

КОНСТРУКТИВНІ ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ВИСЯЧИХ МОСТІВ

*Белоус Є.В., Володченко Є.М. ст. гр. ДМ-26т1-22,
Науковий керівник: ас. каф. МКіБМ Шеховцова Т.О.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Постановка похилих висхідних і низхідних вант, розтяжок і зворотних кабелів [1-3]. Систему з висхідними і низхідними додатковими вантами, що з'явилися в середині ХІХ ст., називають гібридними. У них вертикальні ванти обмежують вертикальні переміщення систему, а горизонтальні (пологі) – перешкоджають горизонтальним переміщенням (рис. 1).

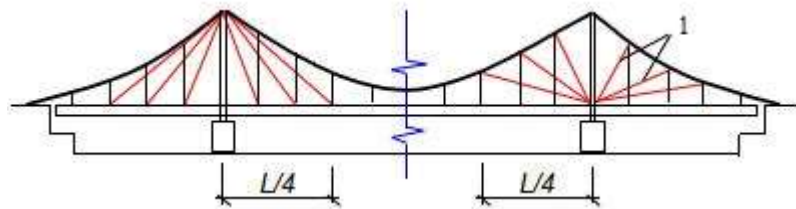


Рисунок 1 – Постанова похилих висхідних і низхідних вант: 1 – ванти

Як зазначалося вище, під час завантаження половини прогону балка жорсткості має S-подібний прогин, найбільші переміщення під час цього виникають у чверті прогону, для зменшення цих переміщень і застосовують похилі низхідні ванти поблизу опор, що є свого роду додатковими пружними опорами. Встановлені в системі висхідні ванти натягнуті і фіксують обрис кабелю. Через свій несприятливий зовнішній вигляд і складність конструкції гібридні системи широкого поширення не набули. До найвідоміших прикладів заведено відносити мости побудовані Джоном А. Роблінгом: Бруклінський (рис. 2) та Ковінгтонський (рис. 3) в США, міст імені 25 квітня через річку Тахо в Португалії (рис. 4), міст Султана Селіма Явуза (рис. 5).

Міст Султана Селіма Явуза (також Третій Босфорський міст) – міст через

Босфор, розташований на півночі м. Стамбул (Туреччина), практично в гирлі Босфору, біля берега Чорного моря (рис. 5).



Рисунок 2 – Бруклінський міст відкритий у 1883 р. (США)



Рисунок 3 – Підвісний міст Джона А. Роблінга (колишній міст Цинциннаті-Ковінгтон) відкритий у 1867 р. (США)



Рисунок 4 – Загальний вигляд мосту через річку Тахо (Португалія)



Рисунок 5 – Міст Султана Селіма Явуза



Рисунок 6 – Гібридний міст прогоном 180 м (Іспанія)

Крім постановки описаних вище висхідних і низхідних вант, для підвищення вертикальної і горизонтальної жорсткостіисячих мостів можуть бути встановлені додаткові зворотні кабелі (вітрові ферми), що фіксують положення балки як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах (рис. 7).



Рисунок 7 – Мости зі зворотним попередньо напруженим кабелем

Жорстке прикріплення кабелю до балки в середині прогону (рис. 8).

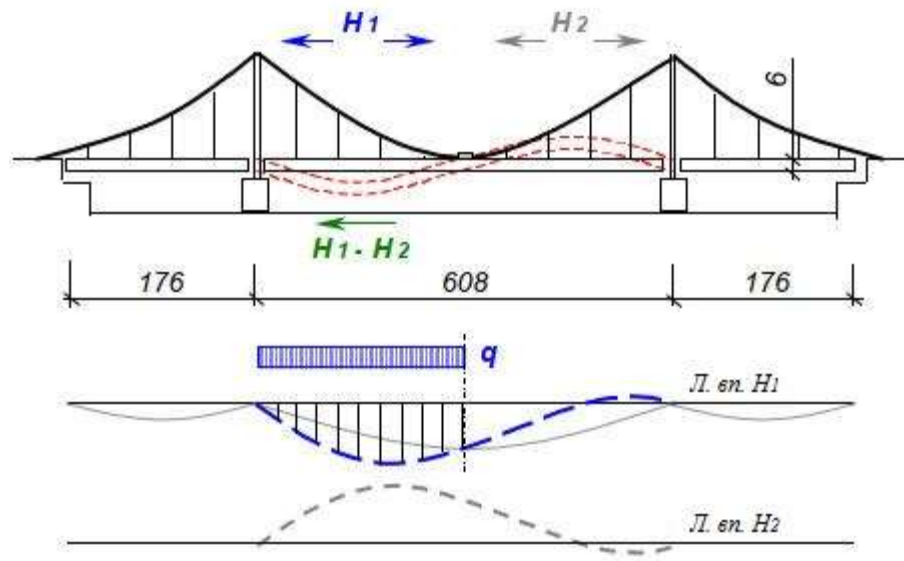


Рисунок 8 – Схема роботи моста з прикріпленням кабелю до балки (розміри відповідають розмірам Танкервільського мосту у Франції)

При жорсткому прикріпленні кабелю до балки в середині її прогону висяча 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, спричинене різницею величин розпорошення $H_1 - H_2$, що виникає під час несиметричних завантажень;
- необхідністю влаштування спеціальних закріплень балки для сприйняття негативних опорних реакцій;
- підвищеною чутливістю систем до змін температури.

Загальні види і можливі конструкції прикріплення кабелю до балки

жорсткості в середині основного прогону моста показано нижче на прикладі мосту імені 25 квітня через річку Тахо (рис. 9).



Рисунок 9 – Вузол кріплення головного несучого кабелю до ферми імені 25 квітня через річку Тахо (Португалія)

Об'єднання кабелю з балкою жорсткості в єдине ціле на частині довжини прогону [1-3]. У разі об'єднання кабелю з балкою в конструкції з'являється ферма, що має найбільшу висоту в чвертях основного прогону, тобто там, де виникають максимальні згинальні моменти і прогини (рис. 10). При цьому розтягнення всіх елементів ферми забезпечується постійним навантаженням.

Міст Ерсіліу Луз, розташований у м. Флоріанополісі, столиці штату Санта-Катаріна на півдні Бразилії, є першим мостом, побудованим для з'єднання острова Санта-Катаріна з материком (рис. 10, а). Це найдовший підвісний міст у Бразилії з центральним прогоном 340 м побудований з 1922 р. по 1926 р. Загальна довжина складає 819,471 м. Міст було закрито для публіки 13 травня 1991 р. і відкрито після повної реставрації 30 грудня 2019 р.

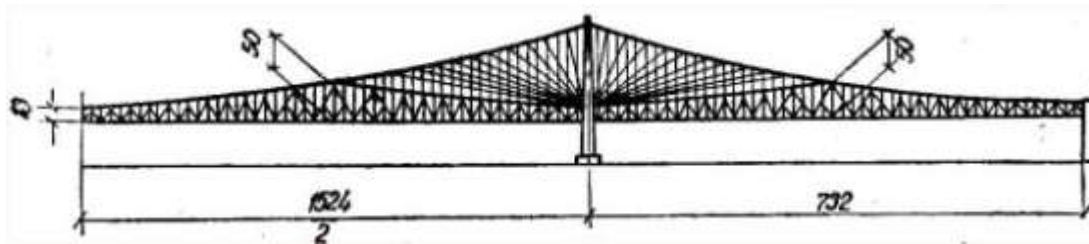
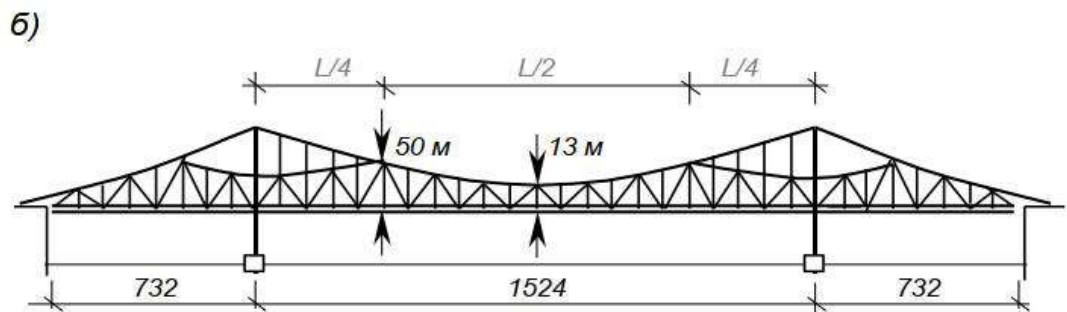
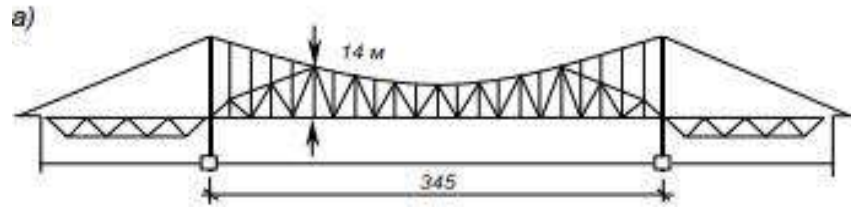


Рисунок 10 – Загальні види та схеми мостів при об'єднанні кабелю з балкою: а – міст Ерсіліу Луз (Бразилія); б – проект мосту (США)

При об'єднанні кабелю (ланцюга) з балкою на частині її прогону висяча система характеризується (рис. 11):

- істотним підвищенням жорсткості системи (у середньому в 2 рази) при можливому зменшенні висоти балки жорсткості;

- усуненням взаємних переміщень кабелю і балки на ділянці, що дорівнює половині прогону, тому що ті конструкції становлять єдине ціле;
- усуненням поздовжніх переміщень кабелю в середині прогону (обмеженням зміни форми рівноваги);
- можливою істотною економією металу (до 30%) і відповідно, зростанням економічності системи.

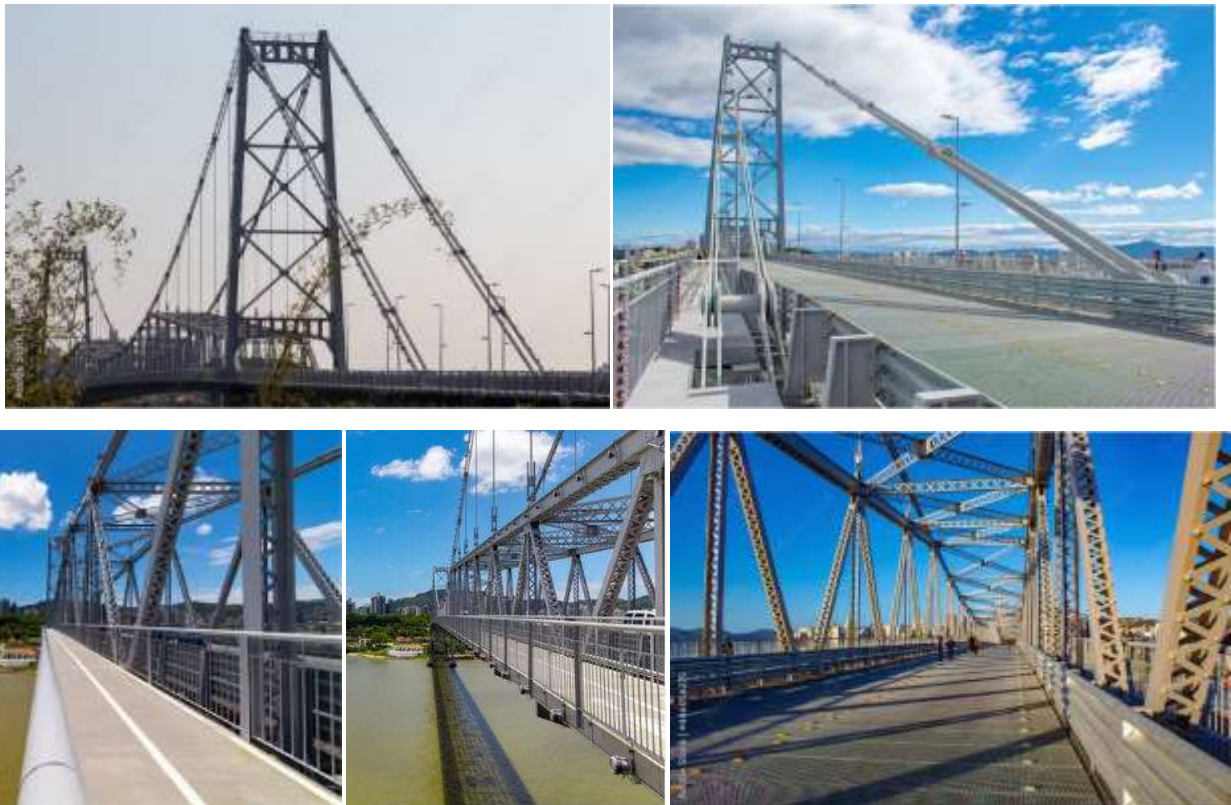


Рисунок 11 – Об'єднання кабелю (ланцюга) з балкою жорсткості на частині її прогону мосту Ерсіліу Луз (Бразилія)

Застосування похилих підвісок. У разі застосування похилих підвісок висяча система характеризується збільшенням загальної жорсткості (зниженням згинальних моментів) завдяки перетворенню системи на комбіновану ферму. У загальних вузлах похилих підвісок акумулюється енергія, необхідна для гасіння вимушених коливань за рахунок гістерезису.

Висячі ферми з трикутною решіткою утворюються з головного несучого кабелю, що спирається на пілони, канатних розкосів, підвішених до головного кабелю, і нижнього пояса. Пояс може бути або з попередньо напружених канатів, що створюють попереднє розтягнення розкосів (рис. 12), або з жорстких конструкцій - підвісною балкою жорсткості. Можливе також проміжне рішення - з канатним нижнім поясом і з балкою жорсткості, прикріпленою за допомогою вертикальних підвісок до вузлів розкосів. Розпір канатів сприймається анкерними опорами (рис. 3.81).

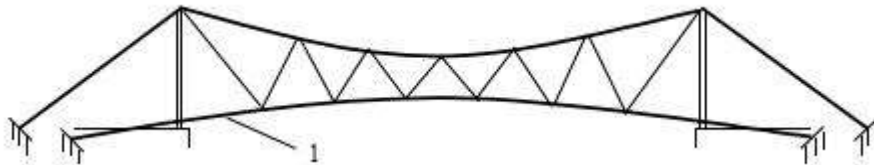


Рисунок 12 – Схема гнучкого висячого моста з гратчастими фермами: 1 – гнучкий нижній пояс

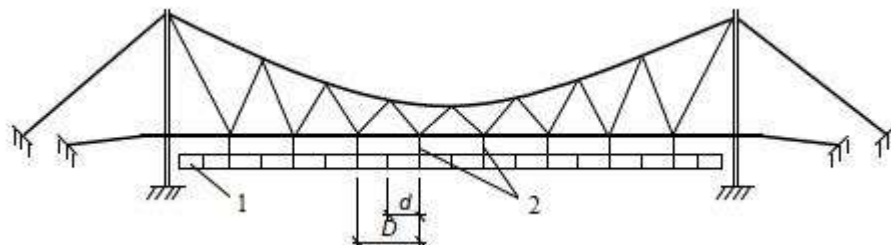


Рисунок 13 – Висячий міст із гратчастими фермами і балкою жорсткості: 1 – балка; 2 – підвіска

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

Основними особливостями висячих ферм із трикутною решіткою є те, що:

- вони конкурентоспроможні класичним висячим системам за величиною прогону, що перекривається;

- вони є геометрично незмінними досить жорсткими конструкціями (у разі забезпечення в розкосах запасу по розтягуванню);
- їх розрахунок може вестися без урахування геометричної нелінійності (без урахування деформованого стану);
- монтаж їхніх елементів досить простий (навіть у разі великої довжини прогонів);
- їх конструкціям притаманні високі аеродинамічні характеристики (висока аеродинамічна стійкість);
- їхні конструкції можна монтувати методами навісного монтажу;
- для них потрібна менша (у 8-10 разів) потужність балок жорсткості;
- їхні розкоси завжди важчі за підвіски, відповідно для цих ферм характерна складна конструкція вузлів;
- для них характерна підвищена чутливість до зміни температури;
- їм притаманний високий ступінь статичної невизначеності;
- для їхніх елементів необхідна висока точність регулювання зусиль;
- за великих прогонів вони мають велику панель проїзної частини.

Для усунення останнього зазначеного недоліку можливо:

- влаштування балки жорсткості (рис. 13), що також збільшує запас конструкції за розтягуванням і за міцністю;
- встановлення підвісок або використання двогратчастих ферм із хрестовими ґратами, які, крім усього іншого, зменшують постійне навантаження, передане на розкіс (рис. 14);
- встановлення розкосів під більшими (крутішими) кутами.

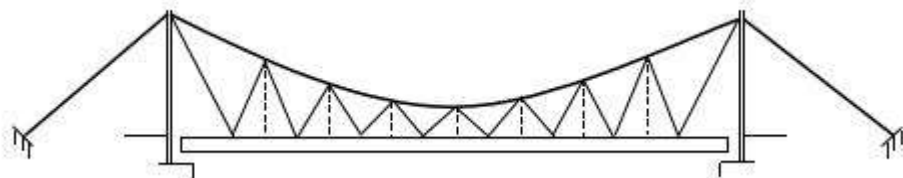


Рисунок 14 – Схема пішохідного моста

Застосування дволанцюгових (двокабельних) мостів. Така конструкція загалом має збільшену загальну вертикальну жорсткість завдяки наданню положенню несучих кабелів певної геометричної форми - нижні ділянки кабелю окреслені по параболі, верхні ділянки кабелю – прямолінійні. При цьому верхні прямолінійні ділянки кабелю можна розглядати як своєрідну піддатливу опору, встановлену в середині прогону і пов'язану з анкерними конструкціями моста (рис. 15).

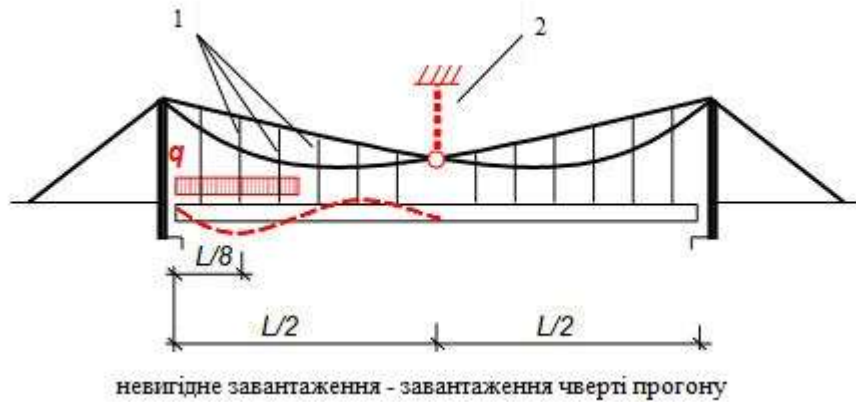


Рисунок 15 – Загальна схема дволанцюгового висячого моста: 1 – стяжки між верхнім та нижнім кабелем; 2 – своєрідна «податлива опора» (проміжний пілон)

При влаштуванні дволанцюгової висячої 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 і збільшенням кількості вузлів;
- менш сприятливим зовнішнім виглядом.

Однак, надалі зазначені вище негативні особливості системи, а також її відносно невисока перекривна здатність вплинули на доволі рідкісне використання таких мостів (рис. 16).



Рис. 3.97 – Двокабельнийисячий міст

Удосконалення форм балок жорсткості [1-3]. До цього способу підвищення жорсткостіисячих мостів, насамперед, слід відносити підвищення крутильної жорсткості балок, що досягається, зокрема, переходом до наскрізних балок (ферм) жорсткості, а також різні методи поліпшення аеродинамічних характеристик балок влаштуванням, обтічних коробчастих конструкцій, влаштуванням елементів проїзної частини, які повністю проникні потоками повітря, та ін.

У висновку слід зазначити, що зазначені вище заходи підвищення загальної жорсткості широко використовуються в більшості запроєктованих і побудованих в останні роки малих, середніх і великихисячих мостів, причому застосовують їх як окремо, так і комплексно.

Перелік посилань:

1. Holger Svensson. Cable-Stayed bridges. 40 years of experience worldwide. 2012. 451 p.
2. Niels J. Gimsing, Christos T. Georgakis. Cable supported bridges. Concept and design. Third Edition. WILEY. 2012. 592 p.
3. Judith Dupré. Bridges. A history of the world's most spectacular spans. Black Dog & Leventhal Publishers. 2017. 350 p.