



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2014, ТОМ 20, НОМЕР 1, 29–43

УДК 624.014.2

(14)-0304-0

## **МЕТОДИКА І АЛГОРИТМ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**М. В. Гоголь**

*Національний університет «Львівська політехніка»,*

*12, вул. Ст. Бандери, м. Львів, Україна, 79013.*

*E-mail: gogolmyron@i.ua*

*Отримана 25 листопада 2013; прийнята 24 січня 2014.*

**Анотація.** У статті розглянуто питання підвищення економічної ефективності комбінованих металевих конструкцій. Показано, що для цього необхідно надати процесу проектування необхідну наукову обґрунтованість і звести до мінімуму елемент суб'єктивності при виборі проектних рішень. Технічна і економічна ефективність сталевих конструкцій може бути забезпечена, з одного боку, розробкою і впровадженням прогресивних методів розрахунку та нових конструктивних схем, з іншого – регулярним аналізом методів проектування. Підкреслено, що найбільш раціональним методом регулювання є розрахунковий – в процесі проектування, а проблема розрахунку будівельних конструкцій, в тому числі комбінованих, насамперед повинна ставитись як проблема їх раціонального проектування. Розроблена узагальнена математична модель розрахунку комбінованих конструкцій на основі енергетичного підходу з врахуванням деформованого стану балки жорсткості. Показана суть розрахунку: спочатку на основі методу декомпозиції системи розділяється система на дві підсистеми – головну і допоміжну. Далі, використавши синтез системи, розраховується її напружено-деформований стан. Представлено алгоритм розрахунку і методика проектування раціональної комбінованої конструкції.

**Ключові слова:** модель, метод, комбіновані конструкції, рівнонапруженість, раціональне проектування, регулювання, ефективність.

## **МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**М. В. Гоголь**

*Национальный университет «Львовская политехника»,*

*12, ул. Ст. Бандеры, г. Львов, Украина, 79013.*

*E-mail: gogolmyron@i.ua*

*Получена 25 ноября 2013; принята 24 января 2014.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы повышения экономической эффективности комбинированных металлических конструкций. Показано, что для этого необходимо придать процессу проектирования необходимую научную обоснованность и свести к минимуму элемент субъективности при выборе проектных решений. Техническая и экономическая эффективность стальных конструкций может быть обеспечена, с одной стороны, разработкой и внедрением прогрессивных методов расчета и новых конструктивных схем, с другой – регулярным анализом методов проектирования. Подчеркнуто, что наиболее рациональным методом регулирования является расчетный – в процессе проектирования, а проблема расчета строительных конструкций, в том числе комбинированных, изначально должна ставиться как проблема их рационального проектирования. Разработана обобщенная математическая модель расчета комбинированных конструкций на основе энергетического подхода с учетом

деформированного состояния балки жесткости. Показана суть расчета: сначала на основе метода декомпозиции системы разделяется система на две подсистемы – главную и вспомогательную. Далее, используя синтез системы, рассчитывается ее напряженно-деформированное состояние. Представлен алгоритм расчета и методика проектирования рациональной комбинированной конструкции.

**Ключевые слова:** модель, метод, комбинированные конструкции, равнонапряженность, рациональное проектирование, регулирование, эффективность.

## TECHNIQUES AND ALGORITHMS RATIONAL DESIGN COMBINED METAL STRUCTURES

**Myron Gogol**

*National University «Lviv Politechnique»,*

*12, Str. Bandery, Lviv, Ukraine, 79013.*

*E-mail: gogolmyron@i.ua*

*Received 25 November 2013; accepted 24 January 2014.*

**Abstract.** This article describes how to increase the economic efficiency of the combined metal structures. It is shown that this is necessary to give the design process of scientific support and minimize element of subjectivity in choosing the design decisions. Technical and economic efficiency of steel structures can be provided, on the one hand, the development and introduction of advanced methods of calculation and design of new schemes, on the other – a regular analysis of design methods. Emphasized that the most efficient method of regulation is calculated – in the design process, and the problem of design of structures, including combined, should initially posed as a problem of their rational design. The generalized mathematical model for calculating the combined structures based on energy approach taking into account the strain state of the beam stiffness. Shows the calculation are: first, based on the method of decomposition of the system, the system is divided into two subsystems – the main and auxiliary. Further, using the synthesis system calculated its stress-strain state. An algorithm for calculating and rational method of designing a combined structure.

**Keywords:** model, method, combined structures, equi-stress, rational desing, control, efficiency.

### Постановка проблеми і її актуальність

Науково-технічний прогрес в галузі будівництва тісно пов'язаний з проблемами розвитку і удосконалення несучих металевих конструкцій, зокрема комбінованих. На сьогодні в Україні гостро поставлена проблема підвищення економічної ефективності таких конструкцій – зниження їх металоємності, підвищення технологічності, якості, надійності, що зробить їх конкурентоздатними на ринку порівняно з зарубіжними аналогами [15].

Виконання зростаючих вимог до якості, надійності та металоємності несучих конструкцій може бути досягнуто за рахунок розробки раціональних конструкцій, усунення надлишкових запасів міцності, максимального використання міцнісних характеристик сталі і технологій. Проте широке їх використання затримується

передусім недосконалістю нормативної бази та недостатнім вітчизняним досвідом економічного та надійного проектування таких конструкцій.

Основна задача при проектуванні таких раціональних будівельних конструкцій, з якою зустрічається інженер, є одержання рівномірної конструкції, тобто найбільш раціональної системи. Тому проблема розрахунку будівельних конструкцій, у тому числі комбінованих, насамперед повинна ставитись як проблема їх раціонального проектування [3–6, 18–19].

Основним методом на цей час для одержання такої конструкції є метод наближень. Кількість наближень може досягати великого числа і залежить в першу чергу від досвіду і інтуїції конструктора, за яких рідко досягається мета. Існуючі в проектних інститутах і конструкторських бюро методи розробки несучих

конструкцій вимагають значних витрат і часу, і коштів, так як передбачають повномасштабну, на рівні ескізного проекту, розробку варіантів і їх порівняння. Отже, вирішення проблеми підвищення ефективності робіт з проектування конструкцій такого типу є актуальним.

В умовах ринкової економіки вирішення цієї науково-технічної проблеми починається на етапі розробки робочого проекту, в якому визначено та обґрунтовано основні архітектурно-будівельні та конструктивні рішення. Створення первинної моделі ґрунтується в основному на досвіді та творчому потенціалі проектувальника [11].

Відсутність методології розробки раціональних несучих комбінованих конструкцій не дозволяє вести цілеспрямовані та ефективні розрахункові та проектні роботи. Така методологія повинна ставити своєю метою дати конструктору-проектувальнику в простому, доступному і наочному вигляді теорію для проектування найвигідніших комбінованих конструкцій, а також конструкцій, що відрізняються від існуючих істотною новизною конструктивних форм.

Успіх створення нових конструкцій і розширення області використання традиційних при нестачі або відсутності вказівок, норм значною мірою залежить від наявності розрахунково-теоретичної бази, що забезпечує адекватне уявлення про взаємодію споруд із зовнішніми навантаженнями на основі досить точних і в той же час доступних для інженерів розрахункових моделей і методів розрахунку. Для розв'язання поставленої проблеми потрібен розвиток і підвищення ефективності сучасних математичних моделей і методів, що додають процесу проектування необхідну наукову обґрунтованість і зводять до мінімуму елемент суб'єктивності при виборі проектних рішень.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Подорожчання всіх видів природних ресурсів, вартості праці поряд з великим обсягом застосування сталі поставило в ряд першорядних і актуальних завдань економії металу, зниження маси конструкцій, трудомісткості виготовлення і монтажу. Вирішення таких завдань має будуватися на основі використання високих

технологій на всіх стадіях: проектування, виробництва, монтажу та експлуатації металевих конструкцій [10].

Найбільш яскравим прикладом використання високих технологій є розрахунковий метод регулювання напружено-деформованого стану (НДС), який дозволяє раціонально перерозподілити внутрішні зусилля і тим самим знизити витрату сталі. Тому останнім часом проектувальники все частіше використовують розрахунковий перерозподіл зусиль і регулювання НДС конструкцій, що не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат [13, 16]. Такі прийоми дозволяють зменшувати розрахункові зусилля в одних елементах або перерізах конструкції за рахунок збільшення зусиль в інших елементах чи перерізах і в результаті досягати такого самого ефекту, як і від попереднього напруження. Ідея регулювання – адаптація параметрів конструкції до поставленого остаточного результату, що забезпечує заздалегідь вибраний раціональний розподіл зусиль. Особливо це актуально для комбінованих металевих конструкцій.

Раціональне вирішення цієї проблеми можливе лише при комплексному системному підході до проектування конструкцій. Технічна і економічна ефективність і, в кінцевому рахунку, конкурентна здатність сталевих конструкцій може бути забезпечена, з одного боку, розробкою і впровадженням прогресивних методів розрахунку найбільш близьких до дійсного НДС конструкції та нових конструктивних схем, з іншого – регулярним аналізом методів проектування.

В умовах ринкової економіки одним з головних завдань у проектуванні несучих конструкцій стає підвищення конкурентоспроможності проекту. Ця вимога може бути реалізована за рахунок наступних заходів: підвищення якості проектних робіт, особливо на ранніх стадіях проектування; зменшення витрат на багатоваріантні опрацювання; скорочення загальних термінів вироблення проекту.

Приклади використання таких конструктивних схем для комбінованих конструкцій наведено на рис. 1, 2. Слід відмітити їх актуальність – всі комбіновані конструкції змонтовані за останні десять років.

Ефективність використання комбінованих металевих конструкцій порівняно з балковими

не викликає ніякого сумніву [12]. Однак до цього часу існують значні розбіжності стосовно кута нахилу шпренгеля або підвіски до балки жорсткості, кількості пружних опор балки жорсткості (наприклад, на рис. 1 їх дві, а на рис. 2 – п'ять) та висоти конструкції і не має рекомендацій для визначення раціональних геометричних параметрів комбінованих конструкцій.

### Мета роботи

Метою роботи є підвищення ефективності і розробка методології раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій та аналіз результатів виконаних досліджень.

### Виклад основного матеріалу

Розрахунок кожного виду таких конструкцій існуючим методом [6, 14, 17] має свої особливості. Разом з тим деякі суттєві особливості цих систем, а саме їх нелінійність не дають можливості реальної оцінки їх дійсного НДС з використанням існуючих – звичних методів розрахунку [6–7]. Результати таких розрахунків дають нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає у суттєвій різниці опорних і прольотних моментів. Це робить такі комбіновані конструкції не завжди раціональними [16]. Тому розвиток методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій, який відображав би їх дійсну роботу, є на даний час також актуальною проблемою.



**Рисунок 1.** Монтаж малоелементної комбінованої шпренгельної ферми, Україна.

Нами запропоновано єдину розрахункову модель комбінованих систем у вигляді балки на пружних опорах, в якій балка моделює балку жорсткості, а пружні опори – систему підкріплення [2–4]. Для розрахунку статично невизначених систем нерозрізних балок на пружних проміжних опорах існують класичні методи [11, 18, 19]. Останні не дають можливості проводити розрахункове регулювання НДС конструкції, так як коефіцієнти пружності проміжних опор мають бути заздалегідь відомі.

Отже, для розрахунку більш широкого класу комбінованих конструкцій необхідно було розробити ітераційний алгоритм, а для можливості проведення розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості використати енерговаріаційні принципи і методи декомпозиції та синтезу [3–4]. Суть розрахунку: спочатку на основі методу декомпозиції системи розділимо систему на дві підсистеми – головну і допоміжну. Головною підсистемою будемо вважати балку жорсткості на пружних опорах, які моделюють систему підкріплення. Пружними опорами вважаються елементи (вертикальні і похилі) комбінованої конструкції (системи). Допоміжною підсистемою вважаємо конструкцію шпренгеля або ванта.

При цьому для розрахунку використано не статичні принципи, а енерговаріаційні, зокрема принцип Лагранжа. Далі, використавши синтез системи, розраховуємо її напружено-деформований стан. Для запропонованої розрахункової моделі математична модель описується на основі повної потенційної енергії системи.



**Рисунок 2.** Комбінований міст, Чехія.

Запропонований метод проектування і розрахунок раціональних комбінованих конструкцій зводиться до врахування впливу деформативності проміжних опор балки жорсткості на співвідношення опорних і прольотних моментів [4].

Щоб розрахункова модель, яка відрізняється від реальної конструкції, була коректною, необхідно витримати принцип сумісності, тобто, щоб точки контакту балки жорсткості з пружними опорами переміщались у процесі роботи під навантаженням у заданій системі на таку ж величину, як точки вузлів кріплення системи підвіски конструкції. Для такого класу конструкцій розроблено фізичну модель балки жорсткості (рис. 3–5) і математичну модель процесу регулювання зусиль в системі (рис. 6). Опираючись на класичні теоретичні передумови для запису фізичної моделі балки жорсткості

комбінованих конструкцій, використаємо енергетичні принципи будівельної механіки.

$$\overline{M}_k^n = \left| \frac{6EI_k}{\left(\frac{l_k}{2}\right)^2} \right| = \left| \frac{24EI_k}{l_k^2} \right| = \overline{M}_k^n;$$

$$\overline{M}_{k+1}^n = \left| \frac{6EI_{k+1}}{\left(\frac{l_{k+1}}{2}\right)^2} \right| = \left| \frac{24EI_{k+1}}{l_{k+1}^2} \right| = \overline{M}_{k+1}^n,$$

а реактивне зусилля у пружній опорі

$$r_{i,i} = \frac{2\overline{M}_k}{\frac{l_k}{2}} + \frac{2\overline{M}_{k+1}}{\frac{l_{k+1}}{2}} + K_k = \frac{96EI_k}{l_k^3} + \frac{96EI_{k+1}}{l_{k+1}^3} + K_k.$$

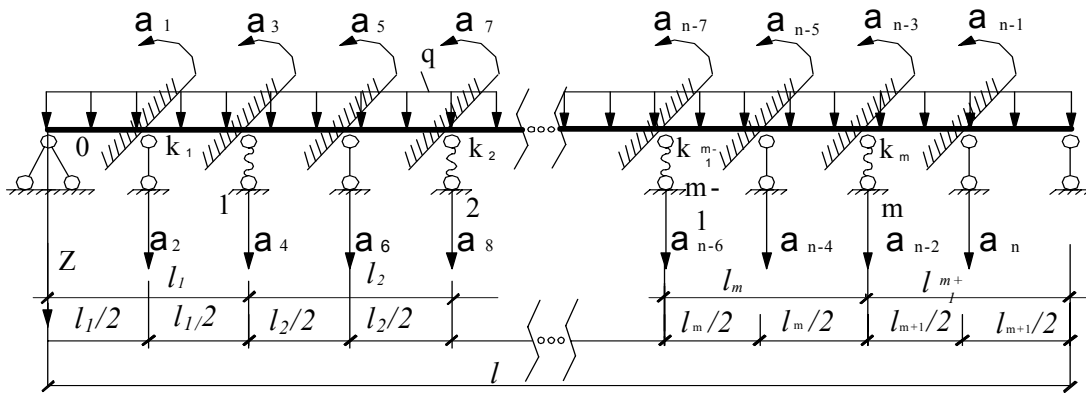


Рисунок 3. Схема для фізичної моделі.

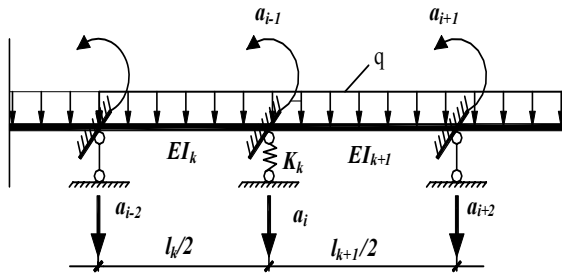


Рисунок 4. Фрагмент пружної опори «к» із прилеглими до неї відтинками балки.

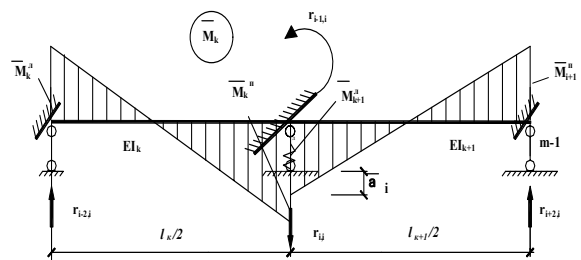
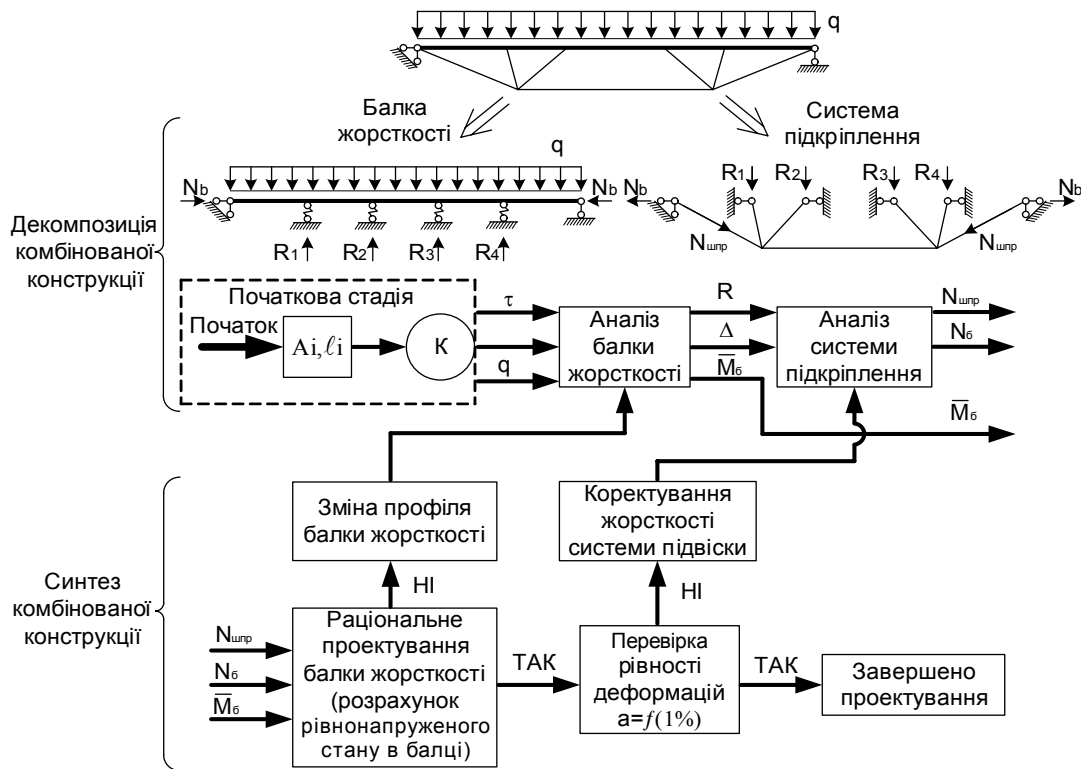


Рисунок 5. Епюра  $\overline{M}$  від одиночного осідання опори «К» ( $K = \overline{1}, m$ ).





**Рисунок 6.** Схема математичної моделі ітераційного процесу проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій.

геометричні параметри: раціональну кількість опор балки жорсткості – кількості підкріплень у балці жорсткості не більше трьох, а в разі симетричних вантових систем їх може бути не більше чотирьох, а також величини кутів нахилу підкосів, тяжів і вант і відповідну висоту комбінованої конструкції. За більшої кількості підкріплень раціональність конструкції зменшується, вона стає «у ділі» дорожчою. Звідси, узагальнюювальним принципом формування нових конструктивних систем є те, що ці системи повинні бути комбінованими і мати якомога менше елементів та вузлів їх з'єднання.

Отже, створюючи раціональні конструктивні комбіновані системи, критеріями раціональності, очевидно, будуть (рис. 7):

- регулювання НДС розрахунковим методом на базі варіювання співвідношень деформативності балки жорсткості і підтримувальної системи;
- забезпечення рівномірного напруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості;
- концентрація матеріалу в основному елементі (балці жорсткості);

– малоелементність і технологічність конструкцій – розроблення вихідних систем з мінімальною кількістю елементів, максимальне використання прокатних профілів, застосування вискоелективних видів профілів, використання прокату з підвищеними механічними властивостями. Зазначені вище критерії покладені в основу розроблення нових комбінованих систем (рішень), або вдосконалення наявних, що забезпечує їхню раціональність і ефективність.

Але часто досконалий напружений стан конструкції під навантаженням не дає гарантії її найменшої вартості «у ділі», тому що у таку вартість входить технологія виготовлення, монтажу та експлуатації. Досягнути його можливо лише у разі дотримання таких умов:

- а) кількості підкріплень у балці жорсткості не більше трьох, а в разі симетричних вантових систем їх може бути не більше чотирьох;
- б) регулювати моменти в балці жорсткості можна також зміною віддалей між підкріпленнями;

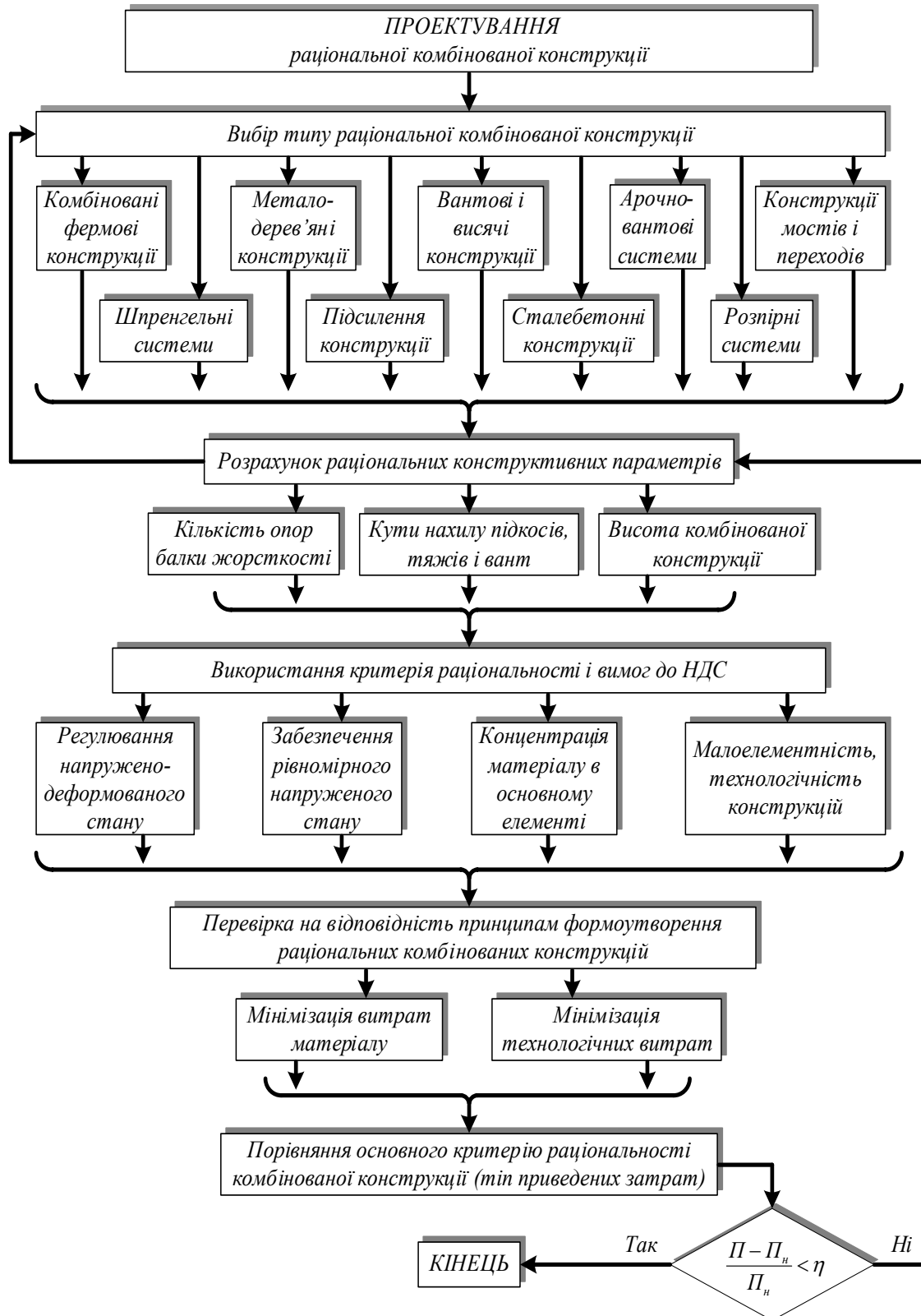


Рисунок 7. Методика проектування раціональної комбінованої конструкції.



- в) основну масу матеріалу потрібно зосереджувати в балці жорсткості;
- г) балку жорсткості раціонально проектувати із ефективного прокатного профілю або складеного;
- д) під час несиметричного навантаження жорсткість забезпечується за допомогою похилих стояків;
- е) з метою підвищення ефективності комбінованих конструкцій, тобто зниження витрат матеріалу за заданої несучої спроможності або жорсткості, необхідно використовувати розрахункове регулювання їх НДС без силового втручання;
- є) регулюють моменти у балці жорсткості переважно раціональним перерозподілом матеріалу в системі балка – елементи підкріплення;
- ж) регулювати моменти в балці жорсткості можна також зміною кута нахилу похилих стояків;
- з) регулювати зусилля в комбінованій конструкції загалом можна зміною кута нахилу приопорних елементів шпренгеля, який працює за принципом ванта, і за рахунок цього можливе зменшення кута його нахилу до балки жорсткості від 45 до 30°;
- і) регулювання зусиль зміною кутів нахилу похилих стояків і приопорних елементів шпренгеля зумовлює зменшення загальної висоти комбінованих систем, що впливає на загальну висоту будівлі;
- и) зміна кутів нахилу елементів системи підкріплення забезпечує регулювання нормальних сил у балці жорсткості з метою кращого використання матеріалу в її роботі. У результаті цього можна досягти збільшення нормальних сил і зменшення згинальних моментів у балці жорсткості;
- к) комбіновані системи з регулюванням НДС необхідно проектувати загалом з мінімальною кількістю вузлів.

Виконання цих умов забезпечить досягнення сформульованого основного критерію раціональності: формоутворення комбінованої металеві конструкції буде раціональним лише тоді, коли ця конструкція матиме найменшу вартість «у ділі» від усіх можливих форм відомих конструкцій за однакового навантаження і прольоту та забезпечення потрібної жорсткості конструкцій.

Формоутворення раціональних комбінованих систем ґрунтується на таких основних принципах: мінімізація витрат матеріалу і вартості їх виготовлення під час забезпечення раціональних геометричних параметрів (рис 7).

Принципи формоутворення нових типів конструкцій ґрунтуються, очевидно, на якісному оцінюванні відомих конструкцій, на вмінні виявити їхні позитивні та негативні ознаки. Тільки відкинувши у відомих конструкціях все негативне і посиливши все позитивне, можемо створити нові типи конструкцій, які будуть кращі від відомих.

Але принцип мінімальних матеріаловитрат не є достатнім. Тому другим принципом формоутворення є мінімальні технологічні затрати на виготовлення конструкції.

На жаль, обидва зазначені принципи є взаємно протилежні: балка із прокатного профілю має мінімальні технологічні затрати, але максимальну масу, а ферма, навпаки, – мінімальну масу, але максимальні технологічні затрати. Отже, раціональною буде якась проміжна конструкція, що матиме у своєму складі таку балку, яка вимагатиме мінімум фермових елементів. Тобто це буде синтез параметрів малої маси ферми та малих технологічних затрат балки. Такими конструкціями є комбіновані – шпренгельні та вантові.

Отже, розглянемо детальніше кожен із таких основних принципів формоутворення раціональних комбінованих конструкцій:

- мінімізація витрат матеріалу та його вирішення трансформуванням епюри моментів;
- принцип мінімальних технологічних витрат та його вирішення трансформуванням топології конструкцій.

Маса звичайної балки на двох шарнірних опорах під час трансформації епюри  $M_x$  із моноекстремальної у рівноекстремальну за допомогою проміжних пружних опор, інтенсивно падає лише до кількості прольотів  $n \leq 4$ , тобто за максимум трьох проміжних пружних опор [1, 6]. У разі більшої кількості таких опор маса балки зменшується повільно, тоді як кожна нова опора збільшує пропорційно масу підкріплювальної системи – вантової чи шпренгельної. Оскільки маса балки ідентифікується з її вартістю, то цей самий висновок можна зробити і стосовно вартості балки, що збігається із числовими

дослідженнями, виконаними для вантових систем за розробленою у цій роботі методикою.

Але часто досконалий напружений стан конструкції під навантаженням не дає гарантії її найменшої вартості «у ділі», тому що у таку вартість входить технологія виготовлення, монтажу та експлуатації. Характерним прикладом тут є ферма, для якої з умов уніфікації перерізів та довжин елементів свідомо зменшують значення коефіцієнта повноти напруженого стану конструкції. Більше того, хоч ферма може мати досконалий напружений стан, а балка має найнедосконаліший, але з умов технології прокатні балки мають перевагу перед фермами за прогонів до  $l \approx 18$  м. Це тому, що прокатна балка складається лише з одного елемента і зовсім не має вузлів, тоді як у фермі, навіть за умов уніфікації, є кілька типів елементів та багато вузлів з'єднання цих елементів. І щоб оцінити економічну ефективність необхідно порівняти приведені затрати (вартість «у ділі») раціональної комбінованої конструкції з приведеними затратами типового (звичного) варіанта (рис. 7). Для забезпечення регулювання НДС розрахунковим методом на базі варіювання співвідношень деформативності балки жорсткості і підтримувальної системи необхідно провести розрахунок комбінованої конструкції.

Такі прийоми дозволяють регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій в будь-яких системах, що дозволяє вважати їх універсальними [2, 3]. Розроблена методика розрахунку дозволяє одержати у балці жорсткості поліекстремальну, з потрібними значеннями екстремумів, епоури  $M_q$  без попереднього напруження системи, тільки використовуючи розрахунковий метод регулювання НДС.

Отримані диференційні залежності для визначення величин деформацій і осідання пружних опор балки жорсткості в матричній формі і запропоновані розрахункові формули для визначення НДС комбінованих конструкцій [3].

На базі удосконаленого методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій з врахуванням деформованого стану балки жорсткості розроблено метод регулювання НДС комбінованих конструкцій шляхом визначення раціональної топології та жорсткісних характеристик поперечних перерізів елементів [3, 4]. Це забезпечує можливість регулювання НДС в

балці жорсткості по її довжині для отримання рівних напружень в розрахункових опорних і прольотних перерізах. Розроблений метод дає можливість регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій у всіх типах комбінованих систем.

На основі запропонованого критерію раціональності комбінованих металевих конструкцій доведено, що маса нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах, порівняно з балкою на двох опорах прольотом до 45–60 м, інтенсивно зменшується при наявності не більше трьох проміжних пружних опор. Визначено раціональні кути нахилу підкосів, тяжів і вант комбінованих конструкцій по відношенню до їх маси в діапазоні 30–60° [1].

На основі аналізу результатів виконаних досліджень і вивчення впливу деформованого стану балки жорсткості на роботу комбінованої конструкції розроблені пропозиції з удосконалення їх конструктивних рішень і запропоновані нові конструктивні форми комбінованих систем меншою масою до 20 %, які захищені патентами України на винаходи (Патенти України: № 50014, 46383, 48841) [7–9].

Використання узагальненої методики раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій, розрахункового методу регулювання НДС, врахування пружності проміжних опор балки жорсткості, а також удосконалення топології, яке базувалось на розроблених критеріях раціональності і основних принципах формування раціональних комбінованих конструкцій дало можливість запропонувати нові конструктивні форми раціональних комбінованих металевих конструкцій – комбіновані шпренгельні системи (табл.) і визначити їх раціональну область використання. Істотними перевагами таких систем є зменшені: матеріалоемність до 22–27 %; приведені затрати до 24 %. Концентрація матеріалу в основному елементі – балці жорсткості – складає в середньому 65–70 %, а кількість вузлів і елементів порівняно з типовими зменшена у рази. Як видно із табл. 1 такі малоелементні шпренгельні системи запропоновані з кількістю пружних опор від 2 до 7 для прольотів від 9 до 40 м. Найбільш раціональне використання таких систем для трьох пружних опор, що відповідає в середньому

12–24 м. При більших прольотах для забезпечення рівнонапруженого стану в балці жорсткості необхідно більше пружних опор, що викли-

кає зменшення ефективності. Отже, для прольотів від 12 до 40 м ефективно використовувати удосконалені легкі малоелементні шпренгельні

**Таблиця.** Нові конструктивні форми раціональних комбінованих металевих шпренгельних ферм і ферм покриття

№ п/п	Схема комбінованої конструкції	Прольоти, в м	№ п/п	Схема комбінованої конструкції	Прольоти, в м	Кількість опор
1		9, 12	13		9,12	2
2		9, 12, 15	14		9,12, 15	
3		9, 12, 15	15		9,12, 15	
4		9, 12	16		9,12	3
5		15, 18, 24	17		15,18,2 4	
6		18, 24, 30	18		18, 24, 30	4
7		До 36	19		До 36	
8		До 40	20		До 40	5
9		До 40	21		До 40	
10		До 36	22		До 36	6, 7
11		До 36	23		До 36	
12		До 50	24		12, 18, 24	

комбіновані ферми, раціонально запроєктовані на основі розрахункового методу регулювання НДС (табл.).

Балку жорсткості в цих системах найбільш раціонально проектувати із ефективних прокатних профілів, в першу чергу, прокатних двотаврів з паралельними гранями полок і гнутих профілів. Все вищесказане забезпечить високу технологічність конструкцій, а зазначені вище критерії в цілому підвищать раціональність і ефективність комбінованих фермових конструкцій. Раціональність кожної із наведених у табл. конструктивної схеми визначається конкретними умовами роботи конструкції. Так схеми 1–5, 13–17 раціональні для великих, а схеми 6–12, 18–24 – для малих навантажень (табл.).

Це розширює область використання таких легких комбінованих конструкцій, серед яких найпоширеніші шпренгельні і панельно-шпренгельні системи, фермові конструкції, перересні, вантові і висячі системи, підвісні покриття, мостові і сталебетонні конструкції, комбіновані системи з використанням жорстких ниток, системи легких конструкцій сільськогосподарських будівель.

## Висновки

1. Розроблена фізична і математична моделі для розрахунку раціональних комбінованих систем.
2. Розкриття потенціалу регулювання, що криється в таких комбінованих системах шляхом раціонального формування напружено-деформованого стану в перетинах конструкції вже на стадії проектування, створює

раціональні підстави для розробки наукових основ одержання конструкцій нової генерації.

3. Подана методика розрахунку дозволяє виконувати потрібне регулювання зусиль у балці жорсткості без її попереднього напруження.
4. Розроблена методика раціонального проектування комбінованих сталевих конструкцій.
5. Запропонований основний і чотири допоміжні критерії раціональності комбінованих конструкцій, а також сформульовані принципи і розроблені рекомендації по формоутворенню і конструюванню раціональних комбінованих металевих конструкцій.
6. Розроблені основи проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій.
7. Методи регулювання зусиль в комбінованих металевих системах на стадії проектування, що супроводжуються шляхом раціонального підбору геометричних параметрів конструкцій, не передбачають додаткових витрат на створення регулюючих зусиль і тому є більш ефективними.
8. Запропоновані нові конструктивні форми раціональних комбінованих металевих конструкцій – комбіновані шпренгельні системи, які мають зменшену матеріалоемність до 22–27 %, а приведені затрати до 24 %.
9. Результати досліджень значно збільшують номенклатуру конкурентоздатних на вітчизняному і світовому ринках комбінованих конструкцій для будівель і споруд різного призначення і тим самим будуть сприяти підйому металоіндустрії в Україні.

## Література

1. Гоголь, М. В. Дослідження раціональних параметрів комбінованих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. – Львів, 2007. – № 602. – С. 14–18.
2. Gogol, Myron. New constructive forms and their reliability [Текст] / Myron Gogol, Ivan Peleshko, Mykhajlo Bilskyj // Quality and Reliability in Building Industry : IV. International Scientific

## References

1. Gogol, M. V. Researches of well-minded parameters of composite constructions. In: *Mercury National University «Lviv Politechnique»: Theory and practice of civil engineering*. Lviv, 2007, Number 602, p. 14–18. (in Ukrainian)
2. Gogol, Myron; Peleshko, Ivan; Bilskyj, Mykhajlo. New constructive forms and their reliability. In: *Quality and Reliability in Building Industry: IV. International Scientific Conference, 17–19 Oct. 2006:*

- Conference, 17–19 Oct. 2006 : Proceedings / Technical University of Kosice. – Levoca, Slovakia : Technical University of Kosice, 2006. – S. 9. – ISBN 80-8073-594-8.
3. Гоголь, М. В. Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, № 4. – С. 253–262.
  4. Gogol, Miron. Shaping of effective steel structures [Текст] / Miron Gogol // Budownictwo i inzynieria srodowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. – Rzeszow, 2009. – № 264, Z. 52. – S. 43–56.
  5. Гоголь, М. В. Теорія і практика раціонального проектування сталевих мостових переходів [Текст] / М. В. Гоголь, Я. Й. Коцій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Теорія і практика будівництва. – Львів, 2013. – № 755. – С. 88–94.
  6. Гоголь, М. В. Теорія і практика регулювання напружено-деформованого стану комбінованих металевих конструкцій [Текст] / М. В. Гоголь // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2010. – № 2. – С. 2–4.
  7. Деклараційний патент 50014 А Україна, МКИ 7 Е 04 С 3/10 В 66 С17/00. Балкова конструкція [Текст] / М. В. Гоголь, О. М. Гайда (Україна) ; заявник і власник патенту Державний університет «Львівська політехніка», Гоголь Мирон Васильович, Гайда Олексій Миколайович. – № 99127148 ; заявл. 28.12.99 ; опубл. 15.10.02, Бюл. № 10. – 2 с.
  8. Деклараційний патент 46983 А Україна, МКИ 7 Е 04 С3/10. Прогінна конструкція [Текст] / М. В. Гоголь, О. М. Гайда, Б. С. Чайка (Україна) ; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка», Гоголь Мирон Васильович, Гайда Олексій Миколайович, Чайка Борис Степанович. – № 2001031714 ; заявл. 14.03.01 ; опубл. 17.06.02, Бюл. № 6. – 2 с.
  9. Деклараційний патент 48841 А Україна, МКИ 7 Е 04 С 3/08. Шпренгельна балка [Текст] / [Гоголь М. В., Чайка Б. С., Гайда О. М., Надала І. В. (Україна)] ; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка», Гоголь Мирон Васильович, Гайда Олексій Миколайович, Чайка Борис Степанович, Надала Ігор Володимирович – № 2001128874 ; заявл. 21.12.01 ; опубл. 15.08.02, Бюл. № 8. – 2 с.
  10. Денисова, А. П. Принципы формообразования, технологии изготовления и монтажа новых легких металлических конструкций повышенной транспортабельности и их экспериментальное обоснование [Текст] : автореф. дис. на соискание научн. степени д-ра техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / А. П. Денисова. – Пенза, 2004. – 43 с.
  11. Металеві конструкції [Текст] / [В. О. Пермяков, А. А. Нілов, О. В. Шимановський і інш.] ; під ред. В. О. Пермякова і О. В. Шимановського. – К. : Видавництво «Сталь», 2008. – 812 с.
  12. *Proceedings / Technical University of Kosice*. Levoca, Slovakia: Technical University of Kosice, 2006, s. 9. ISBN 80-8073-594-8.
  3. Gogol, M. V. Design and calculation of rational combined metal structures. In: *Metal Constructions*, 2008, Volume 14, Number 4, p. 253–262. (in Ukrainian)
  4. Gogol, Miron. Shaping of effective steel structures. In: *Budownictwo i inzynieria srodowiska: zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Rzeszow, 2009, № 264, Z. 52, s. 43–56.
  5. Gogol, M. V.; Kotsii, Ya. Y. Theory and practice of intelligent design of metal bridge crossing. In: *Mercury. National University «Lviv Politechnique»: Theory and practice of civil engineering*, Lviv, 2013, Number 755, p. 88–94. (in Ukrainian)
  6. Gogol, M. V. Theory and practice of regulation of stress and strain state of composite metal constructions. In: *Industrial engineering and engineer constructions*, 2010, Number 2, p. 2–4. (in Ukrainian)
  7. Declaration patent 50014 A Ukraine, MKI 7 E 04 C 3/10 B 66 C17/00. Beam construction / Gogol, M. V.; Gaida, O. M. (Ukraine); informer and patent owner State University «Lviv Politechnique»; Gogol, M. V.; Gaida, O. M. No. 99127148; declaration 28.12.99; published 15.10.02, Bul. No. 10. 2 p. (in Ukrainian)
  8. Declaration patent 46983 A Ukraine, MKI 7 E 04 C3/10. Continuous construction / Gogol, M. V.; Gaida, O. M.; Chaika, B. S. (Ukraine); informer and patent owner. National University «Lviv Politechnique», Gogol, M. V.; Gaida, O. M.; Chaika, B. S. No. 2001031714; declaration 14.03.01; published 17.06.02, Bul. No. 6. 2 c. (in Ukrainian)
  9. Declaration patent 48841 A Ukraine, MKI 7 E 04 C 3/08. Strut-framed beam / [Gogol, M. V.; Chaika, B. S.; Gaida, O. M.; Nadala, I. V. (Ukraine)]; informer and patent owner. National University «Lviv Politechnique», Gogol, M. V.; Chaika, B. S.; Gaida, O. M.; Nadala, I. V. No. 2001128874; declaration 21.12.01; published 15.08.02, Bul. No. 8. 2 p. (in Ukrainian)
  10. Denisova, A. P. Fundamentals of forming, fabrications technique and assembling of light metal constructions of increased transportability and their experimental validation: D.Sc. in Engineering Authors Abstract. Penza, 2004. 43 p. (in Russian)
  11. Permiakov, V. O.; Nilov, A. A.; Shymanovskyi, O. V. Edited by Permiakov, V. O.; Shymanovskyi, O. V. *Metal Constructions*. Kyiv: Publisher «Steel», 2008. 812 p. (in Ukrainian)
  12. Kuznetsov, V. V. (Ed.) *Metal Constructions*. In three parts. The second part. Steel constructions of buildings and structures (reference book of designer). Moscow: Publisher ASV, 1998. 512 p. (in Russian)
  13. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V.; Peleshko, I. D. Composite metal constructions with regulation and their optimization. In: *Science and innovation in current civil engineering: International research-*

12. Металлические конструкции [Текст]. В 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В. В. Кузнецова ; ЦНИИпроектстальконструкция им. М. П. Мельникова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
13. Пермяков, В. А. Комбинированные металлические конструкции с регулированием и их оптимизация [Текст] / В. А. Пермяков, М. В. Гоголь, И. Д. Пелешко // Наука и инновации в современном строительстве : Междунар. научн.-практ. конф., 17–19 окт. 2007 г. / Сакт-Петербургский государственный архитектурно-строительный ун-т. – СПб. : СПбГАСУ, 2007. – С. 142–145.
14. Пермяков, В. О. Проблема регулювання напружено-деформованого стану плоских стержневих металевих конструкцій [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Теорія і практика будівництва. – Львів, 2004. – № 495. – С. 154–157.
15. Пичугин, С. Ф. Современные проблемы проектирования стальных несущих конструкций в промышленном и гражданском строительстве [Текст] / С. Ф. Пичугин, А. В. Семко, Г. Н. Трусов // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2005. – Том 1, № 1. – С. 53–66.
16. Проекування раціональних комбінованих металевих конструкцій [Текст] : Навч. посібник / [В. О. Пермяков, М. В. Гоголь, І. Д. Пелешко, М. Р. Більський, Б. С. Чайка] ; за ред. проф. В. О. Пермякова. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 180 с.
17. Пермяков, В. О. Рекомендації з проєкування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покрить [Текст] / В. О. Пермяков, М. В. Гоголь. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 24 с.
18. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures [Текст] / Edited by Ronald D. Ziemian. – 6th Edition. – Chichester : John Wiley & Sons, 2010. – 1120 p. – ISBN 978-0-470-08525-7.
19. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures [Текст] / Edited by Theodore V. Galambos. – New York : John Wiley & Sons, 1998. – 911 p. – ISBN 0-471-12742-6.
20. Ференчик, П. Предварительно напряженные стальные конструкции [Текст] : Пер. с нем. / П. Ференчик, М. Тохачек. – М. : Стройиздат, 1979. – 423 с.
- to-practice conference, 17–19, October, 2007. St. Peterburg: SPbGASU, 2007, p. 142–145. (in Russian)*
14. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V. The problems of regulation of stress and strain state of two dimensional bar metal constructions. In: *Mercury National University «Lviv Politechnique»: Theory and practice of civil engineering*. Lviv, 2004, Number 495, p. 154–157. (in Russian)
15. Pichugin, S. F.; Semko, A. V.; Trusov, G. N. Modern problems of bearing steel structures designing for industrial and civilian construction. In: *Modern Industrial and Civil Construction*, 2005, Volume 1, Number 1, p. 53–66. (in Russian)
16. Permiakov, V. O. (Ed.); Gogol, M. V.; Peleshko, I. D.; Bilskyi, M. R.; Chaika, B. S. Design of well-minded composite metal constructions. Textbook. Lviv: Publisher National University «Lviv Politechnique», 2005. 180 p. (in Ukrainian)
17. Permiakov, V. O.; Gogol, M. V. Design recommendations of well-minded metal load-carrying structures of overhead covers and covers. Lviv: Publisher National University «Lviv Politechnique», 2006. 24 p. (in Ukrainian)
18. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures / Edited by Ronald D. Ziemian. 6th Edition. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 1120 p. ISBN 978-0-470-08525-7.
19. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures / Edited by Theodore V. Galambos. New York: John Wiley & Sons, 1998. 911 p. ISBN 0-471-12742-6.
20. Ferenchik, P.; Tohachek, M. Prestressed steel constructions. Moscow: Strojizdat, 1979. 423 p. (in Russian)

**Гоголь Мирон Васильович** — к.т.н., доц. кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка». Академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: регулювання зусиль в будівельних конструкціях розрахунковим методом, оцінка технічного стану та проєкування раціональних металевих конструкцій, посилення конструкцій.

**Гоголь Мирон Васильевич** — к.т.н., доц. кафедры строительного производства Национального университета «Львовская политехника». Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: регулирование усилий в строительных конструкциях расчетным методом, оценка технического состояния и проектирование рациональных металлических конструкций, усиление конструкций.

**Gogol Myron** — Ph.D., associate professor; Build Production Department, National University «Lviv Politechnique». An academician of the Academy of Civil Engineering of Ukraine. Scientific interests: adjusting of efforts in build structures by a calculation method, estimation of the technical state and planning of rational metallic structures, strengthening of structures.