

Ефективні параметри малоелементних шпренгельних ферм із застосуванням двотаврових елементів з гофрованими стінками

Людмила Лавріненко¹, Анастасія Зотіна²

^{1,2} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹ludmila.lavrinenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5601-0943

²zontiknas@gmail.com

DOI: 10.32347/2522-4182.4.2019.56-69

Анотація. В розвиток досліджень малоелементних кроквяних ферм з неповною (розріженою) решіткою виконано пошук оптимальних геометричних параметрів (без зміни топології), розподілу зусиль та матеріалу, що відображають сучасний стан проектування легких несучих конструкцій, конкретні умови використання та вимоги чинних нормативних документів.

Досліджується конструктивна форма з неповною схемою решітки. Відмічено, що її основною особливістю є виражена чутливість до змін геометричних параметрів конструктивної схеми. Проведені дослідження показали, що регулювання напружено-деформованого стану (SDS) в процесі проектування дозволяє проектувати конструкції щонайбільш раціонально. Для пошуку таких значень параметрів, що надають можливість створити потрібний (за певним критерієм) розподіл зусиль в елементах ферми, застосовано метод оптимального проектування, алгоритм якого реалізований в формі методу прямого пошуку Нелдера-Міда з штрафними функціями, побудованого в розвиток регулярного симплексного методу Спендлі-Хекста-Хімсворта.

Чисельні дослідження проведені для комбінованої системи з жорстким верхнім поясом у вигляді двотаврового елемента з хвилястою гофрованою стінкою, в якості обмежень проектування використовуються нерівності/рівняння умов забезпечення несучої здатності за ДБН В.2.6-198. Отримані оптимальні значення геометричних параметрів за критеріями мінімуму маси та приведених витрат для малоелементної шпренгельної ферми прольотами 24 – 36 м. Показано, що сумісні рішення в області (10...20)%-их втрат за обома критеріями належать до конкурентоспроможних для споруд, аналогічних за призначенням.

Ключові слова. Шпренгельна ферма, розріжена решітка, гофрована стінка, геометричні



Людмила Лавріненко
доцент кафедри металевих та
дерев'яних конструкцій
к.т.н., доц.



Анастасія Зотіна, магістр ка-
федри металевих та дерев'яних
конструкцій

параметри, оптимальне проектування, параметри проектування.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Застосування легких металевих конструкцій у наш час не викликав жодних сумнівів через ті переваги, які вони надають при комплексному вирішенні всіх етапів зведення будівлі. При цьому на перший план виходять взаємозалежність конструктивної форми та технологія її створення, підвищення ступеню уніфікації, можливість серійного виготовлення на спеціалізованих заводах металевих конструкцій. Сучасні уявлення про легкі металеві конструкції пов'язують не стільки з їхньою масою, скільки з деяким інтегральним показником якості конструкції в конкретних умовах, до якого входять показники технологічності виготовлення та транспортування, простота та надійність монтажних з'єднань, можливість застосування швидкісних методів мо-

нтажу без застосування механізмів великої вантажопідйомності тощо. При такому підході сучасним вимогам щонайбільше відповідають тонкостінні малоелементні несучі конструкції у поєднанні із сталевими панельними огорожувальними конструкціями та синтетичними утеплювачами [1].

В практиці проектування виробничих будівель все більшого поширення набувають похилі покрівлі, як наприклад, типове рішення ферми «Молодечно» з похилом верхнього поясу. Вони надають можливість застосування сучасних типів покрівельних матеріалів, та, на відміну від плоских, покращують умови експлуатації рулонних покриттів, що компенсує деяке зростання експлуатаційних витрат при збільшенні будівельного об'єму будівлі. При застосуванні безпрогонних покриттів регулярна решітка наскрізних ригелів також не є безсумнівною, та постає питання про зменшення кількості вузлових спряжень.

Відомо, що в діапазоні малих навантажень маса кроквяних конструкцій визначається не тільки діючими навантаженнями, а й значною мірою характером конструктивного рішення [2]. Щонайбільш відповідною до цих вимог може бути комбінована система у вигляді малоелементної шпренгельної ферми (рис.1).

Базовою конструктивною формою тут є двостоякова шпренгельна ферма, яка при певному мінімумі елементів дає змогу ефективно впливати на розподіл зусиль в її елементах шляхом незначних змін геометричних параметрів.

В центральній частині, де перерізувальна сила є малою, решітка відсутня, а перерізувальна сила сприймається завдяки похилу верхнього поясу. Верхній пояс працює на стиск із згином за будь-якої схеми прикла-

дання навантажень та є найбільш метало-містким елементом ферми. Раціональним з точки зору розподілу внутрішніх зусиль у фермі є розміщення стояків в межах (1/4...1/6) прольоту у поєднанні з жорстким гребневим вузлом та ексцентричним приєднання нижнього поясу в опорному вузлі.

Ферма є ефективною як при безфасонковому вирішенні вузлів, так і при традиційному рішенні на болтах для можливості перевезення ферми розсипом у спеціальному транспортному пакуванні. Конструкція також надає можливість створення відправної марки у вигляді напіферми без додаткових елементів для умов перевезення. Конструктивне рішення V-подібної центральної вставки та малоелементної шпренгельної ферми з такою вставкою захищене патентом на корисну модель [3].

На відміну від безстоякових аркових рішень, де постановка поздовжніх в'язей є утрудненою, наявність проміжних стояків у фермі дозволяє встановити як поздовжні в'язі по шатру, так і вертикальні в'язі для забезпечення просторової жорсткості покриття.

Внутрішні зусилля в таких конструкціях суттєво відрізняються в фермах однакових обрисів, але з різними значеннями геометричних параметрів, що надає можливість створення такого розподілу зусиль, яке дозволило б запроєктувати верхній пояс постійного перерізу з найбільш повним використанням його несучої спроможності в максимальній кількості перерізів.

При цьому без збільшення металоємності досягається зниження трудомісткості виготовлення завдяки зведенню кількості елементів решітки до певного мінімуму, а також трудомісткості монтажу через зменшення кількості в'язей [4].

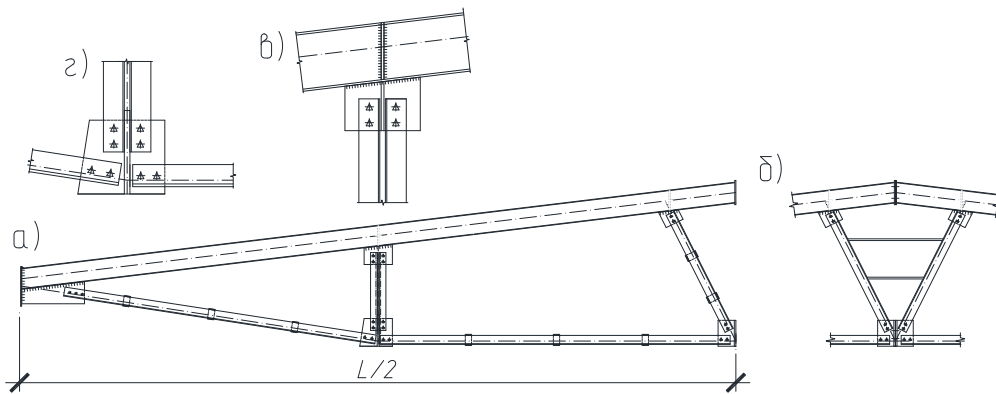


Рис.1. Конструктивне рішення малоелементної шпренгельної ферми: *a* – відправна марка ферми (напівферма); *б* – гребеневий вузол та варіант V-подібної вставки; *в, г* – варіанти вузлів на болтах

Fig.1. The structural solution of the combined truss with a sparse grating; *a* – factory unit (semi-farm); *б* – ribbed knot and variant of the V-shaped insert; *в, г* – bolt options

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В статичному сенсі такі ферми є комбінованими системами з верхнім поясом аркового типу. В попередніх роботах було показано [2,5,6], що їм притаманні як основні позитивні властивості аркових конструкцій – вони мають малу власну вагу та високу жорсткість при симетричних навантаженнях, так і негативні – чуттєвість до несиметричних впливів. Для зменшення пливу несиметричних навантажень було запропоноване конструктивне рішення ферми з центральною вставкою у вигляді V-подібної вставки, закріпленої на затяжці шпренгеля одним кінцем, та на верхньому поясі – іншим. Наявність вставки, що не сприймає жодних зусиль при симетричному навантаженні, дозволяє перерозподілити кососиметричну складову несиметричних навантажень та впливів. При цьому досягається не тільки зниження зусиль та прогинів від однобічного навантаження, але й зменшується розрахункова довжина елемента верхнього поясу за першою кососиметричною формою втрати стійкості.

Для застосування в конструкції з мінімальною кількістю вузлів при завантаженні верхнього поясу за безпрогонною схемою (або через прогони у вигляді зосереджених сил) в якості несучого елемента має бути

застосований економічний профіль, достатньо розвинений як в площині, так і поза площиною згину.

Щонайповніше цим вимогам відповідають тонкостінні двотаврові профілі з синусоїдально гофрованою стінкою із застосуванням високотехнологічних зварювальних робіт [7].

З 1993 року австрійською фірмою Zeman налагоджено випуск таких балок на повністю автоматизованій лінії [8]. Лінія керується комп'ютером та виконує безперервне гофрування, а також зварювання з швидкістю до 2 м/хв. Зварювання стінки з поясами одностороннє. Таким чином виготовляються балки довжиною до 16 м, з висотою стінки від 333 до 1500 мм, товщиною стінки від 1,5 до 3,0 мм. Можливе виготовлення стінки товщиною до 6 мм [9, 10], виробництво балок зі стінкою змінної висоти, моносиметричних перерізів з різною шириною і товщиною поясів, з тонкими поясами (товщина від 6 до 30 мм і ширина від 120 до 450 мм), а також з технологічними отворами в стінці [11]. Максимальна довжина балки за умови застосування зварювальних робіт складає 16 м, але практично вона менша через обмеження на транспортування, гальванізацію тощо. Максимальна довжина балок змінного перерізу – 12 м.

Значне поширення в багатьох регіонах України знайшли сучасні громадські, виробничі і складські будівлі, каркаси яких ви-

конано з елементів з гофрованими стінками (рис. 2) [4, 7].



Рис. 2. Малоелементні кроквяні ферми: *а* – змонтовані ферми покриття; *б* – ферми в процесі виготовлення (фото М.В. Лазнюка)

Fig. 2. Low-element trusses: *a* - mounted trusses; *b* - trusses in the manufacturing process (photo by M. Lazniuk)

Станом на 2018 рік в Україні працюють два заводи, які випускають гофровані двотаври за технологією Zeman.

За технологічними можливостями заводів рекомендуються до використання двотаври з висотами стінок, що не перевищують 1500 мм та дозволяють кратне розрізання заготовки шириною 1000, 1250 або 1500 мм: $h_w = 333, 500, 625, 750, 1000, 1250$ і 1500 мм і товщиною $t_w = 2,0; 2,5$ і 3,0 мм. Пояси стандартних балок можуть мати симетричний переріз і прийматися шириною $b_f = 200 \dots 430$ мм і товщиною $t_f = 10 \dots 30$ мм [8].

В якості матеріалу для поясів використовується листова (ГОСТ 19903-74*) або широкоштабова універсальна сталь (ГОСТ 82-70*) марок С245 або С255 за ГОСТ 27772-88 (СтЗпс або СтЗсп). Для стінок використовується холоднокатана за ГОСТ 19904-90 або гарячекатана тонколистова сталь марки ВСтЗсп (група міцності ОК 360В) за ГОСТ 16529. Для поясів при відповідному техніко-економічному обґрунтуванні можливо використання сталі С345 за ГОСТ 27772-88. З'єднання гофрованих стінок з поясами виконується на спеціальних стендах з використанням автоматизованих способів зварювання односторонніми швами з нерівнобічними катетами (більший

катет прилягає до більш товстого елемента). Внаслідок сполучення надтонких стінок з порівняно товстими поясами такі шви за рахунок майже повного провару наближаються до стикових.

Як показано в багатьох дослідженнях [5,13,14], тип елемента складеного двотаврового перерізу щонайбільше задовольняє вимоги стосовно елементів жорсткості комбінованих систем. Наявність стискувальних напружень, порівняно проте невисоких відносно нормальних напружень від згинального моменту, надає можливість застосуванню як балки жорсткості елемента складеного перерізу, в якому стінка не бере участі в роботі при згині [15,16,17]. Наявність такої гофрованої стінки у цьому разі зменшує загальну металомісткість конструкції при забезпечення усіх чинних вимог до таких елементів [10, 12, 18], а понижена висота балки за певних умов не суттєво впливає на загальну масу [19]. Конструктивний коефіцієнт при цьому не перевищує 1,05...1,08 [7]. Це розширює область ефективного застосування малоелементних кроквяних систем до прольотів 36 м, а при освоєній технології виготовлення двотаврових елементів з поперечно гофрованими хвилястими стінками елементів може нада

ти їм конкурентні переваги серед несучих конструкцій покриттів.

Розглядаються конструктивні рішення у варіанті зварної ферми з двох відправних марок, а також варіант з болтовими з'єднаннями в усіх вузлах (рис.1). Це надає можливість перевезення конструкцій розсипом в транспортних пакетах з спеціальним пакуванням та додатково отримати економію за рахунок транспортних витрат.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Суттєвим при дослідженні малоелементної шпренгельної ферми є вибір параметрів розглядаєної конструкції, що забезпечує найкращий по обраному критерію результат [20].

Такими критеріями можуть бути економічні: матеріалоемність, вартість «в ділі», сума разових і експлуатаційних витрат, зведених до однієї розмірності (приведені витрати) та ін. [21], а також фізичні – наприклад, рівнонапруженість, мінімум маси або об'єму, максимум сприйняття навантаження тощо, що непрямо впливає на ефективність конструкції. В загальному вигляді така задача відносно малоелементної шпренгельної ферми згадувалася в [22].

В даній роботі призначення параметрів конструктивної схеми малоелементної шпренгельної ферми розглядається з позицій оптимального проектування. До числа незмінних параметрів віднесено схеми прикладання навантажень, генеральні розміри покриття – проліт та крок ферми, характеристики матеріалів та сортаментів профілів. Як n змінних параметрів (параметрів проектування) беруться характеристики перерізів елементів та геометричні параметри – висота H та підйом верхнього поясу, величина розкриття центральної вставки, опорний ексцентриситет, відстань l_1 від опори до стійки шпренгеля (рис. 3).

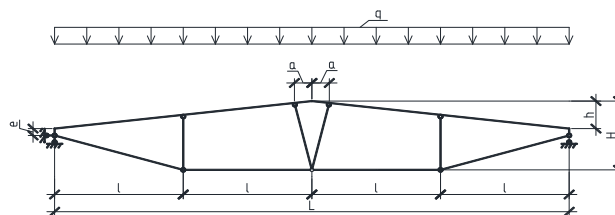


Рис. 3. Геометричні параметри ферми
Fig.3. Geometric parameters of the truss

Можуть бути розглянуті декілька критеріїв оптимальності (тобто мінімізуватися декілька цільових функцій).

Оптимізаційна модель передбачає функціональну залежність показників якості проектного рішення та внутрішньосистемних змінних, а задача оптимального проектування через нелінійність цієї залежності формулюється як задача нелінійного оптимального проектування:

$$\min f(\bar{X}); \bar{X} \in E^n, \quad (1)$$

де f – скалярна цільова функція; \bar{X} – вектор змінних параметрів розмірності n . Задача доповнюється обмеженнями нерівностями:

$$q(P, \bar{X}) \geq 0, \quad (2)$$

де P – параметри стану (зусилля та деформації). Обмеження типу (2) записані як обмеження за несучою здатністю відповідно до ДБН В.2.6 -198 «Сталеві конструкції. Норми проектування» та доповнені обмеженнями на уніфікацію перерізів та конструктивними обмеженнями. Обмеження на прогини не включались до числа використовуваних та застосовувались як перевірочні.

В якості найпоширенішого критерію оптимізації розглядається маса конструкції:

$$M = \sum_i \rho \cdot A_i \cdot L_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

де ρ – питома вага матеріалу, A_i – змінна проектування, L_i – фіксований параметр, пов'язаний з i -тим елементом конструкції (наприклад, для стержньової конструкції A_i – площа поперечного перерізу елемента, а L_i – довжина стержня). Якщо застосовуються конструктивні рішення із застосуванням матеріалів з різною вартістю, можливе застосування в якості критерію вартості конструкції.

Більш об'єктивно (с точністю до змін в цінах) враховуються всі витрати критерієм приведених витрат (з урахуванням вартості огорожувальних і суміжних конструкцій, а також експлуатаційних витрат при зміні геометричних параметрів конструктивної схеми):

$$\Pi = C_{\text{ділі}} + C_{\text{с.к.}} + C_{\text{експл.}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

Критерій, що називається «вартість в ділі» ($C_{\text{ділі}}$), враховує вартість заводського виготовлення ($C_{\text{зав.}}$), монтажу ($C_{\text{монт.}}$), а іноді і вартість транспортування конструкції ($C_{\text{тр.}}$). Разові витрати, представлені вартістю в ділі, також багато у чому обумовлюються складом змінних параметрів проектування. При вирішенні часткової задачі оптимального розподілу матеріалу в системі з заданими розмірами може бути зменшена металемність несучих конструкцій. Інші її показники (трудомісткості виготовлення і монтажу, транспортабельність тощо) майже не змінюються:

$$C_{\text{ділі}} = C_{\text{зав.}} + C_{\text{монт.}} + C_{\text{тр.}} \quad (5)$$

За зміни габаритних розмірів конструкції при її оптимізації необхідно врахувати відшкодування затрат, що виникають при експлуатації об'єкту. Значну частину затрат складають енергетичні витрати на опалення, вентиляцію додаткового об'єму будівлі, зайнятого конструкцією покриття, залежних від шуканих величин H і h . Дещо важче визначити вплив варіації параметрів на амортизаційні та інші експлуатаційні витрати. З іншої сторони очевидно, що витрати на електроосвітлення, водопостачання, прибирання підлоги, перегородок, скляних поверхонь варто виключити з розгляду. Як показали розрахунки, витратами на прибирання снігу з покрівлі також можна знехту-

вати через їхню незначний вплив на шукані параметри. Таким чином:

$$C_{\text{експл.}} = (V \cdot C_{\text{тепл.ен}} + S \cdot C_{\text{експл.вitr}}) \cdot \gamma \quad (6)$$

де V – об'єм простору будівлі як функція будівельної висоти покриття, S – площа будівлі, γ – коефіцієнт, що враховує нормативний термін експлуатації будівлі.

У вартість конструкції також включається такий показник, як вартість суміжних конструкцій ($C_{\text{с.к.}}$). З зовнішньої сторони покриття розміщуються панелі і настил, а із збільшенням висоти ферми розмір площі покрівлі збільшується, що тягне за собою збільшення вартості покрівлі. Аналогічну ситуацію спостерігаємо із стіновими панелями:

$$C_{\text{с.к.}} = (C_{\text{покрівлі}} \cdot l_k + C_{\text{стіл}} \cdot (H-h)) B, \quad (7)$$

де B – крок ферм, l_k – довжина верхнього поясу ферми, $(H-h)$ – висота стінового огороження в межах висоти шпренгельної ферми.

Аналітичні залежності між параметрами проектування і функцією цілі можуть бути суттєво доповнені відомостями про трудовитрати виготовлення, транспортування та монтажу досліджуваних конструкцій.

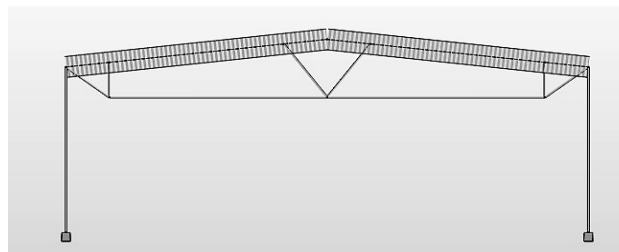


Рис. 4. Розрахункова схема ферми $L=36$ м
Fig. 4. Truss structural model $L=36$ m

Табл. 1. Покрокові значення розрахункових зусиль у верхньому поясі
Table 1. Step-by-step values of calculated forces in the upper belt

Параметри геометричної схеми		Значення розрахункових моментів при висоті похилу h (м)					
відстань l_1	висота шпренгельної частини $(H-h)$	в прольоті			над проміжною стійкою		
		2,0	1,5	1,0	2,0	1,5	1,0
12,0	2,2	191,91	228,42	275,39	-240,38	310,46	-310,46
	2,7	197,5	226,91	268,05	-260,81	294,03	-328,89
	3,5	203,81	231,46	267,47	-282,1	-315,29	-348,36

Продовження Табл.1
Continuation of Tabl.1

10,5	2,2	168,69	203,2	247,65	-149,19	-165,36	-181,84
	2,7	167,02	197,17	233,93	-182,02	-198,95	-216,72
	3,5	160,67	195,66	228,61	-218,15	-234,89	-252,28
9,0	2,2	149,56	181,66	224,06	-72,67	-83,32	-94,67
	2,7	143,96	174,9	206,28	-104,2	-117,18	-130,48
	3,5	142,92	165,45	192,18	-139,39	-152,94	-167,2
6,0	2,2	181,93	157,29	132,79	37,1	-2,71	-61,31
	2,7	142,62	135,36	110,79	33,88	0,17	-85,00
	3,5	141,79	121,0	91,71	33,53	4,44	-88,58

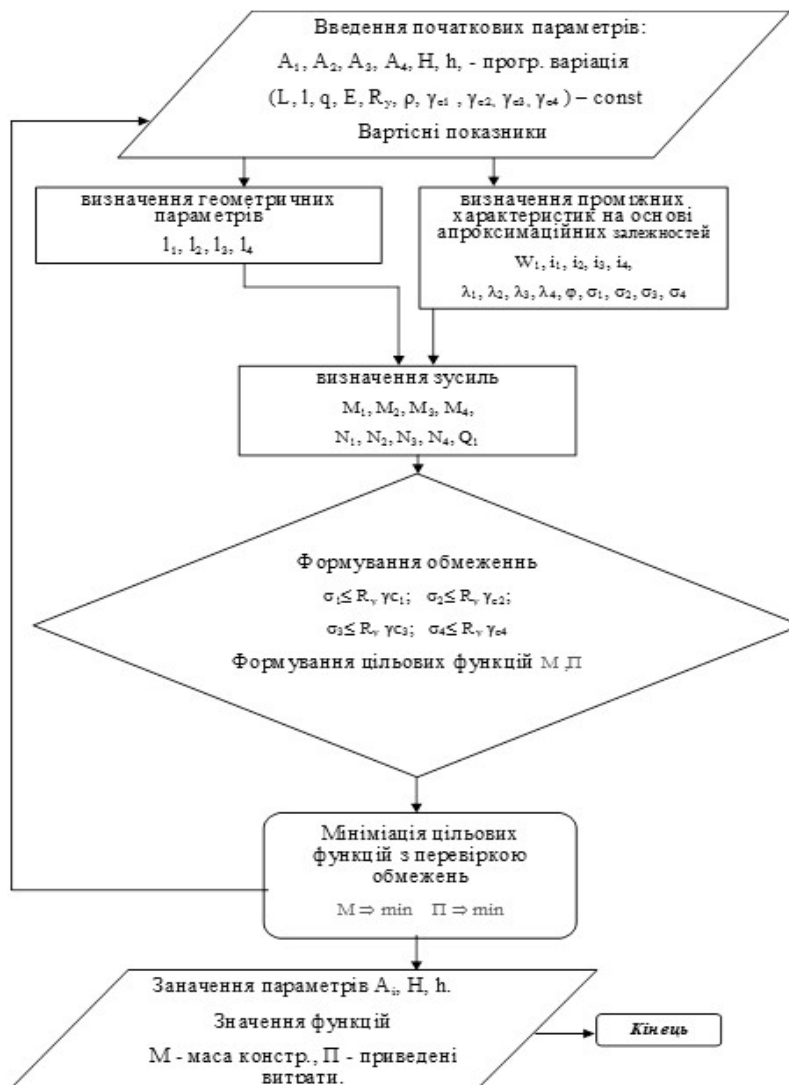


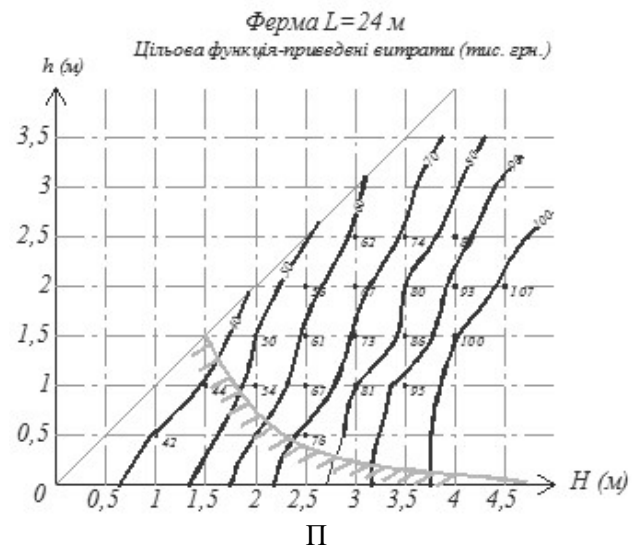
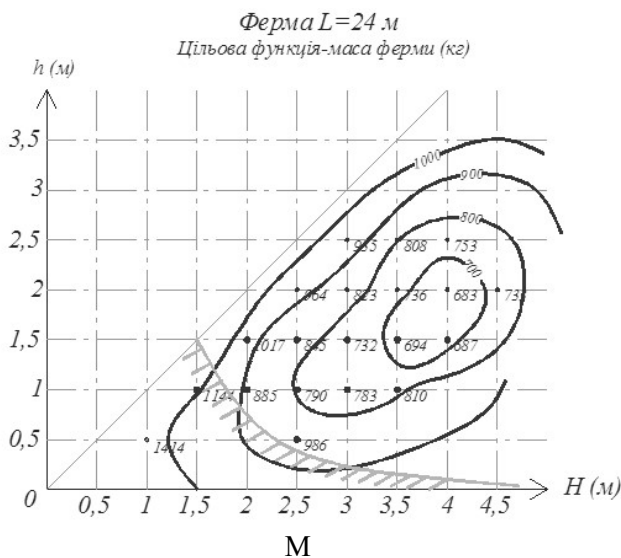
Рис. 5. Схема обчислювального процесу
Fig. 5. Scheme of the computing process

При дослідженні задачі з точки зору отримання інженерних рішень були виявлені активні або наближені до активних обмеження за несучою здатністю, що свідчить про можливість дискретно-рівномірного рішення, а отримана при розв'язанні великої кількості задач оптимізації інформація дозволяє вказати як на характерну особливість досліджуваної конструкції несуттєвий вплив зміни площі одного з елементів на стан інших.

Тому обмеження-нерівності за несучою здатністю елементів можуть бути замінені на відповідні рівності, а відповідність параметрів стану – встановлюватися шляхом перерозрахунку конструкції з побудовою внутрішньої підзадачі мінімізації різниці площ, отриманих на кроці підзадачі. Про отримання рівномірного або наближеного до нього рішення свідчать результати експериментального проектування ферми прольотом 36 м (рис. 4).

Варіювання такими параметрами як похил верхнього поясу, висота шпренгельної частина ферми та відстань від опори до стійки шпренгеля проілюстроване в табл. 1, де показано, що вичерпання несучої здатності верхнього поясу можливо досягти в декількох перерізах одночасно. Отримані дані надають можливість сформулювати початковий проект та встановити початкові значення параметрів проектування.

Початкове наближення свідчить про ефективність відносно високих ферм. За аналізом результатів показано, що в двостояковій шпренгельній фермі з центральною V-подібною вставкою без попереднього напруження при значення $H=(0,13\dots 0,14)L$, а також $h=(0,04\dots 0,03)L$ розрахункових зусиль вирівнюються одночасно в декількох перерізах балки жорсткості, яка проектується постійного перерізу.



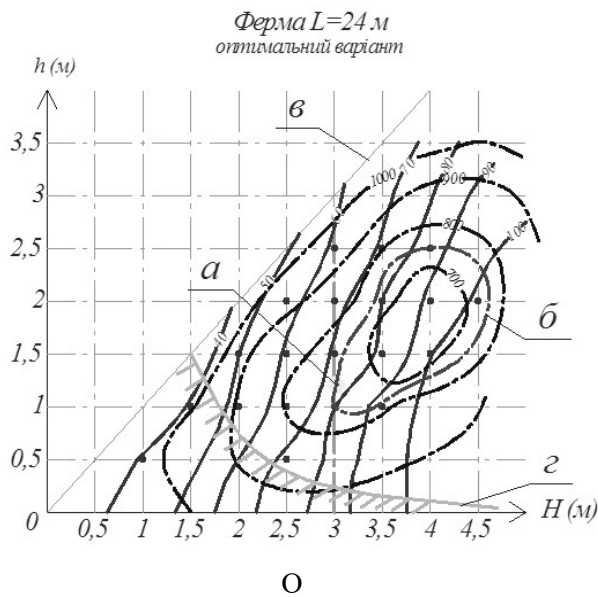


Рис. 6. Результати оптимального проектування ферми прольотом 24 м. Лінії рівнів цільових функцій: М – маса ферми; П – приведені витрати; О – сумісні рішення; *a* – оптимальне сумісне рішення; *b* – рівень 15%-их втрат за функцією М; *e* – границя області допустимих рішень за конструктивною ознакою; *z* – границя області допустимих рішень за прогинами

Fig. 6. Results of optimal design of a farm with a span of 24 m. Lines of levels of target functions: М - weight of the farm; П - the resulted expenses; О - compatible solutions; *a* - optimal compatible solution; *b* - the level of 15% losses on function М; *e* - the boundary of the area of permissible decisions on a structural basis; *z* - the boundary of the region of permissible solutions by deflections.

Через нелінійність цільових функцій та обмежень вимагає постановки з використанням процедур нелінійного програмування.

Алгоритм подальшої оптимізації реалізований в формі методу прямого пошуку Нелдера-Міда з штрафними функціями, побудованого в розвиток регулярного симплексного методу Спендлі-Хекста-Міда, що допускає використання неправильного багатогранника (метод деформованого багатогранника), є достатньо надійним методом послідовної мінімізації і для невеликих задач вважається найбільш ефективним при $n \leq 6$ [23].

Завдяки виявленню можливості дискретно-рівномірного рішення та обмежень у вигляді рівнянь розмірність задачі скорочується. Експериментально визначено, що при цьому виключаються труднощі, пов'язані з пошуком глобального мінімуму, бо на заданому інтервалі змінних перетворена задача є унімодальною.

Шлях розв'язання задачі оптимального проектування зображений на рис. 5.

Для знаходження оптимальних рішень вирішено серію задач з вихідними умовами, що відповідають умовам м. Києва. Цільові функції з використанням вартості обчислені у відносних одиницях.

Побудовані графіки цільових функцій у вигляді ліній рівнів двопараметричних поверхонь, що не тільки відображають загальні тенденції оптимальних конструктивних рішень малоелементних шпренгельних ферм, а й дають можливість аналізувати пропонувані рішення та прогнозувати очікувані втрати при відхиленні від оптимальних параметрів конструкції (рис. 6 – 8).

Компромісні рішення можуть бути знайдені на множині Парето [23]. Границі областей от-риманих парето-оптимальних рішень показані на рис. 6 – 8, схеми О.

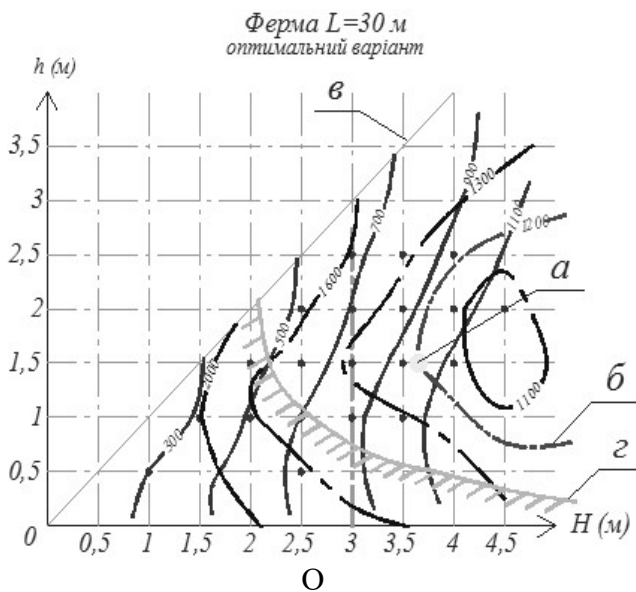
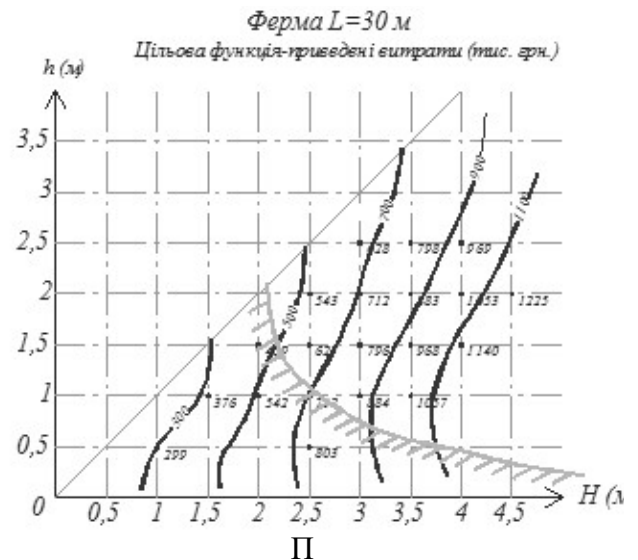
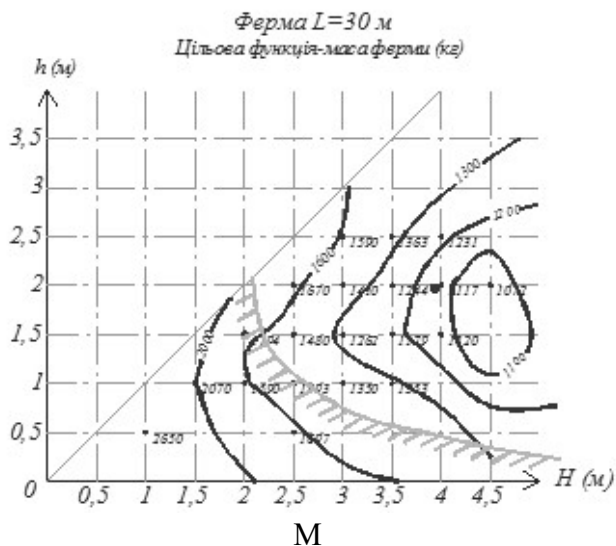


Рис. 7. Результати оптимального проектування ферми прольотом 30 м. Позначення див. рис.5

Fig. 7. Results of optimal design of a farm with a span of 30 m. See Fig. 5 for the notation

Для даної конструкції такі рішення мають властивості рішень за критерієм мінімуму маси більшою мірою, ніж за критерієм приведених витрат. Параметри геометричної схеми тут наближаються до критерію М.

При дослідженні конструкції за критерієм мінімуму маси, геометричні параметри ферми не залежать від навантаження, яке у даному разі є лише масштабним фактором. Величина розкриття V-подібної вставки, що обумовлена асиметрією навантаження, в ході вирішення задачі оптимізації доводиться до певного мінімуму. Слабко виражена залежність висоти ферми від навантаження або відсутність такої залежності дозволяє створити типовий ряд мало елементних ферм з постійною висотою в межах одного прольоту та варійованими пе-

рерізами елементів для різних навантажень. За отриманими даними в програмному комплексі «Idea Statica 10» розраховані та запроектовані опорні, монтажні та інші вузли ферми з використанням замкнених гнучко зварних профілів.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати доводять, що зміною геометричної схеми та ціленаправленим регулюванням внутрішніх зусиль без попереднього напруження можна отримати ефективно та конкурентоспроможне рішення малоелементної шпренгельної ферми із застосуванням складеного двотаврового елемента з хвилястою гофрованою стінкою. Чутливість комбінованих систем з неповною решіткою до варіювання геометрич-

ними параметрами послужила підставою для призначення таких значень параметрів, що суттєво впливають на розподіл внутрішніх зусиль в елементах системи.

Пошук параметрів проектування виконувався із залученням оптимізаційних процедур,

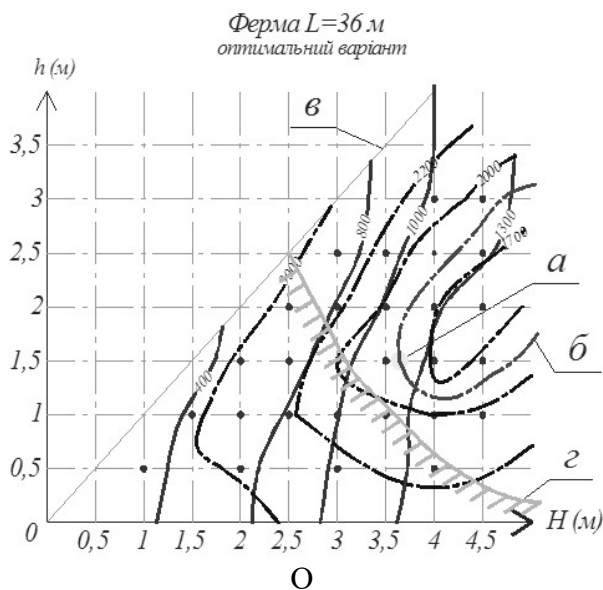
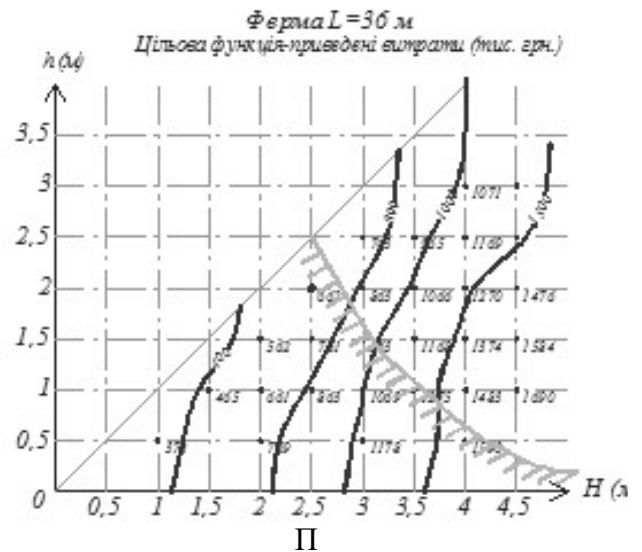
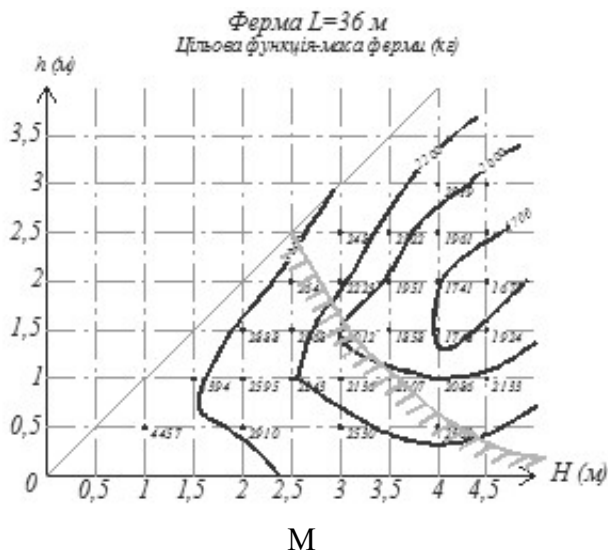


Рис. 8. Результати оптимального проектування ферми прольотом 36 м. Позначення див. рис.5

Fig. 8. Results of optimal design of a farm with a span of 36 m. See Fig. 5 for the notation

Пошук параметрів проектування виконувався із залученням оптимізаційних процедур, аналізу найбільш вживаних критеріїв мінімуму маси та мінімуму загального об'єму покриття стосовно експлуатаційних витрат, з використанням нерівностей першої групи граничних станів за чинними нормами проектування в якості обмежень методу, а також виконанням вимог другої групи граничних станів. При узгодженні критеріїв отримані сумісні рішення в області (10...20)%-их втрат за обома критеріями. Відкривається можливість створення типового ряду малоелементних конструк-

цій покриттів та необхідність врахування при проектуванні зростання витрат на вогнезахист [24]. Всі отримані рішення належать до області конкурентоспроможних відносно існуючих споруд аналогічного призначення.

Застосування апарату оптимального проектування дозволило отримати конструктивне рішення малоелементної шпренгельної ферми, металомісткість якого менша, а приведені витрати не перевищують аналогічних показників типової кроквяної ферми з замкнених гнutoзварних профілів з похилом верхнього поясу. Головною перевагою

досліджуваної кроквяної ферми є простота її виготовлення. Конструктивне рішення надає широкі можливості застосування у верхньому поясі, маса якого складає близько 80% від маси конструкції, замість прокатного двотавра чи гнутозварного замкненого профілю ефективних двотаврових профілів з гофрованою стінкою.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Лавріненко Л.І.** Застосування ефективних двотаврових елементів з тонкими поперечно-гофрованими стінками. *Проблеми державного будівництва в Україні*. Вип.20. В 2-х томах, т.1 (240 с.). ХУП науково-практична конференція «Україна в євроінтеграційних процесах». Київ: КиМУ, 2012. С. 223–226
2. **Нілов А.А., Лавріненко Л.І.** Малоэлементные шпренгельные конструкции покрытий производственных зданий. *Совершенствование сварных металлических конструкций*. Киев: Наукова думка, 1992. С. 111–123.
3. **Малоелементна шпренгельна ферма із V-подібною стабілізуючою вставкою:** Патент №71800 UA, МПК E04C3/08 (2006.01), опубл.25.07.2012, Бюл.№14
4. **Лазнюк М.С.** Малоэлементные фермы с верхним поясом из сварных двутавров с гофрированной стенкой. *Строительная механика и строительные конструкции*. М.: Издательство СКАД СОФТ, 2013. – с.237–243
5. **Гоголь М.В.** Регулювання напружень у сталевих комбінованих конструкціях. Київ: Видавництво Сталь. 2018. 222 с.
6. **Лавріненко Л.І., Скупова А.В.** Кроквяна малоелементна шпренгельна система з оптимальними геометричними параметрами. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Вип.27. Рівне: 2013. С. 127–134.
7. **Нілов А.А., Мартынюк А.Я., Лазнюк М.В., Рыженко С.С.** Применение сварных двутавров с гофрированной стенкой в комбинированных конструкциях. *Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сб. научных трудов, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, №14, часть 1*. Одесса: 2010. С. 169-175.
8. **Johansson B., Maquoi R., Seldasek G., Muller C., Beg D.** (2007). Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated Structural Elements. *JRS Scientific and Technical Reports*. – p.152–167.
9. **Pasternak H., Robra J., Bachmann V.** (2008). Corrugated web beams with increased web thickness, in *Proceedings 5th Europea Conference on Steel and Composite Structures, Graz, Austria*, pp. 1161–1166.
10. **Pasternak H., Robra J., Kubieniec G.** (2010). New proposals for EN 1993-1-5, Annex D: Plate girders with corrugated webs. — *Proceedings of Joint IABSE-fib Conference on Codes in Structural Engineering. Developments and Needs for International Practice, Dubrovnik, May 3-5, pp. 3–5 Google Scholar*.
11. **Siokola, W.** (1997). Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem Steg, *Stahlbau* 66, pp.595–605.
12. **Pasternak H., Kubieniec G.** (2010) Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(2), pp.166-171.
13. **Пермяков В.А., Гоголь М.В., Пелешко И.Д.** Комбинированные металлические конструкции с регулированием и их оптимизация. *Наука и инновации в современном строительстве*. Международн. научн.–практ. конференция. Санкт-Петербургский государственный университет. С.-Пб.: 2007. С. 142-145.
14. **Bilyk S., Tonkacheiev V.** (2018). Determining sloped load limits inside von mises' truss with elastic support. *Journal Materiali in tehnologije. Volume 52, NO.2, Mar.-Apr.* pp. 105-110.doi:10.17222/mit.2016.08361
15. **Biancolini, M.E., Brutti, C. and Porziani, S.** (2009), Analysis of corrugated board panels under compression load, *Steel. Compos. Struct.*, 9(1), pp. 1-17.
16. **Chan, C.L., Khalid, Y.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S.** (2002), Finite element analysis of corrugated web beams under bending, *J. Constr. Steel. Res.*, 58, pp. 1391-1406.
17. **Driver, R.G., Abbas, H.H. and Sause, R.** (2006), Shear behavior of corrugated web bridge girder, *J. Struct. Eng. ASCE*, 132(2), pp. 195-203.
18. **Wang Y.C.**, (2002) Steel and composite structures, *Spon Press, London*, pp.138-154.
19. **Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y., Lavrinenko L.I.** (2019). Experimental and

Theoretical Investigation of Inserted Floors with Decreased Height, *Varilna Tehnika, Vol.69, 2019-1*, pp. 7 – 15.

20. **Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В.** Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. Киев: Сталь, 2008. 538 с.
21. **Лихтарников Я.М.** Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М.: Стройиздат, 1979. 319 с.
22. **Пермяков В.А., Ремеников А.М.** (1992) General purpose code for steel structures optimal design. *Computer and Structures. Vol.48, №6*, pp.1155-1164.
23. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.–536 с.
24. **Yin Y.Z., Wang Y.C.** (2004). A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research, No. 60*, pp. 1029 – 1047.

REFERENCES

1. **Lavrinenko L.I.** Zastocuvann`ia effektivnykh dvutavrovnykh elementyv z tonkimi poperechno-gofrovanymi stynkami [Application of effective I-elements with thin cross-corrugated webs]. *Problemi derzhavnogo budivnitstva v Ukraini. Vip. 20, v.1. XVII Scientific and Practical Conference «Ukraina v evrointegratsiynikh protsesakh»*. Kyiv: KiMU, 2012. pp. 223–226
2. **Nilov A. A., Lavrinenko L.I.** Maloelementnye shprengel'nye konstruktsii pokrytii proizvodstvennykh zdaniy [Low-element sprangel structures of production buildings coatings]. *Sovershenstvovanie svarnykh metallicheskiykh konstruktsii*. Kyiv: Naukova dumka, 1992 . pp. 111–123.
3. **Maloelementna shprengel'na ferma iz V-podibnoi stabilizuiuchoiu vstavkoiu** [Low-element truss with V-shaped stabilizing insert]: Patent №71800 UA, МПК E04C3/08 (2006.01), publ.25.07.2012, bul.№14
4. **Lazniuk M.S.** Maloelementnye fermy s verkhnim poiasom iz svarnykh dvutavrov s gofirovannoi stenкой [Low-element trusses with a top belt made of welded I-beams with corrugated wall]. *Stroitel'naia mekhanika i stroitel'nye konstruktsii*. M.: SCAD SOFT, 2013. – pp.237–243
5. **Gogol' M.V.** Reguliuvannia napruzhenn' u stalevikh kombinovaniykh konstruktsiyakh [Adjustment of stresses in combined steel structures]. Kyiv: Vidavnistvo Stal'. 2018. 222 s.
6. **Lavrinenko L.I., Skupova A.V.** Kroviana maloelementna shprengel'na sistema z optimal'nimi geometrichnimi parametrami [Roof low-element composite system with optimum geometrical parameters]. *Resursoekonomni materiali, konstruktsii budivli ta sporudi. Vip.27. Rivne*: 2013. pp. 127–134.
7. **Nilov A.A., Martyniuk A.Ia., Lazniuk M.V., Ryzhenko S.S.** Primenenie svarnykh dvutavrov s gofirovannoi stenкой v kombinirovannykh konstruktsiyakh [The use of welded I-beams with corrugated wall in combined structures]. *Sovremennyye stroitel'nye konstruktsii iz metalla i drevesiny: Sb. nauchnykh trudov, Odesskaia gosudarstvennaia akademiia stroitel'stva i arkhitektury, №14, part 1. Odessa*. 2010. pp. 169-175.
8. **Johansson B., Maquoi R., Seldasek G., Muller C., Beg D.** (2007). Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 Plated Structural Elements. *JRS Scientific and Technical Reports*. – p.152–167.
9. **Pasternak, H., Robra, J., Bachmann, V.** (2008). Corrugated web beams with increased web thickness, in *Proceedings 5th Europea Conference on Steel and Composite Structures, Graz, Austria*, pp. 1161–1166.
10. **Pasternak H., Robra J., Kubieniec G.** (2010). New proposals for EN 1993-1-5, Annex D: Plate girders with corrugated webs. — *Proceedings of Joint IABSE-fib Conference on Codes in Structural Engineering. Developments and Needs for International Practice, Dubrovnik, May 3-5*, pp. 3–5 .
11. **Siokola, W.** (1997). Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profiliertem Steg, *Stahlbau 66*, pp.595–605.
12. **Pasternak H., Kubieniec G.** (2010) Plate Girders with Corrugated Webs. *Journal of Civil Engineering and Management, 16(2)*, pp.166-171.
13. **Permiakov V.A., Gogol' M.V., Peleshko I.D.** Kombinirovannyye metallicheskie konstruktsii s regulirovaniem i ikh optimizatsiia [Regulated metal structures and optimization.]. *Nauka i innovatsii v sovremennom stroitel'stve. Conference at St. Petersburg State University*: 2007. pp. 142-145
14. **Bilyk S., Tonkacheiev V.** (2018). Determining sloped load limits inside von mises' truss with elastic support. *Journal Materials in*

tehnologije. Volume 52, NO.2, Mar.-Apr. pp. 105-110. doi:10.17222/mit.2016.08361

15. **Biancolini, M.E., Brutti, C. and Porziani, S.** (2009), Analysis of corrugated board panels under compression load, *Steel. Compos. Struct.*, 9(1), pp. 1-17.
16. **Chan, C.L., Khalid, Y.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S.** (2002), Finite element analysis of corrugated web beams under bending, *J. Constr. Steel. Res.*, 58, pp. 1391-1406.
17. **Driver, R.G., Abbas, H.H. and Sause, R.** (2006), Shear behavior of corrugated web bridge girder, *J. Struct. Eng. ASCE*, 132(2), pp. 195-203.
18. **Wang Y.C.** (2002) Steel and composite structures, *Spon Press, London*, pp.138-154.
19. **Bilyk S.I., Nilova T.O., Semchuk I.Y., Lavrinenko L.I.** (2019). Experimental and theoretical investigation of inserted floors with decreased height, *Varilna Tehnika, Vol.69, 2019-1*, pp. 7 – 15.
20. **Permiakov V.A., Perel'muter A.V., Iurchenko V.V.** Optimal'noe proektirovanie stal'nykh sterzhnykh konstrukttsii [Optimal design of steel bar structures]. Kiev: Stal', 2008. 538 p.
21. **Likhtarnikov Ia.M.** Variantnoe proektirovanie i optimizatsiia stal'nykh konstrukttsii []. M.: Stroizdat, 1979. 319 p.
22. **Permyakov V.A., Remennikov A.M.** (1992). General purpose code for steel structures optimal design. *Computer and Structures. Vol.48, №6*, pp.1155-1164.
23. **Himmelblau D.M.** Applied Nonlinear Programming. The University of Texas, Austin, Texas. McGraw-Hill Book Company. 1972. [Prikladnoe nelineinoe programmirovaniye. M.: Mir, 1975. – 536 p.]
24. **Yin Y.Z., Wang Y.C.** (2004). A numerical study of large deflection behavior of restrained steel beams at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, No. 60, pp. 1029 – 1047.

Effective parameters of a low-element truss structure with a corrugated web rigidity beam

Lyudmila Lavrinenko, Anastasia Zotina

Summary. In the development of studies of a combined low-element truss with an incomplete (sparse) grating, a research was made looking for optimal geometric parameters (without changing the topology) and the distribution of forces and material, that reflect the current state of lightweight

metal structure design, specific conditions of use and the requirements of existing regulations.

The structural form, which is designated as a system with incomplete grating scheme, is investigated. It is extremely sensitive to changes in geometric parameters of the scheme. Studies have shown that the regulation of stress-deformed state (SDS) in the design process allows you to develop structures as rationally as possible. The optimal design method is used to find geometrical parameters that allow the necessary (upon some criteria) force distribution in truss elements by fixed loads. The algorithm is implemented in the form of a direct search method of Nelder-Mead with penalty functions, that is developed as modification of usual simplex Spendley-Hext-Himsworth method.

Numerical study of combined system containing a rigidity beam with a corrugated web is carried out. Constructive constraints are recorded as inequalities/equations of strength and stability conditions according to design standards for steel structures DBN B.2.6-98. Optimal values of geometric parameters were obtained according to the criteria of minimum mass and reduced expenditures for low-element truss structure with spans of 24 - 36 m. It is shown that combined solutions in the range of (10... 20)% losses by both criteria are competitive for similar purpose buildings.

Key words. Combined structure, sparse grating, corrugated web, geometric parameters, optimal design, design variable.