УДК 72.01

Звищена вантова система з жорсткими напружуючими елементами

Гвоздьова А. Г.

Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури, Україна

Анотація. Поява звищених вантових систем, які володіють усіма технічними якостями висячих вантових систем та при цьому позбавлені ряду їх недоліків, вирішує багато технічних, естетичних та економічних питань. Такі системи мають непровисаючий (звищений) контур покриття над простором, що перекривається, дозволяють перекривати як великі, так і малі прольоти, при цьому конструктивні елементи таких систем набагато простіші та не впливають на вартість покриття при зміні розмірів прольоту. Звищені вантові системи мають стійкість до дії флатера, нерівномірних просадок ґрунтів, сейсмічних впливів, а також дозволяють проектувати покриття різної конфігурації.

Аннотация. Появление вспарушенных вантовых систем, которые владеют всеми техническими качествами висячих вантовых систем и при этом лишенные ряда их недостатков, решает много технических, эстетичных и экономических вопросов. Такие системы имеют непровисающий (вспарушенный) контур покрытия над пространством, которое перекрывается, позволяют перекрывать как большие, так и малые пролеты, при этом конструктивные элементы таких систем намного проще и практически не влияют на стоимость покрытия при изменении размеров пролета. Вспарушенные вантовые системы обладают стойкостью к действию флаттера, неравномерных просадок грунтов, сейсмических влияний, кроме того, позволяют проектировать покрытия разной конфигурации, в основе геометрии которых может лежать свод.

Abstract. Appearance of bellied cable-stayed structural systems having all technical qualities of the hanging cable-stayed systems and at that devoid of some their failings, decide many technical, aesthetic and economic problems. Such systems have a non-sagging (sail-form) contour of coverage above the recovered space, allow recovering both large spans and small ones, at that the structural elements of such systems are simpler and practically do not affect the cost of coverage after the change of span sizes. The bellied cable-stayed structural systems are firm to the action of flatter, uneven deformation of soils, seismic influences and allow designing coverage of different configuration, the geometry of which can be based on a vault.

Ключові слова. Звищені вантові системи, гнучка нитка, жорсткі елементи, міцність, стійкість.

Гнучка нитка як елемент будівельних конструкцій була предметом дослідження інженерів і вчених (Варіньон, Ляме, Клайперон, Нав'є та ін.) з давніх часів.

Як елемент покрить гнучка нитка застосовується порівняно недавно. Інтенсивний розвиток застосування висячих конструкцій відбувся з середини XX століття. Значний внесок у теорію розрахунків зробили

вчені: Рабинович І. М., Попов Г. Д., Вахуркін В. М., Кузнецов Е. Н., Перельмутер А. В., Райнус Г. Е., Кірсанов М. М., Качурін В. К., Скуратовський М. Н., Мущанов В. П., Гордеєв В. М.; Караджи К. М., Ржаніцин О. Р., Шимановський В. М., Шимановський О. В. та ін.

Серед закордонних вчених, які розробляли теорію висячих конструкцій, необхідно відзначити роботи Б. Фуллера, Ф. Отто , Х. Рюле, К. Шлейера, Х. К. Банделя, А. Скорделіса та ін.

Класичні вантові системі, реалізовані у будівництві до теперішнього часу, мають ряд переваг у порівнянні з іншими будівельними конструкціями (балки, ферми, арки, рами та ін.). До переваг належать:

а) порівняно невелика витрата сталі;
б) можливість перекриття значних за розміром прольотів;
в) забезпечення можливості створення оригінальних просторових архітектурних композицій;
г) простота технічних розрахунків, які відрізняються тим, що міцність і жорсткість конструкцій при розрахунках є елементами, що не пов'язані між собою.

Недоліками класичних вантових систем є:

а) висока вартість конструкцій при перекритті малих прольотів (до 60 м);
б) провисаючий контур покриття над простором, що перекривається;
в) нестійкість до дії флатера, що викликає необхідність використання спеціальних технічних засобів захисту;
г) покриття по вантових системах належить до розряду дрібнозбірних, що значною мірою знижує технологічність будівельно-монтажних робіт.

Самостійно-напружені системи. Нитка, що стоїть – звичайна нитка, на якій закріплені пружні зігнуті смужки з пластика (рис. 1). Нитка дивним чином стоїть вертикально, простягається вгору та ще й тримає на собі ці пластини. Вся річ у тому, що нитка перебуває в розтягнуто-напруженому стані. Вона – приклад самостійно-напружених конструкцій. На цьому принципі засновано багато скульптур американського архітектора Кеннета Снельсона. Винахідником самостійно-напружених або вантово-стержневих будівельних конструкцій є В'ячеслав Колейчук [2] (архітектор, художник, теоретик мистецтва, майстер експериментального дизайну), який отримав патент майже одночасно з великим американським архітектором Фуллером.

Колейчук В. Ф. обгрунтував також свої художні ідеї і технічні винаходи, наприклад, принципи конструкцій, що «самостійно зводяться» та «миттєво-жорстких» (таких, що працюють на ефекті стискання та розпору).

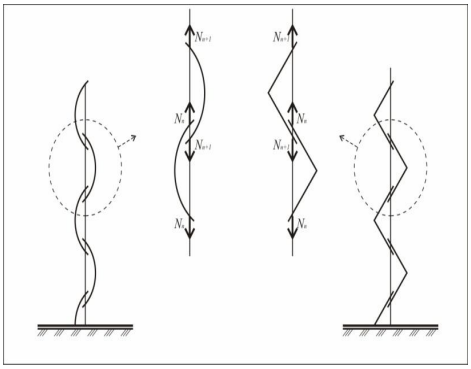

Рис.1. Принцип роботи «нитки, що стоїть» (1979 р.)

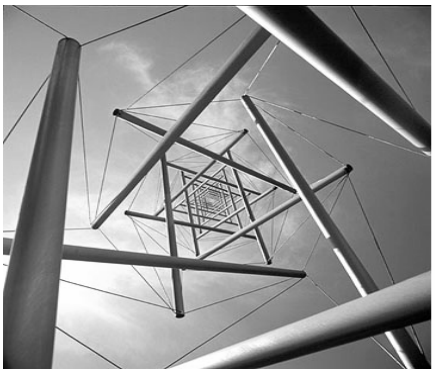

Рис. 2. Голчата башта (1968 р.)

У 50-х роках XX ст. почався розвиток систем, що одержали назву «Tensegrity». «Тенсегріті» або напружена цілісність – властивість цілісності структури, що основується на балансі розтягнення та стиснення елементів. «Тенсегріті» – це властивість каркасних структур, у яких цілісні деталі працюють на розтягнення, а складові деталі – на стиснення, тому всі вони функціонують із максимальною ефективністю та економічністю. У цьому значенні «тенсегріті» використав вчений-архітектор Річард Бакмінстер Фуллер [1].

Найвідоміша споруда, побудована за принципом «тенсегріті» – Голчата башта Кеннета Снельсона (1968 р.) (рис. 2). У побудові Голчатої башти використано більш ніж три кабеля, що зустрічаються на кінці стержня, тому що три кабеля визначають позицію стержня, а додатковий, четвертий, лише утримує його у визначеному місці простору.

Принцип «тенсегріті» був використаний у спорудах Д. Джайгера, Р. Фуллера, К. Йогансона (1920–1921 рр.), К. Снельсона, Р. Спікмана, а також іншими архітекторами та конструкторами.

Треба зазначити, що звищені вантові системи, які аналізуються далі, мають деяку схожість із системами «тенсегріті», але вони працюють тільки у площині.

Звищені вантові системи. Використання «нитки, що стоїть» дозволило створити звищені вантові конструкції покриття. Показана на рис. 3 схема просто демонструє напружений стан троса, вся система зберігає принципові властивості вантової системи:

а) напружуючі елементи не мають жорсткого кріплення до троса;
б) трос розтягнутий по всій довжині;

в) розрахунок системи поділений на розрахунок міцності та розрахунок жорсткості (обчислення деформації прогину системи).

На підставі цього принципу запатентовано дві конструкції арочного покриття – Патенти Російської Федерації № 2132913 та № 2183234 [3, 4] .

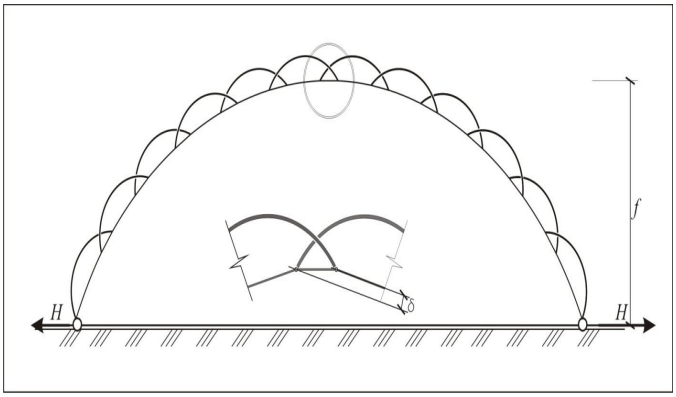

Рис.3. Звищена вантова система у формі арки

Звищені вантові системи мають наступні переваги: 1) непровисаюча конфігурація несучого троса (ванта); 2) природна сейсмічна стійкість; 3) стійкість до локальних вертикальних просадок підвалин та фундаментів; 4) можливість серійного виготовлення покрить малих прольотів завдяки простоті конструктивних вузлів; 5) можливість виготовлення збірно-розбірних конструкцій при збереженні їх капітальності; 6) звищені вантові системи стійкі до дії флатера, нерівномірних просадок ґрунту, сейсмічних впливів.

Кріплення напружуючих елементів до ванта нежорстке, бо на ділянці перехрещування системи використовується трубка, через яку вільно пропущений трос. Трос отримує необхідний напружений стан за рахунок змінення конфігурації ланок ланцюга, тобто напружуючого переміщення δ.

Недоліками таких звищених вантових систем є: 1) використання матеріалів із достатньо високим модулем пружності для виготовлення напружуючих елементів; 2) криволінійна або ломана форма пружного елемента не завжди зручна при виготовленні та архітектурно і економічно не завжди виправдана.

Звищені вантові системи з жорсткими елементами. Результатом аналізу недоліків звищених вантових систем стала пропозиція створення системи, де постійне зусилля розтягнення у робочому тросі досягається завдяки взаємному повороту балочних елементів під дією гравітації [5]. Таким

чином, наявність у ланцюгу покриття елементів, що напружують, із високим модулем пружності виключається. Достатньо, щоб елемент, що напружує, мав змогу працювати на вигин, поперечну та повздовжню силу. Отже, для здійснення такої конструкції може бути використаний будь-який будівельний матеріал або конструкція, навіть залізобетонна. Статична схема може мати два варіанти конструктивного рішення (рис. 4). Ці схеми відображають принципову компоновку конструктивних елементів, що створюють постійне зусилля розтягнення у робочому тросі.

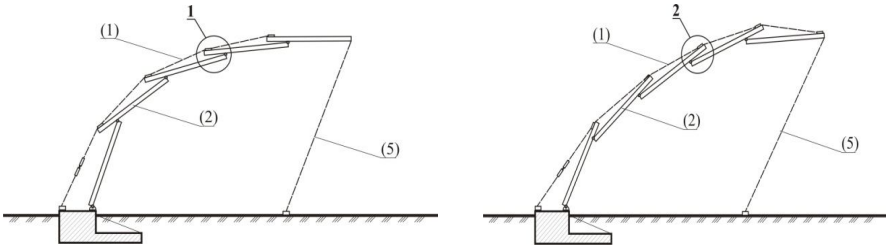

Рис.4. Конструктивні схеми рішення запропонованої звищеної вантової системи

Аналіз напружено-деформованого стану запропонованої звищеної вантової системи (а точніше, аналіз взаємної роботи гнучкої нитки та жорсткої балки) показує, що:

- елементи створюють умови дії постійного рівномірно розподіленого навантаження, що зменшує відхил від первинної форми під дією зосереджених сил;
- елементи попередньо напружують вант – головна особливість звищених вантових систем (принцип «нитки, що стоїть»), що теж сприяє зменшенню деформацій;
- крім того, запропонована звищена вантова система має ще одну перевагу – елементи, що розтягують трос, можуть мати достатньо велику вагу для запобігання дії вітрових навантажень.

Ці особливості значною мірою допомагають усунути деформації, пов'язані з кінематичним переміщенням від зовнішніх навантажень (зосереджені сили, флатер), які мають місце в звищених вантових системах, як і в класичних.

Таким чином, стає очевидним, що звищені вантові системи мають ряд переваг перед класичними вантовими системами, володіючи всіма їх властивостями.

З точки зору механіки, така система повністю аналогічна запропонованим у патентах № 2132913 та № 2183234, оскільки ні одна з ланок ланцюга, крім кінцевого, не має спирання на абсолютну масу (фундамент). Крім того, геометрична форма системи, необхідна для проведення її детального розрахунку, аналогів у будівельній механіці не має.

Як було зазначено раніше, запропонована конструкція володіє усіма властивостями вантових систем, однак розрахунок системи виконується у звичайному порядку, властивому усім будівельним системам:

– визначення геометричних параметрів системи;
– визначення навантажень і впливів;
– розрахунок зусиль, діючих у системі;
– вибір матеріалів та розрахунок перерізів.

Міцність. Для розрахунку відповідно до норм (ДБН) необхідно розробити розрахункову схему, яка має забезпечити високу точність обчислення геометричних параметрів системи. Після визначення площинної форми троса та розмірів балки для розрахунку на міцність будуть використані відомі статичні схеми.

Жорсткість. Для одержання нормально працюючої системи треба проектувати криву загальної форми системи таким чином, щоб обріз уявної арки проходив у безпосередній близькості від центру, а робочий трос і елементи, що напружують, необхідно з'єднувати між собою шарнірами-фіксаторами, що дозволяють системі спрацьовувати на горизонтальні сили від арочного ефекту. Розрахунок жорсткості системи повинен проводитися по ділянках, що дозволить врахувати арочний ефект, який викликає горизонтальні сили.

Стійкість. Якщо несучу вантову систему по ділянках при виготовленні поєднати з конструкцією покриття, то кожен монтажний блок покриття одержить природну стійкість поперек площини, в якій розташовується вантова система. В тому разі, коли конструкція становить відкриту консоль (наприклад, козирок над трибуною стадіону), достатня стійкість забезпечується належною масою самого покриття. Може бути застосовано також якусь допоміжну конструкцію, наприклад вантові відтяжки.

Технологія монтажу. Монтаж звищеної вантової системи може бути проведений кількома різними способами. Усі способи загальновідомі й залежать від розмірів будівельного майданчика та технічних можливостей

забудовника. Запропоновано спосіб монтажу у вигляді самопідйому конструкції у проектне положення.

Архітектурні можливості. Звищена вантова система, що запропонована, унікальна в своєму роді через те, що її звищена форма не тільки «створює комфортне сприйняття», у психологічному сенсі, а ще й дозволяє створювати різноманітні просторові архітектурні форми: консольне покриття напівциліндричної (напівкупольної) форми; циліндричне склепіння; купольне склепіння; при цьому рішення конструктивних вузлів не ускладнюється; конструктивні елементи та вузли мають конструюватися з урахуванням обраних матеріалів.

Таким чином, проаналізувавши напружено-деформований стан звищених вантових систем з жорсткими елементами, можна визначити їх основні переваги та недоліки.

Отже, переваги звищеної вантової системи з жорсткими напружуючими елементами такі: 1) головним несучим елементом є вант, тобто сталевий трос, що володіє усіма властивостями вантів та забезпечує малі витрати сталі (за вагою) в несучій конструкції; 2) балочні елементи напружують несучий трос під дією гравітації; це дає змогу використовувати для їх конструювання залізобетон, що також знижує витрати металу та дає значний економічний ефект; 3) несучий вант не провисає, що дає змогу отримувати максимальний об’єм простору під покриттям; 4) унікальна композиція несучого та напружуючих елементів дає змогу зводити конструкцію методом самопідйому, це дає відносну простоту технології монтажу; 5) конструкція покриття повнозбірна, в ній усі елементи заводського виготовлення; 6) конструкція не боїться сейсмічних впливів при відкритих схемах (козирок), оскільки її елементи жорстко не закріплені між собою, а трос можна розрахувати з достатнім запасом міцності та лінійної пружності; 7) існує можливість організовувати відкриті та закриті простори – куполи, склепіння, тобто створювати різні архітектурні форми.

Проте, така системи має наступні недоліки: 1) при відкритих контурах конструкції (козирки) вона має велику парусність при тому, що розтягнений несучий вант не здатен сприймати стискаючі зусилля, що може призвести до флатерногу «ляску», в зв’язку з чим незмінність геометричної форми козирка слід забезпечувати або великою вагою, що гравітаційно гаситиме флатер (як це роблять у висячих оболонках), або конструктивно забезпечувати просторову жорсткість за допомогою відтяжок, вантових ферм чи жорстких бортових елементів; 2) необхідність мати спеціальне обладнання, аналогічне тому, що використовують під час монтажу збірних жорстких оболонок, для монтажних робіт по стиковці

полос конструкцій та улаштування покрівлі: автомобільні люльки, страхувальне обладнання та ін.; 3) необхідність високої точності розрахунку просторової геометрії та розробки спеціальних вузлів, що дозволять під час монтажу корегувати неточність заводського виготовлення.

Усі ці особливості дають змогу використовувати систему в багатьох сферах будівництва, дозволяючи підкреслити оригінальність архітектурного об'єкту, разом з тим забезпечуючи надійне технічне рішення великопрольотного покриття та отримуючи значну економію під час реалізації в порівнянні з іншими великопрольотними конструкціями.

Література

[1] Fuller R. B. Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking / Richard Buckminster Fuller. – New York : Macmillan Publishing Co, 1975. – 208 p.

[2] Колейчук В. Ф. Новейшие конструктивные системы / В. Ф. Колейчук. – М. : Знание, 1984. – 48 с.

[3] Пат. 2132913 Российская федерация, МПК^7 Е 04 В 1/32. Покрытие / Михеев Ю. М. – № 98106423/03; заявл. 07.04.98; опубл. 10.07.99, Бюл. № 19.

[4] Пат. 2183234 Российская федерация, МПК^7 Е 04 В 1/32. Покрытие / Михеев Ю. М. – № 2000119019/03; заявл. 19.07.2000; опубл. 10.06.02, Бюл.№ 16.

[5] Пат. 82478 Україна, МПК (2006) Е 04 В 1/32. Покриття / Артюхова А. Г. – № 20041109385; заявл. 15.11.04; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8.

Надійшла до редколегії 15.06.2011 р.