

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ РЕГУЛЮВАННЯ НДС Е КОМБІНОВАНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

© Гоголь М.В., 2009

Викладено результати аналітичних досліджень регулювання НДС в комбінованих конструкціях. Показано переваги і область використання розрахункового методу. Наведено удосконалену методику проектування комбінованих металевих конструкцій та визначено принципи їх використання замість типових конструкцій.

The results of analytical researches of adjusting of stress deformation state (SDS) are expounded in the combined constructions. Advantages and area of the use of calculation method are shown. The improved method of planning of the combined metallic constructions is resulted and principles of their use are certain in place of typical constructions.

Вступ. Сьогодні для усіх розвинених країн світу провідним напрямком ефективного металобудівництва є використання легких металевих конструкцій у будівлях промислового, цивільного і сільськогосподарського призначення. Тенденції розвитку будівництва в Україні також йдуть в напрямку збільшення використання нових ефективних легких вітчизняних та зарубіжних індустріальних конструкцій, зокрема металевих. Сучасний ринок будівельних металевих конструкцій ставить гостро проблему в обґрунтуванні прийнятих конструктивних рішень і вимагає удосконалення теоретичних основ для інженерів під час проектування. Сьогодні галузь будівельних металоконструкцій переживає друге відродження, зростання попиту на продукцію заводів металоконструкцій сприяє розширенню ринку і росту конкуренції. За даними маркетингових досліджень [11], металоконструкцій названо одним із стрижневих бізнес-процесів розвиваючої галузі легких металевих конструкцій, яка є визначальною, має конкурентний успіх у підприємств. При цьому перевага віддається продукції закордонних фірм, яка відрізняється не тільки високою якістю виготовлення, короткими термінами виконання замовлення, дисципліною виконання договірних зобов'язань, але і раціональним конструктивним вирішенням об'єкта будівництва, яке забезпечує ефективне використання матеріалу [8]. В імпортних каркасах достатньо рідко використовується фасонний прокат, а для зниження матеріаломісткості конструкцій широко використовуються складені суцільностінчасті елементи, або наскрізні із тонкостінних гнутих профілів [8]. З іншого боку, сучасний потенціал вітчизняних заводів металоконструкцій уможливує кожного року виробляти до 500 тис. тонн металоконструкцій різного призначення [13]. Але сьогодні тільки на базі Житомирського, Кам'янець-Подільського і Краматорського ЗМК створено базу для випуску продукції, яка може конкурувати з світовими аналогами. Виробничі потужності більшості заводів металоконструкцій України орієнтовані на виробництво матеріалоемних конструкцій із прокатних профілів для підприємств важкої індустрії, а не ефективних гнутих профілів [13]. Тому, проблема розробки ефективних, конкурентноспроможних металевих конструкцій з використанням вітчизняних прокатних і гнутих профілів є актуальною.

Постановка проблеми. Як відомо, одним із шляхів підвищення ефективності і економічності металевих будівельних конструкцій є розроблення нових, більш раціональних (з низькою металомісткістю і трудомісткістю виготовлення) конструктивних форм за рахунок концентрації матеріалу, малоелементності, вдосконалення методів їх розрахунку і проектування рівнонапружених конструкцій, як найбільш раціональних систем, вибору розрахункових моделей з врахуванням геометричної і конструктивної нелінійності системи, використання попереднього напруження. Однак технологія попереднього напруження є енергозатратною, крім того вона

викликає підвищення трудомісткості та вартості виготовлення конструкцій і їх експлуатації, що призвело до істотного обмеження її використання у практиці будівництва.

Останнім часом проектувальники все частіше відмовляються від попереднього напруження шляхом заміни його розрахунковим перерозподілом зусиль і регулюванням напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, ідея якого полягає в забезпеченні заздалегідь вибраного раціонального розподілу зусиль в елементах шляхом адаптації параметрів конструкції до визначеного кінцевого результату. Насамперед йдеться про варіювання геометричних і жорсткісних характеристик перерізів елементів, геометричних і топологічних характеристик систем, параметрів граничних умов. Такі прийоми дають змогу зменшувати розрахункові зусилля в одних елементах або перерізах конструкції за рахунок збільшення зусиль в інших елементах чи перерізах і в результаті досягати того ж ефекту, як і від попереднього напруження. Це дає можливість регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій як в статично визначуваних, так і в статично невизначуваних системах.

Поставленій проблемі найбільшою мірою відповідають комбіновані (шпренгельні, вантові, висячі) конструкції, основним несучим елементом яких є балка жорсткості, від металомісткості якої значною мірою залежать техніко-економічні показники усєї системи [1–3]. Саме умови проектування балки жорсткості надають можливість регулювання зусиль в усій системі [10, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок кожного виду таких конструкцій існуючим методом [1] має свої особливості. Результати таких розрахунків дають нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає в істотній різниці опорних і прольотних моментів. Це робить такі комбіновані конструкції на завжди раціональними [1–3]. Разом з тим деякі істотні особливості цих систем, а саме їх нелінійність не дають можливості реально оцінити їхню НДС з використанням існуючих (звичних) методів розрахунку [1-3, 10, 12]. Тому удосконалення методу розрахунку комбінованих металевих конструкцій, який відображав би їх дійсну роботу, є сьогодні актуальним завданням.

Мета роботи – удосконалити існуючі методи розрахунку комбінованих конструкцій з врахуванням їх дійсного напружено-деформованого стану та його регулювання. Завданнями дослідження є: а) розробка методу регулювання напружено-деформованого стану балки жорсткості по її довжині для отримання рівних напружень в розрахункових опорних і прольотних перерізах; б) визначення раціональної топології комбінованих конструкцій; в) розробка єдиного методу їх розрахунку, г) визначення принципів використання комбінованих металевих конструкцій замість типових.

Виклад основного матеріалу. Основне завдання проектування будівельних конструкцій, з яким зустрічається інженер, є одержання рівномірної конструкції, тобто найраціональнішої системи. Основним методом, сьогодні для одержання такої конструкції є метод наближень. Кількість наближень може досягати великої кількості і залежить насамперед від досвіду і інтуїції конструктора, за яких рідко досягається мети. Тому проблема розрахунку будівельних конструкцій, зокрема комбінованих, насамперед повинна ставитись як проблема їх раціонального проектування. Отже, раціональне проектування є актуальною проблемою, вирішення якої приведе до значного економічного ефекту, а це спільно становить велику і важливу наукову проблему.

У цій роботі розвивається метод, який дає змогу одночасно з розв'язанням оберненої задачі – раціонального проектування одержати і розв'язок прямої задачі розрахунку (НДС) конструкції. Як критерій раціональності виступає енергетичний критерій раціонального проектування, а також вимоги до НДС: рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість або мінімальна маса конструкції. Інтерес до комбінованих конструкцій великий і область використання з кожним роком зростає, теорія статичного розрахунку таких систем розроблена недостатньо. Разом з тим деякі істотні особливості цих систем, а саме їх нелінійність, ускладнюють використання існуючих (звичних) методів розрахунку. Отже, необхідно, з одного боку, розробити теорію, адекватну до суті проблеми, а з другого, – щоб освоєння теорії інженером було по можливості спрощене. З цією метою розробка теорії була орієнтована на використання апробованих аналітичних і числових

методів лінійної будівельної механіки до розрахунку нелінійних комбінованих систем. Такі комбіновані системи вимагають своєю чергою розробки як розрахункового методу регулювання зусиль, так і методу розрахунку таких комбінованих конструкцій з врахуванням деформованого стану балки жорсткості [2].

Для розрахунку статично невизначених систем нерозрізних балок на пружних проміжних опорах існують класичні методи [9]. Останній не дає можливості проводити розрахункове регулювання НДС конструкції, оскільки коефіцієнти пружності проміжних опор мають бути заздалегідь відомі. На цій основі також розроблений метод і-х моментів [4–7]. За допомогою цього методу можна отримати залежності згинальних моментів від зміни величин прольотів балки жорсткості і кутів нахилу розкосів шпренгеля. Для цього методу складений алгоритм, який дає можливість знаходити тільки рівномomentний стан балки жорсткості, не дає можливості міняти характеристики системи підкріплення в процесі розрахунку і для інших типів комбінованих систем в кожному конкретному випадку вимагає розроблення нового алгоритму, тобто має обмежену область використання. Отже, для розрахунку ширшого класу комбінованих конструкцій необхідно було розробити ітераційний алгоритм, а для можливості проведення розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості використати енерго-варіаційні принципи і методи декомпозиції та синтезу [1–3]. Суть розрахунку: спочатку на основі методу декомпозиції системи розділимо систему на дві підсистеми – головну і допоміжну. Головною підсистемою вважатимемо 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 енерго-варіаційні, 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.

Запропонований метод проектування і розрахунок раціональних комбінованих конструкцій зводиться до врахування впливу деформативності проміжних опор балки жорсткості на співвідношення опорних і прольотних моментів [1–3]. При цьому раціональність комбінованої конструкції загалом залежить як від жорсткості проміжних опор шпренгельної системи, так і від топології. Ідея регулювання – адаптація параметрів конструкції до поставленого кінцевого результату, що забезпечує заздалегідь вибраний раціональний розподіл зусиль. раціональних комбінованих конструкцій, зводиться до врахування впливу деформативності проміжних опор балки жорсткості на співвідношення опорних і прольотних моментів [3]. На першому етапі регулюють деформований стан та моменти у балці жорсткості. На другому етапі знаходять зусилля “N” в елементах системи підкріплення, яка при цьому стає статично визначеною, і визначають їх перерізи, які відповідають відрегульованому стану балки жорсткості, з метою задовольнити умовам сумісності деформацій балки жорсткості і системи підкріплення комбінованої системи, в якій є ця балка жорсткості [3].


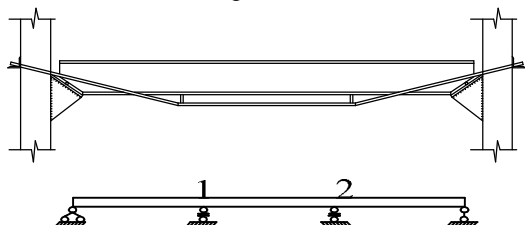
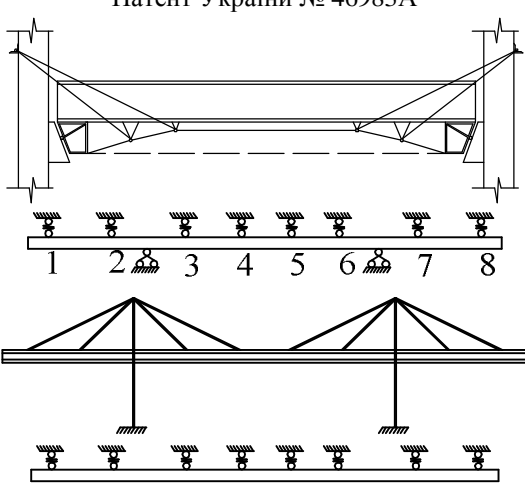
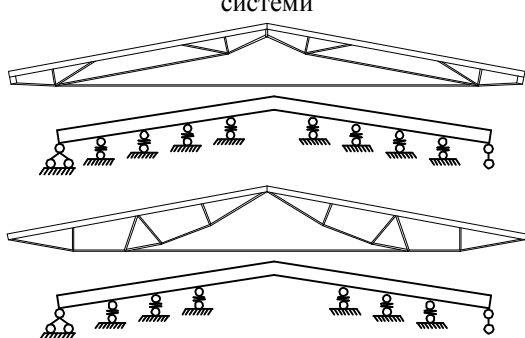
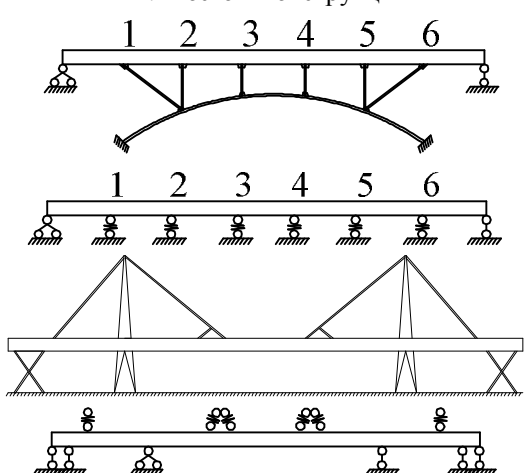
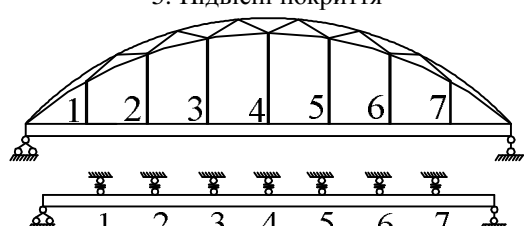
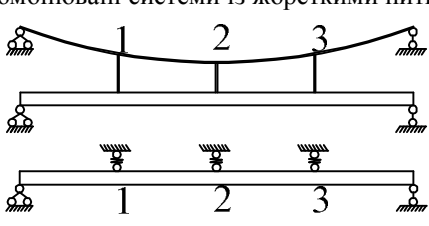
Наприклад, в однопролітній балці, поставивши посередині прольоту пружну опору, можна відрегулювати жорсткість пружної опори так, щоби усі екстремуми моменту мали однакові значення і були рівні між собою – $ql^2/48$. Мінімум, що можна досягнути в балці на жорсткій опорі без регулювання зусиль, це – $M_{\min} = ql^2/32$, а в випадку з регулюванням зусиль – $M_{\min} = ql^2/48$, що на 34 % менше. Звідси випливає основний принцип регулювання напружено-деформованого стану комбінованих конструкцій, розрахункову схему яких можна прийняти як схему балки на «пружних» проміжних і твердих крайніх опорах.

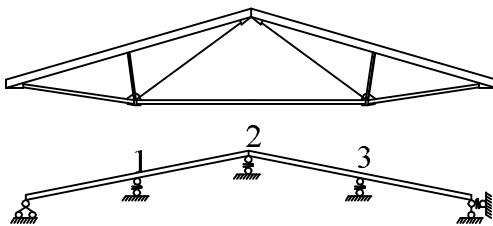
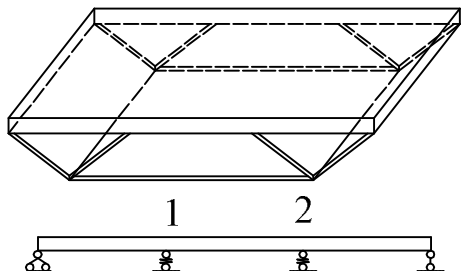
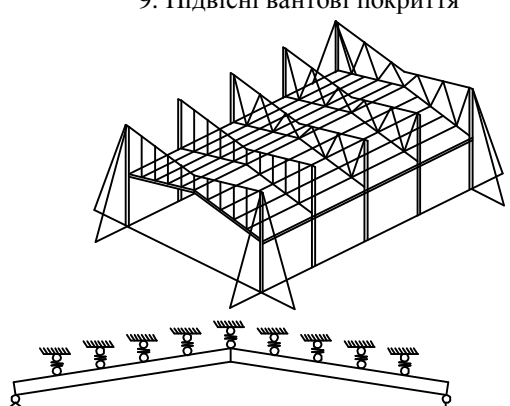
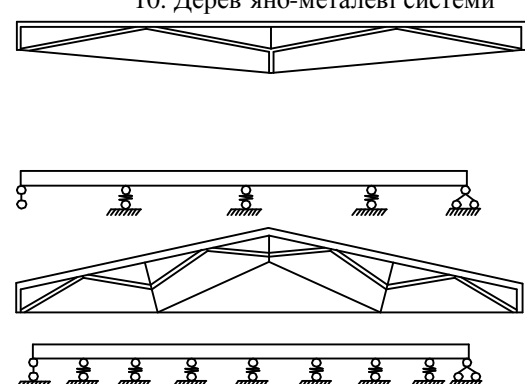
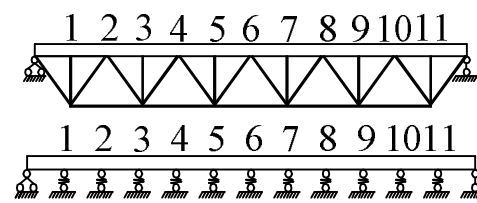
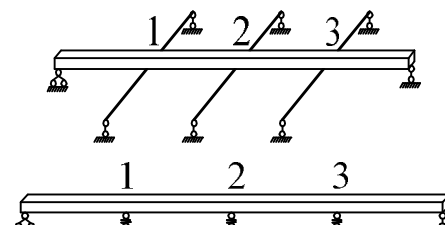
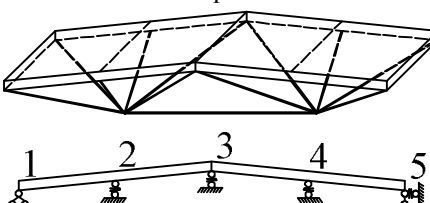
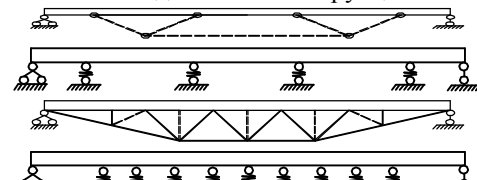

Суть такого регулювання полягає в раціональному виборі топології конструкцій, характеру закріплень на опорах, розрахунку її геометричних параметрів і жорсткісних характеристик стрижневих елементів. В процесі збільшення зовнішнього навантаження в ній відбувається попередньо розрахований раціональний перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами з одержанням НДС, аналогічного, як від дії попереднього напруження. Такі прийоми дають змогу регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій в будь-яких системах, що уможливорює вважати їх універсальними. На основі цього, нами запропонований і запатентований [1, 10, 12] номенклатурний ряд ефективних нових легких, малоелементних шпренгельних

конструкцій (табл. 1) і раціональні області їх використання. Ефективність застосування комбінованих конструкцій наведена в табл. 2,3, рис. 1 а в таблиці 4 наведено типи запропонованих ефективних комбінованих конструкцій, які дають змогу хіба що одержати ефект порівняно з типовими.

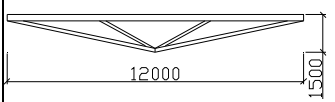
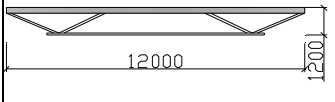
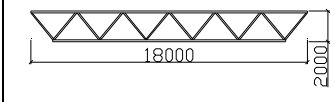
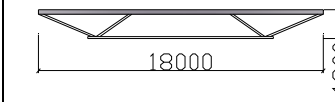
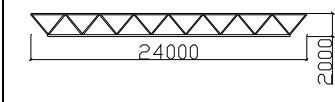
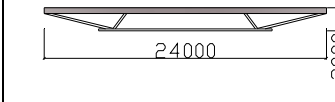
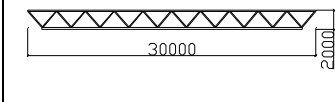
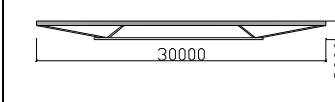
Таблиця 1

Комбіновані конструкції для раціонального проектування

| Конструктивна і розрахункова схеми | Конструктивна і розрахункова схеми |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">1</p> <p>1. Шпренгельні системи Патент України № 48841А</p>  <p>Патент України № 50014А</p>  | <p style="text-align: center;">2</p> <p>2. Вантові системи Патент України № 46983А</p>  |
| <p>3. Велико пролітні шпренгельні системи</p>  | <p>4. Мостові конструкції</p>  |
| <p>5. Підвісні покриття</p>  | <p>6. Комбіновані системи із жорсткими нитками</p>  |

| 1 | 2 |
|---|---|
| <p>7. Сталобетонні конструкції</p>  | <p>8. Блок ферми</p>  |
| <p>9. Підвісні вантові покриття</p>  | <p>10. Дерев'яно-металеві системи</p>  |
| <p>11. Фермові конструкції</p>  | <p>12. Перехресні системи</p>  |
| <p>13. Панельно-шпрентельні системи</p>  | <p>14. Підсилення конструкцій</p>  |
| <p>15. Арочно-вантові системи</p>  | |

Ефективність застосування комбінованих конструкцій

| № з/п | Схеми ферм | | Кількість вузлів ферм | | Маса ферм, кг | | % |
|-------|--|--|-----------------------|-------------|---------------|-------------|------|
| | «Молодечно» | Малоелементна шпренгельна ферма – «балко-ферма» | Типової | Балко-ферми | Типової | Балко-ферми | |
| 1 |  |  | 5 | 6 | 780 | 615 | 78,8 |
| 2 |  |  | 14 | 6 | 1310 | 1098 | 83,8 |
| 3 |  |  | 18 | 6 | 2035 | 1868 | 91,8 |
| 4 |  |  | 22 | 6 | 2513 | 2461 | 97,9 |

*елементи типових ферм виконані з гнutoзварних профілів;

*елементи балко – ферми виконані:

верхній пояс з двотавра; нижня підвіска з гнutoзварних профілів.

Таблиця 3

Техніко-економічні показники на один елемент

| № п/п | Назва показника | Одиниця виміру | Типова ферма L=18м | Балко-ферма L=18м | Процентне відношення |
|-------|---|----------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 1 | Маса конструкцій | кг | 3000 | 2189 | 73 % |
| 2 | Працемісткість виготовлення | чол.-год | 59 | 14,5 | 24,5 |
| 3 | Вартість виготовлення і транспортування | Грн. | 1350 | 560 | 42 |
| 4 | Працемісткість монтажу | чол.-дн | 6,0 | 6,3 | 105 |
| 5 | Вартість монтажу | грн. | 520 | 550 | 106 |
| 6 | Вартість конструкцій в “ділі” | грн. | 7536,6 | 5198,3 | 69 |
| 7 | Економічний ефект | грн. | | 2338,3 | |

БАЛКО-ФЕРМА

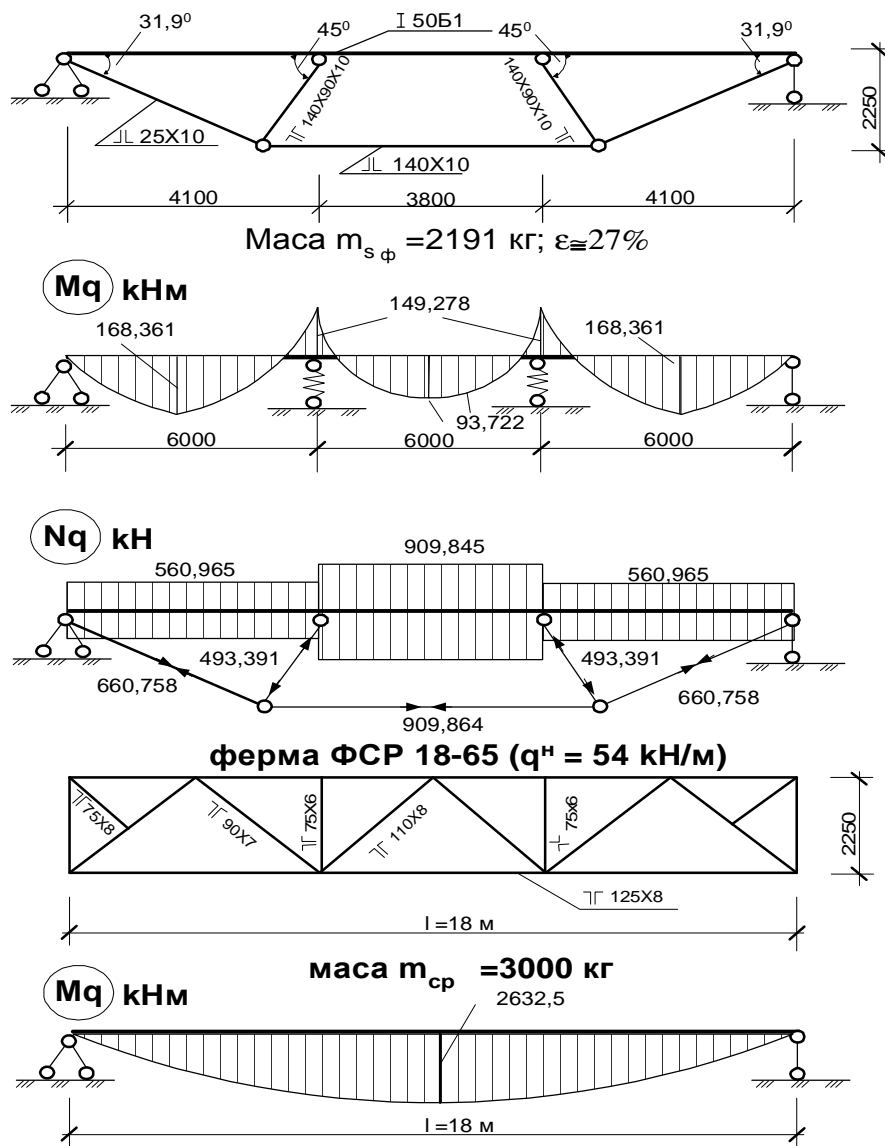
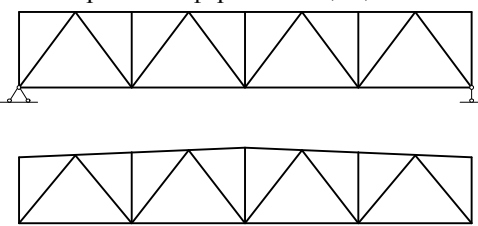
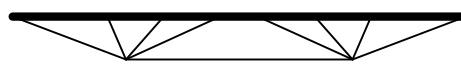
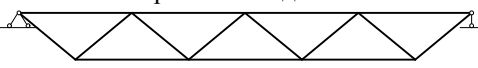
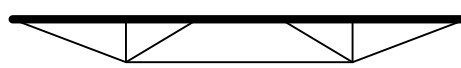
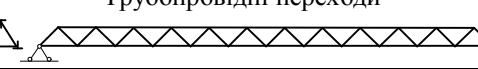
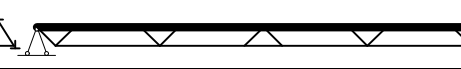
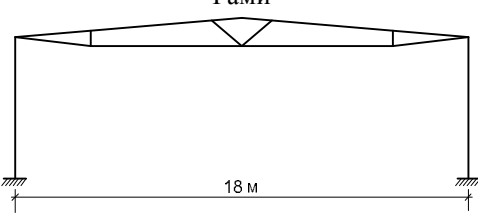
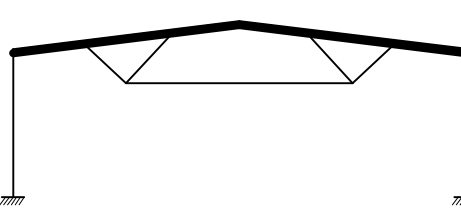
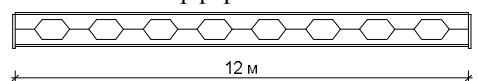
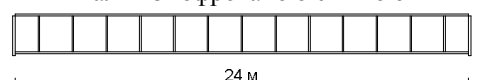
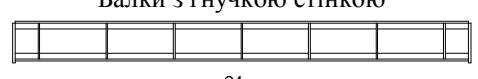
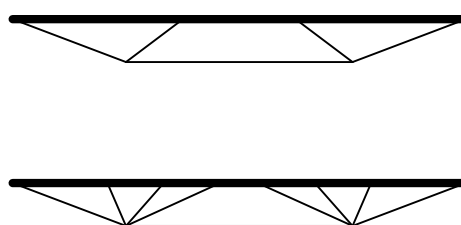
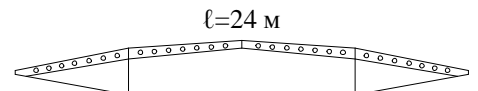
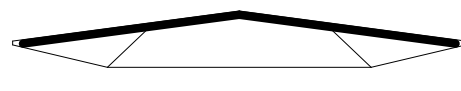
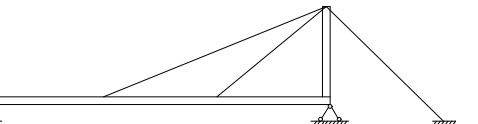
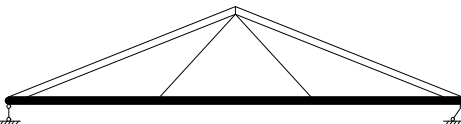
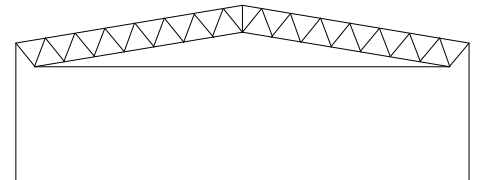
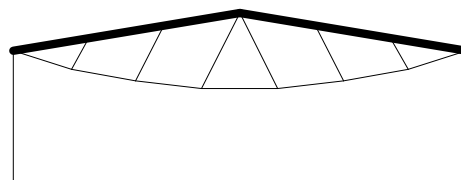


Рис. 1. Типова ферма ФС 18-65 з паралельними поясами і комбінована шпренгельна малоелементна ферма прольотами 18 м за навантаження 54 кН/м

Таблиця 4

Типи запропонованих ефективних комбінованих конструкцій, які дозволяють одержати ефект порівняно з типовими

| № | Існуючі | Запропоновані |
|---|--------------------------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Решітчасті прогони $\ell=12$ м | |
| | | |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| 2 | <p>Крок`вяні ферми $\ell = 18, 24, 30\text{м}$</p>  |  |
| 3 | <p>Ферми «Молодечно»</p>  |  |
| 4 | <p>Трубопровідні переходи</p>  |  |
| 5 | <p>Рама</p>  <p>18 м</p> |  |
| 6 | <p>Балки з перфорованою стінкою</p>  <p>12 м</p> <p>Балки з гофрованою стінкою</p>  <p>24 м</p> <p>Балки з гнучкою стінкою</p>  <p>24 м</p> |  |
| 7 | <p>Ферма з поясів з перфорованих двотаврів $\ell = 24\text{ м}$</p>  |  |
| 8 | <p>Мостові конструкції</p>  |  |
| 9 | <p>Великопрольотні фермові системи $\ell > 45\text{м}$</p>  |  |

Висновки: 1. 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. 2. Удосконалена методика проектування комбінованих металевих конструкцій та визначені принципи їх використання замість типових, а також розширена область їх раціонального застосування. 3. Запропоновані нові конструктивні рішення комбінованих металевих конструкцій на основі встановлених принципів і чинників їх формоутворення та раціональних значень геометричних параметрів. 4. За результатами проведених досліджень підтверджено ефективність запропонованих конструкцій.

1. Гоголь М.В., Більський М.Р. *Особливості регулювання напружено-деформованого стану комбінованих сталевих конструкцій* // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. – 2009.- № 1. – С. 6–9. 2. Гоголь М.В. *Комбіновані металеві конструкції будівель і споруд (дослідження, розрахунок, виготовлення і монтаж)* // *Вісник НУ “Львівська політехніка”. Теорія і практика будівництва*. 2008. – №. 627.– С. 58–63. 3. Гоголь М.В. *Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій* // *Металеві конструкції*. – 2008. – Том 14. – № 4. – С. 253–262. 4. Іваник І., Гоголь М., Віхоть С. *Розрахунок рівномоментного стану в статично невизначених комбінованих конструкціях* // *Вісник ЛДАУ. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. – 2006. – № 7. – С. 261–265. 5. Іваник І.Г., Гоголь М.В., Віхоть С.І. *Розрахунок статично невизначених комбінованих конструкцій* // *Дороги і мости. Зб. наук. праць держ. дорожнього наук.-дослд. ін-ту ім. М.П. Шульгіна*. – 2006. – Випуск 6. – С. 33-42. 6. Іваник І.Г., Віхоть С.І. *Розрахунок комбінованих конструкцій з використанням методу введення уявних шарнірів* // *Вісник НУ «Львівська політехніка»* № 545, 2005р. стор.74-78. 7. Іваник І.Г. *Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану комбінованих статично невизначених металевих конструкцій* / Іваник І.Г., Віхоть С.І., Вибранець Ю.Ю. // *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. – 2008. – № 62. – С. 106–111. 8. Пермяков В.А., Глитин А.Б. *Рамы с элементами переменной жесткости* // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. – 2007. – № 2. 9. Рабинович И.М. *Курс строительной механики стержневых систем. Часть II. Статически неопределимые системы*. – М.: Госстройиздат, 1954. 10. *Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій* / Укл.: 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. 11. Пронозин Я.А., Корсун Н.Д. *Опыт разработки и внедрения новой металлической конструкции покрытия* // *Сборник научных трудов Международного симпозиума. Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)*. – Брест, 2009. – С. 259–264. 12. *Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покриття для наукових працівників, аспірантів, студентів будівельних спеціальностей, інженерно-технічних працівників проектних і науково-дослідних організацій та підприємств будівельного профілю* / Укл.: В.О. Пермяков, М.В. Гоголь. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”. – 2006. – 24 с. 13. Скрипниченко Т. *Металлический ажур* // *Капстроительство*. – 2002. – №7. – С. 27–28.