

**БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ**

УДК 624.074

**Л. І. Стороженко  
Д. А. Єрмоленко  
Г. М. Гасій****СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОСТОРОВИХ  
КОНСТРУКЦІЙ, СКЛАДЕНИХ З ЖОРСТКИХ ДИСКІВ**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

*В статті наведено методику та особливості статичного розрахунку нових комбінованих конструкцій – просторових структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів. Ідея статичного розрахунку полягає в умовному поділі конструкції на плоскі жорсткі диски та визначенні зусиль, які виникатимуть у вузлах з'єднання таких дисків.*

*Ключові слова:* диск, проліт, стріла підйому, шарнір, сталезалізобетонні конструкції.

**Вступ**

Останнім часом в інженерній практиці при розробленні нових конструкцій для покриття різноманітних будівель та споруд застосовуються оригінальні або унікальні рішення, зокрема великих прольотів. При варіантному проектуванні таких рішень, на остаточний вибір варіанту впливають багато чинників, зокрема економічних, екологічних тощо. Крім цього, конструктивні та технологічні особливості проєктованих конструкцій повинні задовольняти сучасним вимогам щодо ресурсоекономності та енергоощадності. Цим вимогам повною мірою відповідає нова комбінована конструкція – просторове структурно-вантове сталезалізобетонне покриття [1]. Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція є новим рішенням системи покриття, яке реалізує принципи раціонального використання матеріалів і модульності базових елементів [2, 3]. Просторові структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції вже ґрунтовно та всебічно експериментально та теоретично досліджені [4, 5, 6]. Також встановлена їх техніко-економічна перевага порівняно з традиційними рішеннями [7, 8, 9]. Такі конструкції є ефективними системами, що мають просту будову та технологію. Конструктивні особливості структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів детально розглянуті у [10], однак слід зазначити те, що такі конструкції об'єднують у собі та забезпечують сумісну роботу жорстких (просторових модулів) і гнучких елементів (рис. 1), що необхідно враховувати на всіх стадіях виробництва таких конструкцій, зокрема і при розрахунках. Тому всебічне вивчення особливостей поведінки таких конструкцій покриттів під дією зовнішнього навантаження є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

За будовою структурно-вантові сталезалізобетонні конструкції нагадують класичні структурні конструкції [11]. Теорія розрахунку останніх достатньо широко та ґрунтовно розроблена та апробована [12]. В основу статичного розрахунку структурних конструкцій покладено уявлення про роботу елементів у пружній стадії. Такий підхід інколи призводить до значних перевитрат матеріалів та збільшення вартості конструкції. Тому, доцільно при проектуванні великопролітних конструкцій враховувати пластичні деформації застосованих матеріалів [13].

Також, слід зазначити, що у точних методах розрахунку структурні конструкції розглядаються як дискретні системи, а у наближених методиках розрахунку дискретну систему замінюють на відповідну континуальну систему [14].

**Формулювання цілі статті**

Метою роботи є розроблення методики визначення зусиль між компонентами (просторовими модулями та гнучкими елементами) структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції для подальшого розрахунку міцності перерізів окремих елементів (жорстких і гнучких стрижнів, плит, елементів вузлових з'єднань тощо). Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити дві

задачі:

– обрати та проаналізувати розрахункову схему просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій лінійного типу, як універсального;

– задача визначення внутрішніх зусиль в елементах просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції при постійних та тимчасових зовнішніх навантаженнях.

### Виклад основного матеріалу

Вирішення проблеми застосування просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій в реальних об'єктах будівництва потребує наявності апарату розрахунку їх несучих елементів. Беручи до уваги питання геометрії системи, міцності окремих елементів і деформативності варто зазначити, що розрахунковий апарат є досить громіздким. Тому на початковому етапі, після формування геометричної схеми потрібно визначити величини зусиль між складовими елементами структурно-вантової системи.

Основним складовим елементом структурно-вантових конструкцій є просторовий модуль тетраїдної форми у вигляді просторового плитно-стрижневого елемента [15]. Із просторових модулів складаються три типи лінійних елементів (рис. 1), а з лінійних елементів утворюють просторову циліндричну конструкцію покриття.

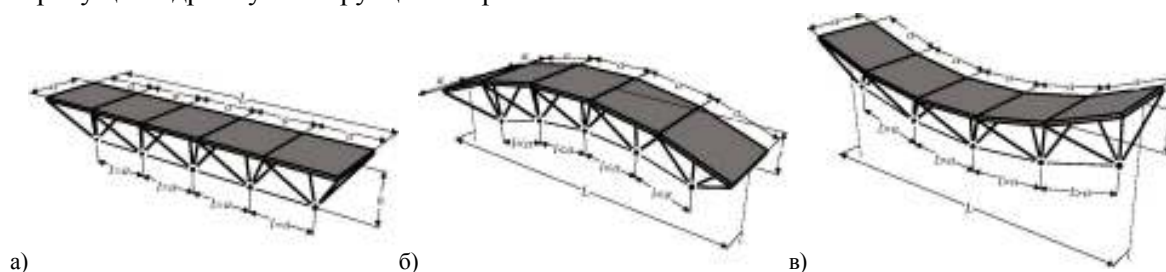


Рисунок 1 – Типи структурно-вантових сталезалізобетонних лінійних елементів: а) арковий; б) балковий; в) висячий

Структурно-вантові сталезалізобетонні лінійні елементи можуть застосовуватись як альтернатива збірним залізобетонним покриттям із ребристих плит тощо. Крім того, при певних умовах завантаження на такі лінійні елементи можна розділити просторову конструкцію у вигляді циліндричного покриття.

Основними геометричними параметрами лінійних елементів є проліт ( $L$ ) та стріла підйому ( $\pm f$ ). На величину останнього параметра суттєвий вплив має величина поздовжнього зусилля у гнучких елементах. Так в елементах аркового типу можуть виникати зусилля стиску у гнучких елементах, що є неприпустимим. Крім того, величина прольоту та стріла підйому визначають геометрію лінійного елемента. Ординати вісі встановлюються за рівняннями кривих, а сама вісь проходить через центри верхніх шарнірів. Так у разі закріплення початку координат у центрі лівої опори арки маємо такі рівняння вісі лінійного елемента:

– окресленого за колом

$$y = \sqrt{R^2 - (l/2 - x)^2} - R + f, \text{ де } R = f/2 + l^2/8f; \quad (1)$$

– окресленого за параболою другого ступеня

$$y = 4f \frac{x(l-x)}{l^2}; \quad (2)$$

– за еліпсом

$$y = \sqrt{\frac{4f^2x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}. \quad (3)$$

*Розрахункова схема.* Після аналізу як розрахункову було обрано схему у вигляді шарнірно стрижневої системи із жорсткими блоками. В якості жорстких блоків виступають модулі тетраїдної форми.

Поєднання елементів різних типів у єдину комбіновану систему відбувається через з'єднання у вигляді ідеального шарніру. Зовнішні зусилля вважаємо прикладеними строго у площині отриманої плоскої комбінованої системи. Кріплення даної системи відбувається через шарнірні опори, з одного боку – рухому, з іншого – нерухому. Загальний вигляд геометричної схеми плоскої структурно-вантової комбінованої системи наведено на рис. 2.

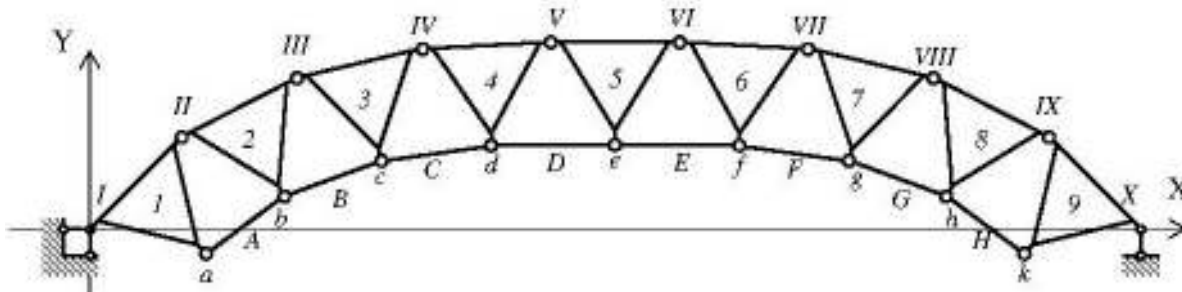


Рисунок 2 – Геометрична схема структурно-вантової конструкції

Модель лінійного елемента представлена кінцевим числом  $n$  жорстких трикутних елементів (рис. 3, а),  $m$  гнучких елементів (рис. 3, б),  $i$  вузлів між жорсткими елементами у вигляді простих шарнірів (рис. 3, в) та  $j$  вузлів у вигляді кратних шарнірів (рис. 3, г).

При цьому:  $n = \{1, 2, \dots\}$ ;  $m = \{A, B, \dots\}$ ;  $i = \{I, II, \dots\}$ ;  $j = \{a, b, \dots\}$ .

На дію вертикального навантаження структурно-вантова конструкція у вигляді лінійного елемента розглядається як плоска. Окремі модулі замінюємо рамними трикутними елементами (рис. 4). Гнучкі елементи замінено стрижнями. Така заміна є обґрунтованою, тому що розглядаються системи із геометрією, яка не призводить до появи стискаючих зусиль у гнучких елементах.

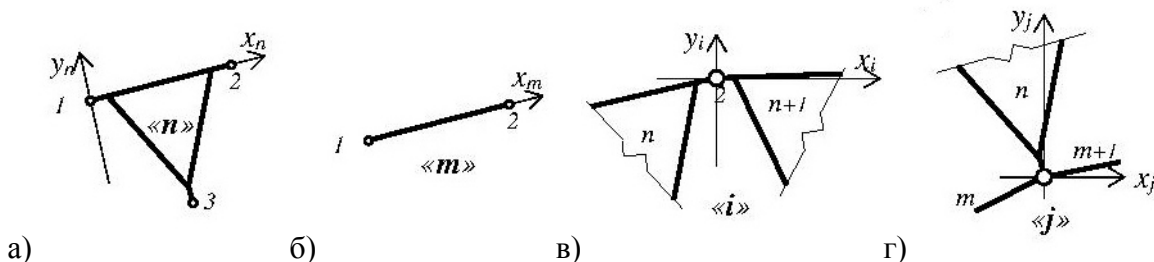


Рисунок 3 – Моделі елементів геометричної схеми:

а) жорсткі трикутні елементи; б) гнучкі елементи; в) вузли верхнього поясу; г) вузли нижнього поясу

*Кінематичний аналіз.* За основний простий елемент системи приймаємо фігуру, що утворено із трьох тіл 1–2–3 із вузлами В–С–D. Тобто до двох дисків 1 та 2, які об'єднано шарніром В, за допомогою двох шарнірів С та D приєднано третій диск 3. Перший геометрично незмінний диск утворюють дві плоскі фігури, які з'єднано через ідеальний шарнір та в'язевий стрижень кінцевої довжини При цьому лінія CD не проходить через точку В. За допомогою диску 4 та стрижня 5 приєднано точку G і так далі. Таким чином, маємо геометрично не змінну систему.

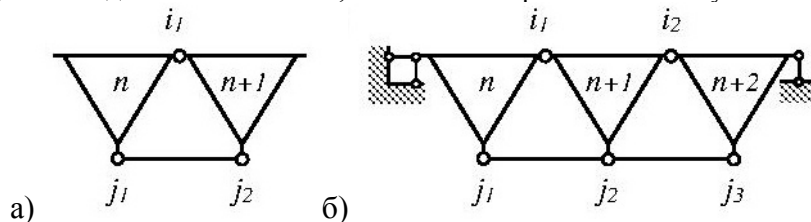


Рисунок 4 – Поділ структурно-вантової системи на жорсткі диски

З кінематичного погляду плоска структурно-вантова система є комбінованою системою. Положення жорстких вставок, як плоских фігур визначається трьома параметрами  $(x, y, \varphi)$ . Тому

вони мають три ступені вільності. Стрижні, що з'єднують плоскі фігури в реальній конструкції працюють виключно на осьове навантаження. Тому їх представимо як в'язеві стрижні.

Таким чином утворюється статично визначена система. В якій диски мають три точки з'єднання (шарніри), а стрижні (гнучкі елементи) – дві.

*Статичний аналіз.* Зовнішні зусилля вважаються прикладеними тільки у вузлах. Тобто, у місцях з'єднання жорстких трикутних елементів на верхній стороні конструкції, а також у місцях з'єднання гнучких елементів на нижній стороні (рис. 5).

Окремий жорсткий трикутний елемент  $n$  знаходиться під дією зусиль (рис. 6, а)  $\{S_i^n\} \equiv (N_i)^T$ ,  $\{S_{i+1}^n\} \equiv (N_{i+1})^T$  та  $\{S_j^n\} \equiv (N_j^m, N_j^{m+1})^T$ . А окремий елемент  $m$  знаходиться під дією зусиль  $\{S_j^m\} \equiv (N_j^m)^T$ ,  $\{S_{j+1}^m\} \equiv (N_{j+1}^m)^T$ .

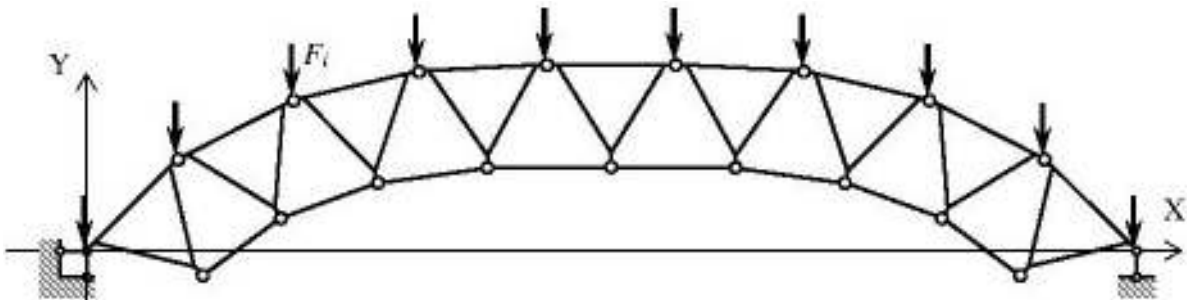


Рисунок 5 – Розрахункова схема структурно-вантової конструкції

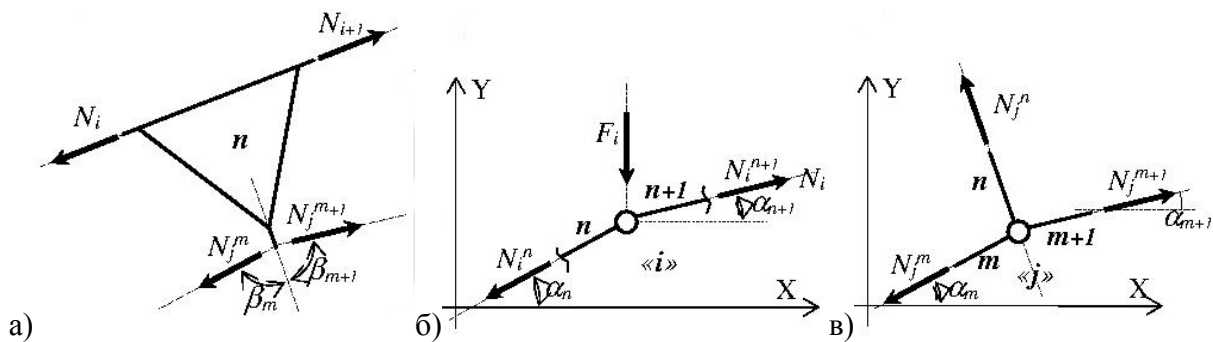


Рисунок 6 – Зусилля в елементах системи:

а) жорсткий трикутний елемент; б) вузол верхнього поясу; в) вузол нижнього поясу

Вектор зусиль всієї моделі лінійного елемента складається із векторів зусиль окремих елементів і має загальний вигляд  $\{S\} \equiv (\{N\})^T$ .

*Визначальні співвідношення розрахунку.* Напружений стан  $n$ -го елемента (рис. 6, а) описується повздовжніми силами  $N_i$  та  $N_{i+1}$ , що діють у вузлах верхнього поясу, і повздовжніми силами  $N_j^m$  та  $N_j^{m+1}$ , що діють у нижньому шарнірі. При цьому  $N_j^m = N_j^{m+1} = N^m$ .

Рівняння статки складаються на основі умов рівноваги у вузлах моделі. У даній системі можна виділити два типи вузлів:

- вузол типу « $i$ » – в ньому сходяться два жорстких трикутних елемента типу « $n$ »;
- вузол типу « $j$ » – в ньому сходяться один жорсткий трикутний елемент типу « $n$ » та два гнучких елементи типу « $m$ ».

Розглянемо вузол типу « $i$ » (рис. 6, б). На вузол діє зовнішнє навантаження  $\{F_i\} \equiv (F_{yi})^T$ , а також зусилля  $\{S^n\} \equiv (N_i^n)^T$  та  $\{S^{n+1}\} \equiv (N_i^{n+1})^T$ .

У випадку плоскої системи зовнішніх та внутрішніх сил можна скласти три рівняння статки:

- сума моментів відносно центру вузла:

$$\Sigma M = 0; \tag{4}$$

- сума проекцій всіх сил на горизонтальну вісь:

$$\Sigma Y = F_{yi} + N_i^n \cdot \cos \alpha_n - N_i^{n+1} \cdot \cos \alpha_{n+1} = 0; \tag{5}$$

– сума проекцій всіх сил на вертикальну вісь:

$$\Sigma X = N_i^n \cdot \sin \alpha_n - N_i^{n+1} \cdot \sin \alpha_{n+1} = 0. \quad (6)$$

Тоді матриця компонентів рівнянь статички буде мати вигляд:

$$[A_i] \equiv \begin{matrix} & N_i^n & N_i^{n+1} \\ \begin{matrix} +\cos \alpha_n & -\cos \alpha_{n+1} \\ +\sin \alpha_n & -\sin \alpha_{n+1} \end{matrix} \end{matrix}$$

Розглянемо вузол типу «j» (рис. 6, в). На вузол не діє зовнішнє навантаження, але діють зусилля  $\{S^m\} \equiv (N_j^m)^T$ ,  $\{S^{m+1}\} \equiv (N_j^{m+1})^T$  та  $\{S^n\} \equiv (N_i^n)^T$ .

У випадку плоскої системи зовнішніх та внутрішніх сил можна скласти три рівняння статички:  
– сума моментів відносно центру вузла:

$$\Sigma M = 0; \quad (7)$$

– сума проекцій всіх сил на горизонтальну вісь:

$$\Sigma Y = -N_j^m \cdot \cos \alpha_m + N_j^n \cdot \sin \alpha_n + N_j^{m+1} \cdot \cos \alpha_{m+1} = 0; \quad (8)$$

– сума проекцій всіх сил на вертикальну вісь:

$$\Sigma X = -F_{xi} - N_j^m \cdot \sin \alpha_m - N_j^n \cdot \cos \alpha_n + N_j^{m+1} \cdot \sin \alpha_{m+1} = 0. \quad (9)$$

Тоді матриця компонентів рівнянь статички буде мати вигляд:

$$[A_i] \equiv \begin{matrix} & N_j^m & N_j^{m+1} & N_j^n \\ \begin{matrix} -\cos \alpha_m & +\cos \alpha_{m+1} & +\sin \alpha_n \\ -\sin \alpha_m & +\sin \alpha_{m+1} & -\cos \alpha_n \end{matrix} \end{matrix}$$

Таким чином, маючи рівняння в усіх вузлах та враховуючи граничні умови рівняння статички у загальному вигляді будуть такими

$$[A] \{S\} = \{F\}. \quad (10)$$

Вирішення рівняння (10) дасть величину взаємних зусиль між складовими елементами структурно-вантових конструкцій лінійного типу. При цьому матрицю [A] складено із рівнянь для всіх вузлів системи.

### Висновки

За результатами проведено дослідження було розроблено методику статичного розрахунку нових комбінованих конструкцій – просторових структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів, суть якого полягає в умовному приведенні проектованої конструкції до плоскої системи, яка складається з жорстких дисків. Відповідно до поставлених задач дослідження зроблено наступні висновки:

1. Вибір розрахункової схеми структурно-вантової конструкції лінійного типу у вигляді плоскої комбінованої значно спрощує статичний аналіз на дію вертикального зовнішнього навантаження. Запропонована схема є геометрично незмінною і статично визначеною.

2. У результаті вирішення статичної задачі встановлюються величини зусиль взаємодію між окремими елементами структурно-вантових конструкцій лінійного типу. Що дає змогу виконати підбір несучих елементів модулів тетраїдної форми та гнучких елементів. А також запроектувати місця спирання конструкції на опори.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стороженко Л. І. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття: Монографія / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко – Полтава: АСМІ, 2015. – 218 с.
2. Gasii G. M. Connections systems of the composite cable space frame / G. M. Gasii // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – Т. 22. – № 1. – С. 5–10.
3. Gasii G. M. Types of steel and concrete composite cable space frames / G. M. Gasii // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 6 (66). – P. 158–165. DOI: 10.15802/stp2016/90514.
4. Експериментальне дослідження моделей структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, Г. М. Гасій, Ю.Л. Гладченко // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2012. – № 3 (33). – С. 243–249.
5. Стороженко Л. І. Визначення переміщень вузлів просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції експериментальним шляхом / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2017. – № 169. – С.118–128.
6. Стороженко Л. І. Експериментальне дослідження деформативності окремих несучих елементів сталезалізобетонного структурно-вантового покриття / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научных трудов. – 2015. – № 82. – С. 219–225.
7. Gasii G. Estimate of technical and economic benefits of a new space composite structure / G. Gasii, O. Nasii, O. Zabolotskyi // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 116. DOI:10.1051/mateconf/201711602014.
8. Gasii G. M. Comparative characteristics of the spatial grid-cable steel-concrete composite slab / G. M. Gasii // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 260–265.
9. Стороженко Л. И. Особенности конструкции и технологии монтажа новых пространственных сталежелезобетонных структурно-вантовых покрытий / Л. И. Стороженко, Г. М. Гасий, С. А. Гапченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1 (70). – Т. 4. – С. 67–72. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26041.
10. Стороженко Л. І. Просторове сталезалізобетонне структурно-вантове покриття / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научных трудов. – 2015. – № 82. – С. 226–230.
11. Трофимов В.И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений: монография / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М.: АСВ, 2002. – 573 с.
12. Канчели Н.В. Строительные пространственные конструкции: Учеб. пособие / Н. В. Канчели. – М.: АСВ, 2009. – 112 с.
13. Шимановский А.В. Теория и расчет сильнонелинейных конструкций / А. В. Шимановский, В. К. Цихановский. – К.: Изд-во "Сталь", 2005. – 432 с.
14. Кирсанов М.Н. Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 6 (24). – С. 28 – 34.
15. Стороженко Л.І. Великопролітні структурно-вантові сталезалізобетонні покриття для будівель і споруд аеропортів / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Проблеми розвитку міського середовища. – 2016. – № 2 (16). – С. 72–79.

**Стороженко Леонід Іванович** – д.т.н., професор, професор кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

**Єрмоленко Дмитро Адольфович** – д.т.н., доцент, професор кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

**Гасій Григорій Михайлович** – к.т.н., доцент, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.

**L. I. Storozhenko**

**D. A. Yermolenko**

**G. M. Gasii**

**STATIC CALCULATION THE SPACE STRUCTURE CONSISTING RIGID DISCS**

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

*The article presents the methodology and features of the static calculation of new combined structures – the steel and concrete composite cable space frames. The idea of a static calculation is to conditionally split the structure into flat rigid discs and determine the forces that will occur at the nodes of the connection of such disks.*

*Key words:* disc, flying, boom, hinge, composite steel-concrete structures.

*Storozhenko Leonid Ivanovich* – D.Sc, Professor, Professor of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

*Yermolenko Dmytro Adolfovich* – D.Sc, Associate Professor, Professor of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

*Gasii Grygorii Mykhailovich* – Ph.D., Associate Professor, Doctoral candidate of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

**Л. И. Стороженко**

**Д. А. Ермоленко**

**Г. М. Гасий**

## **СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ ЖЕСТКИХ ДИСКОВ**

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

*В статье приведена методика и особенности статического расчета новых комбинированных конструкций – пространственных структурно-вантовых сталежелезобетонных покрытий. Идея статического расчета заключается в условном разделении конструкции на плоские жесткие диски и определении усилий, возникающие в узлах соединения таких дисков.*

*Ключевые слова:* диск, пролет, стрела подъема, шарнир, сталежелезобетонные конструкции.

*Стороженко Леонид Иванович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры конструкций из металла, дерева и пластмасс; Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка.

*Ермоленко Дмитрий Адольфович* – д.т.н., доцент, профессор кафедры конструкций из металла, дерева и пластмасс; Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

*Гасий Григорий Михайлович* – к.т.н., доцент, докторант кафедры конструкций из металла, дерева и пластмасс; Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка.