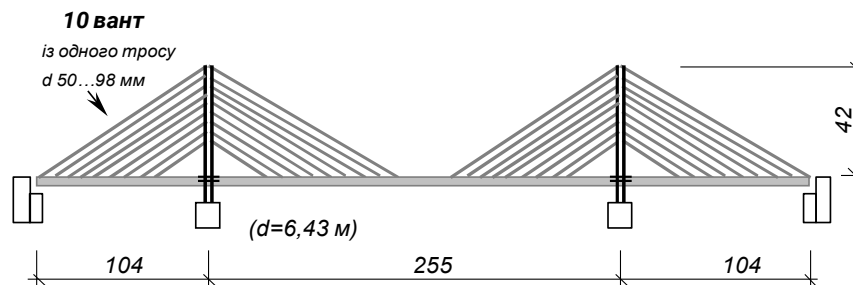


Рис. 8.14. Багатовантовий міст у Німеччині

Основними особливостями таких систем є:

- високий рівень уніфікації через повторюваність вузлів;
- легка балка (оскільки основна її робота на стиск, а не на згин);
- відносна простота конструкції вант та їх прикріплення;
- підвищена аеродинамічна стійкість;
- живучість (оскільки при пошкодженні однієї вант конструкція вистає, в принципі можливе зняття вант та передача навантаження з неї на інші без улаштування додаткових тимчасових опор);
- можливість використання вант як монтажних елементів при навісному монтажі, що сприяє зниженню витрат на допоміжні пристрої при монтажі;
- менший вплив повзучості та усадки бетону на згинальні моменти та осьові зусилля (у разі використання залізобетонних балок жорсткості);
- зменшення ефектів нелінійності;
- складність регулювання зусиль у вантах через їхню високу взаємозалежність;

- велика кількість елементів і вузлів (число вант може бути до 35–40 пар і більше);
- монтаж з багатьма видами робіт.

Враховуючи велику кількість позитивних особливостей даних систем, слід зазначити, що останніми роками спостерігається стійка тенденція переходу до багатовантових мостів (рис. 8.15).



Рис. 8.15. Багатовантові мости Франції, Португалії та Китаю

Заходи з підвищення жорсткості вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Які заходи приймаються для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів?
2. В чому полягає суть застосування вант відтяжок для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів? Покажіть відповідну схему.
3. В чому полягає суть збільшення кількості вант відтяжок для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів? Покажіть відповідну схему на прикладі моста Кнібрюкке (Rheinkniebrücke) в Дюссельдорфі.
4. До чого призводить продовження балки жорсткості як нерозрізної в сусідні з вантовою частиною прогони? Продемонструйте це на прикладі моста Святого Северина через Рейн в Кельні.
5. До чого призводить застосування залізобетонних конструкцій балок жорсткості в прогоновій частині вантово-балкових мостів?
6. Як впливає на роботу вант застосування жорстких пілонів? За рахунок чого це відбувається?
7. До чого призводить застосування похилих пілонів? Покажіть це на прикладах схем мостів Талавера де ла Рейна в Іспанії та пішохідного моста Семюела Бекетта в Роттердамі, а також вантового моста в Мельбурні.
8. Як впливає на жорсткість вантово-балкових мостів застосування гратчастих балок жорсткості? Покажіть це на прикладі схеми вантового автодорожнього металевих моста Бетмана (Batman Bridge) через річку Теймар на острові Тасманія в Австралії.

Матеріали для відповідей:

Заходи з підвищення жорсткості вантових мостів

Для підвищення загальної жорсткості конструкцій вантово-балкових мостів, як і для підвісних, використовується цілий ряд заходів, найбільш ефективними з яких є:

- застосування вант відтяжок, а також збільшення їх кількості;
- продовження балки жорсткості в сусідні з вантовою частиною прогони;
- застосування залізобетонних конструкцій, у тому числі як противаг;
- застосування жорстких пілонів;
- застосування похилих пілонів;

- застосування ґратчастих балок жорсткості.

Використання вант відтяжок (так званих опорних вант) за рахунок зменшення відхилення вершин пілонів дозволяє суттєво (в півтора, два рази) знизити величину згинальних моментів у балці жорсткості. При цьому площу перерізу відтяжки, як правило, призначають у два-чотири рази більшою за площу інших вант (рис. 8.16).



Рис. 8.16. Вантова система двопрогонового вантового шляхопроводу у Франції

Збільшення кількості вант відтяжок (насамперед у системах арфа і віяло) дозволяє, як і в попередньому випадку, зменшити відхилення вершин пілонів, а також скоротити в цілому площу перерізу відтяжки. Нижче на рис. 8.17 показано міст через Рейн в Німеччині із зазначеним способом збільшення жорсткості споруди.

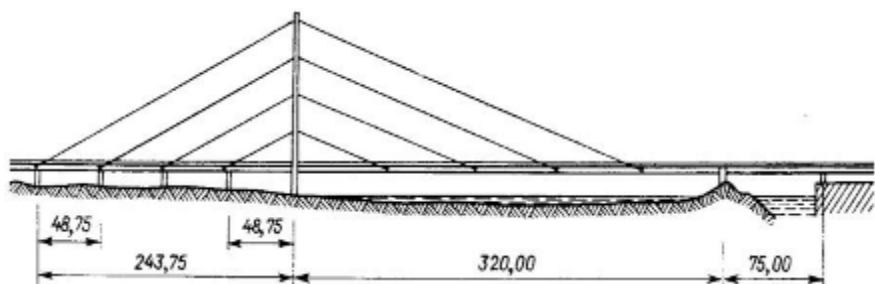


Рис. 8.17. Міст Кнібрюкке (Rheinkniebrücke) в Дюссельдорфі

Міст Кнібрюкке збудовано у 1969 р. Повністю металевий міст загальною довжиною 561,1 м та шириною – 8,92 м. Висота пілонів мосту Кнібрюкке (Rheinkniebrücke) у Дюссельдорфі – 114,1 м, висота балки жорсткості – 3,35 м ($1/100 \times L$). Балка – двотаврова з ортотропною плитою проїжджої частини по верхньому поясу. На момент відкриття це був вантовий міст із найдовшим прогоном у світі.

Продовження балки жорсткості як нерозрізної в сусідні з вантовою частиною прогони призводить до суттєвого зменшення навантаження на опори (на 25–60%). Довжину крайніх прогонів естакадної частини споруди зазвичай підбирають так, щоб можна було зберегти поперечний переріз балки жорсткості, прийнятий в основному прогоні. Як ілюстрація до сказаного, на рис. 8.18 показаний міст через Рейн у Кельні (Німеччина).



Рис. 8.18. Міст Святого Северина через Рейн в Кельні

Міст Святого Северина – повністю металевий міст загальною довжиною 691 м, довжиною основного прогону – 302 м та шириною – 29,5 м. Висота пілону – 77,2 м, висота балки жорсткості – 4 м. На момент відкриття це був вантовий міст з найдовшим прогоном у світі.

Застосування залізобетонних конструкцій за рахунок їх великої питомої ваги дозволяє суттєво скоротити деформації вант і балки жорсткості при завантаженнях, а також, у разі залізобетонних бічних прогонів, дозволяє, дещо змінивши схему роботи вантової споруди, досягти мінімальних деформацій балки жорсткості під навантаженням (рис. 8.19).

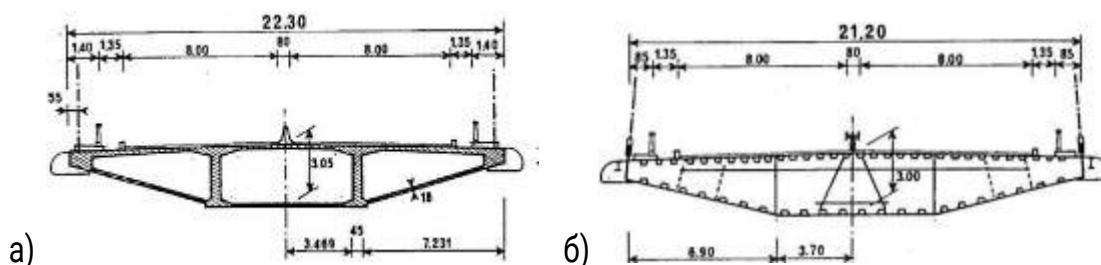


Рис. 8.19. Перетин балки жорсткості мосту Нормандія
а – залізобетонний поперечний переріз бокового прогону (анкерний блок)
б – сталевий переріз основного прогону

Застосування жорстких пілонів, за рахунок фіксованого (незмінного) положення вершини їх стійок, сприяє лінійно-пружній роботі вант, при якій деформації балки виявляються невеликі. Як приклади, тут слід розглянути пілони мосту Каменерізів та шляхопроводу в Дюссельдорфі, а також пілони мосту через Оку біля Мурому (рис. 8.20).



Рис. 8.20. Жорсткий пілон мосту через Оку біля Мурому

Застосування похилих пілонів, за рахунок зменшення кута нахилу та довжини відтяжки або вант основного прогону, дозволяє суттєво збільшити жорсткість канатних елементів, знизити зусилля в них та скоротити деформації споруди під навантаженням.



Рис. 8.21. Вантовий міст Еразма Роттердамського через річку Маас у межах Роттердама в Голландії

Міст Еразма Роттердамського через річку Маас у межах Роттердама в

Голландії (рис. 8.21) було побудовано 1996 р. Повна довжина мосту становить 802 м, висота мосту над водою – близько 14 м. На мосту розташовані дві смуги автопроїзду, трамвайний проїзд, велосипедні доріжки та тротуари для пішоходів.

Вантова частина споруди (рис. 8.21) довжиною 410 м включає основний вантовий прогон завдовжки 284 м і бічний прогон завдовжки 60 м. Прогонова будова в основному прогоні утримується 32 парами вант. Балка жорсткості сталева з ортотропною плитою проїжджої частини, загальною шириною 33,2 м і висотою 2,3 м. Металевий пілон моста має висоту 139 м (у тому числі його верхня, вертикальна частина – 70 м заввишки). Усередині стійок пілона розташовані ліфти. Загальна вага пілона близько 1800 т.

До складу споруди входить також розвідний прогон завдовжки 50 м.

Завдяки своєму зовнішньому вигляду міст серед мешканців частіше називають «Лебідь».

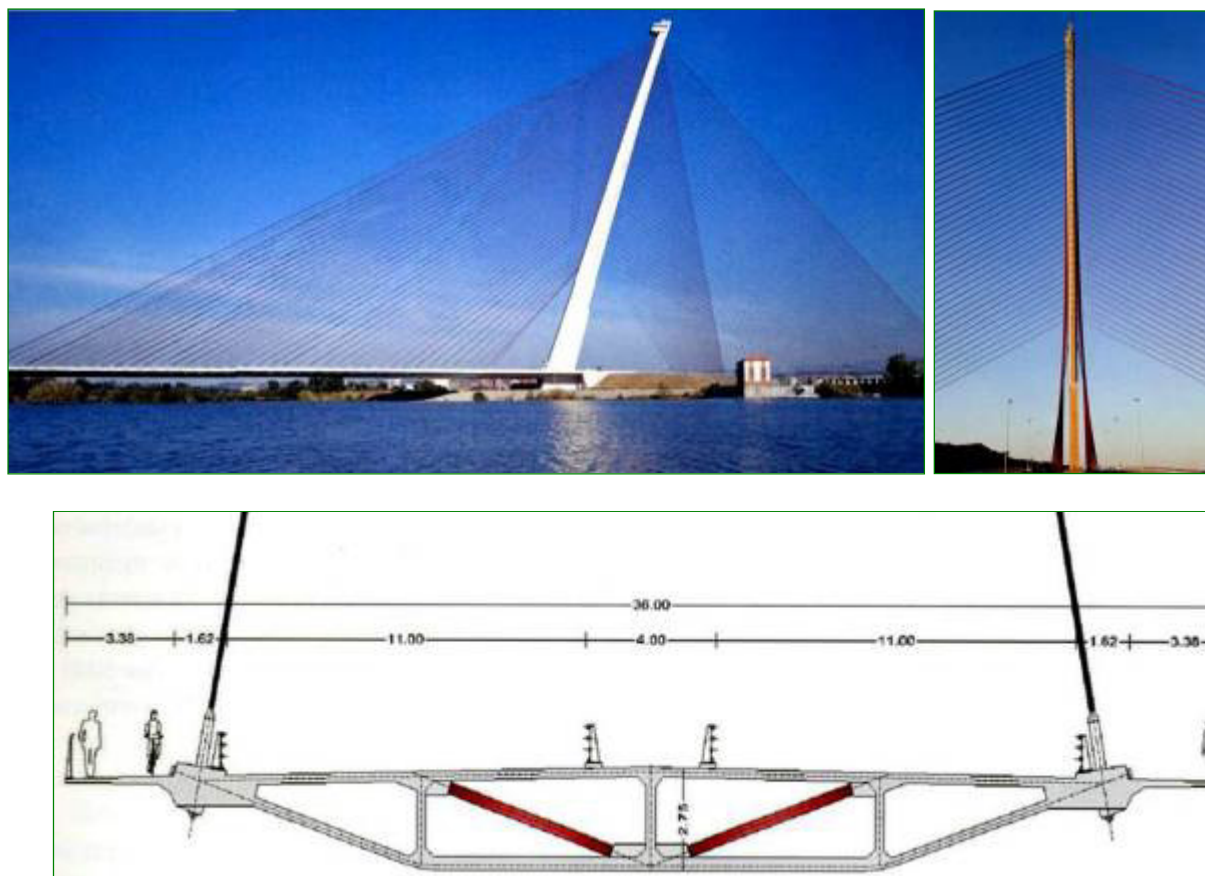


Рис. 8.22. Міст Талавера де ла Рейна в Іспанії

Міст Талавера де ла Рейна (Talavera de la Reina) в Іспанії (рис. 8.22) побудований в 2011 р. Довжина основного прогону – 318 м, висота залізобетонної балки жорсткості – 2,75 м, висота пілону – 192 м, ширина пілону по фасаду мосту змінюється від 4 до 16 м.

У показаних на рис. 8.21, рис. 8.22 спорудах за рахунок зворотного нахилу стійок пілонів зменшена довжина відтяжок і зусилля в них, проте кути нахилу

вант основного прогону виходять при цьому пологі (невеликі), а фундаменти пілонів повинні мати можливість опиратися зсуву від горизонтальних складових діючих на них сумарних зусиль.

Навпаки, у спорудах, показаних нижче на рис. 8.23 та рис. 8.24, довжина відтяжки та зусилля в ній збільшені, проте кути нахилу вант в основному прогоні при цьому помітно більші. Таким чином система виходить жорсткішою.



Рис. 8.23. Пішохідний міст Семюела Бекетта

Будівництво мосту Семюела Бекетта велося за проектом інженера та архітектора Сантьяго Калатрави у Роттердамі. У травні 2008 р. готовий міст було перевезено до Дубліна (Ірландія) і відкрито для руху в 2009 році. Довжина моста – 123 м, ширина – 48 м, кут повороту при розведенні – 90 градусів.

Пішохідний металевий міст Пассерелья Де Ла Мужер у Буенос-Айресі (Аргентина), збудований у 2002 р., за проектом інженера та архітектора Сантьяго Калатрави має повну довжину 175 м, у тому числі центральний металевий розвідний вантовий прогон завдовжки 100 м (70). Висота сталевого пілона складає 40 м над центральною поворотною опорою, кут нахилу стійки пілона – 38,81 градуса від горизонталі. Висота бетонних опор моста близько 10 м. Розвідна частина повертається вздовж річки на кут до 90 градусів (рис. 8.24).



Рис. 8.24. Міст Пассерелья де ла Мужер



Рис. 8.25. Панорамний міст довжиною 126,7 м в Малайзії

У показаних на рис. 8.25 та рис. 8.26 мостах пілони запроектовані так, щоб звести до мінімуму довжину відтяжок і вант основного прогону.



Рис. 8.26. Вантовий міст в Мельбурні (Австралія)

Застосування гратчастих балок жорсткості (рис. 8.27) за рахунок збільшення згинальної жорсткості балочної конструкції також призводить до зниження величини деформацій прогонових будов вантових мостів під навантаженнями.



Рис. 8.27. Вантовий автодорожній металевий міст Бетмана (Batman Bridge) через річку Теймар на острові Тасманія в Австралії (збудований у 1968 році)

Повна довжина мосту Бетмана – 442 м, довжина основного прогону – 206 м. Це перший вантовий міст на території Австралії.

Практичне заняття 9

Розрахунок кабелів, підвісок, пілонів, анкерних опор і балок жорсткості підвісних мостів

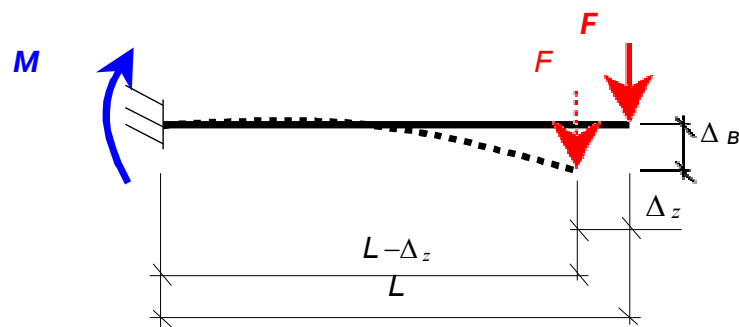
Питання для відповіді:

1. За якою схемою розраховують підвісні мости?
2. В чому переваги розрахунку за деформованою схемою?
3. Чи впливає геометрична нелінійність на роботу вантових мостів?
4. Яке співвідношення навантажень рекомендується для підвісних мостів?
5. Для чого рекомендується застосування в підвісних мостах балки жорсткості? Продемонструйте схемою.
6. Який варіант завантаження прогону вважається найнебезпечнішим для підвісних мостів? Продемонструйте схемою.
7. Покажіть принципову схему підвісного мосту, прийнятого до ескізного розрахунку.
8. Вкажіть формулу для величини розпору в підвісному мості. Чому дорівнює максимальне зусилля в кабелі?
9. За якою формулою знаходять необхідну площу поперечного перерізу кабеля за умовою міцності та за умовою жорсткості?
10. За якою формулою знаходять необхідну площу поперечного перерізу підвіски?
11. Які характеристики (ескізно) згинної та поздовжньої жорсткості пілона?
12. Як знаходять момент інерції балки жорсткості за умовою міцності та умовою жорсткості?
13. Яку залежність можна використати для визначення максимально можливої для сучасних підвісних систем величини прогону? Яка це величина прогону?

Матеріали для відповідей:

З урахуванням того, що форми рівноваги кабелю підвісних розпірних мостів залежать від положення навантаження, принциповою відмінністю статичного їх розрахунку є те, що підвісні системи необхідно розраховувати за деформованою схемою (тобто з урахуванням так званої геометричної нелінійності).

Геометрична нелінійність – це властивість конструкцій, суть якої у тому, що величина внутрішніх зусиль (M , Q , N) залежить від деформованого становища споруди, тобто від її прогинів (рис. 9.1).



$$M = F \times L; \quad M_{\text{звл}} = F \times (L - \Delta_z)$$

Рис. 9.1. Ілюстрація до розрахунку балки за деформованою схемою

Для більшості споруд прогини Δ_B та зміщення Δ_z незначні і ними нехтують при розрахунку конструкції за вихідною недеформованою схемою (виконуючи так званий лінійний розрахунок). Проте у підвісних мостах переміщення можуть бути суттєві і величина зусилля стає повністю залежною від деформованого стану конструкції, тобто від її жорсткості:

$$M = f(F, L, EI).$$

Розрахунки підвісних систем ведуть ітераційними методами. Якщо змодельовати підвісний міст балкою, що лежить на пружних опорах типу пружин, встановлених замість підвісок, то виявиться, що поки ми не знаємо величини прогину, ми не можемо знайти реакції опор (пружин). З іншого боку, поки невідомі реакції опор, для балки не можна знайти прогини. Виходом із цього «замкнутого кола» і є метод послідовних наближень – тобто ітераційним шляхом знаходять такі прогини, щоб відповідні реакції забезпечували б рівновагу балки під навантаженням.

Перевагою розрахунку за деформованою схемою є те, що він точніший за звичайний розрахунок, а отримані уточнення дозволяють зменшити витрату матеріалів (вагу) і, отже, прогини споруди під навантаженням.

На роботу вантових мостів геометрична нелінійність впливає меншою мірою (якщо розглядати ванту як простий розтягнутий стрижень, навіть за дуже не вигідних умов «помилка» складе не більше 3%), тому їх можна розраховувати як системи, що лінійно деформуються.

Нелінійність вантових систем, перш за все, пов'язана з провисанням вант (при завантаженні моста тимчасовим навантаженням ванти, що провисають, вступають в роботу тільки після їх деякого випрямлення) – рис. 9.2. Практично величина провисання вант невелика (1/100–1/200 від довжини вант) і може бути вибрана при регулюванні в них зусиль.



Рис. 9.2. Провисання вант вантових мостів

Перше математичне дослідження, присвячене розрахунку підвісних мостів з урахуванням впливу власної ваги ланцюга та проїжджої частини належить математику і великому французькому механіку та інженеру Клоду Луї Нав'є (Navier). Він перший в 1823 р. вивів рівняння кривої, яку має ланцюг під дією будь-якого суцільного нерівномірного навантаження. Нав'є розглядав системи, які не мають балки жорсткості. До застосування балок жорсткості будівельники дійшли пізніше, практичним шляхом.

Основною особливістю підвісних мостів є та обставина, що їх головний несний елемент – вільно провисаюча нитка (кабель) – є системою геометрично змінюваною (внаслідок цього і знижується загальна жорсткість споруди). Крім того, гнучка нитка не може сприймати зусиль стиску, так як при цьому вона втрачає стійкість.

Можна констатувати, що при рівномірному завантаженні кабеля вертикальним навантаженням по всій довжині прогону переміщення його точок викликані лише подовженням кабеля в результаті розтягування. Великих переміщень, обумовлених геометричною змінністю кабеля, немає, а отже, для підвісних мостів:

- бажано мати співвідношення навантажень на користь власної ваги, тобто на користь рівномірно розподілених по довжині кабелю навантажень (великі прогони, відносно невелике тимчасове навантаження тощо);
- для рівномірної передачі тимчасових навантажень на кабель та обмеження його переміщень (геометричної змінності) у рівні проїжджої частини слід застосовувати балку жорсткості (рис. 9.3).

Вплив балки на кабель залежатиме від згинальної жорсткості балки – чим жорсткість вища, тим менше переміщення кабелю. Проте дуже жорсткі балки застосовувати недоцільно, тому що це рішення не економічне (у згинальних елементах матеріал використовується гірше, ніж у розтягнутих).

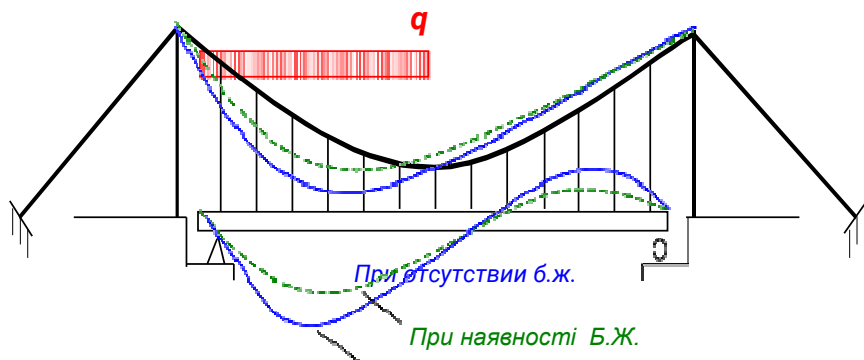


Рис. 9.3. Схема переміщень вузлів та елементів підвісного мосту за наявності балки жорсткості

Тут варто також відмітити, що при завантаженні половини прогону для підвісних мостів характерний S-подібний прогин – під дією навантаження частина балки прогинається, за нею частина кабелю опускається над завантаженою частиною балки. В цей момент спрацьовує «ефект нитки» – інша частина кабелю розпрямляється, піднімається вгору і тягне за собою підвіски, що згинають балку. Таким чином балка жорсткості набуває незвичайної форми рівноваги. Тому, на відміну від інших систем, завантаження половини прогону для більшості елементів підвісних мостів набагато небезпечніше, ніж завантаження прогону цілком.

Розрахунок кабелів, підвісок, пілонів, анкерних опор та балок жорсткості підвісних мостів

Принципова схема підвісного мосту, прийнятого до ескізного розрахунку, представлена на рис. 9.4.

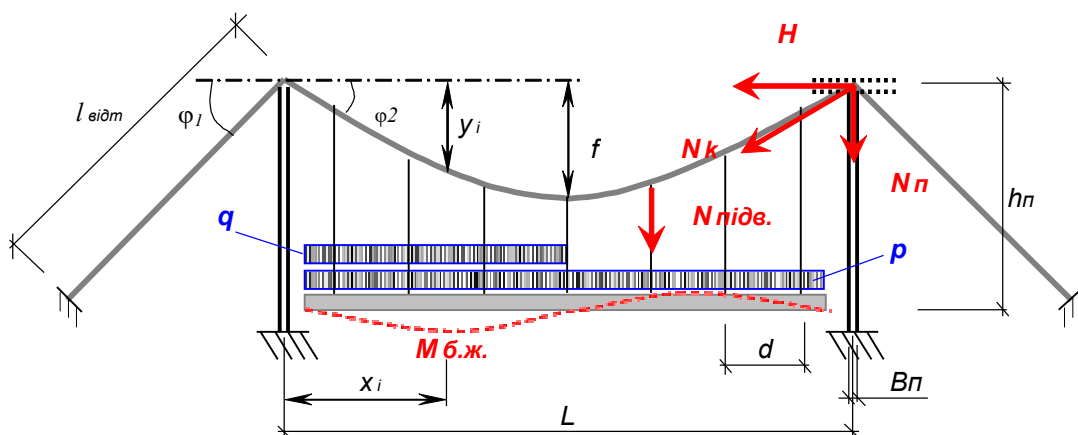


Рис. 9.4. Схема для розрахунку елементів підвісного мосту

Вважатимемо, що при розрахунку моста відомі:

p, q – інтенсивність, відповідно, постійного та тимчасового навантаження;

L – величина основного прогону;

$l_{відм}$ – довжина відтяжки;

f – стріла провисання кабелю в середині прогону;

d – крок підвісок (панель);

B_{II} – ширина пілонів;

h_{II} – висота пілонів;

φ_1, φ_2 – кути нахилу кабелю та відтяжки на пілонах;

x_i, y_i – відповідно, горизонтальна та вертикальна координати точок кабелю.

Обрис осі кабелю – квадратна парабола:

$$y_i = \frac{4f}{L^2} x_i (L - x_i).$$

1. Розрахунок кабелів та відтяжок підвісних мостів може бути здійснений за наступною ескізною методикою:

Величина розпору (H) – горизонтальна складова зусилля в кабелі (відтяжці), яка по всій довжині кабелю є постійною величиною (що забезпечується його поздовжньо-рухомим опиранням на пілонах):

$$H = \frac{(p+q)L^2}{8f}.$$

Залежно від зміни кута нахилу дотичної по довжині кабелю поздовжнє зусилля в ньому:

$$N_{K(x)} = \frac{H}{\cos \varphi_{(x)}}.$$

Тоді:

- на вершині пілона:

$$N_{K(x)} = N_{\max} = \frac{H}{\cos \varphi_2};$$

- в середині прогону:

$$N_K = N_{\min} = H.$$

Проаналізувавши зміну зусиль у кабелі, при середньому відношенні $f/L = 1/10$, можна записати:

$$N_{\max} = 1,078 N_{\min}.$$

Таким чином, з деяким запасом зусилля в кабелі:

$$N_K = 1,1 H.$$

Модуль нормальної пружності матеріалу кабелю за всіх розрахунків може бути прийнятий рівним $E_K = (1,3...1,85) \times 10^5 \text{ МПа}$ – для кабелів з кручених

канатів заводського виготовлення та $E_K = 2,0 \times 10^5 \text{ МПа}$ – для кабелів із паралельних дротів. Площа перерізу кабелю з паралельних дротів за умовою міцності може бути отримана з виразу:

$$A_K = k \frac{N_k}{0,63 R_{un}}.$$

Тут $R_{un} = 1000 \dots 2400 \text{ МПа}$ (частіше – 1600–1900 МПа) – для сучасних канатів заводського виготовлення найменший тимчасовий опір дроту розриву; $k = 0,87 \dots 0,99$ – коефіцієнт агрегатної міцності каната, значення якого визначається за вимогами ДБН залежно від типу каната.

За умовою жорсткості, площа перерізу кабелю може бути отримана з виразу величини прогину в середині прогону:

$$\Delta_{0,5} = \frac{3 q L^2 l}{128 A_K f^2} \leq [\Delta],$$

тоді

$$A_K = \frac{3 q L^2 l}{128 [\Delta] f^2 E_K}.$$

Тут l – повна довжина кабелю:

$$l = L \left(1 + \frac{8 f^2}{3 L^2} \right) + 2 l_0,$$

а l_0 – довжина відтяжок; $[\Delta]$ – допустиме значення прогину прогонової будови, що визначається ДБН.

З двох отриманих значень площі перерізу A_K слід вибрати найбільше. Після чого, задавшись площею перерізу одного дроту A_{dp} з урахуванням коефіцієнта умов роботи m , одержати n – ціле число дротів у кабелі:

$$n = \frac{A_K}{m A_{dp}}.$$

У кабелях, сформованих із паралельних дротів, при їх розташуванні по колу, кількість дротів необхідно узгодити зі схемою укладання.

Зусилля у відтяжці залежить від кута її нахилу до горизонту. Якщо кути нахилу кабелю та відтяжки на пілоні прийняти рівними, тобто $\varphi_1 = \varphi_2$ (рис. 9.4), то всі основні міцнісні та геометричні характеристики кабелю і відтяжки будуть однакові.

2. Розрахунок підвісок підвісних мостів може бути зроблено з урахуванням таких особливостей їхньої роботи:

- зусилля в підвісках не залежать від їхнього положення по довжині прогону;

- при рівній довжині панелі d , зусилля у всіх підвісках однакові за будь-якого розташування навантаження на мосту;

- підвіски підвісних мостів є елементами, що працюють тільки на розтяг, а розрахунок підвісок аналогічний розрахунку кабелю.

Зусилля у підвісках, що залежить від відстані між ними, становить:

$$N_{підв} = (p + q) d.$$

Площа перерізу підвісок:

$$A_{підв} = k \frac{N_{підв}}{0,63 R_{un}}.$$

Тимчасовий опір та модуль нормальної пружності металу підвісок, а також момент інерції їх перерізів можуть бути прийнятими такими, як для кабелю.

3. Розрахунок пілонів підвісних мостів загалом робиться аналогічно розрахунку опор мостів, тобто на дію поздовжніх зусиль стиску від постійних та тимчасових навантажень:

$$N_{п} = H (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2),$$

а також на згинальні моменти, що діють у поздовжній та поперечній площині (див. рис. 9.4 та рис. 9.5):

$$M_{п} = N_{п} e,$$

де

$$e = \frac{N_{відм} l_{відм}}{A_{відм} E_{відм} \cos \varphi_1}.$$

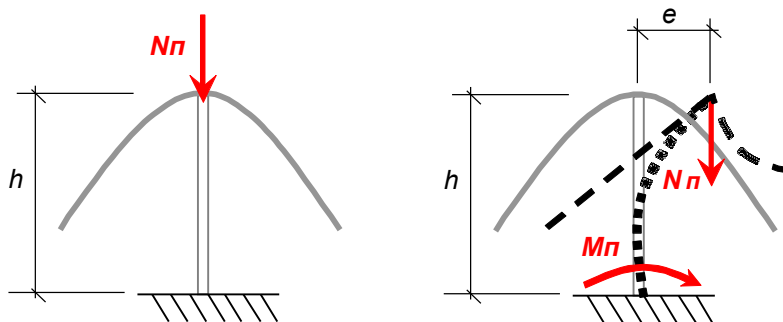


Рис. 9.5. Схеми роботи пілона в поздовжній площині мосту

Тут слід зазначити, що для гнучких пілонів у поперечній площині, залежно від різних факторів, під дією вітру відхилення вершин може досягати

1/50 висоти стійок.

Характеристики згинальної та поздовжньої жорсткості пілону ($E_{II}A_{II}$ та $E_{II}I_{II}$) ескізно можуть бути призначені, виходячи з досвіду проектування, якщо:

$$B_{II} = (1/25 \dots 1/35) h_{II},$$

де $h_{II} = f + (2 \dots 4 \text{ м}) + h_{БЖ}$ – висота пілону.

Слід додати, що для гнучких пілонів величину $E_{II}I_{II}$ слід намагатися приймати мінімальну, так як при цьому будуть знижені зусилля у конструкції.

При отриманих даних перевірка міцності перерізу пілону та стійкості виконується за відомими залежностями:

$$\sigma = \frac{N_{II}}{A_{II}} \pm \frac{M_{II}}{W_{II}} \leq m R_y; \quad \sigma_y = \frac{N_{II}}{\varphi A_{II}} \leq m R_y.$$

З досвіду проектування відомо, що область середніх значень коефіцієнта поздовжньої стійкості φ лежить у діапазоні 0,6–0,7 – для металевих пілонів та 0,8–0,9 – для залізобетонних (при класі бетону – В40–В50).

Про забезпечення стійкості пілонів необхідно особливо подбати під час їхнього спорудження, тобто тоді, коли вони ще не закріплені від зміщень у верхній частині кабелем або вантами.

4. Розрахунок анкерних опор підвісних мостів проводять для розпірних систем, де вертикальні та горизонтальні зусилля передаються відтяжками на устої.

Під час визначення розмірів анкерної опори необхідно підтвердити виконання трьох перевірок:

- стійкість від перекидання навколо ребра А (рис. 9.6);
- перевірка на зсув плити основи опори по ґрунту (ця перевірка, як правило, не є визначальною, бо вважається, що стійкість опор на ковзання забезпечується, якщо їхня вага приблизно вдвічі перевищує розпір підвісної системи, що ними сприймається);
- перевірку на відсутність напруг розтягу по підшві фундаменту (причому ця умова вважається основною).



Величина горизонтальної реакції (розпору):

$$H = \frac{(p+q)L^2}{8f} = \frac{8 \times 100^2}{8 \times 12.5} = 800 \text{ T} = 8000 \text{ kH}.$$

$$V = \frac{(p+q)L}{2} = \frac{8 \times 100}{2} = 400 \text{ T} = 4000 \text{ KH.}$$
$$\gamma_{\text{кладки}} hb = 2,2 \times 30 \times 11 = 726 \text{ Т/м} = 7260 \text{ кН/м};$$

$$\gamma_{\text{грунта}} b t g^2(45^0 - \frac{\varphi}{2}) = \frac{1,8 \times 30^2}{6} \times 11 \times t g^2(45^0 - 17^0 30^I) = 24100 T_M = 241000 \kappa H / m$$

$$a^2 - \frac{2V}{\gamma_{\text{кладки}} h b} a - \frac{6}{\gamma_{\text{кладки}} h b} [H(c+h) - V_s + \frac{\gamma_{\text{грунта}} h^3}{6} b \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})] = 0,$$
$$a^2 + 0,544a - 486 = 0,$$

156

$$a = 0,27 + \sqrt{0,73 + 486} = 23 \text{ м.}$$

Пересвідчимось, що по підшві фундаменту напруга не перевищує допустимих значень:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{171000}{253} \pm \frac{630000}{979} = 680 \pm 650 \text{ кПа};$$

де

$$Q = V + \gamma_{\text{кладки}} h b a = 400 + 2,2 \times 23 \times 30 \times 11 = 17100 \text{ Т} = 171000 \text{ кН};$$

$$M = H(c + h) + V\left(\frac{a}{2} - s\right) + \frac{\gamma_{\text{грунта}} h^3 b t g^2 (45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{6} = 800 \times 43,5 + 400 \times 10,5 + 244100 = 63000 \text{ Тм} = 630000 \text{ кНм};$$

$$A = 23 \times 11 = 253 \text{ м}^2; \quad W = 11 \times 23^2 / 6 = 979 \text{ м}^3.$$

Таким чином, напруги становлять: $\sigma_{\max} = 1,33 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\min} = 0,03 \text{ МПа}.$

Напруг розтягу немає.

5. Розрахунки балок жорсткості підвісних мостів проводять, виходячи з таких особливостей їхньої роботи під навантаженням:

- опорні реакції балок можуть бути як позитивними, так і негативними (див. рис. 9.4);
- по всій довжині балки діють позитивні та негативні згинальні моменти;
- поперечні (перерізуючі) сили в балці мають відносно невелику величину.

Згинальний момент у перерізах балки жорсткості:

$$M_{xi} = M_0 - H \times y_i.$$

Максимальний згинальний момент у балці жорсткості (у чверті її прогону):

$$M_{БЖ} = 0,0156 \times q \times L^2.$$

Перевірка міцності перерізу для металевої балки:

$$\sigma = \frac{M_{БЖ}}{W_{БЖ}} \leq m R_y.$$

Момент інерції балки із умови її міцності:

$$I_{БЖ} = W_{БЖ} \frac{h_{БЖ}}{2} = \frac{M_{БЖ} h_{БЖ}}{2 m R_y}.$$

Згинальна жорсткість балки перевіряється також із умови забезпечення жорсткості при завантаженні половини прогону тимчасовим навантаженням.

При цьому прогин у чверті прогону:

$$\Delta_{0,25} \approx \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{32 E_{БЖ} I_{БЖ}}.$$

Якщо прийняти $[\Delta] = L / 400$, то

$$E_{БЖ} I_{БЖ} \cong \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{32[\Delta]}.$$

Звідси потрібно підібрати перетин, що відповідає отриманому моменту інерції $I_{БЖ}$ і підрахувати його площу. Перевірку на міцність балки жорсткості після цього, зазвичай, не роблять, тому що вона виконується із запасом.

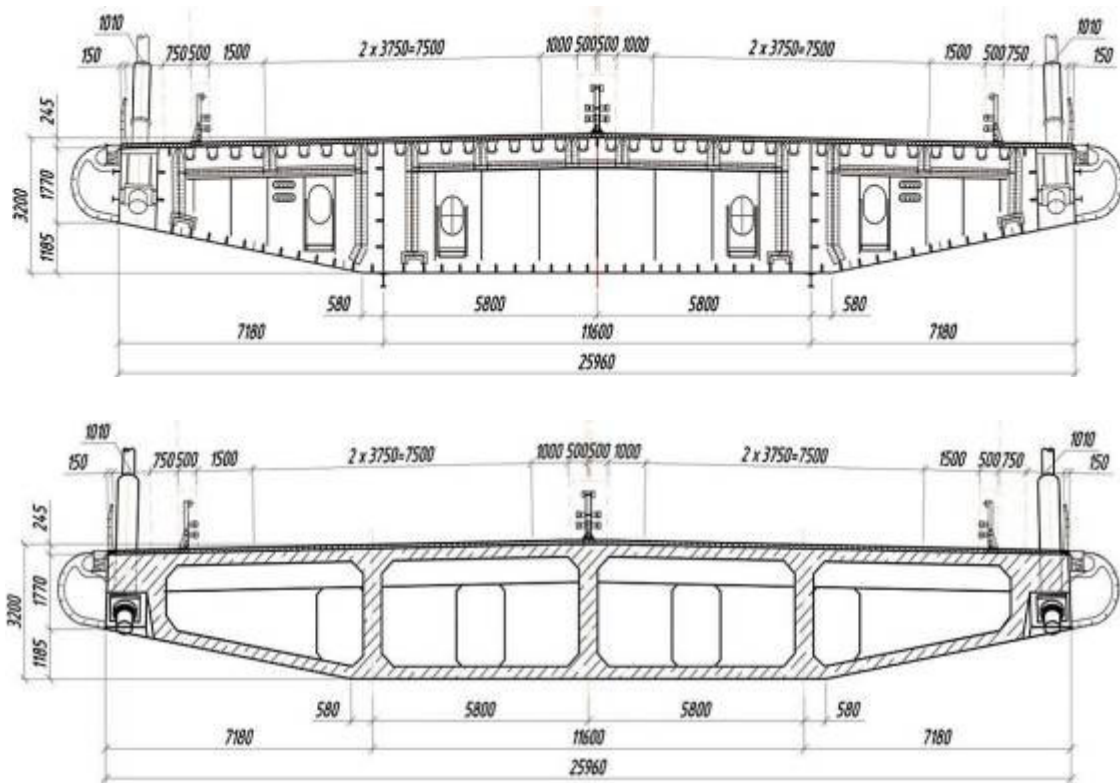


Рис. 9.7. Поперечні перерізи балки жорсткості в основному (вверху) та боковому (внизу) прогонах мосту через протоку Босфор Східний

При ескізному розрахунку сталезалізобетонних балок допускається замінювати залізобетонну плиту на металеву з приведеною площею $A_{пр}$:

$$A_{пр} = A_{плити} \frac{E_{бет}}{E_{мет}}.$$

Площі поперечного перерізу балок жорсткості підвісних і вантових мостів можуть змінюватися в широких межах (тому що їх висота змінюється в діапазоні від 1/50 до 1/360 довжини прогону), проте звичайна «розумна»

величина площі перерізу металевих конструкцій зазвичай становить не більше $0,1-0,5 \text{ м}^2$, залізобетонних – до $10-15 \text{ м}^2$ (рис. 9.7).

6. Про можливу величину прогону підвісних мостів

В даний час існують амбітні проекти великих підвісних мостів через Мессинську протоку і протоку Гібралтар з величиною основного прогону, який істотно перевищує прогон мосту Акасі, що рівний 1991 м і є на сьогодні рекордним для всіх типів мостових споруд.

Для визначення максимально можливої для сучасних підвісних систем величини прогону, що перекривається, нижче показаний варіант розрахунку максимально можливого прогону.

Вважаючи відомими: p – власну вагу, q – вагу тимчасового навантаження, $f = 1/6 \times L$ – стрілу провисання кабелю, $\gamma \times A_K$ – вагу 1 м.п. кабелю (при питомій вазі сталі $\gamma = 78,5 \text{ кН/м}^3$), $R = 100\,0000 \text{ кН/м}^2$ – розрахунковий опір сталі (для кабелю із високоміцного дроту – $R_n = 240\,0000 \text{ кН/м}^2$), маємо:

$$H = \frac{PL^4}{8f} = \frac{(p+q+\gamma+A_K)L^2 \times 6}{8L} = A_K R,$$

звідки

$$L = \frac{1,33 A_K R}{(p+q) + \gamma A_K}.$$

Вважаючи, що вага кабелю від загального навантаження в мостах великих прогонів зазвичай становить близько 25%:

$$(p+q)/4 = \gamma A_K,$$

отримуємо

$$L = \frac{0,27 R}{\gamma} = \frac{0,27 \times 1000000}{7,85} \approx 3440 \text{ м}.$$

Розрахунок вант, пілонів і балок жорсткості вантових мостів

Питання для відповіді:

1. Які особливості вантових мостів у порівнянні з підвісними?
2. Вантові мости є статично визначувані чи статично невизначені?
3. Як обчислюється ступінь статичної невизначеності будь-якої вантової системи?
4. Як виконують розрахунок у разі виникнення у ванті зусиль стиску?
5. Чому дорівнюють зусилля у вантах (крім відтяжки)?
6. Чому дорівнює зусилля у відтяжці вантового моста?
7. Як знайти площу перерізу кабелю з паралельних дротів за умовою міцності?
8. Як знайти кількість канатів, що формують кожну ванту, у разі виготовлення вант із канатів заводського виготовлення або з окремих пасм – стрендів?
9. Чому дорівнює величина поздовжнього зусилля в пілоні?
10. Чому дорівнюють згинальні моменти, що діють у поздовжній та поперечній площині пілона?
11. Як виконується перевірка міцності перерізу пілону та його стійкості?
12. Які основні призначення балок жорсткості вантових мостів?
13. Чому дорівнює максимальний згинальний момент у балці жорсткості при її завантаженні (для конструкцій з малою кількістю вант) за методикою В.К.Качуріна?
14. Чому дорівнює у загальному випадку величина згинального моменту в балці жорсткості вантового моста?
15. Чому дорівнює максимальна поздовжня сила у балці жорсткості вантового моста?
16. Який вигляд має загальна формула перевірки міцності перерізів балки жорсткості вантового моста для металевої конструкції?

Матеріали для відповідей:

Однією з важливих особливостей, що відрізняють розрахунок вантових систем від підвісних чи ланцюгових, є те, що вони характеризуються геометричною незмінністю. До інших особливостей вантових мостів зазвичай відносять:

- можливість виникнення у гнучких вантах стискаючих зусиль та виключення їх при цьому з роботи (рис. 9.8) – у цьому випадку розрахунок

повторюють, розглядаючи конструкцію без вимкненої з роботи ванти;

- більшу жорсткість порівняно з підвісними (через це розрахунок їх робляють без урахування геометричної нелінійності);
- вантові конструкції є багаторазово статично невизначеними системами, розрахунок яких проводиться методами будівельної механіки (метод сил, метод переміщень або змішаний метод).

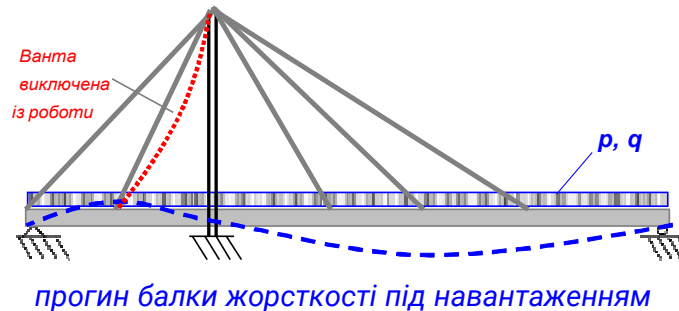


Рис. 9.8. Работа вантового моста при завантаженні

Потрібно зазначити, що геометрично незмінна система, у якій деякі (чи всі) елементи можуть сприймати зусилля лише одного знака, не може бути статично визначеною.

Ступінь статичної невизначеності будь-якої вантової системи можна знайти за формулою:

$$i = D + 2 \times n - u - 3.$$

Тут:

D – кількість вант (на рис. 9.8 кількість вант – 5);

n – кількість опор балки жорсткості (на рис. 9.8 кількість опор – 3);

u – число рухливих спирень, включаючи рухомі спирання вант на пілонах (на рис. 9.8 – шарнірів 2).

Тоді для моста, показанного на рис. 9.8, маємо: $i = 5 + 2 \times 3 - 2 - 3 = 6$.

Принципова схема вантового моста, прийнятого до ескізного розрахунку, представлена на рис. 9.9:

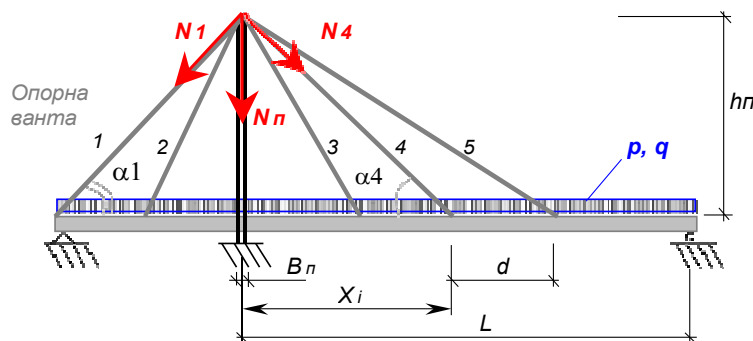


Рис. 9.9. Схема для розрахунку елементів вантового моста

Вважатимемо, що при розрахунку моста відомі:

p, q – інтенсивність, відповідно, постійного та тимчасового навантаження;

L – величина основного прогону;

d – відстань між точками прикріплення вант на балці жорсткості (панель);

B_{II} – ширина пілону;

h_{II} – висота пілону;

α_1, α_4 – кути нахилу вант до горизонту;

x_i – відстань від пілону до точки прикріплення вант на балці жорсткості.

Розрахунок вант вантових мостів та визначення у них зусиль може бути ескізно зроблено за методикою, запропонованою проф. В.К. Качуріним (слід зазначити, що дана методика, в першу чергу, відноситься до розрахунку конструкцій з малим числом вант).

У всіх вантах, крім відтяжки, поздовжня сила дорівнюватиме:

$$N_{\text{від}} = \frac{1,5(p+q)L(1-1,06\lambda_i)}{n \sin \alpha_i}$$

В загальному випадку маємо:

$$N_{\text{від}} = \frac{(p+q)d_i}{\sin \alpha_i}.$$

Тут $\lambda_i = X_i / L$ – відстань від пілона (до якого прикріплена ванта) до точки прикріплення її на балці жорсткості, що виражена в частках від основного прогону (див. рис. 9.9), n – кількість вант в основному прогоні.

У відтяжці (на рис. 9.9 відтяжка (опорна ванта) – це ванта з номером 1, зусилля в ній N_1 , кут її нахилу до горизонту – α_1) поздовжня сила становить:

$$N_{\text{відм}} = \frac{\sum (N_{\text{від}} \cos \alpha_i)}{\cos \alpha_{\text{відм}}}.$$

У разі виготовлення вант із паралельних дротів, призначення їх характеристик та перерізів, а також поздовжньої та згинальної жорсткості проводиться аналогічно показаним вище для кабелів підвісних мостів. Площа перерізу кабелю з паралельних дротів за умовою міцності може бути отримана з виразу:

$$A_K = k \frac{N_k}{0,63 R_{un}}.$$

Тут $R_{un} = 1000 \dots 2400 \text{ МПа}$ (частіше – 1600–1900 МПа) – для сучасних канатів заводського виготовлення найменший тимчасовий опір дроту розриву; $k = 0,87 \dots 0,99$ – коефіцієнт агрегатної міцності каната, значення якого

визначається за вимогами ДБН залежно від типу каната.

У разі виготовлення вант із канатів заводського виготовлення або з окремих пасм – стрендів, кількість канатів, що формують кожну ванту, може бути отримана відповідно до значення розривного зусилля ($N_{розр}$) за формулою:

$$n = \frac{N_{від}}{1,6 N_{розр}}.$$

Для вітчизняних канатів середнє значення розривного зусилля стрендів можна прийняти рівним 240–270 Кн.

Розрахунок пілонів вантових мостів робиться на поздовжні зусилля стиску і на згинальні моменти від постійних і тимчасових навантажень. Величина поздовжнього зусилля в пілоні може бути прийнята:

$$N_{\Pi} = \sum N_{від} \times \sin \alpha_i.$$

Величина згинального моменту, а також характеристики поперечних перерізів, згинальної та поздовжньої жорсткості при подальших розрахунках можуть бути визначені як і для підвісних мостів. Згинальні моменти, що діють у поздовжній та поперечній площині (рис. 9.9 та рис. 9.10) становлять:

$$M_{\Pi} = N_{\Pi} e,$$

де

$$e = \frac{N_{відm} l_{відm}}{A_{відm} E_{відm} \cos \varphi_1}.$$

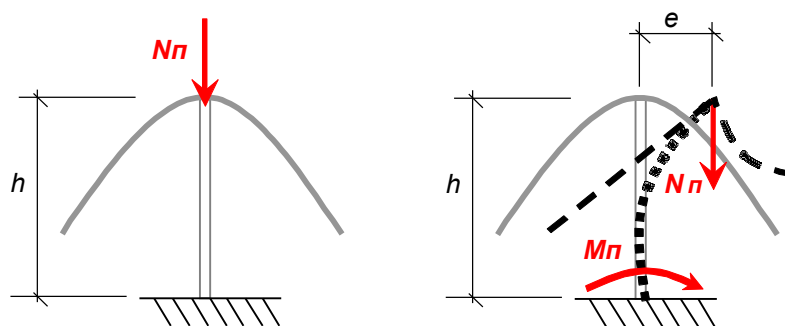


Рис. 9.10. Схеми роботи пілона в поздовжній площині мосту

Модуль нормальної пружності матеріалу кабелю за всіх розрахунків може бути прийнятий рівним $E_K = (1,3...1,85) \times 10^5 \text{ МПа}$ – для кабелів з кручених канатів заводського виготовлення та $E_K = 2,0 \times 10^5 \text{ МПа}$ – для кабелів із паралельних дротів.

При отриманих даних перевірка міцності перерізу пілону та стійкості виконується за відомими залежностями:

$$\sigma = \frac{N_{\Pi}}{A_{\Pi}} \pm \frac{M_{\Pi}}{W_{\Pi}} \leq m R_y; \quad \sigma_y = \frac{N_{\Pi}}{\varphi A_{\Pi}} \leq m R_y.$$

З досвіду проектування відомо, що область середніх значень коефіцієнта поздовжньої стійкості φ лежить у діапазоні 0,6–0,7 – для металевих пілонів та 0,8–0,9 – для залізобетонних (при класі бетону – В40–В50).

Про забезпечення стійкості пілонів необхідно особливо подбати під час їхнього спорудження, тобто тоді, коли вони ще не закріплені від зміщень у верхній частині кабелем або вантами.

Розрахунок балок жорсткості вантових мостів проводять з урахуванням того, що основним її призначенням є:

- рівномірний розподіл навантаження між сусідніми вантами;
- забезпечення необхідної довжини панелі проїжджої частини (оскільки довжина панелі проїжджої частини (2–4 м) не залежить від довжини панелі вантової ферми (5–80 м));
- створення у вантах запасу по розтягуванню (додаткових зусиль розтягу) за рахунок опору згину балки жорсткості;
- забезпечення можливості регулювання зусиль у вантах шляхом їхнього додаткового натягу (так зване штучне регулювання зусиль);
- можливість перетворення системи на безрозпірну при прикріпленні всіх вант до балки (при цьому горизонтальні складові зусиль у вантах врівноважуються всередині системи через балку жорсткості, тобто відпадає необхідність у спорудженні дорогих анкерних опор).

Максимальний згинальний момент у балці, при її завантаженні (для конструкцій з малою кількістю вант) може бути визначений за методикою проф. В.К. Качуріна:

$$M_{БЖ} = a \times (p + q) \times L^2,$$

тут a – коефіцієнт, що приймається рівним 0,007 при двох і 0,006 при трьох-чотирьох вантах, що підтримують балку в основному прогоні кожного пілона.

У загальному випадку величина згинального моменту в балці:

$$M_{БЖ} = (p + q) \times d^2 / 8.$$

Максимальна поздовжня сила у балці:

$$N_{БЖ} = \sum (N_{вант,i} \cos \alpha_i).$$

З урахуванням передачі на балку жорсткості горизонтальних складових

зусиль від вант та згину балки під навантаженням, загальна формула перевірки міцності її перерізів для металевої конструкції має вигляд:

$$\sigma = \frac{N_{БЖ}}{A_{БЖ}} \pm \frac{M_{БЖ}}{W_{БЖ}} \leq m R_y.$$

Характеристики площі, а також характеристики згинальної і поздовжньої жорсткості балок можуть бути призначені так само, як і для підвісних мостів.

Практичне заняття 10

Динамічна стійкість та заходи з її підвищення

Питання для відповіді:

1. Які історично етапи виділяють у проектуванні підвісних та вантових мостів по відношенню до питань динамічної та аеродинамічної стійкості?
2. Як модельно досліджують мости на аеродинамічну стійкість?
3. Покажіть основні форми коливань конструкції.
4. Як приблизно можна оцінити період власних вертикальних коливань за основним тоном підвісних мостів?
5. Що таке резонанс?
6. Що називають динамічною стійкістю мостів?
7. Що являється причиною вертикальних коливань?
8. Що являється причиною горизонтальних коливань?
9. Що являється причиною крутильних коливань?
10. В яких межах не повинні знаходитись розрахункові періоди вертикальних та горизонтальних коливань автодорожніх та пішохідних мостів?
11. Як визначається частота власних коливань двопрогонового вантового мосту?
12. Які конструктивні заходи та (або) демпфуючі пристрої застосовують для зменшення динамічних впливів (гасіння коливань)?
13. Що таке аеродинамічна стійкість мостів?
14. Що є основною причиною аеродинамічної нестійкості підвісних та вантових мостів?
15. Як визначається частота періодичної сили, що діє на споруду поперемінно з одного та іншого боку з частотою зриву вихорів?
16. Коли виникають автоколивання споруди?
17. Що називається критичною швидкістю вітру? Які її наслідки для прогонової будови?
18. Як приблизно визначають критичну швидкість вітру?
19. Як формулюється критерій Р.Аммана для аеродинамічної стійкості підвісних мостів?
20. Як формулюється критерій Д.Штейнмана для аеродинамічної стійкості підвісних мостів?
21. Які існують два шляхи для вирішення проблеми забезпечення

аеродинамічної стійкості мостових споруд?

22.Що можуть включати в себе шляхи забезпечення аеродинамічної стійкості мостових споруд?

Матеріали для відповідей:

У звичайних мостах динамічні та вітрові навантаження відіграють другорядну роль, для підвісних та вантових мостів їх вплив може виявитися дуже великим. Це пов'язано з великою протяжністю, гнучкістю та відносно невеликою власною вагою таких споруд. Крім того, часто підвісні та вантові мости будуються в районах зі складними аеродинамічними та сейсмічними умовами (гірські райони, відкриті морські протоки тощо).

Історично у проектуванні підвісних та вантових мостів виділяють три етапи:

- перший, коли головним вважалось забезпечення статичної міцності споруди, динамічна та аеродинамічна стійкість при цьому забезпечувалася зовсім випадково;

- другий – що почався з краху Такомського мосту у 1940 р. – характеризується підвищенням уваги проектувальників до питань динамічної та аеродинамічної стійкості мостів;

- третій – останні 30–45 років, коли динаміка та аеродинаміка інженерних споруд сформувалися у самостійний науковий напрямок.

Експерименти і методи динамічного і аеродинамічного розрахунку, що використовуються в даний час, досить складні, що пояснюється складністю процесів, що відбуваються в прогонових будовах, і великою різноманітністю їх конструктивних форм. Тому при будівництві великих мостів (і мостів, що не мають аналогів) проводять дослідження проектованої конструкції на моделях (рис. 10.1), що піддаються дії змінних вертикальних та горизонтальних навантажень та обдування в аеродинамічній трубі (рис. 10.2).

Як моделі зазвичай використовують модель секції балки жорсткості або масштабну модель всієї споруди. Слід зазначити, що для правильного перенесення результатів дослідів від моделі до натури, необхідна рівність критеріїв подібності – переріз моделі має бути геометрично подібним до реальної конструкції. Таку модель встановлюють на пружних опорах в аеродинамічній трубі, досліджуючи при різних швидкостях руху повітря та різних кутах атаки. Основним завданням при цьому є визначення критичної швидкості вітру. Швидкість потоку повітря для моделі приймають такою, щоб з урахуванням масштабу вона відповідала максимальній швидкості вітру у районі будівництва. Основною характеристикою аеродинамічної труби є швидкість потоку повітря, що досягає у трубах 120 м/сек і більше.

У процесі динамічних та аеродинамічних випробувань та експериментів

швидкість потоку повітря збільшується до виникнення катастрофічних коливань (рис. 10.2). Основна мета таких експериментів і розрахунків полягає в тому, щоб знайти геометричні та жорсткісні характеристики споруди, при яких виключалася б можливість розвитку небезпечних її коливань при експлуатації.

В останні роки випробування моделей великих мостів проводилося в Китаї, Японії, Данії, Франції, Центральному аерогідродинамічному інституті імені професора Н.Є.Жуковського (ЦАГІ) та інших.



Рис. 10.1. Масштабна модель вантового мосту через Об біля Сургута (масштаб моделі 1/25)



Рис. 10.2. Продування в аеродинамічній трубі моделі мосту Акаші в Японії

Динамічна стійкість та заходи її підвищення

Аналізуючи коливання споруд, слід зазначити:

1. Кожне тіло (конструкція) може коливатися за багатьма формами коливань, які характеризуються числом напівхвиль « i » (форми коливань з $i \leq 3$ називають основними (рис. 10.3)).

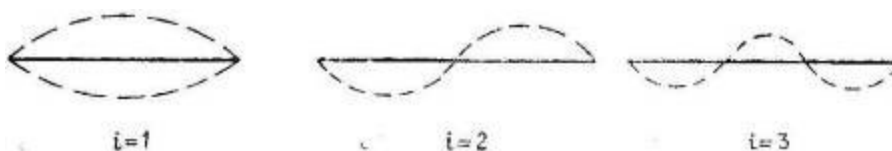


Рис. 10.3. Основні форми коливань

2. Кожне тіло має число ступенів свободи « n », для реальних мостів $n \rightarrow \infty$.

3. Кожне тіло має вільні коливання, тобто коливання, що виникають під час виведення тіла з рівноваги чи спокою. Частота вільних коливань ω називається власною частотою (ω – це число коливань за одиницю часу (1/с)). Час одного повного коливання називається періодом T , $T = 2\pi / \omega$ (с). Відомо, що період власних вертикальних коливань за основним тоном можна приблизно оцінити величиною $T = L / (75 \dots 150)$, або в середньому $T = L / 100$, де L – прогон споруди в метрах.

4. За рахунок внутрішнього та зовнішнього опору (тертя) всі коливання в природі – згасаючі. Згасання має кількісну характеристику – логарифмічний декремент коливань δ , у середньому рівний (при задовільному стані конструкції):

- $\delta = 0,3$ – для залізобетонних мостів;
- $\delta = 0,02 \dots 0,12$ – для сталезалізобетонних мостів;

- $\delta=0,1$ – для металевих мостів,
- $\delta=0,015 \dots 0,07$ – для підвісних та вантових мостів.

Вимушені коливання виникають під впливом різних сил, мають свою частоту θ . При збігу частоти збурення θ та власної частоти ω виникає резонанс. Резонанс – це різке збільшення амплітуди коливань, отже, зростання деформацій і напруг.

Характер і величина динамічного ефекту, що викликається в конструкції моста тимчасовим навантаженням, в основному, залежить від динамічних характеристик самого моста і від особливостей тимчасового навантаження, що викликає вимушені коливання моста.

Динамічна стійкість – здатність підвісних та вантових мостів протистояти вертикальним, горизонтальним і крутильним коливанням, викликаним впливом різних факторів.

Причинами вертикальних коливань (рис. 10.4) є:

- нерівності проїжджої частини, що призводять до поштовхів та ударів під час руху транспорту;
- коливання окремих невідновжених частин навантаження (коливання кузовів автомобілів на ресорах тощо);
- періодичні дії тимчасових навантажень;
- ритмічна дія пішоходів та інше.

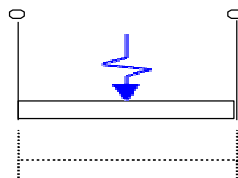


Рис. 10.4 Схема впливів, що викликають вертикальні коливання прогонових будов

Причиною горизонтальних коливань (рис. 10.5) є:

- вплив вітру (так як вітер створює статичний тиск (навантаження)), а також пульсація вітру (якщо пориви чергуються з певними інтервалами) викликають збурювальні сили; по відношенню до споруди вони є вимушеними і призводять до коливань.

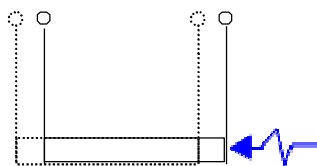


Рис. 10.5. Схема впливів, що викликають горизонтальні коливання прогонових будов

Причиною крутильних коливань (рис. 10.6) є:

– асиметричне прикладання вертикальних та горизонтальних навантажень на прогонову будову.

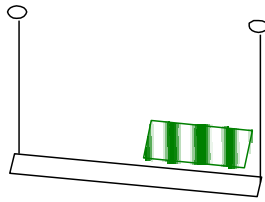


Рис. 10.6. Схема впливів, що викликають крутильні коливання прогонових будов

Відповідно до вимог нормативних документів, врахування динамічного впливу рухомого навантаження проводиться за допомогою введення динамічного коефіцієнта $1 + \mu$, величина якого, для елементів головних ферм (балок) та пілонів підвісних і вантових мостів приймається рівною:

$$1 + \mu = 1 + \frac{50}{70 + \lambda}.$$

Відповідно до ДБН динамічні коефіцієнти до візків автомобільного навантаження АК при розрахунку елементів проїжджої частини, а також при розрахунку елементів сталевих та сталезалізобетонних мостів прийнято – 1,4; при розрахунку елементів залізобетонних та дерев'яних мостів – 1,0. До рівномірно розподіленого навантаження АК та навантаження НК динамічні коефіцієнти прийняті – 1,0.

Для підвісних та вантових мостів технічні умови проектування передбачають оцінку за частотами власних коливань з метою виключення резонансних явищ, запроваджуючи обмеження, що виключають роботу споруди у резонансній зоні.

Так, розрахунковий період вільних вертикальних коливань автодорожніх та пішохідних мостів не повинен перебувати в інтервалі, встановленому на основі дослідних даних та рівному 0,3–0,7 сек. – $T_{\text{верт},i} \neq 0,45 \dots 0,6$ с, $T_{\text{гориз},i} \neq 0,9 \dots 1,2$ с, для залізничних мостів – $T_{\text{гориз},i} \leq 0,01 \times L$ та $T_{\text{гориз},i} \leq 1,5$ с (тут T – період горизонтальних та вертикальних коливань i -тої форми, L – довжина прогону моста в метрах).

На практиці період коливань кузовів автомобілів у навантаженому стані дорівнює 0,3–0,4 с, період вільних коливань безпружинної частини – 0,1–0,15 с, період впливу звичайного кроку людей, що йдуть зі швидкістю 85–120 кроків за хвилину – 0,5–0,7 с.

Власна частота коливань балки на двох опорах становить:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{i^4 \pi EI}{L^4 m}}.$$

Тут $i \leq 3$ – номер форми коливань; EI – згинна жорсткість балки; L – величина прогону; m – маса прогонової будови, т/м.

Частота коливань двопрогонового вантового мосту:

$$\omega_{\text{верт},i} = \sqrt{\frac{EI}{L^4 m \lambda_i}}.$$

Тут при $i=1$ – $\lambda_i = \lambda_1 = 3,527$; при $i=2$ – $\lambda_i = \lambda_2 = 0,342$; при $i=3$ – $\lambda_i = \lambda_3 = 0,15$ (λ_i – деякі характеристичні числа).

Окрім того, для підвісних мостів необхідне виконання перевірки на виникнення так званого «параметричного резонансу». Це явище пов'язане з нелінійністю деформацій – тобто з переходом вертикальних коливань в горизонтальні та навпаки. Параметричний резонанс настає при $T_{\text{гориз},i} = T_{\text{вертик},i}$.

Для зменшення динамічних впливів (гасіння коливань) використовують спеціальні конструктивні заходи та (або) демпфуючі пристрої.

1. Конструктивні заходи:

- застосування багатовантових систем (у них кожна ванта має своє значення частоти коливань, і коливання вант прогонової будови гасять один одного);
- використання залізобетону для балки жорсткості або пілону (при цьому підвищується параметр згасання коливань);
- застосування жорстких пілонів (зокрема залізобетонних, А – подібних).

2. Демпфуючі пристрої (демпфери – віброгасники, ефективні при захисті мостів від динамічних та сейсмічних впливів).

На рис. 10.7, рис. 10.8, рис. 10.9 показані принципові схеми та конструкції демпферів для вант і балок жорсткості у вигляді противаг, згинальних пластин, амортизаторів (т.зв. шок-трансмітерів) та ін.

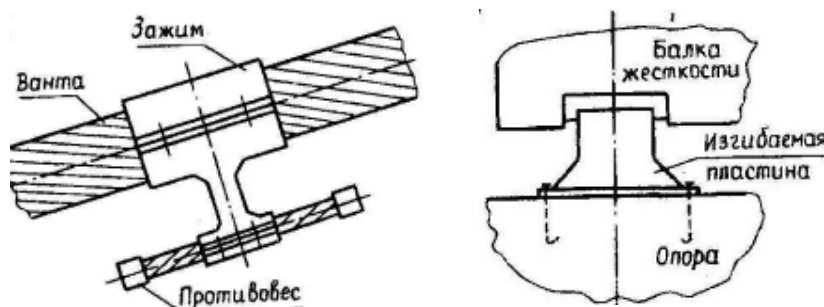


Рис. 10.7. Демпфуючі пристрої у вигляді противаги на кабелях та вантах та у вигляді згинальної пластини на балках жорсткості



Рис. 10.8. Резонансні гасителі коливань на мосту через Рейн у Німеччині



Рис. 10.9. Демпфер (амортизатор) вантової бухти через бухту Золотий Ріг

Ще одним видом гасителів вібрації вант служать фрикційні демпфери (рис. 10.10). Такі демпфери встановлюють на вантах за кілька метрів від анкерів у рівні плити проїжджої частини та закріплюють до металоконструкцій балки. Деталі демпфера щільно охоплюють канат, виключаючи його коливання на ділянці довжини від демпфера до анкера.



Рис. 10.10. Фрикційний демпфер вант моста через Босфор Східний та демпфуючі пристрої у вигляді гвинтоподібного зовнішнього ребра на оболонці вант

Фрикційний демпфер складається із двох основних частин, одна з яких рухлива, кріпиться на канаті болтовим хомутом і дозволяє переміщати її вздовж ванти, регулюючи процес демпфування. Конструкція фрикційного демпфера допускає малі, не критичні амплітуди, що зменшує його зношування і таким чином скорочує експлуатаційні витрати, а при заданій амплітуді коливань демпфер починає функціонувати.

Таким чином, в основі методів та засобів гасіння коливань основних конструкцій підвісних та вантових мостів лежить зниження амплітуди коливань шляхом зміни їх частоти – підвищенням жорсткості, зміною розрахункової схеми, приєднанням додаткової маси за допомогою пружного зв'язку та інше.

Аеродинамічна стійкість та заходи її підвищення

Аеродинаміка охоплює аеромеханіку та аеропружність. Аеромеханіка вивчає аеродинамічні сили, які діють на конструкції при обтіканні їх вітром. Аеропружність вивчає процеси, що виникають при взаємодії конструкції з потоком повітря (поведінка конструкції в потоці), тобто реакцію споруди на дію вітру.

Аеродинамічна стійкість – здатність підвісних та вантових мостів протистояти впливам вітру.

Аеродинамічна стійкість порушується при дії на міст рівномірного поперечного вітру та розвитку коливань його елементів із надзвичайно великими амплітудами.

Вітрове навантаження (тиск вітру або швидкісний напір) прийнято визначати з рівняння кінетичної енергії вітрового потоку:

$$q = 0,5 \times \rho \times V^2,$$

де $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря нормальної атмосфери (маса сухого повітря в одиниці об'єму при температурі $+15^\circ \text{C}$, атмосферному тиску 160 мм рт.ст., на рівні моря);

V – швидкість потоку повітря, максимальна швидкість за великий проміжок часу 50–100 років (тут слід зазначити, що розрахунок вітрового навантаження по абсолютному максимуму не економічний).

При реальних швидкостях вітру значні коливання притаманні лише конструкціям, що мають відносно малу жорсткість (низькі частоти власних коливань), до яких відносяться підвісні та вантові мости, тому для них вітрове навантаження є одним з основних тимчасових навантажень.

Основними причинами аеродинамічної нестійкості підвісних та вантових мостів є згинально-крутильні коливання, до яких призводять:

- **утворення вихорів та вихрових доріжок** за елементом, що обтікається

повітрям. На ім'я французького вченого Т. Кармана це явище називається «Доріжка Кармана». Вимушені коливання можуть виникнути навіть за рівномірного обтікання прогонової будови потоком повітря;

- **виникнення автоматичних коливань (автоколивання) підвісних систем.**

Утворення вихорів та вихрових доріжок у вітровому потоці за перешкодою, що обтікається повітрям, проілюстровано на рис. 10.11.

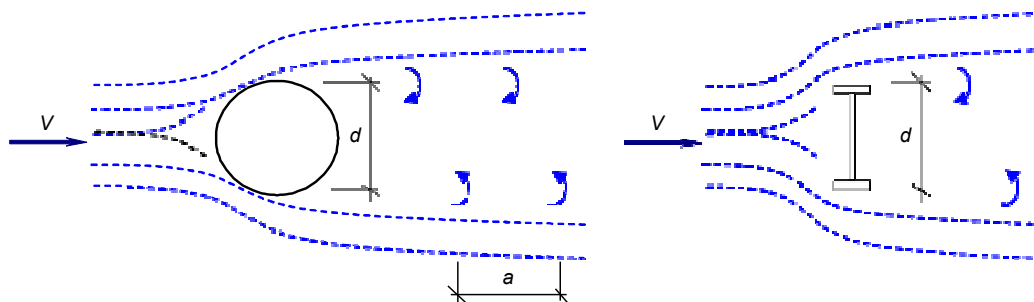


Рис. 10.11. Схеми утворення вихорів та вихрових доріжок

Це явище пов'язане з тим, що внаслідок зміни швидкості вітру в зоні вихорів змінюється тиск повітря. Виникає періодична сила, що діє на споруду поперемінно з одного та іншого боку. Частота цієї сили відповідає частоті вихорів, що зриваються з конструкції – частоті зриву вихорів:

$$v = \frac{S_h \times V}{d}.$$

Тут d – поперечний розмір тіла у потоці повітря; S_h – величина, що характеризує форму профілю перешкоди – «число Струхалю».

У загальному випадку $S_h = 0,08 \dots 0,22$ (зокрема для циліндра $S_h = 0,2$). Для прогонових будов мостів це число визначається лише експериментальним шляхом в аеродинамічній трубі. Так для прогонових будов, що мають гострі кромки, вважається, що $S_h = 0,15 \dots 0,18$ (рис. 10.12).

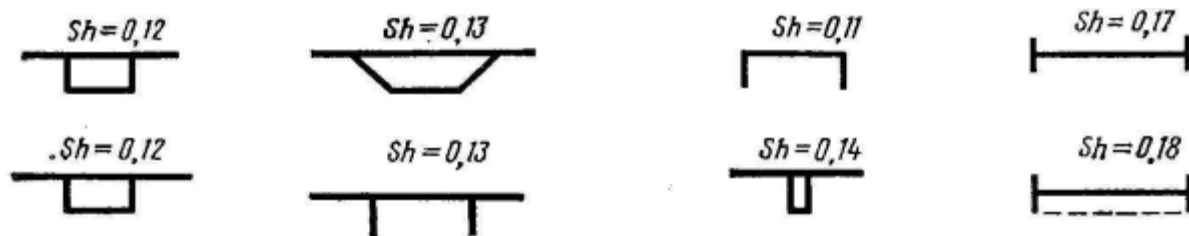


Рис. 10.12. Форми поперечних перерізів балок жорсткості та відповідні їм числа Струхалю S_h

При довільній зміні швидкості вітру частота зриву вихорів може збігтися з частотою власних коливань споруди, і тоді в ній виникає резонанс.

Утворення автоколивань підвісних та вантових мостів у вітровому потоці проілюстровано на рис. 10.13.

Якщо підвісна система під дією будь-яких факторів зазнала коливань, то проїжджа частина мосту перетинатиме струмені повітря, що дме зі швидкістю V . При цьому з'являється і безперервно змінюється кут атаки (α) повітряного потоку, що набігає на проїжджу частину (висхідному потоку відповідає $+\alpha$, низхідному $-\alpha$, через що на споруду починає діяти підйомна сила, що створює крутний момент:

$$M = F \times B / 4.$$

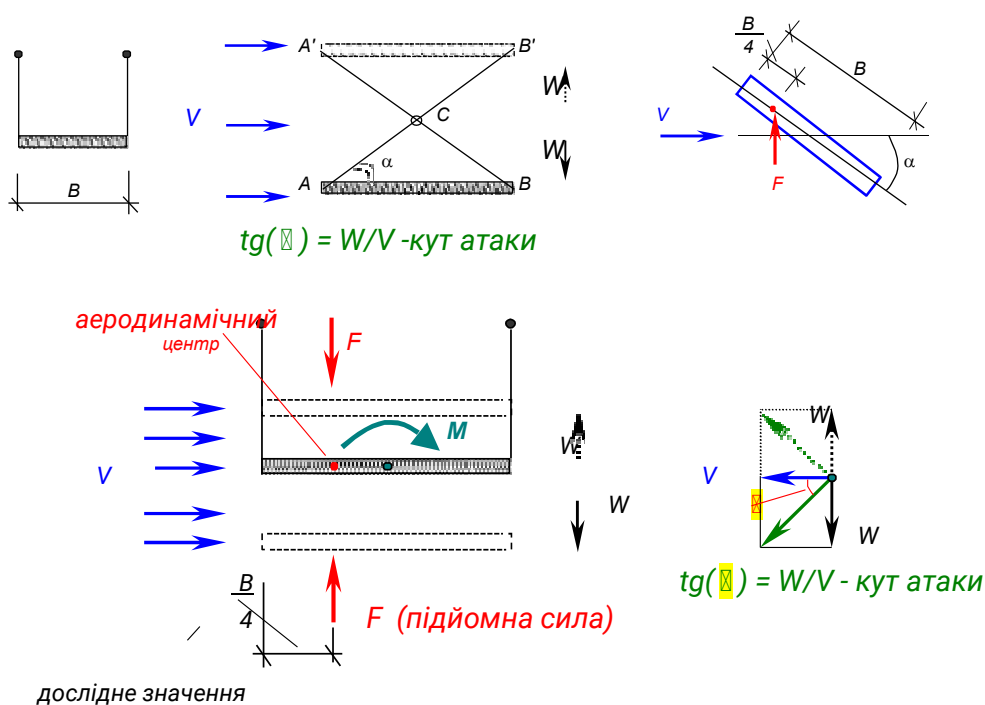


Рис. 10.13. Схеми виникнення автоколивань

Складова тиску повітря за напрямом швидкості вітру – за аналогією з авіацією – називається лобовим опором, а складова тиску, перпендикулярна швидкості потоку – це підйомна сила. Величина підйомної сили:

$$F = 0,5 \times C_F \times A \times \rho \times V^2.$$

Тут C_F – безрозмірний коефіцієнт підйомної сили, що залежить від форми поперечного перерізу балки жорсткості та кута атаки (для циліндра $C_F \approx 1$, чим гірша обтічність конструкції, тим вища величина C_F). $C_F = k \times \alpha$, де k – коефіцієнт пропорційності, який називають похилою кривою підйомної сили, причому дослідне значення k близьке до 5; A – площа фасадної поверхні прогонової будови.

Якщо частота дії підйомної сили збігається з частотою власних коливань споруди, виникають автоматичні коливання конструкції – автоколивання.

В історії мостобудування відомо досить багато випадків руйнування підвісних мостів через аеродинамічну нестійкість та коливання.

Найбільш відома катастрофа Такомського мосту у 1940 році (рис. 10.14), збудованого у 1936 р. через протоку Пюджет Саунд і який мав на той період третій за величиною центральний прогон у світі.

Адреса відео коливання і руйнування Такомського моста:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/transcoded/f/f2/Tacoma_Narrows_Bridge_destruction.ogv/Tacoma_Narrows_Bridge_destruction.ogv.480p.vp9.webm

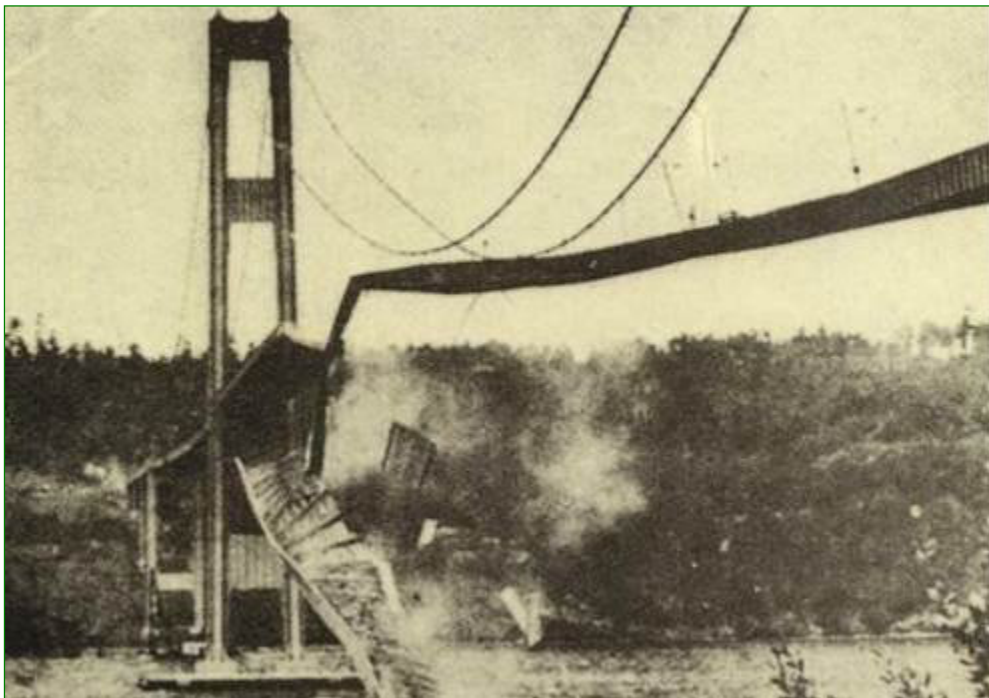


Рис. 10.14. Момент аварії Такомського мосту

Критична швидкість вітру – це швидкість, що викликає небезпечні коливання конструкцій моста, тобто при якій на даній прогоновій будові виникає одне з аеропружних явищ: флаттер, бафтинг, галопування, дивергенція або вітровий резонанс.

Флаттер (згинально-крутильний або класичний) – пов'язані згинально-крутильні самозбуджувальні коливання, що швидко нарастають в часі. Причина їх у неспівпаданні точки прикладання аеродинамічних сил з центром згину поперечного перерізу балки жорсткості моста. Зривний флаттер виникає за рахунок зриву повітряних вихорів. Надійною основою для дослідження небезпеки виникнення флаттера досі є лише експерименти, суто аналітичних методів не існує.

Бафтинг спостерігається у елементів конструкції, що знаходяться в

турбулентному потоці або сліднують за іншими елементами через інтерференцію аеродинамічних сил.

Вітровий резонанс – наростання амплітуд автоколивань упоперек потоку повітря, яке спостерігається при збігу частоти зриву вихорів Кармана з однією з власних частот коливань.

Галопування (розгойдування), до якого схильні гнучкі, погано обтічні елементи з аеродинамічно нестійкими поперечними перерізами (квадратними або прямокутними). Подібні явища найчастіше виникають у канатів у разі покриття льодом. Галопування небезпечніше резонансу, оскільки воно наростає зі збільшенням швидкості потоку навіть вище критичної швидкості вітру, а резонанс виникає лише за критичної швидкості вітру.

Параметричний резонанс полягає у перекачуванні енергії вертикальних коливань у горизонтальні та навпаки.

Дивергенція – втрата стійкості від крутильних коливань.

У цілому нині методика перевірки аеродинамічної стійкості мостів зводиться переважно до визначення критичної швидкості вітру $V_{кр}$ кожної конкретної прогонової будови.

Визначення критичної швидкості для споруди здійснюється залежно від:

- форми та розмірів конструкції;
- маси конструкції;
- динамічних характеристик балки жорсткості;
- кліматичних умов регіону (оцінюються лише експериментальним шляхом або приблизно) та ін.

Це зводиться до вигляду:

$$V_{кр} \gg V_p.$$

Тут V_p – це розрахункова (тобто максимально можлива) швидкість вітру для даного району будівництва. Вважається, що у найбільшу бурю швидкість вітру не перевищує 45 м/сек. Швидкість тайфунного вітру досягає 75 м/сек.

У наближених обчисленнях:

$$V_{кр} = V_{кр,м} \frac{\omega_k}{2\pi} B.$$

Тут $V_{кр,м}$ – приведена критична швидкість, отримана при випробуванні моделі; ω_k – частота вільних крутильних коливань; B – ширина моста в метрах.

Критичні швидкості вітру, що відповідають появі вітрового резонансу, знаходяться в «небезпечному» діапазоні особливо для підвісних та вантових

мостів із прогонами від 100 до 250 м. Це пов'язано із закономірністю:

$$V_{кр} = \frac{d}{S_h T_{верт}}.$$

При визначенні аеродинамічної стійкості підвісних мостів загалом можливе використання різних наближених критеріїв. Для прикладу два з них показані нижче.

Критерій Р. Аммана:

$$1,6 \frac{m}{f} + 160 \frac{I}{(0,01L)^4} \geq 0,6.$$

Тут m – інтенсивність постійного навантаження на одну площину підвісної системи; f – стріла провисання кабеля; I – момент інерції балки жорсткості; L – прогон підвісної системи

Критерій Д. Штейнмана:

$$h_{\delta} \geq 0,001L(8,33 + 0,0033L);$$

$$EI \geq \frac{0,737 B L^4}{10^4 \sqrt{f}};$$

$$\omega_{верт,i}^2 \frac{m^2}{g B^2} \geq 0,024,$$

де h_{δ} – висота балки (ферми) жорсткості;

E – модуль пружності матеріалу балки жорсткості;

B – ширина підвісної системи.

Представлені вище формули дозволяють попередньо призначити розміри балки (ферми) жорсткості. У разі невиконання умов стійкості параметри споруди слід скоригувати.

В даний час проблему забезпечення аеродинамічної стійкості мостових споруд прийнято вирішувати двома шляхами:

- *американським* – пов'язаний з підвищенням згинальної та крутильної жорсткості елементів споруди;
- *європейським* – пов'язаний з пошуком конструктивних форм, що відрізняються хорошими аеродинамічними властивостями з погляду обтікання їх вітровим потоком..

Заходи щодо підвищення аеродинамічної стійкості підвісних та вантових мостів, спрямовані, перш за все, на зменшення різних видів коливань:

вертикальних, горизонтальних, крутильних та згинально-крутильних.

Так проти вертикальних коливань може бути спрямовано:

- підвищення згинальної жорсткості прогонової будови;
- збільшення постійного навантаження.

Проти горизонтальних коливань може бути спрямовано:

- збільшення ширини моста;
- встановлення вітрових горизонтальних попередньо напружених відтяжок.

Проти крутильних коливань може бути спрямовано:

- застосування як балок жорстких просторових конструкцій, в першу чергу коробчатих.

Проти згинно-крутильних коливань може бути спрямовано:

- застосування ферм жорсткості (подрібнення повітряного потоку) (рис. 10.15);

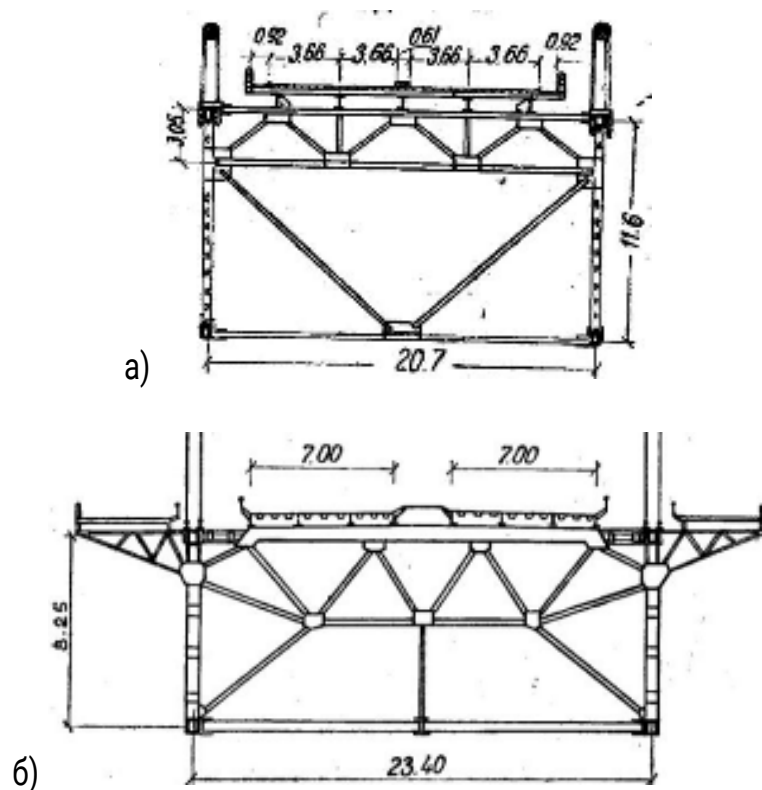


Рис. 10.15. Схеми перерізу ґратчастих балок (ферм) жорсткості підвісних мостів
а – міст через протоки Макінак, б – Фортський міст

- застосування балок жорсткості поліпшеної обтічності (рис. 10.16 та рис. 10.17), балок з керованими аеродинамічними параметрами (т.зв. «активний захист»), а також влаштування для балок прогонових будов регульованих і не регульованих обтічників, «заспокійливих листів» з легких металів та ін. (рис. 10.18);

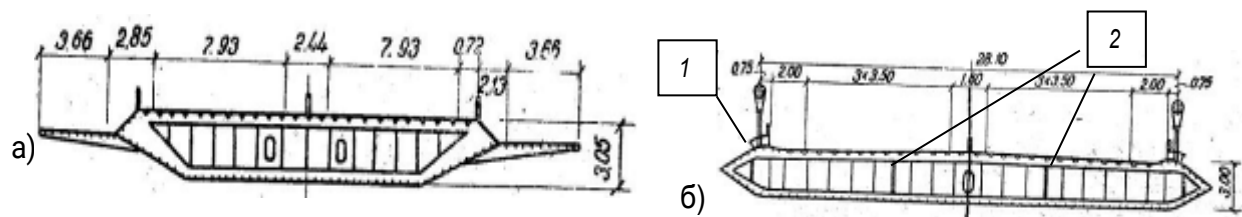


Рис. 10.16. Схеми перерізу балок жорсткості підвісних мостів
а – міст через Северн, б – міст через протоку Малий Бельт
1 – регульовані закріпки, 2 – поздовжні ґратчасті ферми

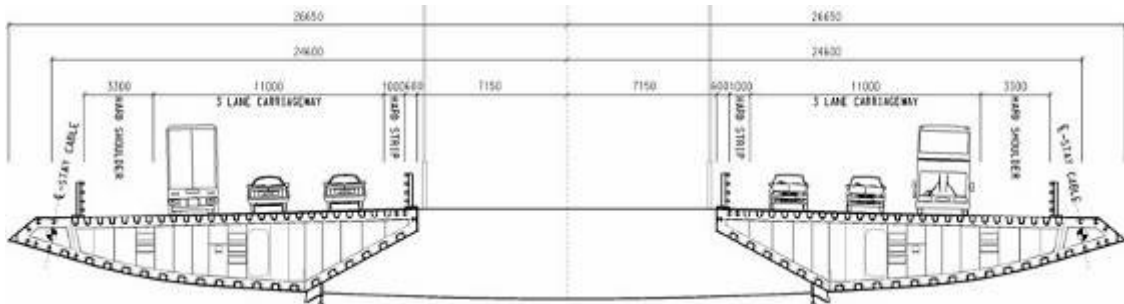


Рис. 10.17. Обтічна форма перерізу балки жорсткості вантового мосту Камнерезів у Китаї

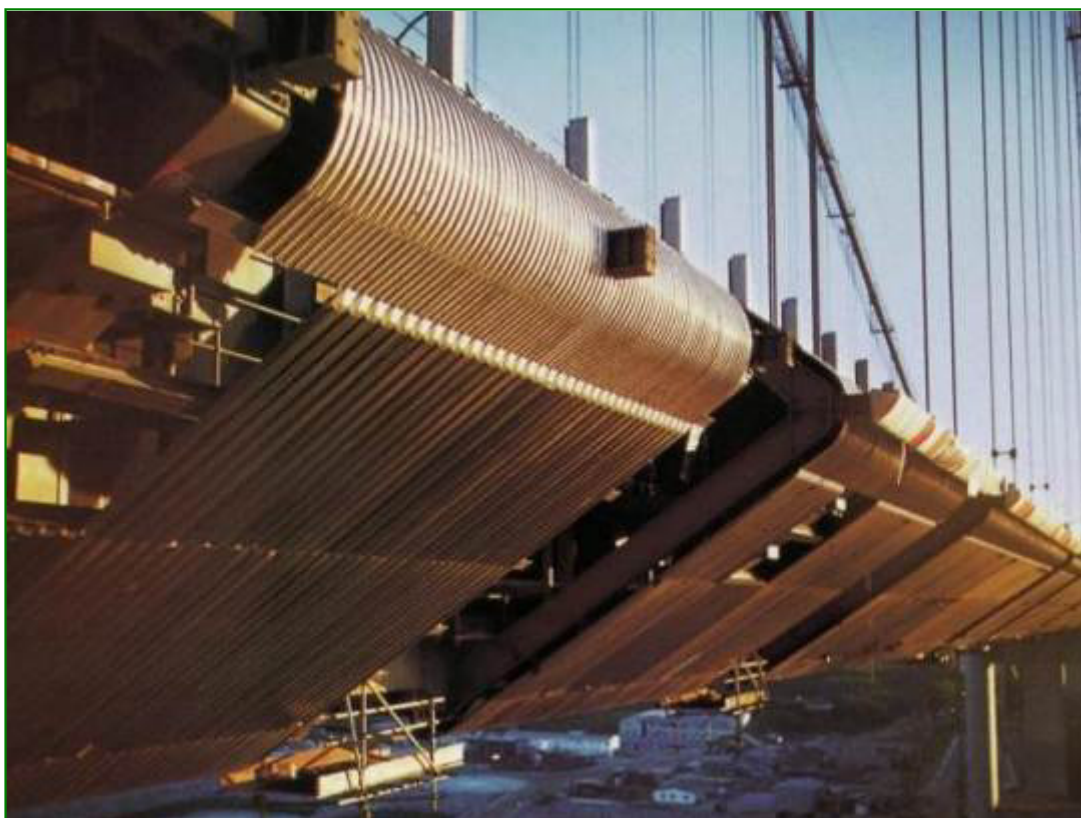


Рис. 10.18. Фрагменти обтічників балок жорсткості підвісного мосту Цинма

- застосування наскрізної проїжджої частини із систем вертикальних ребер замість плити;
- «аеродинамічно – прозорого» настилу (т.зв. настилу з прорізами, настилу з

перфорацією, просічено-витяжного настилу та ін.), а також бордюрів та поздовжніх балок з прорізами для пропуску вітрового потоку (рис. 10.19). У таких конструкціях перебіг повітряного потоку виявляється безладним, внаслідок чого можливість згинальних вертикальних коливань стає малоймовірною;

- будову в елементах конструкції спеціальних каналів-шлюзів для наскрізного пропуску вітрового потоку;
- використання характерних рис рельєфу місцевості, що зумовлюють природну турбуляцію вітрового потоку в нижньому, приземному шарі атмосфери;
- застосування залізобетонних балок жорсткості; внаслідок великої маси, а також через швидке (у 2–3 рази швидше) згасання коливань, залізобетонні вантові мости щодо аеродинамічної стійкості не створюють проблем.

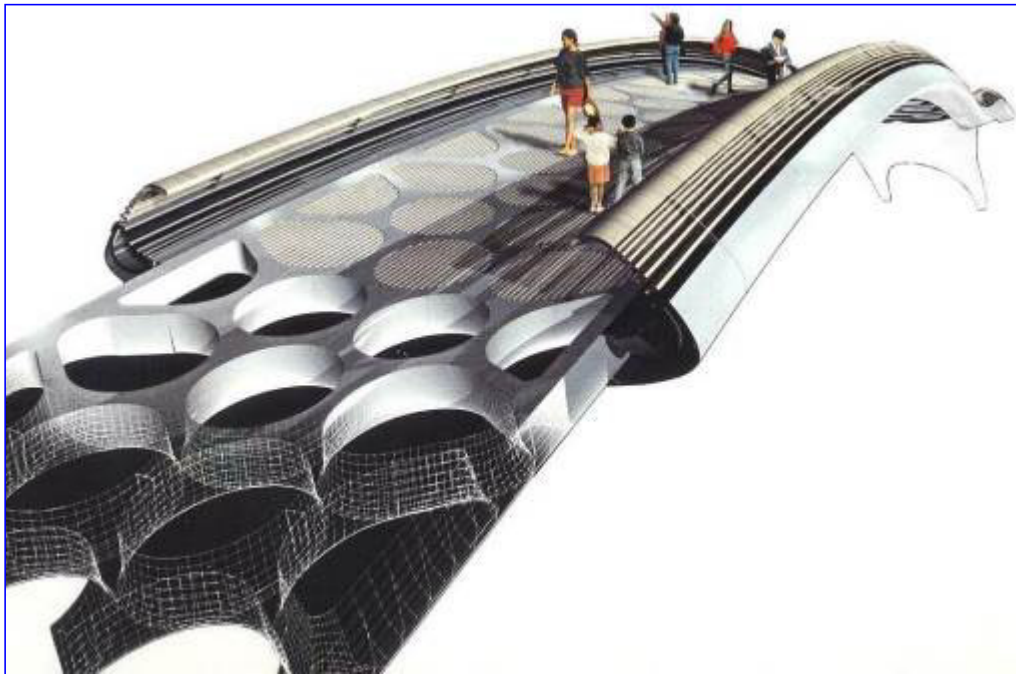


Рис. 10.19. Наскрізна конструкція проїжджої частини балки жорсткості

На закінчення слід зазначити, що останні дані аеродинамічних випробувань моделей великих мостів показують, що багатовантові системи з двома площинами радіально розташованих вант і підвісні мости з похилим розташуванням підвісок та коробчатими балками малої висоти ($L/300$), що мають обтічний профіль перерізу, практично не піддаються небезпечним аеропружним коливанням.

Найдовші та найвідоміші підвісні мости світу

Вважається, що першим підвісним мостом із тросу та дроту був Паучий міст, споруджений в Америці біля водоспаду Скулкілл ще у 1816 році. За сучасними мірками, це досить скромний пішохідний міст, прогон якого становив 124 метри, а ширина лише 45 сантиметрів.

Наведемо далі перелік і конструктивні дані та особливості найдовших та найвідоміших підвісних мостів світу:

1. Великий міст протоки Акасі (Японія).
2. Жуньянський підвісний міст (Китай).
3. Міст Сіхоумень (Китай).
4. Міст Гамбер (Велика Британія).
5. Міст Цзян'їнь (Китай).
6. Міст Цзін Ма (Гонконг).
7. Міст Веррацано-Нерроуз (США).
8. Міст «Золоті ворота» (США).
9. Міст Гегакустенбрун (Швеція).
10. Міст Янло (Китай).
11. Міст Макінак (США).
12. Міст Хуанпу в комбінованому мостовому переході (Китай).
13. Підвісний міст Сето в мостовому комплексному переході (Японія).
14. Міст Султана Мехмеда Фатіха, або Другий Босфорський міст (Туреччина).
15. Перший Босфорський міст (Туреччина).
16. Міст Балінхе (Китай).
17. Міст Джорджа Вашингтона (США).
18. Міст Курусіма-Кайкьо (Японія).
19. Міст 25 квітня (Португалія).
20. Міст Форт-Роуд (Шотландія).
21. Мостовий перехід Сето – підвісні мости Симоцуї-Сето, Мінамібісан-Сето та Кітабісан-Сето (Японія).
22. Міст Лунцзян (Китай).
23. Підвісний міст Шарля Куонена (Швейцарія).
24. Міст Titan RT (Німеччина).
25. Міст Дімухе (Китай).
26. Міст Осман Газі або міст через Ізмітську затоку (Туреччина).
27. Такомський міст, або міст Такома-Нерроуз (США) та Східний міст (США).
28. Скляний пішохідний міст Чжанцзяцзе (Китай).
29. Скляний міст Хун'ягу або Скляний міст Шицзячжуан (Китай).

1. Великий міст протоки Акасі (яп. 明石海峡大橋, акасі кайкьйо оохасі) – підвісний міст у Японії, що перетинає протоку Акасі (明石海峡, акасі кайкьйо) і з'єднує місто Кобе на острові Хонсю з островом Авадзі. Конструктор – Satoshi Kashima. Міст є частиною магістралі «Хонсю-Сікоку». Центральний прогон мосту – найдовший у світі і має довжину 1991 метр, а два бічних прогона – по 960 метрів. Повна довжина мосту складає 3911 м. Висота мосту над водою – 65,72 м. Висота пілонів – 297 м, що вище за 90-поверховий будинок.

До будівництва моста через протоку Акасі діяла поромна переправа. В цьому регіоні часто бувають сильні шторми. У 1955 році під час шторму потонули два пороми, жертвами цієї трагедії стали 168 дітей. Заворушення мешканців і загальне невдоволення змусили японський уряд скласти плани будівництва підвісного моста. Спочатку планувалося побудувати залізнично-автомобільний міст, але в квітні 1986 року, коли почалося будівництво моста, було вирішено **обмежитися** тільки автомобільним мостом з 6 смугами руху. Фактично створення моста почалося в 1988 році, а відкриття відбулося 5 квітня 1998 року. Протока Акасі – міжнародний водний шлях, ширина фарватеру мала бути не меншою 1500 м.

Планувалося, що довжина головного прогону складе 1990 метрів, але вона збільшилася на один метр після землетрусу в Кобе 17 січня 1995 року. У конструкції мосту є система двох шарнірних балок жорсткості, що дозволяє витримувати швидкості вітру до 80 метрів на секунду, сейсмічну активність до 8,5 балів за шкалою Ріхтера і протистояти морським течіям.

Вартість спорудження мосту склала 500 мільярдів єн.



Рис. 1. Вигляд мосту Акасі в Японії



Рис. 2. Вигляд прогонової будови мосту Акасі в Японії



Рис. 3. Конструкція прогонової будови мосту Акасі в Японії

Міст Акасі двічі увійшов у книгу рекордів Гіннесса: як найдовший підвісний міст, і як найвищий міст. Для троса, який мав утримувати міст вагою 160 000 тонн, японці створили дріт міцніший, ніж ті, які зазвичай використовувалися при

будівництві підвісних мостів. Трос був зібраний за спеціальною системою – з безлічі пучків сталевого дроту, причому кожен такий пучок складався з 127 дротів діаметром 5,23 мм. Ще один цікавий факт: якщо витягнути в довжину всі сталеві троси мосту Акасі-Кайкьо, то ними можна було б оперезати Землю сім разів!

2. Жуньянський підвісний міст (кит.: 潤揚長江大橋) – південна частина комплексної мостової споруди, що перетинає річку Янцзи в провінції Цзянсу, приблизно за 45 км на схід від Нанкіна, Китай.

Комплекс складається з двох мостів: підвісного південного та вантового північного. Є частиною Пекін-Шанхайської швидкісної дороги.

Назву мосту пов'язано з тим, що він сполучає Чженьцзян (колишній Жуньчжоу) й Янчжоу.

Довжина основного прогону мосту становить 1 490 м, таким чином, після завершення будівництва і відкриття в 2005 році, він став четвертим за довжиною підвісним мостом у світі і другим в КНР. Висота пілонів мосту дорівнює 215 м над рівнем моря. Ширина моста становить 39,2 м, дорожнє полотно вміщує 6 автомобільних смуг і вузькі доріжки по краях обох сторін полотна для технічного обслуговування. Висота дорожнього полотна над водною поверхнею усереднені становить близько 50 метрів.



Рис. 4. Вигляд Жуньянського підвісного мосту (Китай)

3. Міст Сіхоумень (кит.: 西堠門大橋) — підвісний міст на архіпелазі Чжоушань, Китай). Основний відсік завершений у грудні 2007 року.

Будівництво було розпочато в 2005 р., а перший автомобіль перетнув міст 25 грудня 2009 р.

Є другим найдовшим мостом у світі за довжиною центрального прогону. Дата введення в дію відкладена через зіткнення корабля з опорою мосту 16 листопада 2009 року.



Рис. 5. Вигляд підвісного мосту Сіхоумень (Китай)



Рис. 6. Процес будівництва підвісного мосту Сіхоумень

Довжина всіх з'єднань моста — 5,3 км, довжина основного моста — 2,6 км, довжина основного прогону — 1650 м, висота — 211 м. Нині існує тільки один

міст з більшим прогоном – Акасі-Кайку в Японії. Однак, відразу декілька проєктованих або споруджуваних мостів будуть більшими.

Міст побудований провінцією Чжецзян і обійшовся платникам податків в 2,48 млрд. юанів.

4. Міст Гамбер (англ. Humber Bridge) – міст в Англії через річку Гамбер поруч з Кінгстон-апон-Галл, є п'ятим за величиною трьохпрогоновим підвісним мостом у світі. Він охоплює Гамбер (естуарій, утворений річками Трент і Уз) між Бартоном-на-Гамбері на південному березі і Гезл на північному березі, поєднуючи Східний Йоркшир і Північний Лінкольншир. Основний прогон – 1410 м, загальна довжина – 2220 м, ширина – 28,5 м.

Міст відкрито 17 липня 1981 року. У середньому мостом проїжджають 120 000 автомобілів на тиждень. Для легкового автомобіля проїзд в одну сторону коштує 2,70 фунтів (для вантажних автомобілів більше).



Рис. 7. Міст Гамбер (Велика Британія)



Рис. 8. Міст Гамбер

5. Міст Цзян'їнь (Китай) — найближчий до моря на момент його спорудження міст через річку Янцзи, проте пізніше побудовано ще два мости нижче за течією: Сутунський міст та Шанхайський міст і тунель через Янцзи. Проектування і будівництво моста були завершені трохи менше ніж за три роки. Початок будівництва – 1995 рік. Довжина головного прогону моста становить 1 385 метрів, загальна довжина – 3071 м, що робить його сьомим в світі та найбільшим в Китаї на момент його завершення в 1999 році. Висота моста над рівнем річки становить 50 метрів. Пілони мають 190 метрів у висоту, що приблизно еквівалентно висоті 60-поверхового будинку. Є по три смуги руху в обох напрямках і пішохідні тротуари.

Це був перший міст такої великої протяжності, спроектований в Китаї. Основний прогон виконаний з єдиної сталевий пластини обтічної форми. Сталева ферма створена за рахунок збору з попередньо виготовлених елементів вагою до 500 тонн (на рис. 9 – фото монтування елемента прогонової будови). Загальний обсяг інвестицій в міст становив до 2,728 мільярдів юанів.

Це вражаюче будівництво було проведено компанією Cleveland Bridge & Engineering Company з Великої Британії. Goodwin Steel Castings Ltd, також з Великої Британії, виготовили канати.

У 2002 році міст отримав нагороду за «... видатні досягнення в галузі інженерії мостів».



Рис. 9. Монтування елемента прогонової будови моста Цзян'їнь



Рис. 10. Міст Цзян'їнь (Китай)

6. Міст Цзін Ма (青馬大橋, Tsingma Dàqiáo) — підвісний міст у Гонконгу, п'ятий у світі за довжиною. Міст має два рівні, по яких організовані автомобільний і залізничний рух. На верхньому рівні розташована шестиполосна автомагістраль, по три смуги в кожному напрямку. На нижньому - дві залізничні колії і запасна двохполосна автодорога для службових цілей та для руху під час сильних вітрів (в Гонконгу іноді бувають тайфуни). Основний прогон мосту має довжину 1377 метрів (більше, ніж у знаменитих Золотих Воріт у Сан-Франциско), Цей прогон – найбільший у світі серед мостів, по яких організовано залізничний рух. Загальна довжина мосту – 2160 м. Висота пілонів – 206 метрів.

Будівництво мосту почалося в 1992, закінчилося в 1997 й коштувало 7,2 мільярди гонконзьких доларів. Магістраль Лантау відкрилася 27 квітня 1997 р.

Особливості конструкції мосту:

- *Фундамент і конструкція опор.* Одна опора побудована з боку острова Цзін І, а інша – за 120 метрів від узбережжя штучного острова Ма Ван. Кожна опора піднімається на 206 метрів над рівнем моря, і укопана на відносно малу глибину. Пілони зроблені з високоміцного бетону за технологією неперервного заливання бетону з використанням рухомої опалубки.
- *Закріплення тросів.* Сили натягу в тросах натягу урівноважені великими опорними спорудами, які розташовані з обох кінців мосту. Це масивні бетонні конструкції, загальна вага бетону, використаного при створенні цих двох опорних конструкцій – приблизно 300 000 тонн.
- *Основні троси.* Троси були виготовлені підвісним методом формування волокон. Цей процес зв'язаний із протягуванням дроту, забезпечуючи подачу з постійним натягом і витягуванням дроту від однієї опори до іншої, проходячи через 500-тонні чавунні санки нагорі кожного опорного пілону мосту. 70 000 дротів, кожен діаметром 5,38 мм були об'єднані в основний трос діаметром 1,1 метр.
- *Прогонова будова.* Конструкція прогонової будови – сталева і була виготовлена в Англії і Японії. Після доставки вона була оброблена і зібрана в модулі в місті Донггуань у Китаї. Усього було підготовлено 96 модулів, кожен довжиною 18 метрів і вагою 480 тонн. Модулі були доставлені на місце монтажу спеціально зробленими для цього баржами і встановлювалися двома кранами, які могли пересуватися вздовж основного тросу.



Рис. 11. Міст Цзін Ма (Гонконг)



Рис. 12. Міст Цзін Ма

7. Міст Веррацано-Нерроуз (англ. Verrazano-Narrows Bridge) — один з найбільших у світі підвісних мостів, сполучає два райони Нью-Йорку — Бруклін і Стейтен-Айленд.

Довжина центрального прогону моста становить 1298 м, бічних прогонів — по 370,5 м. Загальна довжина — 4176 м. Пілони висотою 211 м, на яких підвішені несні троси моста, видні з більшої частини Нью-Йорку. Міст — «двоповерховий», на кожному з «поверхів» міститься по шість смуг для руху автотранспорту. Матеріал моста — сталь і бетон.

Міст побудований в 1964 році й названий на честь італійського

мореплавця Джованні да Верраццано, першого європейця, що ввійшов у бухту Нью-Йорк і річку Гудзон. До 1981 року міст був найбільшим (за довжиною центрального прогону) підвісним мостом у світі; на вересень 2006 року він є сьомим у світі за цим параметром і першим у США серед мостів такої конструкції.

Просвіт під мостом (відстань по вертикалі від нижньої кромки моста до поверхні води) становить 69,5 м.



Рис. 12, а. Міст Веррацано-Нарроуз (США)

8. Міст «Золота Брама» (англ. Golden Gate Bridge) – підвісний міст через протоку Золота Брама. Він з'єднує місто Сан-Франциско на півночі півострова Сан-Франциско і південну частину мису округи Марін, поруч із містом Сосаліто. Місцева визначна пам'ятка й один із символів США. Довжина мосту – 2 737,4 метра, ширина мосту – 27 метрів, довжина основного прогону – 1280 м, висота опор – 227,4 метра над водою, товщина головного опорного троса – 90 см. Від проїжджої частини до поверхні води – 67 метрів. Конструкція моста має 1 млн 200 тис. заклепок. Будівництво мосту почалося 5 січня 1933 року й тривало понад 4 роки. Міст з гордістю утримував титул найдовшого підвісного мосту в світі майже 30 років, перш ніж його замінив міст Верразано-Нарроуз у Нью-Йорку в 1965 році.

Канати, що підтримують міст, також вражають – вони мають 93 см у діаметрі і складаються з 27 572 окремих ниток. Довжини дроту, який використовується для виготовлення цих канатів, вистачило б, щоб тричі обігнути Землю! Кожна з опор мосту може витримати навантаження 95 тисяч тонн, що є доказом надзвичайної точності та міцності цієї конструкції.

Через загрозу землетрусів міст довелося зміцнити, щоб витримати землетрус силою до 8,3 бала за шкалою Ріхтера. Вартість цієї роботи оцінили в \$217,4 млн. Міст вже витримав кілька сильних землетрусів, у тому числі землетрус 1989 року з інтенсивністю 7,1 балів.

Історія

Місце майбутнього будівництва знаходилося в сейсмічній області за 20 км від розлому Сан-Андреас і було відкрито хвилям і вітрам Тихого океану, тому до міцності мосту були висунути жорсткіші вимоги, ніж зазвичай.

Проект мосту підготував інженер Джозеф Строусс (англ. Joseph Baermann Strauss), а консультантом був архітектор Ірвінг Морроу (англ. Irving Foster Morrow), що використовував у дизайні елементи стилю артдеко. Усі математичні обчислення зробив Чарльз Альтон Еліс (англ. Charles Alton Ellis), який мешкав у Нью-Йорку, але через погані відносини між ним та Джозефом Строуссом, ім'я Еліса не фігурує в будівництві мосту і не згадується на табличці будівельників мосту на південній вежі.

У питанні пофарбування розглянули такі варіанти: запропоновано пофарбувати міст чорною або сірою фарбою; представники бази ВМС наполягали на смугастому чорно-жовтому варіанті – щоб військові кораблі в непогоду й туман могли побачити міст і не зіткнутися з ним. Але будівельники вирішили, що найкраще буде лишити такий же колір, як і антикорозійне покриття – червоно-помаранчевий. Червоний і жовтогарячий – кольори, які завжди використовуються при зведенні сталевих конструкцій, тому що ці фарби містять свинцеву компоненту, яка захищає сталь від корозії. Крім того, завдяки цьому кольору міст добре видно в тумані, який часто буває в цій місцевості. Але в мрячну погоду фарба розкладається на елементи, шкідливі для навколишнього середовища. Тому в 1990-х роках міст перефарбували акриловими фарбами.

Автомобільний рух

Автомобільний рух мостом здійснюється по шести смугах. Кількість смуг у кожен бік змінюється залежно від потоку машин. У будні ранком можна побачити чотири смуги на південь (у місто) і дві смуги на північ (з міста). У вечірню годину пік – навпаки. Уночі відкрито по дві смуги в кожен бік. Розділова смуга – яскраві жовті пластмасові стовпчики, які дуже легко збити та виїхати на зустрічну смугу. Через це обмеження швидкості на мосту – 45 миль на годину (~72 км/год). У середньому раз на рік трапляються аварії, коли машина виїжджає на зустрічну смугу і зіштовхується з зустрічним транспортом. У наш час продовжуються розмови про будівництво пересувної розділової смуги, яка б захистила обидві частини мосту від таких аварій.

27 травня 1937 року о шостій годині ранку міст «Золота Брама» відкрили для пішоходів. Перші 12 годин він належав тільки їм. Наступного дня за

сигналом президента Франкліна Рузвельта з Білого дому на міст в'їхали перші автомобілі.

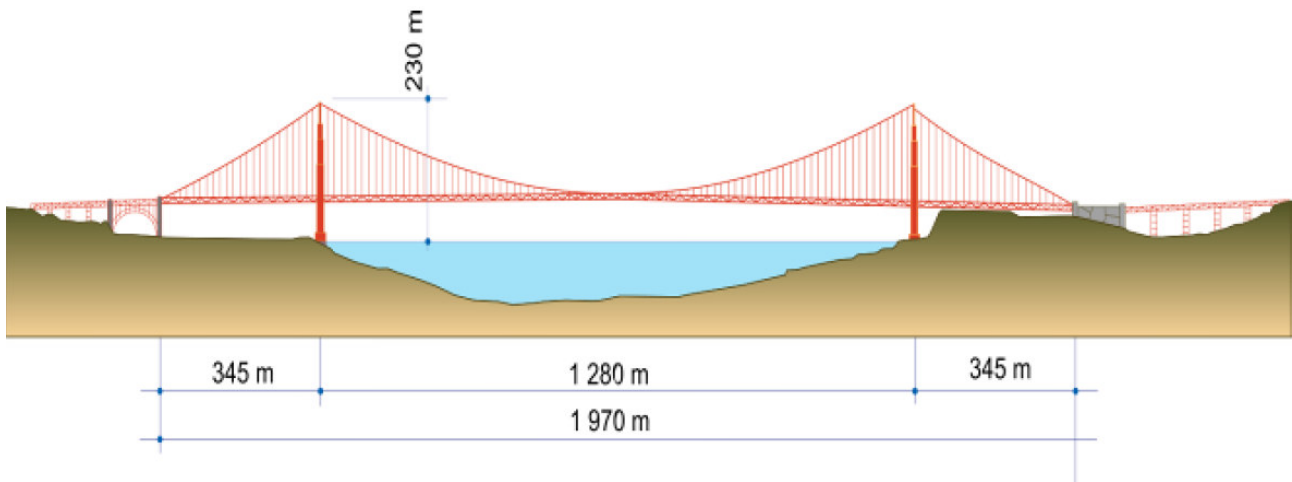


Рис. 13. Схема моста «Золота Брама»



Рис. 14. Міст «Золота Брама» (США)



Рис. 15. Міст «Золота Брама»



Рис. 16. Міст «Золота Брама»

Нагороди та відзнаки

У 1994 році Американське товариство інженерів-будівельників (ASCE) визнало міст Золота Брама одним із **семи чудес сучасного світу**. Ця престижна відзнака підкреслює не лише важливість мосту як інженерного досягнення, а й його вплив на розвиток будівельних технологій.

У 1984 році міст Золота Брама був включений до списку **національних історичних пам'яток**. Цей статус надається пам'яткам особливого значення для історії США. Визнання мосту національним пам'ятником підкреслює його роль як ікони культурної та історичної спадщини Америки.

У 2010 році Американський інститут архітекторів (AIA) присудив мосту Золота Брама **Нагороду двадцяти п'яти років**. Ця нагорода присуджується

будинкам, які витримали перевірку часом і продовжують радувати своєю архітектурою та функціональністю. Міст Золота Брама є прекрасним прикладом довговічності та елегантності, які збереглися десятиліттями.

9. Міст Гегакустенбрун (швед. Högakustenbron) — підвісний міст в Швеції на маршруті E04, що перетинає річку Онгерманельвен біля гирла. Розташований в лені Вестерноррланд у північній Швеції на узбережжі Ботнічної затоки. Міст залізобетонний. Основний прогон – 1210 м. Загальна довжина – 1545 м. Ширина – 17,8 м. Висота конструкцій – 40 м. Відкритий у грудні 1997 року.



Рис. 17. Міст Гегакустенбрун (Швеція)

10. Міст Янло (кит.: 武汉阳逻长江大桥) — підвісний міст через річку Янцзи в місті Ухань, Китай.

Спроектований компанією China Communications Construction і побудований при співпраці з британською компанією Dorman Long. Загальна довжина моста 1970 метрів, основний прогон – довжиною 1280 метрів. Загальна довжина – 2725 м. Міст входить в десятку найдовших підвісних мостів.



Рис. 18. Міст Янло (Китай)

11. Міст Макінак (англ. Mackinac Bridge) — підвісний міст, що перетинає протоку Макіно, розташований у північній частині штату Мічиган (США). Є частиною швидкісної автодороги 75 (Су-Сент-Марі — Маямі).



Рис. 19. Міст Макінак (США)

У точці розташування мосту проходить умовна межа між озерами Мічиган та Гурон.

Міст з'єднує Сейнт-Ігнас і Макіно-Сіті, розташовані по різні боки протоки Макіно, відповідно, на Верхньому та Нижньому півострові. До введення в експлуатацію мосту обидва береги з'єднувала поромна переправа.

Довжина — 8038 м. Довжина основного прогону — 1158 м. Загальна довжина — 8038 м. Ширина — 20,9 м. Має 4 ряди руху. Відкрито міст 1 листопада 1957 року. Охоронний статус — Historic Civil Engineering.

Будівництво моста обійшлося в 95 млн. доларів США (в еквіваленті 2013 — 2,06 млрд).

12. Хуанпу (кит.: 黄埔大桥) — комбінований мостовий перехід в Китаї, що включає підвісну та вантову конструкції. Перетинає річку Чжуцзян і розташований в місті Гуанчжоу. 17-й по довжині основного прогону підвісний міст у світі (восьмий в Китаї). Є частиною національної швидкісної автодороги G4W Гуанчжоу-Макао.

Початок будівництва — у грудні 2003 року. 16 грудня 2008 мостовий перехід Хуанпу відкритий для руху в складі швидкісної автодороги, що зв'язує Гуанчжоу з Макао.

Довжина моста — 7016 м. Являє собою два підходи з обох сторін (довжина північного підходу до вантової секції — 1775,5 м, південного до підвісної — 3080,5 м), підвісний міст з основним прогоном довжиною 1108 м (над південно-західним проходом річки), естакадний перехід між мостами на острові річки Чжуцзян, вантовий міст з прогонами по 322 і 383 м (останній над північно-східним проходом річки). Висота пілона вантової секції становить 226,14 м, підвісної — 189 м.

Має 8 смуг руху (по 4 в обидві сторони).



Рис. 20. Підвісний міст в переході Хуанпу (Китай)

13. Міст Сето (яп. 瀬戸大橋, せとおおはし, сето охасі, «Великий міст Внутрішнього Японського моря») – шляхопровід через Внутрішнє Японське море, який сполучає острови Шікоку і Хонсю (Японія). Відкритий 10 квітня 1988 року.

Великий міст Сето – це цілісний комплекс, що складається з 6 мостів, ланцюжком витягнутих з півночі на південь на відстань 37,3 км. Для зведення опор будівельники скористалися маленькими острівцями в акваторії Внутрішнього моря, ширина якого в цьому місці становить 9,4 км. З шести мостів три – підвісні, два – вантові і один – з наскрізними фермами. За своїм призначенням Сето Охасі – міст суміщений. Верхній його ярус – чотирисмугова автодорога, нижній призначений для залізничного сполучення.

Найбільший з шести мостів комплексу «Мінамі-бісан» завдовжки 1723 метри вважається п'ятим за величиною у світі серед підвісних мостів і найдовшим двоярусним мостом. Міст залізобетонний. Загальна довжина – 13100 м.

Будівництво Великого мосту Сето, що розпочато в 1978 р., продовжувалося трохи менше десяти років. Будівництво коштувало 1,13 трильйонів єн (8,7 млрд доларів за курсом того часу) і 17 людських життів. На будівництві було задіяно близько 50 000 чоловік.

Великий міст Сето був задуманий як могутня лінія транспортних комунікацій, що дозволяє досягати Шікоку потягом або автомашиною без утомливих пересадок на пором і з порому. Великий міст Сето сполучив добре розвинену автодорожню і залізничну мережу Центральної Японії з островом Шікоку.

Охоронний статус мосту – Japan's 20th Century Heritage.



Рис. 20. Міст Сето (Японія)

14. Міст Султана Мехмеда Фатіха (тур. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü) або Другий Босфорський міст (тур. 2. Boğaziçi Köprüsü) – підвісний автомобільний міст через протоку Босфор у Стамбулі, Туреччина, збудований у 1988 році. Міст названо на честь османського султана Мехмеда II Фатіха, який захопив візантійський Константинополь у 1453 році. Він з'єднує райони Хісарюстю (Європа) та Каваджик (Азія). Загальна довжина мосту – 1510 м, довжина головного прогону – 1090 м. Ширина – 39 м. Висота конструкцій – 110 м.

Міст споруджено консорціумом будівельних компаній: японських (IHI Corporation та Mitsubishi Heavy Industries), італійської Salini Impregilo і турецької STFA Grubu. Кошторисна вартість будівництва – 130 млн доларів США. Початок будівництва в 1986 році, завершення – в 1988 році. Конструктор, архітектор – Hyder Consulting.

Висота моста над водою – 64 м, що дає змогу проходити найвищим кораблям у світі – авіаносцю Ентерпрайз та океанському лайнеру «Королева Єлизавета II». Переїзд через міст є платним. Щодня мостом в обидва боки прямують близько 150 000 транспортних засобів. Має по чотири смуги для автомобільного руху в кожному напрямку та ще по одній додатковій смузі для руху аварійних служб в обох напрямках. За 5 км на південь розташовано Перший Босфорський міст.



Рис. 21. Міст Султана Мехмеда (Туреччина)

15. Перший Босфорський міст (тур. 1.Boğaziçi Köprüsü) – підвісний автомобільний міст через протоку Босфор у Стамбулі, Туреччина. Збудований у 1973 році.

Міст сполучає історичний район Ортакой у Бешикташ (Фракія) з Бейлербеї в Ускюдарі (Анатолія). Загальна його довжина – 1560 м, довжина головного прогону – 1074 м. Ширина мосту – 33 м. Висота мосту – 64 м.

Має по три смуги для автомобільного руху, по одній додатковій смузі для руху аварійних служб та по одній пішохідній доріжці в обох напрямках. Переїзд через міст є платним. Щодня мостом в обидва боки користуються близько 180 000 транспортних засобів. Пішохідний рух заборонений.

Північніше від нього знаходяться міст Султана Мехмеда Фатіха (за 5 км) та міст Султан Селім Явуз (практично в гирлі Босфору).



Рис. 22. Перший Босфорський міст (Туреччина)

16. Міст Балінхе або Міст через річку Балін (кит.: 坝陵河大桥) — міст, що перетинає долину річки Балін (притока річки Дабан, басейн річки Бейпаньцзян), розташований на території автономного повіту Гуаньлін міського округу Аньшунь; 20-й по довжині основного прогону підвісний міст у світі (9-й в Китаї). Є частиною національної швидкісної автодороги G20 Шанхай-Куньмін.



Рис. 23. Міст Балінхе (Китай)

23 грудня 2009 відкритий для руху в складі швидкісної автодороги, що зв'язує Шанхай з Куньміном, що на південному заході Китаю. Міст дозволив скоротити час у дорозі через долину між містами Куньмін і Гуйян з однієї години до 4 хвилин.

Довжина — 2237 м. Є підвісним мостом з основним прогоном довжиною 1088 м. Висота західного пілона становить 204,5 м. Висота конструкції — 370 м. Пілони мосту закріплені на схилах долини. Міст розташований за 375 м від поверхні долини, що робить його одним з найвищих мостів у світі.

У липні 2012 міст став місцем проведення Міжнародних змагань з бейсджампінгу.

17. Міст Джорджа Вашингтона (George Washington Bridge)— міст у Нью-Йорку через річку Гудзон, сполучає Мангеттен із Фортм Лі (штат Нью-Джерсі).

Міст будувався під керівництвом архітектора Отмара Амманна з 1927 року. Відкритий 25 жовтня 1931 року. Свою назву здобув через те, що сполучив місця, де під час Війни за незалежність США були два форти на різних берегах Гудзона — форт генерала Чарльза Лі та форт Джорджа Вашингтона. До появи в

1937 році мосту «Золота Брама» у Сан-Франциско міст Джорджа Вашингтона був найбільшою підвісною конструкцією на планеті.

При відкритті на мості було всього шість смуг для руху транспорту. Проте Отмар Амманн передбачив зростання кількості автомобілів. У 1947 році після проведеної реконструкції моста було додано ще дві смуги. У 1962 році відкрили нижній ярус моста з шести смуг. Міст став двоповерховим і найбільшим у світі за кількістю транспортних потоків – чотирнадцять смуг руху. По обидві сторони верхнього ярусу розташовані зони для пішоходів і велосипедів. Міст Джорджа Вашингтона справляється з потоком у 300 тис. автомашин за добу.

Пілони заввишки 185 м планувалося покрити бетоном і гранітом. Проте через Велику депресію було прийнято рішення зекономити на цьому гроші. Також врахували оригінальність індустріального стилю сталевих веж з їх характерними кріпленнями навхрест.

Основний прогон – 1090 м. Загальна довжина – 1460 м. Ширина – 36 м. Конструктор, архітектор – Othmar Hermann Ammann і Касс Гілберт. Охоронний статус - Historic Civil Engineering Landmark.

Згодом реформатор архітектури Ле Корбюзьє писав: «Міст Джорджа Вашингтона через Гудзон – найкрасивіший міст у світі. Це єдине благодатне місце в хаотичному місті».



Рис. 24. Міст Джорджа Вашингтона (США)



Рис. 25. Міст Джорджа Вашингтона (США). Аерознімок мосту



Рис. 26. Міст Джорджа Вашингтона (США). Металеві конструкції пілону

18. Міст Курусіма-Кайкьо (яп. 来島海峡大橋) — мостовий перехід, що перетинає протоку між островами Сікоку й Осіма (Внутрішнє Японське море), розташований в північній частині міста Імабарі, Японія. Є частиною швидкісної автодороги 317 Нішісето (Ономіті — Імабарі) та системи мостів Хонсю-Сікоку.

1 травня 1999 відкрито для руху в складі швидкісної автодороги, що сполучає місто Імабарі на острові Сікоку (райони Коуратьо, Тікамітьо, Накаборі) й острові Осіма (район Йосіумітьомьо).



Рис. 27. Міст Курусіма-Кайкьо (Японія)



Рис. 28. Міст Курусіма-Кайкьо (Японія). Аерознімок мосту

Довжина – 4045 м (960 + 1515 + 1570). Мостовий перехід представлений трьома підвісними мостами: Перший Курусіма-Кайкьо, Другий Курусіма-Кайкьо та Третій Курусіма-Кайкьо.

Міст перетинає маленькі острови Ма та Муші. Мостовий перехід має шість пілонів і чотири несні опори. Є найдовшим мостовим переходом серед підвісних мостів у світі, обігнавши Акасі-Кайкьо на 104 м. Довжина основного прогону: першого моста – 600 м, другого – 1020 м, третього – 1030 м. Ширина – 27 м. Отримані відзнаки – The Japan Society of Civil Engineers Tanaka Prize.

Має 4 ряди руху для автомобілів (по два в обидві сторони), 2 ряди для мотоциклів, пішохідні доріжки.

19. Міст 25 квітня (порт. Ponte 25 de Abril) – підвісний міст, що сполучає Лісабон на північному (правому) і Алмаду на південному (лівому) березі річки Таг.

Міст перетинає місце впадання Тагу в Атлантичний океан. Відкритий 6 серпня 1966 року. До 1974 року міст мав назву на честь прем'єр-міністра Антоніу де Олівейра Салазара (порт. Ponte Salazar), але був перейменований після Революції гвоздик. Міст входить в двадцятку підвісних мостів світу за довжиною.

Довжина основного прогону – 1012,88 м. Повна довжина мосту – 2277,64 м висота верхньої платформи над поверхнею води – 70 м. Висота головних пілонів (опор) над поверхнею води – 190,47 м. Діаметр основних несних тросів – 58,6 см, в яких по 11 248 сталевих жил діаметром 4,87 мм в кожному несному тросі. Глибина фундаменту головного південного пілона під рівнем води – 79,3 м. На будівництво споруди витрачено 263 000 м³ бетону і 72 600 т сталі.

Охоронний статус – Pending classification monument.

У 1958 році було офіційно прийнято рішення про будівництво моста, а наступного року – оголошено відкритий міжнародний конкурс. Після розгляду чотирьох проектів у 1960 р. перемога була присуджена консорціуму на чолі з північно-американською фірмою «Експортна сталеливарна компанія США» (англ. United States Steel Export Company). 5 листопада 1962 року були розпочаті будівельні роботи. Вони велися Американською мостобудівною компанією (англ. American Bridge Company), частиною консорціуму, який виграв тендер, а також за допомогою 11 місцевих компаній. При спорудженні моста загинули 4 робітники з 3000, які брали участь в будівництві. Роботи зайняли 2 185 000 людино-годин; повна вартість моста досягла 2,2 млрд португальських ескудо, або 32 млн доларів США (201 млн доларів у перерахунку на 2006 р. з урахуванням інфляції).

Через 45 місяців після початку робіт (на півроку раніше терміну), 6 серпня 1966 р. в Алмаді відбулася урочиста церемонія відкриття. Згодом

після Революції гвоздик міст був перейменований на честь дня, коли відбулася ця подія.

У листопаді 1998 р. ширина проїжджої частини для автотранспорту була розширена з 4 до 6 смуг, а 30 червня 1999 року було відкрито рух поїздів по Південній лінії (порт. Linha do Sul). Ці модифікації потребували істотного посилення конструкції: надбудови головних опор, додавання ще одного набору несних тросів, що проходять поверх уже наявних, тощо. Американська мостобудівна компанія брала участь і в цій модернізації.

На початок XXI сторіччя вартість проїзду по мосту становить 1,65 євро тільки для пасажирських автомобілів, що прямують на північ (до Лісабону).

В 2006 році середньодобова кількість автомобілів, що перетинають міст, досягла 150 000 при середньому значенні для години пік 7000. Залізничний рух також дуже інтенсивний: 157 поїздів на добу. В цілому близько 380 000 чоловік щодня перетинають міст в обох напрямках.

Нижче наведені інші цікаві цифри, які здебільшого стосуються дати відкриття мосту.

Через схожість конструкції і кольору Міст імені 25 квітня порівнюють з мостом Золота Брама у Сан-Франциско, США. Проте Міст 25 Квітня будувався тією ж компанією (American Bridge Company), яка споруджувала інший міст — через затоку між Сан-Франциско і Оклендом. Це пояснює схожість дизайну Моста 25 квітня і Сан-Франциско — Окленд, особливо якщо врахувати, що обидва вони розташовані в сейсмонебезпечних зонах.

Автомобілі, що їдуть крайньою лівою смугою, видають специфічний звук, тому що центральна частина полотна не покрита асфальтом, а зроблена зі сталеві решітки.



Рис. 29. Міст 25 квітня (Португалія)



Рис. 30. Міст 25 квітня (Португалія). Вид залізничних колій



Рис. 31. Міст 25 квітня (Португалія). Панорамний вигляд

20. Міст Форт-Роуд (англ. Forth Road Bridge) — підвісний автомобільний міст через естуарій Ферт-оф-Форт, сполучає Единбург і Файф (Шотландія).

Міст має довжину 2512 метрів, ширину 33 м, висоту над водою — 44 м, найбільший прогон — 1006 м. Відкрито 4 вересня 1964 р., що замінло поромне сполучення або довгий об'їзд. Охоронний статус — реєстрова споруда категорії «А».

Міст має 4 автомобільні смуги, по дві в кожную сторону, по дві велосипедні та пішохідні доріжки. У 2010–2013 трафік через міст склав більше 22 млн автомобілів на рік.

Рішенням Парламенту Шотландії з 11 лютого 2008 року проїзд по мосту став безкоштовним.



Рис. 32. Міст Форт-Род (Шотландія)

21. Мости мостового переходу Сето (яп. 瀬戸大橋 Сето о:хасі, «Великий/великий міст через протоку») – мостовий перехід через протоку Бісан Внутрішнього Японського моря (Сето-Найкай), що з'єднує острови Хонсю (місто Курасики префектури Окаяма) та Сікоку (місто Сакаїді) префектури Кагава), Японія. Матеріал – залізобетон. Загальна довжина – 13100 м. «Це охасі» був задуманий як потужна лінія транспортних комунікацій, що дозволяє досягати Сікоку поїздом або автомашиною без втомливих пересадок з порома на пором, чії рейси були обмежені частими туманами в протоці. Це найдовший у світі двоярусний комплекс із чотирисмугової автодороги (експрес-лінія Сето-Тюо) та швидкісної залізничної лінії «сінкансен» (експрес-лінія Сето-охасі) під нею, що складається з витягнутих ланцюжком з півночі на південь п'яти віадуків та шести мостів із власними іменами. Для зведення опор будівельники скористалися невеликими острівцями, розсипаними у Внутрішньому морі, найменша ширина якого тут становить 9,4 км.

Ідея зв'язку острова Сікоку з рештою Японії зародилася майже відразу після введення в дію першої паровозної лінії на ньому в 1889 році. Перша спроба почати будівництво в 1955 році призвела до загибелі 171 людини на поромі, що врізався в тумані в узбережжя Такамацу. Рівень небезпеки робіт був переглянутий. У 1959 р. було вирішено продовжувати роботи, дослідницькі роботи тривали до 1970 р., проте після «нафтової кризи» 1973 р. проект був знову заморожений. Будівництво було розпочато у 1978 році і тривало трохи менше десяти років силами 50 000 осіб. Перехід відкрито 10 квітня 1988 року. Вартість – 1130 млрд ієн (8,7 млрд. доларів за курсом того часу) та 13–17 людських життів. Проїзд платний.

Підвісні мости в порядку прямуювання з півночі на південь:

Міст Сімоцуї-Сето – двоярусний підвісний міст довжиною 1400 м з найбільшим прогоном 940 м (36-е місце у світі на 2016 рік), що з'єднує острови Хонсю та Хіцуїсі.



Рис. 33. Міст Сімоцуї-Сето



Рис. 34. Міст Мінамібісан-Сето (поряд) та Кітабісан-Сето (вдалині). Добре видно бетонну змичку між ними

Міст Кітабісан-Сето — двоярусний підвісний міст довжиною 1538 м з найбільшим прогоном 990 м (33-є місце у світі на 2016 рік), що з'єднує острів Йосіма та наступний міст (Мінамібісан-Сето) через безіменний острів.



Рис. 35. Вид на Кітабісан-Сето з острова Йосіма

22. Міст Лунцзян (кит.: 龙江大桥) — автомобільний міст, що перетинає річку Лунцзян (права притока річки Лунчуань — Швелі, урочище Іраваді), розташованому на терені повіту Тенчун міського округу Баошань (Еитай). 15-й за довжиною основного прогону підвісний міст у світі (6-й в Китаї). Є частиною пролонгової ділянки з Баошаня до Жуйлі швидкісної дороги G56 Ханчжоу-Жуйлі.



Рис. 36. Вид на процес монтажу прогонової будови моста Лунцзян (Китай)

Довжина — 2471 м. Є підвісним мостом з основним прогоном завдовжки 1196 м. Міст має дві баштові опори (пілони). Висота пілонів 169,7 м. Ширина

33,5 м. Кількість смуг руху – 4. Дорожнє полотно моста знаходиться на висоті 292 м над долиною річки Лундзян.

Відкриття мосту скоротило час у дорозі на ділянці вдвічі.

Кошторисна вартість будівництва – 1,47 млрд юань. Початок будівництва - 2 серпня 2011 року. Будівництво моста було завершено 5 квітня 2016 року, для руху його було відкрито 1 травня 2016 року.

23. Підвісний міст Шарля Куонена (Офіційна назва – Charles Kuonen Hängebrücke) – підвісний пішохідний міст, що з'єднує дві ділянки гірської туристичної стежки Euraweg між гірськими селищами Грехен і Церматт у кантоні Вале, Швейцарія.

Міст побудовано 2017 року швейцарською компанією Swissrope за 10 тижнів. Попередній пішохідний міст, що існував на цій ділянці туристичної стежки, був демонтований 2010 року, оскільки внаслідок каменепадів став непридатний для використання вже за 2 місяці після введення в експлуатацію.

Для захисту нового моста від непередбачуваних каменепадів, викликаних рухом льодовика, його довелося прокласти нижче і зробити довшим за попередній. Таким чином, обрана конструкція зі сталевोї сітки та тросів має довжину 494 м і розташована на висоті 85 м над дном долини. Міст обладнаний демпферними пристроями, що попереджають вібрацію. Ширина мосту становить 65 см, діаметр тросів – 53 мм, вага тросів – 8 т. Загальна вага конструкції – 58 т. На момент відкриття в липні 2017 року споруда вважалась найдовшим у світі пішохідним підвісним мостом.



Рис. 37. Вид на підвісний міст Шарля Куонена (Швейцарія)

У фінансуванні проекту вартістю 730 000 швейцарських франків взяли участь навколишні комуни Грехен, Ранда, Санкт-Ніколас, Теш та Церматт, а також місцеві компанії-постачальники туристичних послуг. Суттєву різницю (понад 100 000 франків) між зібраними коштами та загальною сумою надав

психолог і бізнесмен, співвласник виноробної компанії Gregor Kuonen Caveau de Salquenen AG Шарль Куонен.



Рис. 38. Вид на підвісний міст Шарля Куонена (Швейцарія)

24. Міст Titan RT – пішохідний підвісний міст довжиною 483 м у районі Гарц землі Саксонія-Ангальт, Німеччина. Міст розташований в об'єднаннях громад Обергарц-ам-Броккен і Тале, що межують на його середині, та перетинає водосховище річки Боде.

Споруда довжиною 483 м є одним з найдовших пішохідних підвісних мостів у світі й має основний вільно-підвісний прогон 458,5 м. Підвісний міст Шарля Куонена, відкритий у липні 2017 року в Швейцарії, перевищує Titan RT на 11 метрів, але дані щодо довжини вільного прогону лишаються невідомими. Для порівняння, одним з найдовших пішохідних мостів у світі є міст Додхара Чандані в Непалі, загальна довжина якого становить 1452,96 м, але найдовший його прогон становить лише 225,4 м.

Ширина мосту 1,20 м. Максимальна висота мосту від поверхні становить близько 100 м. Міст має чотири головні опорні троси діаметром 65 мм і два додаткових стабілізаційних троси діаметром 36 мм. Вага конструкції 118 тонн.

Будівельні роботи, що виконувала австрійська компанія НТВ, тривали з листопада 2016 року. Відкриття мосту відбулося 7 травня 2017 року.

Міст обладнаний для банджі-джампінгу та роуп-джампінгу на шнурі довжиною 75 м.



Рис. 39. Вид на підвісний міст Titan RT (Німеччина)

25. Міст Дімухе (кит.: 抵母河特大桥) – автомобільний міст, що перетинає річку Санша, розташовано на території міського округу Люпаньшуй. На момент спорудження є 25-м по довжині основного прогону підвісним мостом в Китаї та 10-м по висоті над перекритою перешкодою мостом в світі (8-м в Китаї). Є частиною швидкісної автодороги Ханчжоу-Жуйлі. Кількість смуг для руху – 4.



Рис. 40. Підвісний міст Дімухе (Китай)

Міст з'єднує північний і південний береги річки Санша на території повіту Шуйчен міської округи Люпаньшуй. Відкритий у 2016 році.

Є двопілонним вантовим мостом з основним прогоном завдовжки 538 м, який змінюється двома секціями балкової конструкції з обох сторін. Дорожнє полотно моста знаходиться на висоті 360 м над річкою. Ширина – 27,9 м.

Є одним з перших підвісних мостів в Азії, побудованих в гірській місцевості.

26. Міст Осман Газі або Міст через Ізмітську затоку (тур. Osman Gazi Köprüsü) – підвісний міст, побудований над Ізмітською затокою на східному узбережжі Мармурового моря, в безпосередній близькості від Ізміту і приблизно за 50 км на південний схід від Стамбула, Туреччина. На 2016 рік це четвертий за довжиною підвісний міст у світі.

Основний прогон – 1550 м. Загальна довжина моста – 2682 м. Ширина – 35,93 м. Висота конструкції – 235 м. Висота прогонової будови над водою – 64 м. Кількість смуг руху – 3 + 3. Конструктор, архітектор – Dissing+Weitling.

Тендер з будівництва та експлуатації мосту, який відбувся в квітні 2009 року, виграло спільне підприємство, утворене п'ятьма турецькими компаніями (Nurol, Özaltın, Makyol, Yüksel та Gocay) й однією італійською будівельною компанією Astaldi. У 2010 році був підписаний контракт на будівництво автомагістралі від Гебзе до Бурси. Кошторисна вартість проекту 11 млрд лір. Після введення в експлуатацію моста відстань між Стамбулом та Ізміром скоротиться до близько 140 км замість об'їзду навколо Ізмітської затоки. Автострада матиме 420 км і дозволить скоротити час у дорозі між двома великими містами з 6½ годин до 3½ годин. Відкриття відбулося 1 липня 2016 року.



Рис. 41. Підвісний міст Осман Газі або міст через Ізмітську затоку (Туреччина)

27. Такóмський міст, або міст Такóма-Нерроуз — підвісний міст у США, у штаті Вашингтон, побудований через протоку Такома-Нерроуз (частина затоки П'юджет-Саунд) у місті Такома.

Початковий варіант моста спроектував Леон Моїсєєв і його відкрито для руху 1 липня 1940 року. Ще під час зведення будівельники дали йому прізвисько «галопуюча Герті» (англ. Galloping Gertie), оскільки у вітряну погоду його дорожнє полотно сильно розгойдувалося (через малу висоту балки жорсткості).

Основні характеристики моста: загальна довжина — 1810 м; довжина центрального прогону — 854 м; ширина — 11,9 м; діаметр основних (опорних) тросів — 438 мм; стріла провисання (різниця між висотою троса біля пілонів і висотою в точці його найбільшого провисання) — 70,7 м; пілони — сталеві на бетонних биках; висота балки жорсткості — 2,44 м.

7 листопада 1940 року на 11:00 за місцевим часом при швидкості вітру близько 18 м/с сталася аварія, яка призвела до руйнування центрального прогону моста.

Процес руйнування був знятий на 16-міліметрову кольорову кіноплівку Kodachrome. На основі знімання був створений документальний фільм «The Tacoma Narrows Bridge Collapse» (1940), що дозволив згодом докладно вивчити процес руйнування. Тривалість руйнування — 2 години та 30 хвилин.

Аварія моста залишила значний слід в історії науки і техніки. Руйнування моста сприяло дослідженням в галузі аеродинаміки та аеропружності конструкцій і зміні підходів до проектування всіх великопрогонових мостів у світі, починаючи з 1940-х років. У багатьох підручниках причиною аварії називають явище механічного резонансу, коли зовнішня частота вітрового потоку збігається з власною частотою коливань конструкцій моста. Однак справжньою причиною став аеропружний флаттер (динамічні крутильні коливання) через недоврахування при проектуванні споруди вітрових навантажень.

Процес руйнування описано так:

Обрив підвісок центрального прогону спричинив провисання бічних прогонів і нахил пілонів. Сильні вертикальні і крутильні коливання моста стали наслідком надмірної гнучкості конструкції та відносно малої здатності моста поглинати динамічні сили. Міст був запроектований і правильно розрахований на дію статичних навантажень, в тому числі й вітрового, але аеродинамічну дію навантаження враховано не було. Крутильні коливання виникли внаслідок дії вітру на проїжджу частину близько горизонтальної осі, паралельної поздовжній осі моста. Крутильні коливання посилювалися вертикальними коливаннями

тросів. Опускання троса з одного боку моста і підняття його з іншого викликали нахил проїжджої частини і породили крутильні коливання.

Адреса відео коливання і руйнування Такомського моста:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/transcoded/f/f2/Tacoma_Narrows_Bridge_destruction.ogv/Tacoma_Narrows_Bridge_destruction.ogv.480p.vp9.webm



Рис. 42. Такомський міст, 1940 рік (США)



Рис. 43. Момент руйнування головного прогону Такомського моста (США)

Демонтаж пілонів і бічних прогонів був початий незабаром після аварії і тривав до травня 1943 року. При будівництві нового моста були використані анкерні стояни, бики пілонів і деякі інші складові частини старого моста. Повністю відновлений міст (англ. Westbound bridge) було відкрито 14 жовтня 1950 року і він став третім на той момент найдовшим підвісним мостом у світі (загальна довжина – 1822 м, довжина центрального прогону – 853 м). Для додаткової стійкості і зниження аеродинамічних навантажень у конструкцію нового моста введено відкриті ферми, стійки жорсткості, деформаційні шви та системи гасіння вібрацій. Пропускна здатність моста – 60 тис. автомобілів на добу.

У 2002–2007 роках для збільшення пропускної здатності шосе, поруч зі старим зведено ще один міст (англ. Eastbound bridge – Східний міст), що має загальну довжину 1645,9 м, довжину центрального прогону 853,4 м і висоту пілонів 155,4 м.

Цікаві факти:

- Архітектор Леон Моїсєєв, який розробив Такомський міст, до цього розробив і знаменитий Мангеттенський міст, який і досі стоїть.
- 20 травня 2010 року сильне розхитування, амплітудою близько 1 м, внаслідок вітру, пережив і Волгоградський міст.



Рис. 44. Такомський міст, 1950 рік (США)



Рис. 45. Такомський та Східний мости, 2007 рік (США)



Рис. 46. Такомський та Східний мости, 2007 рік (США)

28. Складний міст Чжанцзяцзе є підвісним пішохідним мостом в окрузі Чжанцзяцзе, Китай, над областю Улін'юань. Міст, збудований як атракція для туристів, має скляне дно і є прозорим. На мить відкриття, він був найдовшим і найвищим скляним мостом у світі. Довжина мосту, який був відкритий для загалу 20 серпня 2016 року, становить 430 метрів і основний прогон також 430 м у довжину та 6 метрів у ширину. Також він розміщений на висоті близько 300 метрів над землею. Міст охоплює каньйон між двома гірськими скелями в національному лісовому парку Чжанцзяцзе у центральній провінції Китаю Хунань. Він побудований таким чином, що може вмістити до 800 відвідувачів одночасно. Міст спроектував ізраїльський архітектор Хаїм Дотан (Hayim Dotan).

Аби побудувати міст, інженери звели 4 опорні колони по краях стін каньйону. Міст зроблений з металевої рами з більш як 120 скляними панелями. Кожна з цих панелей є 3-шарова і являє собою 2-дюймову плиту з гартованого скла. До нижньої частини моста прикріплені три довгі гойдалки. Також є можливість до стрибка з висоти 285 метрів, так званий банджі-джампінг. Місце вважається найвищою точкою для подібних стрибків у світі.

Згідно з даними Комітету з питань управління мостом, міст встановив десять світових рекордів, зокрема охоплюючи такі його аспекти, як проектування та будівництво. Рекорд найдовшого скляного моста невдовзі побив міст у місцевості Хун'ягу, Хебей.

2 вересня 2016 року, всього через 13 днів після відкриття мосту, влада оголосила, що закриває його через величезний потік відвідувачів. Міст, розрахований на 800 осіб одночасно, і який, як очікувалося, відвідуватиме близько 8 тисяч осіб/добу, привабив понад 80,000 відвідувачів/день.

Влада заявила, що уряд вирішив призупинити діяльність моста внаслідок «терміновості вдосконалення та оновлення» атракцій, зокрема, йшлося про автостоянки, систему бронювання квитків та обслуговування клієнтів.

Міст було знову відкрито 30 вересня 2016 року.



Рис. 47. Скляний пішохідний міст Чжанцзяцзе (Китай)

29. Скляний міст Хун'ягу або Скляний міст Шицзячжуан (кит.: 悬跨式玻璃)

— скляний підвісний пішохідний міст, що перетинає ущелину Хун'ягу в повіті Піншань, округ Шицзячжуан, провінція Хебей, Китай.

Довжина мосту складає 488 метрів, висота над дном ущелини 218 метрів, ширина 4 метри. Станом на грудень 2017 року це був найдовший у світі скляний міст. Він складається з 1077 скляних панелей товщиною 4 сантиметри і загальною вагою 70 тон, що підвішені на конструкції зі сталевих тросів.

Міст Хун'ягу з'єднує дві скелясті вершини та є туристичним об'єктом в місцевості, відомій мальовничими гірськими пейзажами, природними водоспадами, стародавніми містами та храмами.

Розпочате 2014 року будівництво тривало три роки. За словами Ян Мінгуа, керівника Bailu Group, компанії, що збудувала міст, особливостями мосту є найбільший прогон і найбільша прозорість. Відкриття мосту відбулося 24 грудня 2017 року. Конструкція передбачає навантаження до 2000 осіб, але, з метою безпеки, одночасне перебування понад 500–600 відвідувачів не дозволяється.

Попередній рекорд найдовшого в світі скляного мосту належав скляному мосту Чжанцзяцзе, розташованому в провінції Хунань, Китай.



Рис. 48. Скляний міст Хун'ягу або Скляний міст Шицзячжуан (Китай)



Рис. 49. Скляний міст Хун'ягу або Скляний міст Шицзячжуан (Китай)

Найбільші та найвизначніші вантові мости та екстрадозні мости світу

Вважається, що перший вантовий міст побудовано в 1956 році в місті Стрьомсунд, Швеція.

Наведемо далі перелік і конструктивні дані та особливості найбільших та найвідоміших, найвизначніших вантових мостів світу:

1. Міст Ріо-Антіріо (Греція).
2. Віадук Мійо (Франція).
3. Великий Обуховський міст (Росія).
4. Міст Вашку да Гама (Лісабон, Португалія).
5. Міст Татара (Японія).
6. Мости Хіцуїсі-Дзіма та Івакуро-Дзіма (Японія).
7. Міст Нормандії (Франція).
8. Міст Цзінчжоу (Китай).
9. Ересунський міст (Данія – Швеція).
10. Міст Понте аль Індіано (Італія).
11. Міст Сутун (Китай).
12. Міст над Адою (Сербія).
13. Міст Аламільйо (Іспанія).
14. Міст Золотий Ріг (Туреччина).
15. Міст Жінки (Аргентина).
16. Міст королеви Єлизавети II (Англія).
17. Віадук Польчевера або Міст Моранді (Італія).
18. Міст Ніссібі (Туреччина).
19. Міст Сан Роке Гонсалес-де-Санта-Крус або Міжнародний міст Сан Роке Гонсалес-де-Санта-Крус (Аргентина і Парагвай).
20. Міст Саншайн-Скайвей імені Боба Грема (США).
21. Міст Семюеля Беккета (Ірландія).
22. Міст СНП (Словаччина).
23. Хуанпу Китай).
24. Міст через Суецький канал імені Хосні Мубарака або Міст єгипетсько-японської дружби (Єгипет).
25. Міст Янпу (Китай).
26. Міст «Нова Європа» або міст Видин–Калафат / Калафат–Видин (Болгарія і Румунія).
27. Міст Пенанг (Малайзія).
28. Міст на острів Руський (Росія).
29. Міст Султана Селіма Явуза (Туреччина).
30. Міст Кастилія-Ла-Манча (Іспанія).
31. Меморіальний міст ветеранів Стен-Мюзіал (США).
32. Меморіальний міст ветеранів, також відомий як Нью-Стьюбенвільський міст (США).
33. Другий міст Тунлін (Китай).
34. Міст Гонконг – Чжухай – Макао (Китай і Гонконг).
35. Міст Ячі (Китай).
36. Шанхайський великий міст через Янцзи (Китай).
37. Струнний міст (Ізраїль).
38. Міст через затоку Ханчжоувань (Китай).
39. Міст Медьєрі (Угорщина).
40. Міст Солідарності (Польща).
41. Другий Севернський міст (Велика Британія).
42. Вітчизняний міст, або Міст Батьківщини (Хорватія) – екстрадозний міст.

1. Міст Ріо-Антіріо (грец. Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου), офіційна назва Міст «Харілаос Трикупіс» — найбільший вантовий міст в Європі, що поєднав західний Пелопоннес через Коринфську затоку із західною частиною Центральної Греції, а саме міста Ріо та Антіріо.

Міст названо на честь прем'єр-міністра Греції Харилаоса Трикупіса, який першим висунув пропозицію спорудження мосту. Проте розпочати будівництво моста в 19 столітті економіка Греції не дозволяла, воно стало можливим тільки в середині 1990-х років. Генеральним підрядником став франко-грецький консорціум на чолі із французькою будівельною групою «Вінчі», який включив грецькі компанії Hellenic Technodomiki-TEV, J&P-Avax, Athena, Proodeftiki та Pantechniki. Головний архітектор проекту — Бердж Мікеліан.

Підготовка ділянки та роботи з поглиблення дна Коринфської затоки почалися в липні 1998 року, а будівництво масивних пілонів-опор — в 2000 році. Ці роботи закінчено 2003 року, після чого розпочався етап будівництва зі спорудження прогонової будови мосту та підтримуючих кабелів. 21 травня 2004 року основні будівельні роботи були завершені, залишалось обладнати тротуари, поручні, а також гідроізоляцію. Міст був нарешті відкритий 7 серпня 2004 року, за тиждень до відкриття літніх Олімпійських ігор 2004 року в Афінах.

Загальна вартість робіт склала близько € 630 000 000, які фінансувалися коштом грецької держави, консорціумом та позикою Європейського інвестиційного банку. Роботи завершено раніше графіка, за яким завершальний етап передбачався у вересні-листопаді 2004 року.

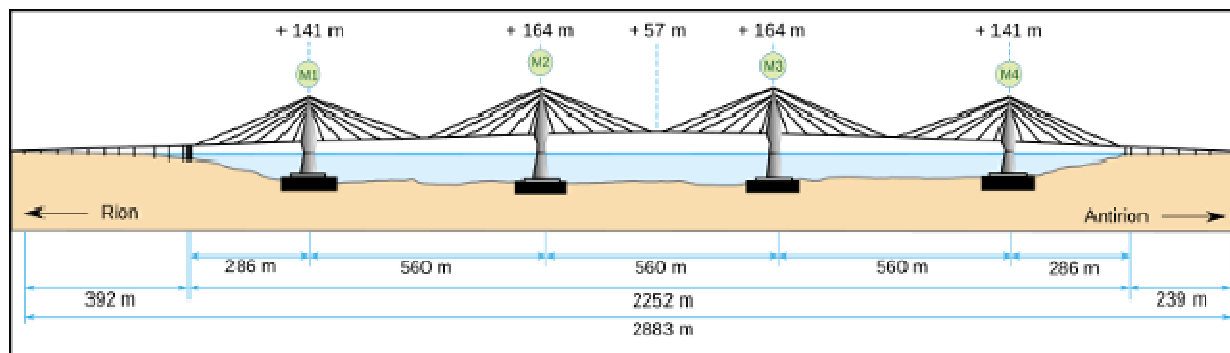


Рис. 50. Висотна схема моста Ріо-Антіріо (Греція)

Довжина мосту Ріо-Антіріо становить 2880 м, він поки що залишається найдовшим вантовим мостом в Європі. За довжиною основного прогону (560 м), він входить до першої десятки мостів у світі. Ріо-Антіріо — міст із найдовшою у світі підвісною балкою жорсткості (2252 м). Для порівняння, довжина балки жорсткості мосту Золота Брама у Сан-Франциско (США) становить 1966 м. Висота пілонів мосту становить 173,7 м. Ширина мосту — 27,5 м. Прогонова будова — стальна.

28 січня 2005 року, через шість місяців після відкриття мосту, один з кабелів на пілоні М3 обірвався та впав просто на міст. Рух автотранспорту було

негайно зупинено. Комісія фахівців встановила, що на пілоні МЗ виникла пожежа через удар блискавки. Кабель швидко відновили і міст знову відкрили.



Рис. 51. Міст Ріо-Антіріо (Греція), червень 2004 року

2. Віадук Мійо (фр. le Viaduc de Millau) – вантовий дорожній міст, що проходить понад долиною річки Тарн поблизу міста Мійо в південній Франції. Авторами проекту моста є французький інженер Мішель Вірложо (фр. Michel Virlogeux), відомий також проектом другого за довжиною вантового мосту у світі – моста Нормандії – і англійський архітектор Норман Фостер, що є також автором проектів аеропорту в Гонконзі та реставрації будівлі Рейхстагу в Берліні. Зараз це найвищий транспортний міст у світі. Одна з його опор має висоту 341 метр – це трохи вище, ніж Ейфелева вежа, і всього на 40 метрів нижче, ніж Empire State Building. Міст був урочисто відкритий 14 грудня 2004 року, а для руху автівок 16 грудня 2004 року. Охоронний статус мосту - Patrimoine du XXe siècle.

Міст є заключною ланкою траси А75, що забезпечує швидкісний рух з Парижу через Клермон-Ферран до міста Безьє. До створення мосту рух здійснювався уздовж національної траси № 9, що проходить поблизу Мійо, що, зазвичай, призводило до великих заторів в кінці літнього сезону. Багато туристів, що рухаються з південної Франції і Іспанії слідує саме цим шляхом, оскільки він один з найкоротших і, здебільшого, безкоштовний.

Траса A75 (la Méridienne) – проект, що розроблявся з метою збільшення швидкості і зниження вартості автомобільних пересувань з Парижа на південь. Він абсолютно безкоштовний впродовж 340 км між містами Клермон-Ферран і Безьє. Проте віадук був створений за контрактом французького уряду з «Ейфаж груп» – французькою будівельною компанією, що також створювала Ейфелеву вежу, – терміном дії на 75 років. Корпорація стягуватиме мито відповідно до тарифу: €4.90 для легкових автомобілів, за винятком пікових місяців – (€6.60 у липні та серпні); і €20 для великих автомобілів.



Рис. 52. Панорама віадук Мійо з півдня. На фотографії, зроблений 29 червня 2004 року видно червоні тимчасові опори

Міст перетинає долину Тарн в найнижчій її точці, і пов'язує плато Ларзака з Червоним плато. Міст проходить внутрішньою стороною периметра природного парку Велике плато.



Рис. 53. Стан будівництва віадук Мійо (початок 2004 року)

Віадук Мійо складається з восьми прогонових сталевих конструкцій, що

підтримуються сімома сталевими пілонами. Прогонова конструкція важить 36000 тонн, має довжину 2460 м, ширину 32 м і висоту 4,2 м. Кожен з шести центральних прогонів має довжину 342 м, два крайніх – по 204 м завдовжки. Дорога має невеликий ухил у 3% (нахилена з півдня на північ) і радіус викривлення 20 км, що дає водіям кращий огляд, дозволяє машинам рухатися по точнішій траєкторії, ніж якби це була пряма лінія, і додає віадукі ілюзію нескінченності. Рух здійснюється в дві смуги в кожному напрямку.



Рис. 54. Віадук Мійо (Франція)



Рис. 55. Віадук Мійо (Франція)

Кожна опора стоїть у чотирьох колодязях завглибшки 15 м і діаметром 5 м.

Висота опор						
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
94,501 м	244,96 м	221,05 м	144,21 м	136,42 м	111,94 м	77,56 м

Діаметр найвищої опори P2 – 24.5 м біля основи та 11 м на рівні прогонової конструкції. Кожна опора складається із 16 секцій, кожна секція важить 2230 т. Секції збиралися на місці з частин масою 60 т, 4 м завширшки і 17 м завдовжки.

Кожна з опор підтримує пілони заввишки 97 м. Спочатку були зібрані проміжні опори разом з тимчасовими опорами, потім зібрана прогонова конструкція, яка насувалася на опори за допомогою гідравлічних домкратів, керованих із супутника, зі швидкістю 600 мм кожні 4 хвилини.

3. Великий Обуховський міст (часто називають просто «Вантовим мостом») – вантовий нерозвідний міст через Неву. Розташований на межі Невського району Санкт-Петербурга і Всеволожського району Ленінградської області Росії в середній течії Неви. Він з'єднує проспект Обухівської оборони і Октябрську набережну. Один з найдовших мостів Росії.

Проектувальник Великого Обуховського мосту – ЗАТ Інститут «Стройпроект», генеральний підрядник – ВАТ Мостоотряд № 19. В будівництві мосту також брали участь: Мостоотряд № 10, Мостоотряд № 18, Мостоотряд № 90, МТФ Мостоотряд № 114, Мостоотряд № 125, які входять до складу Мостотресту (були зайняті на будівництві правобережної частини вантового мосту, а також з'їздів на лівому березі) та інші субпідрядні організації. Міст побудований в досить складній для навігації ділянці Неви, де річка далі робить так зване сліпе коліно, однак завдяки широко розставленим на обох берегах Неви пілонам заввишки 126 м і високим прольотом, міст зовсім не перешкоджає суднам, що пливають річкою.



Рис. 56. Великий Обуховський міст



Рис. 57. Великий Обуховський міст



Рис. 58. Великий Обуховський міст

Повна довжина мостового переходу становить 2824 метри, включаючи судноплавний проліт у 382 метри та з'їзди з мосту. Висота прогонової частини над поверхнею води (підмостовий габарит) дорівнює 30 метрам. Матеріал – залізобетон. Міст відкритий 15 грудня 2004 року.

4. Міст Вашку да Гама або Міст Васко да Гама (порт. Ponte Vasco da Gama, МФА: [põt(i) 'vaʃku dɐ 'gɐmɐ]) – вантовий міст, що переходить у віадук через річку Тежу у північно-східній частині міста Лісабон, Португалія. Найдовший міст у Європі (разом з віадуками і під'їзними дорогами). Його довжина становить 17,2 км, у тому числі 0,829 км основного мосту, 11,5 км – віадук, і 4,8 км під'їзних доріг. Головне призначення мосту полягає в тому, щоб зменшити затори на іншому мосту Лісабона (Міст 25 квітня) і з'єднати автошляхи, що розходяться з португальської столиці. Міст з 6 смугами для руху транспорту був урочисто відкритий у березні 1998 року. Конструктор та архітектор – Michel Virlogeux, Charles Lavigned і Armando Rito.

Рух по мосту було відкрито 29 березня 1998 року, через 18 місяців після початку будівельних робіт, перед міжнародною виставкою Експо 1998. У тому ж році відзначалося 500-річчя відкриття Васко да Гама морського шляху з Європи до Індії.

По мосту проходить шестисмугова автомагістраль з обмеженням швидкості до 120 км/год протягом більшої його частини і 100 км/год – на одній з його секцій.



Рис. 59. Панорамний вигляд мосту Васко да Гама

Секції мосту: Північна під'їзна дорога; Північний віадук – 488 м; Віадук Ехро – 672 м; 12 секцій; Головний вантовий міст – 420 м з боковими ділянками 203 м кожна (загальна довжина: 829 м); Центральний віадук – 6351 м з 80 секцій довжиною 78 м; Південний віадук – 3825 м з 84 секцій по 45 м; Південні під'їзні шляхи – 3895 м. Загальна довжина власне мосту – 12 345 м.

Проект було розбито на чотири частини, усі вони будувалися різними компаніями, а будівництвом керував незалежний консорціум. Безпосереднім будівництвом мосту займалося 3300 робітників, виконання робіт тривало 18 місяців, перед тим ще 18 місяців велася підготовка до будівництва.

Конструкція мосту розрахована на експлуатацію протягом 120 років, повинна витримати вітер швидкістю до 250 км/год і землетрус в 4,5 рази сильніший сумнозвісного Лісабонського землетрусу 1755 року (8,7 балів за шкалою Ріхтера). Найглибші палі мають 2,2 м в діаметрі, вони занурені на глибину 95 м нижче рівня моря. Через велику довжину мосту необхідно було врахувати викривлення Землі для правильного ведення будівельних робіт, в іншому випадку помилка в проектуванні в висоті мосту між протилежними його кінцями сягнула б 80 см. Для зменшення впливу мосту на екологію віадук будувався максимально далеко до другого берега з тим, щоб під ним залишилось природне середовище, освітлення було спроектоване таким чином, щоб світло ламп не потрапляло в річку.

Міст будувався на приватні кошти. Консорціум Lusoponte, що фінансував будівництво, отримав концесію на 40 років і має право отримувати платню за проїзд обома лісабонськими мостами. Капітал Lusoponte складається з 50,4% вкладів португальських компаній, 24,8% – французького і 24,8% – британського капіталу.

Із 2008 року плата за проїзд мостом – від 2,25 євро (для легкових автомобілів) до €10,10 (для вантажівок) лише у Лісабонському напрямку. Плату за проїзд в південному напрямку не передбачено.



Рис. 60. Міст Васко да Гама



Рис. 61. Панорамний вигляд мосту Васко да Гама

5. Міст Татара (яп. 多々羅大橋) – вантовий міст, що перетинає Внутрішнє Японське море Сето, розташований на межі префектур Хіросіма та Ехімі, Японія; 5-й за довжиною основного прогону вантовий міст у світі (1-й у Японії). Є частиною швидкісної автодороги 317 Нісісето (Ономіті – Імабарі) та системи

мостів Хонсю-Сікоку. Міст з'єднує острови Ікуті (територія міста Ономіті) на сході та острів Омісіма (територія міста Імабарі) на заході. Міст відкрито 1 травня 1999 року.

Довжина мосту – 1480 м. Конструктивно є двопілонний вантовий міст з основним прогоном довжиною 890 м. Вантова секція моста змінюється двома секціями (з обох боків) балочної конструкції. Додаткові прогони вантової секції – два по 270 і 320 м. Висота основних пілонів – 220 м. Пілони мають форму перевернутої букви Y.



Рис. 62. Міст Татара (Японія)



Рис. 63. Міст Татара (Японія)

На час відкриття міст був першим у світі вантовим мостом за довжиною основного прогону 890 м. Міст Татара втратив першість у 2008 році, коли був відкритий у Китаї вантовий міст Сутун через річку Янцзи з довжиною основного прогону 1088 м.

Ширина мосту – 26 м. Міст має 4 смуги руху (по обидва боки) для автомашин, максимальна дозволена швидкість для них – 80 км/год. Крім цього є доріжки для пішоходів та велосипедистів.

Будівництво мосту коштувало 605,8 млн доларів США.

6. Міст Сето (яп. 瀬戸大橋 Сето о:хасі, «Великий міст через протоку») – мостовий перехід через протоку Бісан Внутрішнього Японського моря (Сето-Найкай), що з'єднує острови Хонсю (місто Курасікі префектури Окаяма) та Сікоку (місто Сакаїді префектури Кагава), Японія.

«Це охасі» був задуманий як потужна лінія транспортних комунікацій, що дозволяє досягати Сікоку поїздом або автомашиною без втомливих пересадок з порому на пором, чиї рейси були обмежені частими туманами в протоці. Це найдовший у світі двоярусний комплекс із чотирисмугової автодороги (експрес-лінія Сето-Тюо) та швидкісної залізничної лінії «сінкансен» під нею (експрес-лінія Сето-охасі), що складається з витягнутих ланцюжком з півночі на південь на відстань п'яти віадуків та шести мостів кожен із власними іменами. Для зведення опор будівельники скористалися невеликими острівцями, розсипаними у Внутрішньому морі, найменша ширина якого тут становить 9,4 км.

Вантові мости в порядку прямування з півночі на південь:

- **Хіцуїсі-Дзіма** (櫃石島橋 Хіцуїсі-Дзіма-кё:) – двоярусний вантовий міст довжиною 790 м з найбільшим прогоном у 420 м (64–65-е місце у світі) на 2016 рік), що з'єднує острови Хіцуїсі та Івакуро. Однотипний своєму південному сусідові.
- **Івакуро-Дзіма** (岩黒島橋 Івакуро-Дзіма-ке:) – двоярусний вантовий міст довжиною 790 м з найбільшим прогоном в 420 м, що з'єднує острови Івакуро і Васа.



Рис. 64. Мости Хіцуїсі-Дзіма та Івакуро-Дзіма (Японія)

7. Міст Нормандії – вантовий міст, прокладений через гирло Сени (Франція), що сполучає міста Гавр (Приморська Сена) та Онфлер (Кальвадос), розташовані на правому (північному) та лівому (південному) берегах, відповідно.



Рис. 65. Міст Нормандії (Франція)

Міст виступає складовою ділянкою автомагістралі А29. Загальна довжина мосту становить 2141 метрів, причому довжина центрального прогону між двома пілонами становить 856 метрів. Висота конструкцій – 215 м. Матеріал – бетон і сталь. Побудований в 1988 році. Архітектор – Michel Virlogeux. Транспортна завантаженість мосту на 2007 рік становила 6,14 млн. автомобілів.

8. Міст Цзінчжоу – це великий мостовий комплекс, що перетинає річку Янцзи на південь від центру міста Цзінчжоу, провінція Хубей загальною довжиною 4397,6 м. Міст має два основних вантових прогони (північний і

південний) довжиною 500 і 305 метрів, відповідно. Міст має дев'ять прогонів коробчатих балок між двома великими прогонами з вантовими опорами, кожна розміром 151 метр. Міст має чотири смуги швидкісної автомагістралі G55 Еренхот–Гуанчжоу.



Рис. 66. Міст Цзінчжоу (Китай)

9. Ересунський міст (дан. , швед. Öresundsbron) — вантовий комбінований автомобільно-залізничний міст через Ересуннську протоку, що сполучає данський острів Зеландія зі Скандинавським півостровом (Швеція).

Будівництво мосту почалося в 1995 році, закінчилося в 1999 році. Конструктор, архітектор – Dissing та Weitling. Міст обійшовся в 3,8 млрд доларів США. На добу пропускає понад 60 тисяч автомобілів.

Початково міст використовували менше, ніж очікували, що в цілому пояснюється перехідним періодом. Проте у 2005 і 2006 роках спостерігалось швидке зростання обсягу перевезень по мосту. Це явище може бути пов'язане з покупками данців житла у Швеції та поїздками на роботу в Данію, тому що ціни на житло в Мальме нижчі, ніж в Копенгагені. У 2014 році вартість проїзду однієї машини через міст становила EUR 49 (проте для регулярних користувачів доступні знижки до 75%). У 2007 році майже 25 мільйонів осіб скористалося мостом.

Міст має одну з найдовших вант у світі — 490 метрів. Висота найвищого пілона 204 метри. Загальна довжина моста 7845 метрів, що становить приблизно половину відстані між шведськими і данськими берегами,

а його вага 82000 тонн. Матеріал – сталь і залізобетон. Ширина моста – 23,5 м. По мосту прокладено двоколіїну залізницю і чотирисмугову автомагістраль. Міст має вертикальний зазор 57 метрів, хоча більша частина руху суден проходить через Дрогденську протоку (над тунелем). Міст спроектувала компанія Arup.

Міст закінчується в середині Ересунн на штучно побудованому острові – Пебергольм. Острів 4 км завдовжки і декілька сот метрів завширшки, належить Данії і в наш час є природним заповідником.

Зв'язок між Пебергольмом і найближчою населеною частиною Данії йде через тунель, званий Drogdentunnelen (Дрогден-тунель). Довжина тунелю 4050 метрів, з них 3510 м під водою. Причиною створення тунелю замість побудови іншого мосту стала дуже близька відстань від аеропорту Копенгагена.



Рис. 67. Ересунський міст (Данія, Швеція)



Рис. 68. Ересунський міст (Данія, Швеція)



Рис. 69. В тунелі Ересунського мостового переходу

Залізничний громадський транспорт експлуатується спільно шведськими компаніями SJ і Skåne commuter rail та данською Danske Statsbaner.

Через міст поїзди йдуть вдень кожні 20 хвилин, і один раз на годину в нічний час. По мосту прокладена двоколійна стандартна колія (1435 мм), яка здатна пропускати потяги зі швидкістю, що перевищує 200 км/год. Були проблеми, пов'язані з різницею в електрифікації і сигналізації між данськими і шведськими залізничними мережами. Рішенням стало перемикання системи електропостачання зі шведських 15 кВ, 16,7 Гц на данську 25 кВ, 50 Гц змінного струму на Пебергольмі. Швеція має залізницю з лівостороннім рухом, а Данія – правосторонній рух. Перехід робиться на залізничній станції Мальме, яка є кінцевою. На шведському боці є з'єднання з Мальменським міським тунелем.

Вартість будівництва Ересуннського мосту, разом зі з'єднаннями автомагістралей і залізниць, була розрахована в 30,1 млрд данських крон в цінах 2000 року. Міст, як очікується, окупиться у 2035 році.

У 2010 році Швеція відкрила Мальменський міський тунель, який з'єднав Ересуннський міст з центральною залізничною станцією Мальме. Витрати на будівництво склали 9,45 млрд шведських крон.

10. Понте аль Індіано (італ. Ponte all'Indiano) – вантовий міст через річку Арно у Флоренції (Італія). Назва мосту походить від розташованого неподалік у відомому парку Кашине монументу аль Індіано (Monumento all'Indiano).



Рис. 70. Міст Понте аль Індіано (Флоренція, Італія)

Міст був побудований між 1972 р. і 1978 р. компанією Società C.M.F. S.p.A за проектом містобудівних архітекторів Адріано Монтеманьо і Паоло Сіка та інженера-конструктора Фабріціо де Міранда. Проект виграв національний конкурс, організований муніципалітетом Флоренції в 1968 році, і відразу ж

привернув до себе увагу, оскільки він включав в себе пішохідний мостик, який звисав нижче проїжджої частини. За тримальну конструкцію мосту інженер Фабріціо де Міранда в 1978 у Гельсінкі отримав європейську нагороду СЕСМ ECCS (European Convention for Construction Metallica). Цей міст став першим у світі вантовим мостом з великим прогоном (206 м), і одним з найбільших в Італії серед вантових мостів, збудованих у XX ст. Загальна довжина – 347 м. Ширина – 22 м. Кількість смуг руху – 4. Матеріал – сталь.



Рис. 71. Міст Понте аль Індіано (Флоренція, Італія). Вигляд під мостом

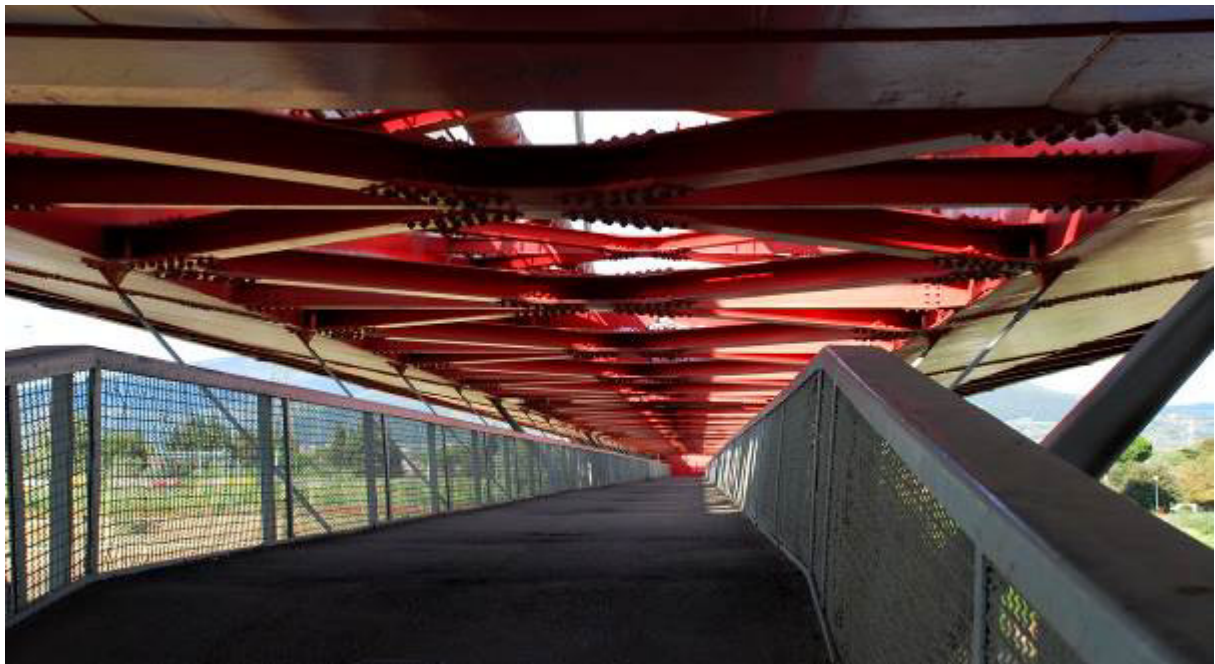


Рис. 72. Міст Понте аль Індіано (Флоренція, Італія). Пішохідний перехід

11. Міст Сутун (кит.: 苏通长江大桥) — вантовий міст, що перетинає Янцзи в Китаї між Наньтуном і Чаншу, містом-супутником Сучжоу, провінція Цзянсу.



Рис. 73. Міст Сутун (Китай)



Рис. 74. Міст Сутун (Китай)

Міст через річку Сутун Янцзи був спроектований доктором Робіном Шамом, CBE, FICE, інженером-конструктором, який народився в Гонконгу та

проживає в Британії, і спеціалізується на мостах. З розмахом 1088 метрів, з 2008 по 2012 рік це був вантовий міст із найдовшим головним прогоном у світі. Його два бічні прогони становлять 300 метрів кожен, а також є чотири невеликі прольоти кабелю. У 2010 році міст отримав нагороду за видатні досягнення в будівництві (OCEA) від Американського товариства інженерів-будівельників.

Два пілони мосту мають висоту 306 метрів і, отже, є п'яті за висотою у світі. Загальна довжина мосту 8206 метри. Матеріал мосту – залізобетон. Будівництво почалося в червні 2003 року, а з'єднали міст з мостовим переходом у червні 2007 року. Міст відкрили для руху 25 травня 2008 року, а офіційно він був відкритий 30 червня 2008 року. Вартість будівництва оцінюється приблизно в 1,7 млрд доларів США.

12. Міст над Адою (серб. Міст на Аді – дослівно Міст над островом) – вантовий чотирипрогоновий міст через річку Саву і східний край півострова Ада-Циганлія в Белграді, Сербія. Поєднує громади Чукариця (Баново-Брдо) та Нові-Београд (Блокові). Є найвищим мостом міста, другою за висотою спорудою у місті (після Авальської телевежі) та першим мостом міста, збудованим за останні 40 років.



Рис. 75. Міст над Адою (Сербія)

Міст побудований зі сталі та бетону, має загальну довжину 964 м (376 м – основний прогон, 338 м – бічний прогон, 200 м – задній прогон та 50 м –

кінцевий прогон). Ширина мосту складає 45 м, конструктивна висота – 200 м, відстань від нижньої частини дорожнього полотна до води – 22 м. Несе на собі шість смуг автомобільного руху півкільцевої дороги, що будується, дві смуги для руху метро, і два пішохідно-велосипедних тротуари. Вартість будівництва в серпні 2011 року оцінювалася в 118,6–120 мільйонів євро, але на момент відкриття склала 161 мільйон, хоча з урахуванням майбутнього будівництва багаторівневих розв'язок і станцій метрополітену, ймовірно, зросте до 450 мільйонів євро.

Основний прогон зроблений із конструкційної сталі та важить 8600 тонн, його утримують 80 тросів. Вночі міст підсвічується численними кольоровими світлодіодами.

Головний конструктор – Віктор Маркель, головний архітектор – Петер Габріелчич.

Перші попередні обговорення зовнішнього вигляду моста розпочалися у 2004 році. Дванадцять європейських компаній запропонували свої послуги, але перевагу віддали словенській Ponting, хоча в результаті в будівництві мосту брали участь понад десяток підрядників і субпідрядників як із Сербії, так і зі Словенії, Німеччини, Австрії, Швейцарії та Китаю. Будівництво розпочалося 1 грудня 2008 року та було закінчено за три роки. Урочисте відкриття мосту відбулося рівно опівночі із настанням нового 2012 року. Міст над Адою дозволив дещо розвантажити центр Белграда від автомобільних пробок, а зокрема знизити навантаження на Міст Газела.

13. Міст Аламільйо – міст через річку Гвадалквівір у Севільї, Іспанія. Міст побудований для сполучення з великим та пустельним островом Картуха, на якому Іспанія в 1992 році вирішила прийняти гостей Всесвітньої виставки Експо. Міст – творіння відомого іспанського архітектора Сантьяго Калатрави. Міст відображає високі прагнення міста Севільї в підготовці до виставки.



Рис. 76. Міст Аламільйо (Іспанія)

Міст складається з єдиної опори, що врівноважує мостовий перехід довжиною 200 м за допомогою тринадцяти кабелів. Матеріал – сталь. Спочатку мали намір побудувати два симетричних моста з обох сторін острова, але врешті вирішено було побудувати вражаючий проект Аламільйо.



Рис. 77. Міст Аламільйо (Іспанія)

14. Міст Золотий Ріг (тур. Haliç Metro Köprüsü) – вантовий міст у Стамбулі, Туреччина, яким проходить лінія стамбульського метро, перетинаючи затоку Золотий Ріг. Міст сполучає райони Бейоглу і Фатіх європейської частини міста. Міст розташовується між Галатським мостом і мостом Ататюрка, приблизно за 200 метрів на схід від останнього. Міст став четвертим мостом, що перетинає бухту Золотий Ріг. Початок експлуатації – 15 лютого 2014 року.

Проекти будівництва цього мосту з'явилися ще в 1952 році. Після схвалення планів будівництва ліній метро було вирішено побудувати міст, що перетинає бухту Золотий Ріг біля мечеті Сулейманіє. Міст при цьому мав відразу переходити в метротунелі з однієї й іншої сторони. У 2005 році було запропоновано 21 проект мосту, але жоден з них не гармонізував із загальним видом міста і бухти і не був схвалений. Вдалий дизайн пізніше презентував турецький архітектор Хакан Кіран, але і цей проект з самого початку був об'єктом дискусій. У листопаді 2009 року висота моста була скорочена з 82 до 65 метрів, оскільки стартова висота загрожувала Стамбулу виключенням з числа пам'яток ЮНЕСКО. Висота підвісних опор також скоротилася спочатку з 63 до 55 метрів, а пізніше до 47 метрів. Остаточний затверджений дизайн з параметрами моста був прийнятий в 2012 році.

Концепція моста була розроблена французьким архітектором Мішелем Вірлаже, який вже проектував міст султана Селіма (третій міст через Босфор). Турецький архітектор Хакан Кіран відповідав за архітектурний дизайн і за саме будівництво. Компанія Wieson Consulting Engineers & Architects проводила інженерні роботи. Основними забудовниками виступили італійська будівельна фірма Astaldi SpA і турецька Gülermak Ağır Sanayi İnşaat ve Taahhüt A.Ş. Почалося будівництво 2 січня 2009 року. Робота мосту в тестовому режимі почалася в лютому 2013 року, а 15 лютого 2014 міст було здано в експлуатацію. Витрати бюджету на будівництво склали 146.7 млн €.

Загальна довжина мосту становить 926 метрів, ділянка над водою становить 460 метрів. Проліт між опорами становить 180 метрів. Має двопілонну вантову систему з дев'ятьма вантами. На ширині мосту 12,6 метрів є дві залізничні колії, а також бічні пішохідні проходи.

На боці Ункапани на ділянці в 120 метрів міст розводиться, щоб великі судна могли також заходити в затоку Золотий Ріг.



Рис. 78. Міст Золотий Ріг (Туреччина)

15. Міст Жінки (ісп. Puente de la Mujer) — пішохідний міст у новому Пуерто-Мадеро, комерційному районі Буенос-Айреса, Аргентина. Він є розвідним мостом. Міст має одну щоглу з вантами і поворотну частину мосту, яка повертається на 90 градусів з метою пропуску водного транспорту.

Автором проекту був Сантьяго Калатрава. Зведення мосту почалось у 1998 році, а його відкриття відбулось 20 грудня 2001 року. Замовником будівництва був Фонд Лоренцо Альберто Гонсалеса. Основний прогон мосту – 100 м, загальна довжина – 170 м, ширина – 6,2 м.



Рис. 79. Міст Жінки (Аргентина)



Рис. 80. Міст Жінки (Аргентина). Розведення моста

16. Міст королеви Єлизавети II (англ. Queen Elizabeth II Bridge) — вантовий автодорожній міст через річку Темзу в Дартфорді, графство Кент, Англія. Поеднує Дартфорд з адміністративною одиницею Таррек графства Ессекс. Є частиною автомобільної дороги A282. Відкрито міст 30 жовтня 1991 року. На момент відкриття це був найдовший вантовий міст Європи, а з 1996 є другим за величиною у Великій Британії, після Другого Севернського моста.

Довжина моста складає 812 м, загальна довжина з підходами — 2872 м. Довжина центрального прогону — 450 м. Загальна висота пілонів становить 137 м (з яких 84 м над мостом і 53 м нижче прогонової будови). Підмостовий габарит становить 65 м, що дозволяє великим кораблям проходити через лондонський порт. Матеріал — сталь.

Будівництво моста розпочато в серпні 1998 року. Конструкція моста була розроблена німецьким інженером Хельмутом Хомбергом. Ця робота виявилася останньою великою роботою відомого інженера. Керівництво з будівництва взяла на себе організація Cleveland Bridge & Engineering Company. В цілому на будівництво самого моста було витрачено понад 120 млн фунтів стерлінгів і близько 30 млн — для проведення автомобільної траси до віадуку.

Будівництво моста було завершено 7 червня 1991 року. 30 жовтня 1991 року відбулося офіційне відкриття моста в присутності королеви Єлизавети II.



Рис. 81. Міст королеви Єлизавети II (Велика Британія) та вхід в тунель

Для зниження автомобільного навантаження на міст поряд є також тунель. За даними деяких дослідників в середньому через міст проїжджає близько 72700 автомобілів.



Рис. 82. Вид на міст королеви Єлизавети II (Велика Британія) з Грінхіта біля Кента

17. Віадук Польчевера або Міст Моранді (італ. Viadotto Polcevera, або Ponte Morandi) – внутрішній міський автодорожній міст у Генуї, Італія, створений за проєктом Рікардо Моранді, що перебував в експлуатації до 14 серпня 2018 року, коли обвалилося близько 240 метрів дорожнього полотна мосту. 28 червня 2019 року остаточно демонтований.

Основний прогон – 208 м, загальна довжина мосту – 1102 м, висота конструкцій – 45 м. Матеріал – залізобетон і попередньо напружений залізобетон.



Рис. 83. Вид на Віадук Польчевера або Міст Моранді (Італія). Панорама мосту до катастрофи. Червоним позначено постраждалу частину мосту

Автор проєкту – Рікардо Моранді, на честь якого і неофіційно названо міст.

Міст був побудований протягом 1962–1967 років організацією Società Italiana per Condotte' Acqua. Він став першим в Європі залізобетонним вантовим мостом такої конструкції. Всього для його будівництва було використано 50 тис. кубометрів попередньо напруженого залізобетону і 5 тис. тонн сталі.

Міст Генерала Рафаеля Урданети має таку ж конструкцію, що і Понте Моранді.

14 серпня 2018 через негоду обвалилося близько 240 метрів мосту разом з авто на ньому. Загинуло щонайменше 35 осіб. Ще 16 поранено. Серед поранених двоє українців.



Рис. 84. Вид на Віадук Польчевера або Міст Моранді (Італія). Панорама мосту до катастрофи. Це чотирьохсмуговий вантовий міст з трьома 90 — метровими пілонами

28 червня 2019 року частина мосту Моранді, що залишалася, була підірвана потужним вибуховим зарядом. Знесенню підлягають також будинки, що знаходилися у районі мосту.

Після прибирання уламків мосту Моранді одразу почалися роботи зі зведення несних конструкцій нового мосту. Генеральним підрядником є фірма Salini Impreglio.

18. Міст Ніссібі (тур. Nissibi Köprüsü) — вантовий міст через водосховище греблі Ататюрка на Євфраті на кордоні провінцій Адияман — Шанлиурфа в південно-східній Туреччині. Введено в експлуатацію 21 травня 2015 року.

З утворенням водосховища з греблею Ататюрка у 1992 році, міст на шосе Кяхта — Сіврек — Діярбакир було зруйновано річкою Євфрат. Трафік між Адиямане і Діярбакир був перенаправлений на південь маршрутом E99 через Шанлиурфа. Трафік також підтримувався поромами через водосховище. За для уникнення об'їзду, новий міст було спроектовано через водосховище греблею Ататюрка. Міст скоротив маршрут на 60 км.

Завершення земляних робіт відбулося 26 січня 2012 року, міст побудовано Gülsan Construction Co, названо на честь стародавнього міста Ніссібі розташованого в безпосередній близькості. Вантовий ортотропний

міст завдовжки 610 м і шириною 24,50 м. Основний прогон – 400 м. Обидва пілони мають 96 м заввишки. Міст має дві смуги руху в кожному напрямку.

Кошторисна вартість будівництва – 100 млн турецьких лір.

Міст був офіційно відкрито 21 травня 2015 року у присутності президента Реджепа Таїпа Ердогана.



Рис. 85. Міст Ніссібі (Туреччина)

19. Міст Сан Роке Ґонсалес-де-Санта-Крус або Міжнародний міст Сан Роке Ґонсалес-де-Санта-Крус (ісп. *Puente Internacional San Roque González de Santa Cruz*) – автомобільний вантовий міст через річку Парана, що з'єднує парагвайське місто Енкарнасьйон з аргентинським містом Посадас.



Рис. 86. Міст Сан Роке Ґонсалес-де-Санта-Крус або Міжнародний міст Сан Роке Ґонсалес-де-Санта-Крус (Аргентина і Парагвай)

Загальна довжина моста – 2550 м. Відкритий 2 квітня 1990 року.

Міст названий на честь одного з засновників держави езуїтів 17 сторіччя Роке Гонсалеса-де-Санта-Круса.

20. Міст Саншайн-Скайвей імені Боба Грема (англ. Bob Graham Sunshine Skyway Bridge) – автомобільний міст через затоку Тампа у штаті Флорида, США. Головний прогон моста – вантовий довжиною 366 м, загальна довжина моста – 6,6 км, ширина – 29 м, висота конструкції – 131 м, висота прогонової конструкції над водою – 53 м. Міст є частиною Шосе 19, що сполучає Сейнт-Пітерсберг в окрузі Пінеллас і Терра Сейя в окрузі Манаті та проходить над водами округу Гіллсборо. Кількість смуг руху – 4. Будівництво останнього варіанту конструкції моста розпочалось у 1982 році й завершилось 7 лютого 1987 року. Вартість робіт становила \$244 мільйони. Відкриття моста відбулось 20 квітня 1987 року. Новий міст замінив старий, частково зруйнований від зіткнення із судном у 1980 році.



Рис. 87. Міст Саншайн-Скайвей імені Боба Грема (США)

Для будівництва мосту використано сталь та бетон. Сталеві кабелі зібрані у 84-х 9-дюймових трубах (по 42 на кожен пілон) вздовж центральної лінії, вони підтримують головний прогон. Це елегантне технічне рішення згодом набуло широкого поширення, але в той час було новаторським. У вантового моста не може бути прогонів такої протяжності, як у підвісного, але будувати його набагато простіше. Полотно моста, що є частиною несної конструкції, складається з готових сегментів, які прикріплюються до опор. Полотно моста шириною 29 м і товщиною 4 м зроблено з пустотілого бетону і складається з сегментів масою до 200 т кожний (це безпрецедентна для збірного залізобетонного моста маса). Проєкт моста розроблено компанією Figg & Muller

Engineering Group, яка також виконала проект Семимильного мосту. Будівельні роботи провадила American Bridge Company.

У 2005 році мосту було присвоєно ім'я Боба Грема, губернатора Флориди з 1979 до 1987 року, при якому велось будівництво нового мосту. Твердять, що конструкція мосту була запропонована Гремом після поїздки до Франції, де він побачив Бротонський міст (фр. Pont de Brotonne) аналогічної конструкції. Попередній міст носив ім'я інженера Вільяма І. Діну, про що свідчить пам'ятна табличка біля південного краю мосту.

Телеканал Travel Channel включив Саншайн-Скайвей у список десяти кращих мостів світу під номером 3. Міст вважається головним мостом у Флориді.



Рис. 88. Вид на міст Саншайн-Скайвей імені Боба Грема (США) з поверхні затоки

До появи мосту через протоку ходив пором, що зв'язував Пойнт-Пінеллас та Пайні-Пойнт. Згодом при будівництві Шосе 19 на північ через протоку було перекинуто консольний міст, що мав ту ж назву. Побудований компанією Virginia Bridge Company, він мав дві смуги руху й став до ладу 6 вересня 1954 року. У 1969 році західніше паралельно до нього було збудовано аналогічний за конструкцією міст, що забезпечило чотирисмуговий рух. Відкриття другого мосту затрималось до 1971 року у зв'язку з потребою забезпечення підсилення конструкції південної головної опори, у якій з'явилися тріщини через недостатню глибину фундаменту. Після введення його в дію рух на кожному з мостів став одностороннім: старим східним мостом потік транспорту рухався на північ, новим західним — на південь.

Південна нитка мосту, введена в дію у 1971 році, зазнала руйнування о 7:33 ранку 9 травня 1980 року при зіткненні суховантажного судна «Summit Venture» з однією з опор в умовах грози й нульової видимості. 366 м прогону впали у затоку Тампа. Шість легкових автомобілів, вантажний автомобіль та автобус впали з висоти 150 м, що привело до загибелі 35 осіб. Катастрофу пережив один водій, пікап якого впав на палубу «Summit Venture», перш ніж опинитись у водах затоки. Він пред'явив позов компанії-власника судна і у 1984 році отримав компенсацію розміром \$ 175000. Капітан судна Джон Лерро був виправданий як журі присяжних, так і Службою берегової охорони, що проводила розслідування пригоди.

Південна головна опора, що потребувала зміцнення після завершення основної частини будівництва, витримала удар судна без значних ушкоджень. Зазнала руйнувань наступна опора, що розташовувалась південніше від головної, і для якої не передбачався такого роду силовий вплив.

Після аварії північний міст став використовуватись для руху в обох напрямках аж до завершення будівництва нового мосту. Перед тим як старий міст розібрали, єдина особа, яка вижила у катастрофі стала останньою людиною, що проїхала по ньому. Разом з ним в автомобілі була його дружина. Діставшись до найвищої точки мосту, вони скинули у воду 35 білих гвоздик — по одній за кожного загиблого у катастрофі.

Головний прогон північного мосту було демонтовано у 1993 році, а в'їзди на міст були перетворені у парк штату Skyway Fishing Pier State Park.

У 1990 році Департамент транспорту Флориди на конкурсній основі найняв компанію Hardaway Company для знесення старого мосту. За вимогами технічного завдання ніяких конструкцій над і під поверхнею води не повинно було залишатися. Особливої уваги потребувало знесення конструкцій біля фарватеру. Крім того, матеріал конструкцій слід було перевезти до берегів, щоб вони разом з під'їздами до мосту утворити штучні рифи, котрі планувалось включити у новий риболовецький парк штату. Головний прогон слід було демонтувати єдиною конструкцією, щоб його елементи не перешкождали рухові суден у порт.

При демонтажі конструкцій мосту було вирішено багато інженерних задач: визначено послідовність демонтажу, розроблений безпечний метод підриву бетонних і сталевих елементів у відкритій зоні затоки, вироблена технологія зняття і вивезення конструкції головного прогону. Після численних досліджень команда інженерів підготувала план одночасного синхронізованого зняття головного прогону за допомогою двох кранів на баржі. План був успішно реалізований за 2,5 години незважаючи на несприятливі погодні умови.

Пропозиція губернатора Грема щодо конструкції нового мосту отримала перевагу над іншими ідеями. Головний прогон нового мосту був на 50% довшим від старого. Головні та другорядні опори на довжині 0,4 км у кожному напрямі отримали захисні острівці, здатні витримати удар судна, більшого за розмірами від «Summit Venture».

21. Міст Семюеля Беккета (ірл. Droichead Samuel Beckett, англ. Samuel Beckett Bridge) – вантовий міст, який з'єднує північний і південний береги річки Ліффі у Дубліні. Розташований у східній частині ірландської столиці, в районі Docklands. Названий на честь ірландського письменника Семюеля Беккета. Спроектований іспанським архітектором Сантьяго Калатравою. Це другий міст цього архітектора у Дубліні. Перший міст – Джеймса Джойса – розташований вище за течією Ліффі.

Довжина мосту – 123 м, висота – 48 м, ширина – 33 м. Міст тримається на 31 вантах і здатний повертатись на 90 градусів, відкриваючи шлях суднам, що проходять по річці. Це забезпечується вбудованим в основу пілона ротаційним механізмом. Матеріал – сталь. Міст розділено на автомобільну смугу, велодоріжку та пішохідну зону. Міст зовні схожий на арфу – політичний символ Ірландії.

Будівництво мосту почалось у 2007 році. Кошторисна вартість проекту спочатку оцінювалась в 11 мільйонів євро, але з часом зросла до 60 мільйонів. Збирання здійснювалось у Роттердамі на підприємстві, яке свого часу займалось виготовленням сталевих конструкцій Лондонського ока. Міст було перевезено до Ірландії у травні 2009 року.

Для пішоходів міст було відкрито 10 грудня 2009 року. В майбутньому по мосту Семюеля Беккета планувалось прокласти трамвайну лінію, але у 2013 році з цією метою було розпочато будівництво іншого мосту (Rosie Hackett Bridge).



Рис. 89. Міст Семюеля Беккета (Ірландія)



Рис. 90. Міст Семюеля Беккета. Транспортування мосту по річці Ліффі (13 травня 2009 року)

22. Міст СНП (словац. Most SNP; з 1993 до 2012 – Новий Міст, словац. Novy Most). А повна назва моста на словацькій мові «Most Slovenského národného povstania». Це вантовий однопільонний автомобільний (комбінований) міст через Дунай в Братиславі. Міст з'єднує два береги Братислави й знаходиться в районах Петржалка і Старе Місто. Також є найбільшим мостом в Братиславі, а також єдиним мостом який не має водних опор. З 1993 по 2012 роки, був виключно автомобільним мостом, проте у 2012 році завершилося будівництво другого рівня для велосипедистів і пішоходів. Міст входить до всесвітньої федерації найвищих веж і є єдиним мостом в рамках цієї організації. Крім того, з 2018 року міст є об'єктом культурної й національної спадщини Словаччини.

Будівництво моста почалося в 1967 році за проектом архітекторів Йозефа Лака, Ладислава Кушніра та Івана Сламеша. Інженерами виступили Арпад Тесар і Йозеф Звар. Будівництво завершилося в 1972 році, а урочисте відкриття мосту відбулося 26 серпня 1972 року і було приурочене до 26-ї річниці Словацького національного повстання. Довжина основного прогону моста 303 м, загальна довжина складає 430,8 м, міст має ширину 21 м і вагу в 7537 т. Висота конструкцій 95 м. На верхньому рівні розташовані чотири смуги руху для автотранспорту, а на нижньому рівні – смуги для велосипедів і пішоходів. На момент відкриття міст входив в четвірку найбільших в світі вантових мостів.

В рік міст відвідують більше 200 000 осіб. Головною пам'яткою моста є конструкція у формі летючої тарілки на пілоні моста, в якій розташований ресторан на вершині опори на висоті в 95 метрів під назвою «UFO». У ресторані є також спеціальний оглядовий майданчик, з якого відкривається панорамний вид на Братиславу. В гарну погоду з оглядового майданчика відкривається вид на відстань до 100 км.



Рис. 91. Міст СНП (Словаччина)

23. Хуанпу (кит.: 黄埔大桥) — комбінований мостовий перехід, що перетинає річку Чжуцзян, розташований в місті Гуанчжоу; 17-й по довжині основного прогону вантовий міст у світі (8-й в Китаї). Включає також і підвісний міст.

У період 23 грудня 2003 — 14 лютого 2005 року тривало будівництво вантової секції мостового переходу. 28 березня 2008 року закінчилась будівництво підвісної секції. 16 грудня 2008 року мостовий перехід Хуанпу відкритий для руху в складі національної швидкісної автодороги, що зв'язує Гуанчжоу з Макао.

Довжина — 7016 м. Являє собою по два підходи з обох сторін (довжина північного підходу до вантової секції — 1 775 м, південного до підвісної — 3 080 м), підвісний міст з основним прогоном довжиною 1 108 м (над південно-західним проходом річки), естакадний перехід між мостами на острові річки Чжуцзян, вантовий міст з прогонами по 322 і 383 м (останній над північно-

східним проходом річки). Висота пілона вантової секції становить 226 м, підвісної – 189 м. Матеріал – залізобетон.

Має 8 смуг руху (по 4 в обидві сторони).



Рис. 92. Міст Хуанпу (Китай)

24. Міст через Суецький канал імені Хосні Мубарака або Міст єгипетсько-японської дружби – автомобільний міст, що перетинає Суецький канал в Аль-Кантара. Арабською мовою «Аль-Кантара» означає «міст».

Тип конструкції – вантовий міст, головний прогон – 404 м, загальна довжина – 3900 м, ширина моста – 10 м, висота пілонів 154 м, нижній просвіт над дзеркалом води 70 м. Максимальна висота суден, які можуть проходити через Суецький канал (Суецмакс) становить 68 м над ватерлінією. Матеріали моста сталь, залізобетон. Дата відкриття – 9 жовтня 2001 року.

Цей міст був побудований за допомогою японського уряду. Підрядник – консорціум Kajima Corporation[en], JFE Holdings, Nippon Steel[en] .

Японський грант, на який припадає 60% від вартості будівництва (або 13,5 млрд ієн), був досягнутий домовленістю в ході візиту президента Мубарака в Японію в березні 1995 року, як частина більшого проекту індустріалізації Синайського півострова. Єгипет вніс решту 40% (9 млрд ієн).



Рис. 93. Міст через Суецький канал імені Хосні Мубарака або Міст єгипетсько-японської дружби (Єгипет)

25. Міст Янпу (кит.: 杨浦大桥; trad. китайська: 楊浦大橋) — вантовий міст через річку Хуанпу в Шанхаї, Китай. З'єднує райони Янпу та Пудун. Загальна довжина мосту становить 8354 м, довжина центрального прогону становить 602 м, що робить його четвертим за довжиною вантовим мостом у світі. Висота двох пілонів дорівнює 223 м. Будівництво мосту було завершено в 1993 році.

Проект мосту було розроблено Шанхайським муніципальним інженерно-проектним інститутом, Шанхайським коледжем міського будування та Шанхайським інститутом міського планування. Будівництвом мосту займалася Шанхайська мостобудівельна компанія Хуанпуцзян.



Рис. 94. Міст Янпу (Китай)

26. Міст «Нова Європа» або міст Видин—Калафат / Калафат—Видин (болг. мост Видин—Калафат; рум. podul Calafat—Vidin) — найновіший міст через Дунай, що сполучає болгарське місто Видин та румунське місто Калафат.

Він входить до четвертого пан'європейського транспортного коридору і Європейського маршруту E79. Має ключове значення для південно-східної транспортної осі Європи з його можливостями комбінованих перевезень і перенесенням певних обсягів трафіку з автомобільного на залізничний транспорт.

За конструкцією це вантовий міст із залізобетону. Загальна довжина моста становить 3598 метрів, а над водою — 1791 метр. Число прогонів — 13, основний — 180 метрів. Ширина мосту — 31 м. По мосту прокладено 4 смуги для автомобілів, залізнична лінія, одна велосипедна доріжка та дві пішохідні.

Початок будівництва — 2007 рік. Міст офіційно відкрито 14 червня 2013 року, а вже з 15 червня 2013 року він в експлуатації.

Починаючи з 1 липня 2013 збір за користування мостом складає:

Транспортний засіб	Євро	Лев	Лей ^[4]
До 8+1 пасажирських місць або вагою до 3,5 т	6 євро	12 левів	27 лейв
Від 9 до 23 пасажирських місць або вантажівки вагою до 7,5 т	12 євро	23 леви	54 леї
Вантажівки вагою до 12 т	18 євро	35 левів	81 лей
Понад 23 пасажирських місця або вантажівки вагою понад 12 т (до 3-х колісних пар включно)	25 євро	49 левів	113 лейв
Вантажівки вагою понад 12 т (від 4-х колісних пар)	37 євро	72 леви	167 лейв
Пішоходи, велосипедисти	безоплатно	безоплатно	безоплатно



Рис. 95. Міст «Нова Європа» або міст Видин—Калафат (Болгарія і Румунія)

27. Міст Пенанг (малай. Jambatan Pulau Pinang) в Малайзії являє собою вантовий автомобільний міст, який з'єднує місто Гелугор на острові Пенанг з материковою частиною штату Пенанг – Себеранг Перай на Малайському півострові.

Будівництво було розпочато в 1982 році, відкриття мосту для громадського транспорту відбулося 14 вересня 1985 року. Витрати на будівництво склали RM 800 млн (175 млн євро), за винятком витрат на покупку землі. Загальна довжина моста становить 13,5 км, що робить його одним з найдовших у світі та найдовшим мостом на території Південно-Східної Азії. Основний прогон 225 м. Висота конструкції 101,5 м. Відстань від води до прогонової будови 33 м. Пенанзький міст є символом острова Пенанг.



Рис. 96. Міст Пенанг (Малайзія)



Рис. 97. Міст Пенанг (Малайзія)



Рис. 98. Міст Пенанг (Малайзія)

28. Міст на острів Руський (рос. Русский мост) — вантовий міст у Владивостоці, що з'єднав півострів Назімова з мисом Новосильського на острові Руському. Будівництво розпочато 3 вересня 2008 року в рамках програми підготовки міста до проведення саміту АТЕС в 2012 році. Має третій в світі прогон серед вантових мостів з довжиною 1104 метра — після мосту Акасі (1991 м) та Мосту Великий Бельт (1624 м). І є п'ятим за висотою пілонів — 324 м. Збудований під керівництвом українського інженера, генерального директора фірми «МОСТ» Євгена Сура.

Загальна вага головної металевої балки жорсткості руслового прогону — 23000 т. Загальна довжина мосту — 1885,53 м. Загальна протяжність з естакадами — 3100 м. Схема мосту: 60 +72 +3 × 84 +1104 +3 ×84 +72 +60 м. Довжина центрального руслового прогону — 1104 м. Ширина мосту — 29,5 м. Загальна ширина проїжджої частини — 21 м. Число смуг руху — 4 (2 в кожную сторону). Підмостовий габарит — 70 м. Кількість пілонів — 2. Висота пілонів — 324 м. Найдовша/найкоротша ванта — 579,83/135,771 м.

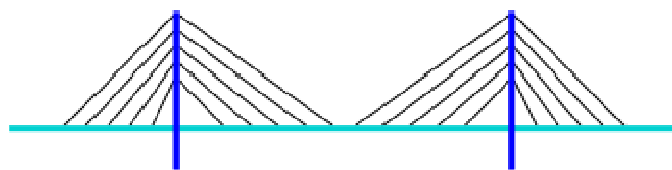


Рис. 99. Тип моста на острів Руський — з розташуванням вант за системою «арфа»

Для міцності та надійності моста під кожен з двох 324-метрових пілонів було встановлено 120 буронабивних паль.

На будівництво мосту було витрачено 33,9 млрд рублів бюджетних коштів.



Рис. 100. Міст на острів Руський (Росія)

29. Міст Султана Селіма Явуза (тур. Yavuz Sultan Selim Köprüsü), також Третій Босфорський міст (тур. Üçüncü Boğaz Köprüsü) — міст через Босфор, розташований на півночі Стамбулу, Туреччина, практично в гирлі Босфору, біля берега Чорного моря. На момент відкриття у серпні 2016 року він став найширшим та найвищим мостом у світі. Він також посідає 9-е місце у світі за довжиною основного прогону.

Проект мосту розробив французький інженер Мішель Вірложе (Michel Virlogeux) разом з інженерною фірмою Jean-François Klein з Женеви (Швейцарія). Початок виконання проекту був запланований турецьким урядом на січень 2012 року. Крайній термін подачі заявок на виконання будівельних робіт сплив 10 січня 2012 року. Однак не було представлено ніяких пропозицій через відсутність фінансування проекту. Договір на будівництво був укладений тільки 31 жовтня 2012 року.

Будівництво розпочато 29 травня 2013 року — в річницю завоювання Константинополя. Загальне керівництво проектом здійснювали турецька фірма IC İctaş та італійська Astaldi. Головними підрядниками були південнокорейські підприємства Hyundai Engineering & Construction та SK Engineering & Construction J. V., а серед субпідрядників — чисельні турецькі фірми. Монтаж основних елементів виконав румунський плавучий кран великої вантажопідйомності GSP Neptun.

Загальна вартість проекту і будівництва (точно невідома) коливається від \$2,5 млрд до \$4,5 млрд. Початок регулярного руху — 27 серпня 2016 року.

З 1 вересня 2016 року ціна проїзду для приватного транспорту 9.90 турецьких лір (прибл. 3 дол. США).



Рис. 101. Міст Султана Селіма Явуза (Туреччина)

Міст має комбіновану конструкцію — вантово-підвісний. Загальна довжина мосту — 2164 м, довжина основного прогону — 1408 м. Ширина — 58,4 м. Матеріал — залізобетон. Міст має вісім швидкісних смуг руху і двокільонну залізницю (європейська колія). Пішохідний рух заборонений. Це найширший у світі міст, а також найдовший у світі підвісний міст із залізничними коліями. Висота пілона, встановленого у селищі Гаріпче — 322 м, висота іншого пілона, що у районі Пойразкей — 318 метрів. Міст також є найвищим у світі по висоті мостових опор.

Залізниця, яка перетинає міст, іде від Едірне, через Ізміт до Стамбулу, крім цього коліями прямують потяги метро, а також вона зв'яже аеропорти: Міжнародний аеропорт Ататюрк, Стамбул-Сабіха Гекчен та Новий аеропорт Стамбулу.

Міст з'єднує райони Стамбула Гаріпче (європейська сторона) та Пойразкей (азійська сторона). Є частиною споруджуваної Північно-Мармурової автостради, яка надалі буде інтегрована з чинною чорноморською прибережною автострадою, і дозволить транзит трафіку в обхід міського руху.

Міст названо на честь османського султана Селіма I Явуза (1465–1520).



Рис. 102. Будова прогонової конструкції моста Султана Селіма Явуза (Туреччина)

30. Міст Кастилія-Ла-Манча (Castilla-La Mancha), Іспанія.

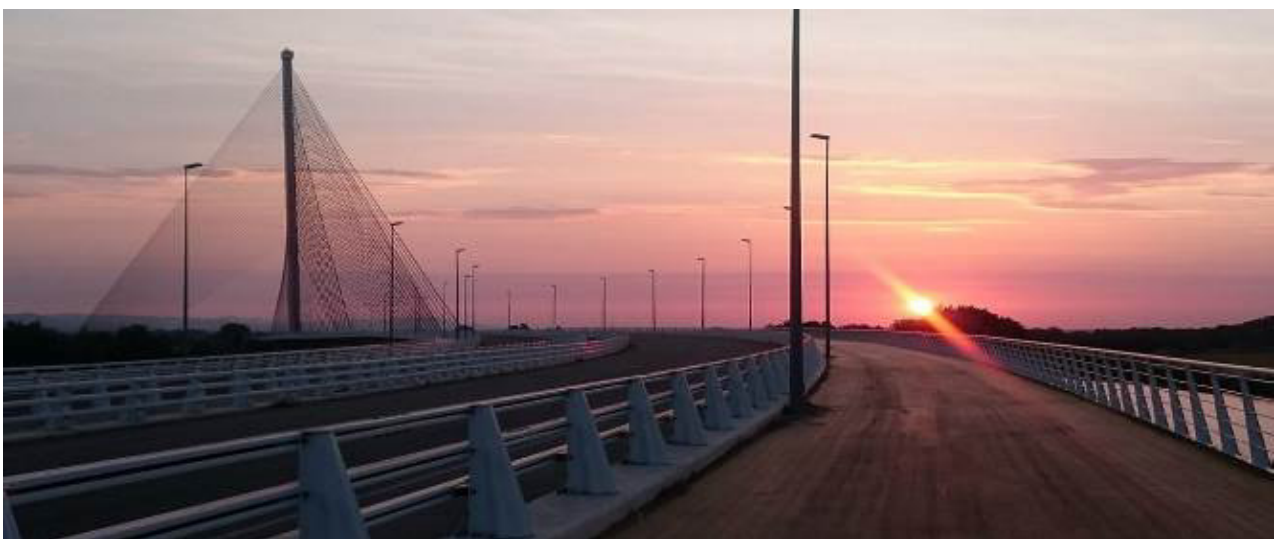


Рис. 103. Міст Кастилія-Ла-Манча (Іспанія)

Міст складається з вантового мосту довжиною 318 м, який одним прогоном охоплює найширший рукав річки Тежу, і під'їзного віадук довжиною 408 м. Цей вантовий міст є інженерним вундеркіндом, це світовий рекорд у типі вантових мостів з однією щоглою з високоміцного попередньо напруженого бетону, з найвищим похилим пілоном у Європі, розміром 192 м.



Рис. 104. Міст Кастилія-Ла-Манча (Іспанія)

31. Меморіальний міст ветеранів Стен-Мюзіал (Stan Musial – відомий як Новий міст через річку Міссісіпі до офіційної назви в 2013 році та неофіційно відомий як «Стен-Спан») – міст через річку Міссісіпі в США між Округ Клер, штат Іллінойс, і місто Сент-Луїс, штат Міссурі. Побудований між квітнем 2010 року та липнем 2013 року, міст був відкритий 9 лютого 2014 року. Вантовий міст має основний прогон 460 м, що є частиною загальної довжиною в 854 м. Його ширина становить 26 м. Кабелі тягнуться від настилу мосту до вершин двох А-подібних пілонів, які сягають 133 м. Основний прогон нового мосту підтримується 1600 км тросу діаметром 1,5 см. Використано майже 15000 т конструкційної сталі та 8600 т арматурної сталі. Близько 69 300 m^3 бетону знаходяться у фундаменті, плиті прогонової будови та пілонах. Після завершення будівництва міст був третім за довжиною вантовим мостом у Сполучених Штатах.



Рис. 105. Меморіальний міст ветеранів Стен-Мюзіал (США)



Рис. 106. Меморіальний міст ветеранів Стен-Мюзіал (США)

32. Меморіальний міст ветеранів, також відомий як **Нью-Стюбенвільський міст**, — це вантовий міст, який прокладає американський шлях 22 через річку Огайо між Стюбенвіллем, штат Огайо, та Вейртоном, штат Західна Вірджинія. Планування мосту почалося в 1961 році в Огайо і в 1964 році в Західній Вірджинії. Будівництво мосту було схвалено Федеральним управлінням автомобільних доріг у 1978 році. Будівництво почалося в 1979 році, а міст був відкритий 1 травня 1990 року. Остаточна вартість мосту склала 70 млн доларів.

Довжина моста – 598,6 м. Найдовший прогон – 250 м. Ширина – 24,7 м.

Дизайнер – Майкл Бейкер.



Рис. 107. Меморіальний міст ветеранів Нью-Стьюбенвільський міст (США)

33. Другий міст Тунлін (кит.: 铜陵长江公铁大桥) – комбінований мостовий перехід, що перетинає річку Янцзи, розташований на території міських округів Уху та Тунлін. Найдовший по параметру основного прогону вантажно-автомобільно-залізничний міст у світі; 18-й по довжині основного прогону вантовий місту у світі (12-й в Китаї). Є частиною швидкісної автодороги S32 Сюаньчен – Тунлін (Xuandong Expressway), швидкісних залізниць Хефей–Фучжоу та Нанкін–Уху. Початок будівництва 18 квітня 2010 року. Відкритий 28 червня 2015 року.

Міст з'єднує північний та південний береги річки Янцзи, відповідно, повіт Увей міського округу Уху з повітом Тунлін міського округу Тунлін.

Довжина мостового переходу – 16719 м, в тому числі міст 1290 м. Мостовий перехід представлений секцією двоярусного двопілонного вантового мосту над річкою Янцзи з довжиною основного прогону 630 м, на півночі з секцією балочної конструкції. Міст над руслом змінюється двома мостовими підходами (естакадами) з обох сторін. Верхній ярус вантового моста автомобільний, нижній – залізничний; мостові підходи представлені парою

естакад для різного транспорту. Прогонові будови нижнього ярусу вантового мосту над річкою виготовлені у вигляді ґратчастих конструкцій – ферм. Додаткові прогони мосту – два по 240 м і два по 90 м. Висота основних пілонів – 210 м. Пілони мають форму перевернутої букви У.

Має 4 залізничні лінії (по дві в обидва боки та різних ліній) на нижньому ярусі для руху поїздів зі швидкістю 200 км/год (на лінії Хефей–Фучжоу) і 160 км/год (на лінії Нанкін–Уху); 6 смуг руху (по три в обидва боки) на верхньому ярусі з допустимою швидкістю руху автотранспорту 100 км/год.

Є другим мостом через річку Янцзи на території міського округу Тунлін. Кошторисна вартість моста - в 3,7 млрд. юанів.



Рис. 108. Другий міст Тунлін (Китай)

34. Міст Гонконг – Чжухай – Макао (кит. трад.: 港珠澳大橋; пінйінь: Gǎng Zhū Ào Dàqiáo) – автомобільний міст завдовжки 49,6 км. Має у своєму складі три вантові мости, два насипних острови і секцію зануреного тунелю (завдовжки 6,7 км). Має шість смуг руху та сполучає Гонконг, Макао і Чжухай, три великих міста у дельті річки Чжуцзян, Китай. Кошторисна вартість проекту – US\$10.6 млрд. Будівництво офіційно було розпочато 15 грудня 2009 року. Міст мав бути завершений наприкінці 2017 року, але введення в експлуатацію було відкладено до кінця

2018 року. Введення його в експлуатацію затримувалось через узгодження механізмів здійснення прикордонного контролю, оскільки Гонконг і Макао є спеціальними адміністративними районами Китаю. Підконтрольна Гонконгу ділянка мосту становить 12 км, а підконтрольна Макао – 13,9 км. Офіційне відкриття мосту відбулося 23 жовтня 2018 року.

Міст спроектувала британська Arup, а побудувала китайська China Communications Construction.

Час у дорозі між Гонконгом і Макао скорочується до 30 хвилин. До відкриття мосту автомобілі здійснювали 200 км об'їзд по мосту Хумень на півночі; час в дорозі – 3,5 години.

Два штучні острови, на яких розташовані в'їзди в тунель, обладнані різною інфраструктурою для водіїв і транспорту. Кожен острів укріплений 120 сталевими палями діаметром 22,5 м і довжиною 55 м кожна.

Підводний тунель максимальною глибиною понад 40 м є найдовшим у Китаї (6,7 км), а також єдиним у світі тунелем у відкритому морі.



Рис. 109. Міст Гонконг – Чжухай – Макао (Китай і Гонконг)

Міст має також три секції вантового моста із прогонами завдовжки 280–460 м для вільного проходження морських суден.

Мінімальна ширина мосту – 33,1 м, ширина тунельної ділянки – 14,2 м. Загальна площа поверхні основної ділянки моста – понад 700 тис. м².

Автомобілі на мосту рухаються по двох трисмугових автомагістралях у кожному з напрямків. Швидкість руху – до 100 км/год. Пропускна

спроможність мосту – 11 автомобілів на хвилину. До 2035 року вона має зрости в чотири рази і скласти 40 автомобілів на хвилину.

На будівництво основної частини мосту пішло 400 тисяч тонн сталі.

Гарантійний термін експлуатації мосту 120 років. Міст має витримати пориви вітру швидкістю до 180 км/год, удар вантажного судна вагою 300 тис. т та землетрус магнітудою 8 балів за шкалою Ріхтера.

35. Міст Ячі (кит.: 鸭池河特大桥) – міст, що перетинає річку Ячі, розташований на межі міських округів Біцзе та Гуйян. Цей вантовий міст 10-й за довжиною основного прогону у світі (5-й в Китаї); 14-й міст у світі за висотою над перешкодою (12-й в Китаї). Є частиною швидкісної автодороги G76 Сяминь – Ченду. Міст сполучає західний і східний береги річки Ячі. Відкритий у липні 2016 року.



Рис. 110. Міст Ячі (Китай)

Довжина – 1466,5 м. Є двопілонним вантовим мостом з основним прогоном завдовжки 800 м, який змінюється двома секціями балкової конструкції з обох сторін. Прогони моста $72 + 72 + 76 + 800 + 76 + 72 + 72$ м. Висота мостових пілонів: східного – 243,2 м та західного – 258,2 м. Крім вантів прогонові балки жорсткості (з дорожнім полотном) також підкріплені знизу фермовими конструкціями для збільшення стійкості і несної здатності прогону. Пілони мають форму букви Н. Дорожнє полотно моста знаходиться на висоті

440 м над річкою, фактична висота над водоймою дамби Донфен на річці Ячі – 306 м.

Ширина мосту – 27, 9 м. Має чотири (по дві в обидві сторони) смуги руху.

Один з перших вантових мостів в Азії, побудований в гірській місцевості. Вартість будівництва мосту – 8,6 млрд юань

36. Шанхайський великий міст через Янцзи (кит.: 上海长江大桥) починається біля виїзду з тунелю, проходить по острову Чансіндао на рівні землі, а потім перетинає Янцзи, закінчуючись на острові Чунміндао в селищі Ченьцзячжень.

Міст складається з двох довгих віадуків і високого вантового мосту між ними, що дозволяє суднам проходити по річці. Загальна довжина моста становить 16,63 км, з яких 6,66 км – це дорога по острову Чансіндао, і 9,97 км – власне міст. Міст не є прямолінійним, він має дещо S-подібну форму. Центральний вантовий прогон має довжину 730 м, що робить його 10-м по довжині вантовим прогоном моста у світі. Матеріал – залізобетон. Відкриття мосту - жовтень 2009 року.



Рис. 111. Шанхайський великий міст через Янцзи (Китай)

Рух по мосту здійснюється по трьох смугах в кожному напрямку, дозволена швидкість – 80 км/год. Простір по обидва боки мосту зарезервовано для майбутньої лінії метрополітену.

Шанхайський тунель під Янцзи (кит.: 上海长江隧道) починається на південному березі Янцзи в Ухаогоу у районі Пудун, та закінчується на південному березі острова Чансіндао. Має довжину 8,9 км і є дворівневим: верхній рівень призначений для автомобільного руху і має по три смуги в кожному напрямку (дозволена швидкість – 80 км/год), нижній рівень зарезервовано для майбутньої лінії метро.



Рис. 112. Шанхайський великий міст через Янцзи (Китай)

37. Струнний міст (івр. גשר המיתרים, Гешер га-Мейтарім) — вантовий міст з бічними лонжеронами в Єрусалимі, Ізраїль. Конструкцію розробив іспанський архітектор та інженер Сантьяго Калатрава. Мостом проходить червона гілка трамваю, яка розпочала роботу 19 серпня 2011 року. Пішохідна частина дозволяє переходити від Кір'ят-Моше до центрального автовокзалу Єрусалиму та залізничної станції «Іцхак Навон». Міст, будівництво якого коштувало близько 70 мільйонів доларів (246 мільйонів шекелів), урочисто відкрили 25 червня 2008 року.

Калатрава вперше відвідав Ізраїль для відкриття виставки своїх робіт у Хайфі в 1997 році. Під час цього візиту його запросили розробити проект пішохідного мосту в Петах-Тікві, який відкрили 2005 року. Він отримав запрошення попрацювати в Єрусалимі від міського інженера Урі Шетріт та мера Егуда Ольмерта, які, за словами Калатрави, запропонували йому «зробити найкрасивіший сучасний міст».

Будівництво моста розпочалося в 2005 році, його вартість оцінювалася у 129 мільйонів шекелів, що набагато перевищувала початковий прогноз у 80 мільйонів шекелів.

Міст розроблявся для того, щоб додати визначальний візуальний елемент до єрусалимської «лінії горизонту» на в'їзді в місто, а також для прокладення трамвайної гілки, яка, як очікувалося, мала вирішити проблеми з транспортом міста. Для Калатрави міст був «також приводом для створення великої площі, щоб надати характер і єдність цьому делікатному місцю».

Подібно до моста Аламільйо в Севільї (Іспанія), міст у Єрусалимі використовує кутову консольну вежу, щоб поглинути частину навантаження і зменшити кількість необхідних тросів. Міст складається з одного пілона, який урівноважує 160-ти метровий проміжок прогону кабелями, що створює драматичний архітектурний вираз. Хоча міст став 40-им мостом Калатрави, він є першим, який архітектор спроектував для трамваїв і пішоходів.

Загальна довжина мосту – 360 м. Яскравою особливістю мосту є єдиний 188 метровий пілон, що підтримує проїзну частину за допомогою 66 сталевих тросів, розташованих у параболічній формі, яка розвивається тривимірно в просторі, що зробило її найвищою спорудою Єрусалима на момент завершення будівництва. Міст оздоблений єрусалимським каменем із сталевими, скляними та бетонними деталями. Названий журналом Time «першою святинею сучасного дизайну в Єрусалимі», міст став туристичною визначною пам'яткою.



Рис. 113. Струнний міст — вантовий міст з бічними лонжеронами в Єрусалимі, Ізраїль

На думку одних спостерігачів, форма мосту нагадує намет у пустелі або арфу. Троси як струни символізують арфу царя Давида (кіннор).

Проект прийняли зі значними суперечками. Прихильники, такі як історик архітектури Давід Кроянкер, сказали, що міст сприяє розвитку західного Єрусалиму та його поточних вимог. Загалом, однак, проект піддавався критиці як екстравагантне та дороге рішення проблеми, яку можна було б вирішити дешевшими способами, адже кінцева вартість у понад 70 мільйонів доларів

перевищила початковий бюджет більш, ніж у два рази. Естетика моста та його вплив на Єрусалим також викликали суперечки. Одні стверджують, що мосту, розташованому біля людного в'їзду в місто, не вистачає місця навколо нього, щоб люди могли оцінити його мистецькі достоїнства; інші ж вважають, що міст просто не для цього міста і сумніваються, що він вписується там візуально.

38. Міст через затоку Ханчжоувань (кит.: 杭州湾大桥; trad. китайська: 杭州灣大橋) – вантовий міст через затоку Ханчжоувань. З'єднує міста Шанхай та Нінбо, Китай. Загальна довжина мосту 35,673 км, він є найдовшим транс-океанічним мостом у світі.



Рис. 114. Міст через затоку Ханчжоувань (Китай)

Будівництво мосту було розпочато 8 червня 2003 року і завершено в 2007 році, хоча планувалося в 2010 році. 1 травня 2008 року, після декількох місяців тестувань, міст було офіційно відкрито. Будівництво мосту обійшлося в 11,8 млрд юанів (близько 1,69 млрд доларів США). 35% цієї суми було внесено приватними підприємствами Нінбо, ще 59% – кредити від центральних та регіональних банків Китаю.

Центральна частина мосту складається з двох прогонів 448 м та 318 м.

По мосту проходить шестисмугова автомагістраль. Максимальна швидкість на мосту – 100 км/год. Проїзд по мосту коштує 80 юанів як для вантажівок так і для легкових автомобілів.

По середині мосту збудовано острів-платформу з центром обслуговування. Площа острову 10 000 м². Острів побудований на палях серед затоки таким

чином, щоб не перешкоджати течіям в затоці. На острові побудовані парковка, магазини, ресторани, конференц-зал, заправна станція, готель та оглядова вежа висотою 145,6 м. Острів є туристичною пам'яткою. Комплекс називається Земля між морем і небом.



Рис. 115. Міст через затоку Ханчжоувань (Китай)

39. Міст Медьєрі (угор. Megyeri híd) – вантовий автомобільний міст, що перетинає Дунай, з'єднуючи Буду і Пешт, відповідно, західну і східну частини Будапешта, столиці Угорщини. Міст є важливою частиною кільцевої дороги М0, що огинає кільцем угорську столицю.



Рис. 116. Міст Медьєрі (Угорщина)



Рис. 117. Міст Медьєрі (Угорщина)

40. Міст Солідарності (пол. Most Solidarności) — вантовий автомобільний та пішохідний міст на річці Вісла в Плоцьку. Міст є найбільшим у Польщі, його загальна довжина становить 1712 м. Основний прогон — 375 м. Довжина над річкою — 615 м. Ширина — 27,5 м. Висота пілонів — 27,5 м. Висота прогону над водою — 12 м. Матеріал — сталь.



Рис. 118. Міст Солідарності (Польща)

Міст Солідарності має чотири смуги руху.

Будівництво моста було розпочате в липні 2002 року. Урочисте відкриття відбулося 13 жовтня 2007 року. При будівництві моста було використано 12,6 тис. т сталевих конструкцій (3 тис. т армованої сталі), близько 19 тис. кубометрів бетону та 3 тис. метрів набивних паль.

41. Другий Севернський міст (англ. Second Severn Crossing) — міст через річку Северн між Англією та Уельсом, Велика Британія. Міст є частиною автомагістралі М4. Довжина мосту становить 5128 метрів, довжина головного прогону — 456 метрів. Ширна — 34,6 м. Висота — 137 м. Матеріал — сталь і залізобетон. Міст було відкрито 5 червня 1996 року. Вартість будівництва — 380 000 000 фунтів стерлінгів.

По цьому мосту рух безкоштовний з Уельсу до Англії, але на зворотному шляху потрібно заплатити.



Рис. 119. Другий Севернський міст (Велика Британія)

5 квітня 2018 року державний секретар у справах Уельсу Алан Кернс оголосив, що цей перехід буде перейменовано на міст Принца Уельського на церемонії, яка відбудеться пізніше цього ж року. Міст було офіційно перейменовано 2 липня 2018 року, коли принц і герцогиня Корнуольські відкрили меморіальну дошку, після чого відбувся прийом для місцевих високопоставлених гостей і бізнес-лідерів на курорті Celtic Manor Resort неподалік. Загальна вартість перейменування мосту, включаючи

встановлення двох вищевказаних дорожніх знаків (і відповідні витрати на персонал для закриття проїжджих частин і перенаправлення руху через М48) разом із церемонією становила 216 513 фунтів стерлінгів.

42. Вітчизняний міст, або Міст Батьківщини (хорв. Domovinski most) – екстрадозний міст через річку Сава в Загребі, найбільший міст у Хорватії. З'єднує південно-східну частину Загреба зі столичним аеропортом. Відкритий 2007 року. Він є частиною транспортного проєкту для поліпшення та розширення сполучення Загреба зі своїм містом-супутником Велика Гориця.

Міст проходить над Савою та прилеглою до неї заплавою, на відрізку річки між загребською місцевістю Петрушевац і Косницею. Міст має по дві смуги руху в обидва кінці, пішохідні та велосипедні доріжки, а посередині – простір, відведений для рейкових транспортних засобів, можливо, для майбутньої приміської залізниці. Крім транспортної, він виконує ще й водопостачальну і водовідвідну функцію: по ньому пролягають дві труби, одна з яких відводить стічні води з міських районів, що на південь від Сави, до головної очисної споруди на Житняку, а друга постачає передмістю воду з насосної станції на західному березі.

Міст виготовлено з попередньо напруженого бетону. Центральна частина підвішена до двох пар пілонів заввишки 16,5 м. Довжина окремо взятих прогонів має послідовно такий вигляд: 48 м + 6 х 60 м + 72 м + 120 м + 72 м + 2 х 60 м + 48 м. Загальна довжина – 880 м, основний прогон – 120 м.



Рис. 120. Вітчизняний міст, або Міст Батьківщини (Хорватія)



Рис. 121. Вітчизняний міст, або Міст Батьківщини (Хорватія). Початковий етап будівництва



Рис. 122. Вітчизняний міст, або Міст Батьківщини (Хорватія)

Його будівництво розпочалося 2002 року і тривало 5 років, а вартість становить близько 300 млн кун, або 40 млн. євро. Основні будівельні роботи на

мосту, який будували загребські фірми «Industrogradnja» та «Viadukt» із субпідрядниками, були завершені у березні 2006 року.

Відкрити міст вдалося лише з сьомої спроби через недоліки проєктування та недогляди у дозволах на експлуатацію. За даними хорватських ЗМІ, погана координація робіт спричинила різницю у висоті між мостом та під'їзними шляхами до 1 м. 5 травня 2007 року його урочисто відкрили.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна література:

1. Розрахунки і проектування мостів / О. Закора, Д. Каплинський, Н. Корнієв, А. Корецький, А. Лантух-Лященко, К. Медведєв, В. Снитко, В. Тодіріка. К. : НТУ, 2007. Том 1. 336 с.
2. Кіренко В. І. Вантові мости. Київ : Будівельник, 1967. 144 с.
3. Мости: конструкції та надійність / Лучко Й. Й., Коваль П. М., Корнієв М. М. та ін. ; за ред. В. В. Панасюка, Й. Й. Лучка. Львів : Каменяр, 2005. 989 с.
4. Борщов В. І., Закора О. Л. Мости і труби : підручн. для студ. вищ. навч. закл. за напр. «Будівництво» : у 4-х т. / Дніпропетров. нац. унів-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту ім. В. Лазаряна, 2007 (повне зібрання).
5. Закора О. Л. Нерозрізні, консольно- та рамно-підвісні попередньо напружені залізобетонні мости : навч. посіб. для студ. вузів / Дніпропетровський техн. ун-т залізн. транспорту. Дніпропетровськ, 1995. 128 с.
6. Кірсанів Н. М. Висячі і вантові конструкції. Київ : Стройиздат, 1981. 160 с.
7. Цифринович А. В. Монтаж попередньо-напружених і вантових конструкцій. Київ : Вища школа, 1981. 68 с.
8. Judith Dupré. Bridges. A history of the world's most spectacular spans. Black Dog & Leventhal Publishers. 2017. 350 p.
9. Holger Svensson. Cable-Stayed bridges. 40 years of experience worldwide. 2012. 451 p.
10. Niels J. Gimsing, Christos T. Georgakis. Cable supported bridges. Concept and design. Third Edition.- WILEY.- 2012.- 592 p.

Допоміжна література:

11. Корнієв М. М. Сталеві мости: Теоретичний і практичний посібник з проектування : у 2-х томах. К. : Вид-во «Академпрес», 2010. Т. 1. 532 с.
12. Корнієв М. М. Сталеві мости: Теоретичний і практичний посібник з проектування : у 2-х томах. К. : Вид-во «Академпрес», 2010. Т. 2. 490 с.
13. Гамеляк І. П., Крючатов С. Д., Оксень Є. І. Визначення натягів підвісних канатів мосту за частотою власних коливань. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науковий журнал, 2022. Вип.111. С. 22–30.

14. М. И. Казакевич. Aerodynamics of bridges: a short course of lectures. Аеродинаміка мостів : короткий курс лекцій. Дніпропетровськ : Акцент, 1995. 128 с.
15. Chernykh V. K., Ovchinnikov I. I. Bearing capacity and life time of multielement structures exposed to corrosive wear // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012062.- P.1-5. doi: 10.1088/1757-899X/451/1/012062.
16. Irvine H. M., Caughey T. K. The linear theory of free vibration of a suspended cable. *Proc., Royal Soc., London, England, Series A*. 1974. Vol. 341. P. 299–315.
17. Shinke T., Hironaka K., Zui H., Nishimura H. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method. *Proc. JSCE*. 1980. Vol. 294. P. 25–34.
18. Shimada T., Kimoto K. and Narui S. Study on estimating tension of tied hanger rope of suspension bridge by vibration method. *Proc. JSCE*. 1989. Vol. 404(I–11). P. 455–458.
19. Zui H., Shinke T. and Namita Y. H. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 1996. Vol. 122(6). P. 651–656.
20. Byeong Hwa Kim, Taehyo Park, Hyunyang Shin, Tae-Yang Yoon A Comparative Study of the Tension Estimation Methods for Cable Supported Bridges. *Steel Structures*. 2007. Vol. 7. P. 77–84.

Нормативна література:

21. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби.
22. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування.
23. ДБН А. 2.2-3-2014. Склад та зміст проектної документації на будівництва.
24. ДСТУ 8903:2019. Мости автодорожні. Класифікація елементів.
25. ДБН В.2.1-10-2009. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення проектування.
26. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції.
27. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування.
28. ДСТУ Б В.2.6-124:2010 (ГОСТ 22362-77, MOD). Конструкції залізобетонні. Методи вимірювання сили натягу арматури.

Навчальне видання

Гуртовий Олексій Григорович

Конструювання підвісних і вантових мостів
Навчальний посібник

Друкується в авторській редакції

Технічний редактор

Г.Ф. Сімчук

Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.