

Артем БІЛИК,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-9219-920X

Максим ТЕРНОВИЙ,

асистент

ORCID: 0009-0003-7586-7872

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

РАЦІОНАЛЬНЕ КОНСТРУКТИВНЕ РІШЕННЯ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ФЕРМ ПОКРИТТЯ ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

У статті наведено результати досліджень із пошуку раціональних параметрів захисних конструкцій ферм покриття невеликих прольотів при дії динамічних навантажень. Розглянуті основні властивості таких конструкцій, вимоги, яким вони повинні відповідати та прийняті положення. Сформульовані основні принципи проєктування захисних конструкцій покриття проєктування сталевих конструкцій при забезпеченні необхідної міцності і стійкості конструкції під час дії імпульсних навантажень. Мета роботи є розробка методики варіантного проєктування для визначення раціональної (обмежено оптимальної) висоти сталеві ферми покриття з хрестовою решіткою при дії короткочасного імпульсного навантаження. Для обраного типу конструкції з відомими загальними параметрами будови, принципові технічні рішення приймаються під час варіантного проєктування. За уточненою класифікацією, техніко-економічні критерії порівняння альтернатив, описуються різними функціями: статичні, динамічні, випуклі не випуклі, полімодальні, нелінійні, дискретні, розривні, недиференційовані та частково сепарабельні. Пошук глобального оптимуму таких цільових функцій для узагальненої задачі оптимального проєктування просторової конструктивної системи існуючими аналітичними методами має певні ускладнення. Це пов'язано з тим, що різні конструктивні рішення з різною топологією, відмінною розрахунковою схемою та дискретним сортаментом геометричних характеристик перерізів елементів не можуть бути приведені до описання єдиної системи функціональних залежностей, так як часткові критерії параметрів окремих рівнянь залежать від різних змінних. Відомо, що у слабкоструктурованій задачі, параметричні залежності між висхідними та змінними параметрами описуються не тільки явними аналітичними виразами, а й методами дискретної математики, на основі числення предикатів, а функції часткових критеріїв порівняння є алгоритмічними. Для варіантного проєктування та визначення раціональної висоти сталеві ферми використано балкову аналогію. За розрахункову схему прийнято розрахункова схема ідеального двотавра з урахуванням деформації зсуву перерізу. Деформації зсуву перерізу враховує збільшення прогинів балкової стрижневої сталеві ферми відносно до двотаврової балки. Записана цільова функція залежності витрат сталі в залежності від висоти і прогону сталеві ферми покриття, також враховано коефіцієнт динамічності Отримані аналітичні залежності для визначення висоти ферм, які враховують їх динамічні

характеристики, із урахуванням додаткового навантаження від затікання вибухової хвилі на торці блоку покриття. Цільовим критерієм прийнято масу конструкцій, яка дозволяє перейти до вартісних параметрів.

Ключові слова: *сталеві конструкції, раціональне проектування, динамічні навантаження, ферми.*

Постановка проблеми. За класичною послідовністю проектування сталевих конструкцій на першому етапі знаходиться варіантне проектування або проектування на передпроектній стадії [1, 2] з урахуванням варіативності умов [3]. Розгляд варіантів майбутньої конструкції за топологією, обмеженнями функціонального об'єму, розрахунковими схемами, типами поперечних перерізів елементів, класом сталі тощо базується на спільних якісних та кількісних параметрах сталеві конструктивної моделі будівлі за висхідними умовами. Ці умови зазвичай описуються у завданні на проектування та висхідній документації. Умови міцності та стійкості конструкцій приймаються за нормативними документами з проектування (ДБН, ДСТУ, технічних умовах на даний клас або тип сталевих конструкцій тощо). В той же час, вибір найкращого технічного рішення конструктивної сталеві системи здійснюється, як правило, за техніко-економічними показниками. Тому вибір раціональних або оптимальних конструктивних рішень сталевих конструктивних систем на першій стадії проектування базується на узагальнених аналітичних методиках. Це полегшує шлях і дає початкові умови для використання автоматизованих програмних комплексів.

Аналіз останніх досліджень. В дослідженнях [1-5] для сталевих стержневих конструкцій обґрунтовано, що «об'єкт узагальненої задачі оптимального (раціонального) проектування – множина усіх можливих рішень конструкцій із заданим абрисом осей, і основна задача проектування – задача вибору найкращого варіанта з цієї множини». Таким чином, для обраного типу конструкції з відомими загальними параметрами будови, принципові технічні рішення приймаються під час варіантного проектування. За уточненою класифікацією, техніко-економічні критерії порівняння альтернатив, описуються різними функціями: статичні, динамічні, випуклі не випуклі, полімодальні, нелінійні, дискретні, розривні, недиференційовані та частково сепарабельні. Пошук глобального оптимуму таких цільових функцій для узагальненої задачі оптимального проектування просторові конструктивної системи існуючими аналітичними методами має певні ускладнення [2]. Це пов'язано з тим, що різні конструктивні рішення з різною топологією, відмінною розрахунковою схемою та дискретним сортаментом геометричних характеристик перерізів елементів не можуть бути приведені до описання єдиної системи функціональних залежностей, так як часткові критерії параметрів окремих рівнянь залежать від різних змінних: «у слабкоструктурованій задачі, параметричні залежності між висхідними та змінними параметрами описуються не тільки явними аналітичними виразами, а й методами дискретної математики, на основі числення предикатів, а функції часткових критеріїв порівняння є алгоритмічними. Відповідним чином, алгоритмічними будуть і функції суперкритеріїв порівняння» [1, 6]. Сучасні методи та алгоритми оптимізації конструкції представлені у роботах [5-9]. З точки зору системного аналізу - коли конструкція розглядається як система із елементів і зв'язків між ними, то поліпшення, раціоналізація та оптимізація конструкцій співвідносяться

наступним чином. **Покращення** – це посилення/послаблення зв'язків без покращення елементів. Наприклад, зміна кроку балок під розміри профнастилу зменшує його відходність, але при цьому не є фактом, що зменшаться сумарні витрати на конструкцію вцілому. **Раціоналізація** – це посилення/послаблення елементів без покращення зв'язків. Наприклад, зміна відстаней між опорами нерозрізної балки для отримання рівномоментності, яка в свою чергу призводить до економічного розподілу матеріалу в балці, проте не гарантує загальної ошадності каркасу. **Оптимізація** же – це зміна кількості і якості елементів та/або зв'язків між ними для задоволення цільової надзагальної функції корисності, що призводить до нової якості системи. Методи раціоналізації більш спрощені, так як використовують не цільові функції корисності, а поодинокі параметри конструкції. Виділяють також обмежену оптимальність, при використанні спрощених методів та аналітичних цільових функцій. Так, зокрема, для сталевих конструкцій, які можна вважати балковими елементами постійного і змінного перерізу, розроблено аналітичний апарат пошуку обмежено оптимальної висоти з урахуванням характеристик двотаврового перерізу та конструкції стінки [10-15].

Мета роботи: розробити методіку варіантного проектування для визначення раціональної (обмежено оптимальної) висоти сталеві ферми покриття з хрестою решіткою при дії короткочасного імпульсного навантаження. Пропонується для досліджень прийняти балкову аналогію роботи динаміки сталеві конструкції з урахуванням деформації зсуву перерізу, конструктивних коефіцієнтів та коефіцієнта динамічності. Досліджень в цьому напрямку доки недостатньо, в силу складності створення фізико-математичної моделі роботи конструкцій, так як зміна висоти перерізу конструкції веде до зміни спектру частот власних коливань.

Результати досліджень. Війна рф проти України, що триває, зумовлює розвиток будівельної галузі у напрямку створення нових класів конструкцій будівель і споруд із додатковими захисними властивостями. У 2022-2023 роках розроблена концепція «Країна-фортеця», яка затверджена на державному рівні (Постанова КМУ №471 від 26.04.2024 р.). Так реалізація цієї концепції, що триває, створює умови захисту об'єктів критичної інфраструктури України (далі – ОКІ) [18, 19]. Перший рівень захисту повинен забезпечити захист елементів ОКІ від поодиноких непрямих влучань безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) на відстані 5 метрів від споруди інженерного захисту (далі – СІЗ), а також захист від поодиноких непрямих влучань ракети на відстані 15 метрів від СІЗ. Другий рівень захисту повинен забезпечити захист елементів ОКІ від поодиноких прямих влучань БпЛА, а також захист від поодиноких непрямих влучань ракети на відстані 15 м від СІЗ. Третій рівень захисту повинен забезпечити захист елементів ОКІ від поодиноких прямих влучань БпЛА, а також від поодиноких прямих влучань ракет [18, 19]. Наразі пропонується розширення застосування концепції «Країна-фортеця» на цивільні та громадські об'єкти. Для цього за рішенням замовника у завданні на проектування вноситься відповідний рівень захисту та фактори ураження, що підлягають урахуванню. Відповідні зміни пропонується внести і у ДБН А.2.2-3 [20]. Відтоді актуальною задачею є розроблення спеціальних конструкцій та інженерних споруд захисту існуючих та нових об'єктів, будівель та споруд. З цією метою, для поширення концепції «Країна-фортеця» на цивільні та громадські об'єкти сформульовані основні принципи раціонального проектування сталевих конструкцій при забезпеченні надійності:

- Використання високоміцних сталей;
- Багатозв'язність систем;
- Здатність сприймати знакозмінні навантаження;
- Конструктивна закритість та підвищена надійність вузлів та з'єднань;
- Ресурсна доступність матеріалів;
- Урахування в роботі конструкцій розвитку пластичних деформацій;
- Забезпечення одиночної живучості;
- Підвищена стійкість до осколкового ураження.

На основі запропонованих принципів була розроблена конструктивна система блоку ферм та решітчастих ригелів покриття для адміністративних і промислових будівель невеликим прольотом 9,0...16,0 м, для другого рівня захисту промислових та адміністративних будівель із підвищеними захисними властивостями. Такі блоки ферм покриття, або просторові конструктивні системи ферм покриття повинні витримувати тиск від наземного або повітряного вибуху бойових частин дронів. Концептуально рішення наведено на рис. 1.

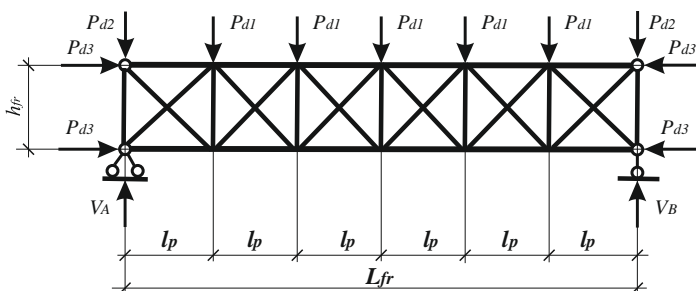


Рис. 1. Розрахункова схема нового класу конструкцій покриття будівель і споруд із захисними властивостями

Для вибору методологічного підходу до пошуку раціональної висоти ферми покриття із захисними властивостями прийнято до уваги, що при розрахунках на живучість можливо не враховувати обмеження щодо прогинів конструкції покриття під час екстремального навантаження. Тому використано пошук екстремуму цільової функції із визначенням найменшої маси ферми. Відповідно до поставленої мети формулювання цільової функції мінімальної вартості захисної конструкції ферми покриття за витратним підходом сформульовані наступні обмеження та початкові умови раціонального (обмежено оптимального) проектування. Положення досліджень при цьому наступні:

1. Для експрес-аналізу використовуються аналітичні спрощені математичні моделі.

2. Досліджуються плоскі сталеві конструкції ферм прольотом 12-16 м із паралельними поясами з хрестовою решіткою, що працюють за балковою розрахунковою схемою при дії вузлових квазістатичних навантажень.

3. Під час процедури проектування вага кожного елемента захисної конструкції сталеві ферми (ЗКСФ) є достатньо мала порівняно з навантаженням і слабо впливає на кінцевий результат. Але під час визначення динамічних характеристик конструкції вага конструкції покриття в цілому враховується.

4. Прийнято умовно, що деформація стержнів відбувається за лінійним законом при пружній роботі сталі. Прийнято також, що під час деформації ферми незначна зміна напрямку дії зовнішніх зусиль, що викликає додаткову зміну зусиль елементів ЗКСФ, не враховуються в силу їх малих значень.

5. Будівельна висота ЗКСФ визначається за екстремальним значенням мінімуму витрат. Корегування максимальної висоти ферми за транспортним габаритом відбувається за результатами досліджень.

6. Конструкції досліджуються із прийнятою верхньою межею граничних навантажень на конструкції 400 кН/м.пог.

7. Із позицій формулювання поставленої задачі доцільними є використання високоміцних сталей С390, С440.

8. При даному рішенні задачі кількісними характеристиками об'єкта проектування прийняті узагальнені геометричні параметри та навантаження. Нормативні значення прийняті згідно документів із проектування сталевих конструкцій: модуль пружності сталі $E=2,06 \cdot 10^5$ МПа, також густина сталі прийнята 7850 кг/м.куб.

9. Вартість сталевих конструкцій та вартість огорожувальних конструкцій прийняті на час виконання досліджень і є не змінними.

10. Прийнята балкова аналогія роботи конструкції сталевої ферми покриття і відповідна розрахункова схема: балка з підвищеною деформацією зсуву перерізу.

В першому приближенні маса ферми з позицій витрат сталі записується так:

$$m_{\Phi} = m_w + m_d + m_{1,g} + m_{2,g}$$

$$m_{\Phi} = \rho \left\{ \Psi_{i,w} \sum_n \frac{N_{i,w} l_{i,w}}{\varphi_i R_y \gamma_c} + \Psi_{j,d} \sum_m \frac{N_{j,d} l_{j,d}}{R_y \gamma_c} + \Psi_{s1,g} \sum_p \frac{N_{s1,g} l_{s1,g}}{\varphi_i R_y \gamma_c} + \Psi_{s2,g} \sum_{2k} \frac{N_{s2,g} l_{s2,g}}{R_y \gamma_c} \right\}$$

$$n_{pd} = 2n_{pd1} + n_{pd2} \tag{1}$$

$$N_{s1=1,g} = \frac{q_p L_{\Phi}}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1}; \quad N_{s1=2,g} = \frac{q_p L_{\Phi}}{4} \frac{1}{\cos \alpha_1}$$

$$V_A = \frac{q_p L_{\Phi}}{2}$$

В крайній формулі прийнятні позначення: $m_{\Phi} = m_w + m_d + m_{1,g} + m_{2,g}$ – теоретична маса (витрати) сталі на ЗКСФ покриття з урахуванням конструктивних коефіцієнтів під час проектування; m_w – теоретична маса (витрати) сталі верхнього поясу ЗКСФ покриття з урахуванням конструктивного коефіцієнта верхнього поясу – $\Psi_{i,w}$ під час проектування; $m_d = \rho \Psi_{i,d} \sum_n \frac{N_{i,d} l_{i,d}}{R_y \gamma_c}$ – теоретична маса (витрати) сталі нижнього поясу ЗКСФ покриття з урахуванням конструктивного коефіцієнта верхнього поясу – $\Psi_{i,d}$ під час проектування; $m_{1,g} + m_{2,g} = \Psi_{s1,g} \sum_p \frac{N_{s1,g} l_{s1,g}}{\varphi_i R_y \gamma_c} + \Psi_{s2,g} \sum_{2k} \frac{N_{s2,g} l_{s2,g}}{R_y \gamma_c}$ – теоретична маса (витрати) сталі решітки ЗКСФ покриття з урахуванням конструктивного коефіцієнта верхнього поясу – $\Psi_{s1,g}$, $\Psi_{s2,g}$; $N_{i,w}$, $l_{i,w}$ – стискаюче зусилля в і-му елементі верхнього поясу довжиною $l_{i,w}$; $N_{j,d}$, $l_{j,d}$ – зусилля розтягу в і-му елементі верхнього поясу довжиною $l_{j,d}$; $N_{s1,g}$, $l_{s1,g}$ – зусилля стиску в s1-му елементі висхідного розкошу

решітки довжиною $l_{s1,g}$; $N_{s2,g}$, $l_{s2,g}$ – зусилля в s2-му розтягнутому елементі низхідного розкошу решітки довжиною $l_{s2,g}$.

У фермі прийнято хрестовий тип решітки. Також покладено, що втрата стійкості стиснутого елемента решітки не приводить до втрати несучої здатності всієї конструкції. Дослідження побудовані на гіпотезі, що втрата несучої здатності ЗКСФ може відбутися тільки внаслідок втрати стійкості стиснутого елемента верхнього поясу. Так як пояси паралельні, то має місце запис маси решітки $m_{1,g} + m_{2,g}$:

$$\begin{aligned} l_{s1,g} &= l_{s2,g}; \quad N_{s1,g} = N_{s2,g}; \quad \Psi_{s1,g} = \Psi_{s2,g} \rightarrow \\ m_{1,g} + m_{2,g} &= \Psi_{s1,g} \sum_p \frac{N_{s1,g} l_{s1,g}}{\varphi_i R_y \gamma_c} + \Psi_{s2,g} \sum_{2k} \frac{N_{s2,g} l_{s2,g}}{R_y \gamma_c}. \quad (2) \\ m_{1,g} + m_{2,g} &= \rho \Psi_{s1,g} \left\{ \sum_p \left[\frac{N_{s1,g} l_{s1,g}}{R_y \gamma_c} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Довжина елемента решітки $l_{s1,g}$ при кількості панелей n_{pd} буде залежати від висоти ферми:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{h_\Phi}{l_{s1,g}}. \quad l_{s1,g} = \sqrt{\left(\frac{L_\Phi}{n_{pd}} \right)^2 + (h_\Phi)^2} = \frac{h_\Phi}{\cos \alpha_1}. \\ m_{1,g} + m_{2,g} &= \rho \Psi_{s1,g} \left\{ \frac{l_{s1,g}}{R_y \gamma_c} \left[2n_{pd1} \frac{q_P L_\Phi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{l_{s2,g}}{R_y \gamma_c} \left[2n_{pd2} \frac{q_P L_\Phi}{4} \frac{1}{\cos \alpha_2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Приймається умова уніфікації елементів решітки і панелей: $n_{pd} = 2n_{pd1} + n_{pd2}$. Так, для кількості елементів решітки в крайніх панелях $2n_{pd1}$ приймається максимальне повздовжнє зусилля $N_{s1=1,g} = \frac{q_P L_\Phi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1}$, а для центральних панелей n_{pd2} – відповідно, максимальні повздовжні зусилля: $N_{s1=1,g} = \frac{q_P L_\Phi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1}$, $N_{s1=2,g} = \frac{q_P L_\Phi}{4} \frac{1}{\cos \alpha_1}$. Таким чином, маса решітки запишеться для ферм прогоном до 16,0 м, як:

$$\begin{aligned} m_{1,g} + m_{2,g} &= \rho \Psi_{s1,g} \left\{ \frac{l_{s1,g}}{R_y \gamma_c} \left[2n_{pd1} \frac{q_P L_\Phi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{l_{s2,g}}{R_y \gamma_c} \left[2n_{pd2} \frac{q_P L_\Phi}{4} \frac{1}{\cos \alpha_2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

$l_{s1,g} = \frac{h_\Phi}{\cos \alpha_1}$; $l_{s2,g} = \frac{h_\Phi}{\cos \alpha_2}$. Далі прийнята умова рівності всіх відстаней між вузлами, що для уніфікації елементів решітки природно, так як маса решітки суттєво менше маси поясів сталевих: $\cos \alpha_1 = \cos \alpha_2 \rightarrow l_{s1,g} = l_{s2,g} = \frac{h_\Phi}{\cos \alpha_1}$. Тепер маємо масу решітки ферми:

$$m_{1,g} + m_{2,g} = \rho \Psi_{s1,g} \frac{l_{s1,g}}{R_y \gamma_c} \frac{q_p L_\Phi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_1} \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}.$$

Або, враховуючи співвідношення

$$l_{s1,g} = \sqrt{\left(\frac{L_\Phi}{n_{pd}} \right)^2 + (h_\Phi)^2} = \frac{h_\Phi}{\cos \alpha_1} \rightarrow \cos^2 \alpha_1 = \frac{(h_\Phi)^2}{\left(\frac{L_\Phi}{n_{pd}} \right)^2 + (h_\Phi)^2}.$$

$$m_{1,g} + m_{2,g} = \rho \Psi_{s1,g} \frac{q_p L_\Phi}{2 R_y \gamma_c} \frac{h_\Phi}{\cos^2 \alpha_1} \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Остаточно витрати сталі на решітку ферми в залежності від прольоту, кількості панелей і висоти ферми, буде мати такий запис:

$$m_{1,g} + m_{2,g} = \rho \Psi_{s1,g} \frac{q_p L_\Phi}{2 R_y \gamma_c h_\Phi} \left[\left(\frac{L_\Phi}{n_{pd}} \right)^2 + (h_\Phi)^2 \right] \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

$$\frac{m_{1,g} + m_{2,g}}{\rho} = \Psi_{s1,g} \frac{q_p}{2 R_y \gamma_c} \left[\left(\frac{L_\Phi}{n_{pd}} \right)^2 + (h_\Phi)^2 \right] \frac{L_\Phi}{h_\Phi} \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}.$$

Витрати сталі на верхній пояс. Для ферм покриття прольотом 12..16 м постійного перерізу, прийнято, що маса сталі верхнього поясу:

$$m_w + m_d = \rho \left\{ \Psi_{i,w} \sum_n \frac{N_{i,w} l_{i,w}}{\varphi_i R_y \gamma_c} + \Psi_{j,d} \sum_m \frac{N_{j,d} l_{j,d}}{R_y \gamma_c} \right\} \quad (6)$$

Але з урахуванням додаткового бокового зусилля (P_{d3}) яке діє на верхній пояс

$$m_w + m_d = \rho \left\{ \frac{N_{max} L_\Phi}{R_y \gamma_c} \left(\Psi_{i,w} \frac{1}{\varphi_n} + \Psi_{j,d} \right) \right\}.$$

ферми, маємо:

$$N_{i,w} = N_{j,d} = N_w \max; \quad N_{max} = N_w \max + P_{d3}.$$

За балковою аналогією, максимальне зусилля в поясах буде становити:

$$N_{i,w} = N_{j,d} = N_w \max; \quad V_A = \frac{q_p L_\Phi}{2} \rightarrow N_w \max = \frac{M_{z,max}}{h_\Phi} \rightarrow M_{z,max} = \frac{q_p L_\Phi^2}{8}. \quad (7)$$

$$N_w \max = \frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi}.$$

Зусилля бічного тиску P_{d3} з урахуванням коефіцієнта k_{d3t} , має аналітичний вираз, який залежить від висоти ферми на опорі: $P_{d3} = k_{d3t} q_p h_\Phi$. Максимальне зусилля у верхньому поясі ЗКСФ буде:

$N_{max} = N_w \max + P_{d3} = \frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi} + k_{d3t} q_p h_\Phi$. Остаточно, вага верхнього поясу ЗУСФ має аналітичний запис:

$$m_w = \rho \left\{ \Psi_{i,w} \frac{(N_w \max + P_{d3}) L_\Phi}{\varphi_n R_y \gamma_c} \right\}.$$

$$P_{d3} = k_{d3t} q_p h_\Phi; \quad N_w \max = \frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi} \rightarrow m_w = \rho \left\{ \Psi_{i,w} \frac{\left(\frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi} + k_{d3t} q_p h_\Phi \right) L_\Phi}{\varphi_n R_y \gamma_c} \right\}.$$

Після перетворень, загальні витрати сталі на верхній і нижній пояси будуть мати аналітичний запис в залежності від прольоту ферми та її висоти:

$$m_w = \rho \frac{\Psi_{i,w} L_\Phi}{R_y \gamma_c} \left(\frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi} + k_{d3t} q_p h_\Phi \right) \rightarrow \frac{m_w R_y \gamma_c}{\rho q_p L_\Phi^2} = \left(\frac{\Psi_{i,w}}{\varphi_n} \frac{L_\Phi}{8 h_\Phi} + k_{d3t} \Psi_{i,w} \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \right) \quad (8)$$

$$m_d = \rho \left\{ \Psi_{i,d} \frac{(N_w \max) L_\Phi}{R_y \gamma_c} \right\} \rho \left\{ \Psi_{i,d} \frac{q_p L_\Phi^2}{8 h_\Phi} \frac{L_\Phi}{R_y \gamma_c} \right\} \rightarrow \frac{m_d R_y \gamma_c}{\rho q_p L_\Phi^2} = \frac{\Psi_{i,d}}{8} \frac{L_\Phi}{h_\Phi} \quad (9)$$

Далі, аналітична функція приведених до навантаження і прольоту витрат сталі на ЗКСФ буде:

$$\frac{m_\Phi R_y \gamma_c}{\rho q_p L_\Phi^2} = \left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right) \frac{L_\Phi}{h_\Phi} + k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} \frac{h_\Phi}{L_\Phi} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \frac{h_\Phi}{L_\Phi}.$$

$$\frac{m_\Phi R_y \gamma_c}{\rho q_p L_\Phi^2} = \left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right) \frac{L_\Phi}{h_\Phi} + \left(k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \right) \frac{h_\Phi}{L_\Phi}. \quad (10)$$

Висота ферми визначається через приведені значення до прольоту, під час визначення екстремального значення, через рівність нулю першої похідної аналітичного виразу функції витрат (10). Повинна також бути виконана умова, що коефіцієнти повздовжнього згину та коефіцієнти стійкості відомі, або відомий діапазон зміни цих коефіцієнтів, які враховують втрату стійкості стрижнів при центральному стиску:

$$\left(\frac{m_\Phi R_y \gamma_c}{\rho q_p L_\Phi^2} \right)' = 0$$

$$\left[\left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right) \frac{L_\Phi}{h_\Phi} \right]'_{h_\Phi} + \left[\left(k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \right) \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \right]'_{h_\Phi} = 0.$$

$$- \left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right) \frac{L_\Phi}{(h_\Phi)^2} + \left(k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \right) \frac{1}{L_\Phi} = 0.$$

Або

$$- \left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right) \frac{L_\Phi}{(h_\Phi)^2} + \left(k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \right) \frac{1}{L_\Phi} = 0.$$

$$\left(\frac{h_\Phi}{L_\Phi} \right)^2 = \frac{\left(\frac{\Psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\Psi_d}{8} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right)}{\left(k_{d3t} \frac{\Psi_w}{\varphi_n} + \frac{\Psi_{s1,g}}{2} S_{n\varphi} \right)}.$$

Тепер

$$S_{n\varphi} = \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}$$

$$\frac{h_{\Phi}}{L_{\Phi}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\psi_d}{8} + \frac{\psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right)}{\left(k_{d3t} \frac{\psi_w}{\varphi_n} + \psi_{s1,g} \frac{1}{2} S_{n\varphi} \right)}} \quad (11)$$

Так як короткочасне навантаження діє певний проміжок часу і напруження встигають розповсюдитись по всім елементам конструкції ферми включаючи і опори, приймається, що динамічний згинальний момент, який діє на конструкцію, прямо пропорційний згинальному моменту від статичного навантаження. Приймається, що коефіцієнт динамічності є відношення згинального моменту від дії імпульсного навантаження до значення згинального моменту від дії статичного навантаження

$$k_{din,M1} = \frac{M_x \left(\frac{l}{2} \right)}{M_{x,st} \left(\frac{l}{2} \right)}$$

Деформація зсуву перерізу $k_{s,G}$ ферми фактично визначається, як різниця між зусиллями ферми, отриманими під час розрахунку за шарнірно-стрижневою схемою і за балковою аналогією. Розрахунки показали, що при використанні балкової розрахункової схеми, деформація зсуву зворотно пропорційна висоті ферми, так як збільшує зусилля в елементах решітки. Таким чином, прийнято визначати обмежено оптимальну (раціональну) висоту сталевій ферми покриття за аналітичним виразом:

$$S_{n\varphi} = \left\{ \left[2n_{pd1} \left(\frac{1}{\varphi_{s1}} + 1 \right) \right] + \left[\frac{n_{pd2}}{2} \left(\frac{1}{\varphi_{s2}} + 1 \right) \right] \right\}$$

$$\frac{h_{\Phi}}{L_{\Phi}} = \sqrt{\frac{k_{din,M1} \left(\frac{\psi_w}{8} \frac{1}{\varphi_n} + \frac{\psi_d}{8} + \frac{\psi_{s1,g}}{2} \left(\frac{1}{n_{pd}} \right)^2 S_{n\varphi} \right)}{k_{s,G} \left(k_{d3t} \frac{\psi_w}{\varphi_n} + \psi_{s1,g} \frac{1}{2} S_{n\varphi} \right)}} \quad (12)$$

Висновки. Отримані аналітичні формули для визначення раціональної висоти сталевій ферми покриття, під час дії короткочасних навантажень, які враховуються коефіцієнтом динамічності $k_{din,M1}$, із урахуванням додаткового навантаження від затікання вибухової хвилі на торці блоку покриття. Коефіцієнт деформації зсуву перерізу $k_{s,G}$ остаточно визначається під час виконання робочого проекту. Подальші дослідження планують проводитись у напрямку точного визначення висоти сталевій ферми покриття з урахуванням її динамічних властивостей.

Список літератури:

1. Білик А.С. Вибір оптимального конструктивного рішення ферм покриття в експертній системі автоматизованого оптимального проектування. *Вісник*

Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2009. № 5. С. 32-39

2. Білик А.С. Визначення оптимальних конструктивних рішень ферм у експертній системі одностадійного оптимального проектування. *Зб. наук.праць УНДПСК ім. В.М.Шимановського*. 2009, вип. 4. С. 119-132

3. Білик А. С. Вибір оптимальних конструктивних рішень при аналізі якісних умов проектування. *Будівельні конструкції*. 2005, вип. 63. С. 335-340

4. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекрить та покриттів / В.О. Пермяков, М.В. Гоголь. Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2006. 24 с.

5. Білик А.С., Пермяков В.О. Експертне моделювання вибору оптимальних рішень плоских сталевих зварних конструкцій. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2008, вип. 16, Ч.2. С. 295-302

6. Бейко І.В., Зінко П.М., Наконечний О.Г. Задачі, методи і алгоритми оптимізації: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 644 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/2017/1/715823%20zah.pdf>

7. Yurchenko V. V., Peleshko I. D.. Searching for optimal prestressing of steel bar structures based on sensitivity analysisfile. *Archives of Civil Engineering*. 2020, Vol LXVI, Issue 3, p. 525-540.

8. Permyakov V.O., Yurchenko V.V., Peleshko I.D. An optimum structural computer-aided design using hybrid genetic algorithm. *Proceeding of the International Conference “Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures”*. Taylor & Francis Group, London, 2006, p. 819-826.

9. Лавріненко Л., Олійник, Д. Области оптимальних параметрів сталевих гофрованих балок. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020, (7), С.45–56. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.45-56>

10. Білик С.І. Методика визначення оптимальної висоти сталеві двотаврової балки зі змінним перерізом стінки при розвитку обмежених пластичних деформацій. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського*. 2012. Вип.9. С. 28-33 URL: <https://www.urdisc.com.ua/rl/info/9'2012.pdf>

11. Білик С.І., Недоходюк І.Д. Раціональні сталеві елементи рам двотаврового перерізу зі змінною висотою стінки. *Зб. наук. праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського*. 2009. Вип.4. С. 133-142. URL: <https://www.urdisc.com.ua/rl/info/4'2009.pdf>

12. Білик С.І., Аїед Альтаїе Н., Лавріненко Л.І. Конструктивні коефіцієнти та раціональна висота сталеві коробчастої балки постійного перерізу. *Будівельне виробництво*. 2017. № 62/1. С. 33-38

13. Гордеев В.М. Елементарні задачі оптимізації двотавра. *Зб. наук. праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського*. 2009. Вип. 3. С. 27-48

14. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальне проектування сталевих стержневих конструкцій. К., Сталь, 2008. 538 с.

15. Sudeok S., Sengwook J., Seungjae L. Minimum Weight Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-Coded Genetic Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017, 9184292, 13 p. DOI:10.1155/2017/ 9184292

16. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів / Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лавріненко

Л.І., Белов І.Д., Володимирський В.О.; під заг. редакцією О.О. Нілова та О.В. Шимановського, видання 2-е. К.: Сталь, 2010. 869 с.

17. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; під ред. Г.С. Писаренка. К.: Вища школа, 2004. 655 с.

18. Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 26.04.2024 р. № 471.

19. Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника: монографія / М.В. Коваль та ін.; під ред. А. С. Білика. К.: Ліра-К, 2023. 185 с.

20. ДБН А.2.2-3:2014 Склад та зміст проектної документації на будівництво. Зі змінами № 1 та № 2. [Чинний від 2022-07-01]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58105 (Інформація та документація).

References:

1. Bilyk, A.S. (2009). Vybir optimalnoho konstruktyvnoho rishennia ferm pokryttia v ekspertnii systemi avtomatyzovanoho optimalnoho proektuvannia [Selection of the optimal structural solution of the covering trusses in the expert system of automated optimal design]. *Bulletin of Prydniprov's'ka state academy of civil engineering and architecture*, 5, 32-39 [in Ukrainian].

2. Bilyk, A.S. (2009). Vyznachennia optimalnykh konstruktyvnykh rishen ferm u ekspertnii systemi odnostadiinoho optimalnoho proektuvannia [Determination of optimal structural solutions of farms in the expert system of one-stage optimal design]. *Collection of scientific works of UNDPISK named after V.M.Shymanovskyi*, 4, 119-132 [in Ukrainian].

3. Bilyk, A.S. (2005). Vybir optimalnykh konstruktyvnykh rishen pry analizi yakisnykh umov proektuvannia [Selection of optimal design solutions in the analysis of quality design conditions]. *Building structures*, 63, 335-340 [in Ukrainian].

4. Permyakov, V.O., Hohol, M.V. (2006). Rekomendatsiyyi z proektuvannia ratsionalnykh metalevykh nesuchykh konstruktsiy perekryt ta pokryt [Recommendations for the design of rational metal load-bearing structures of ceilings and coatings]. Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic". 24 p.

5. Bilyk, A.S., Permyakov, V.O. (2008). Ekspertne modelyuvannia vyboru optimal'nykh rishen' ploskykh stalevykh zvarnykh konstruktsiy [Expert modeling of the choice of optimal solutions of flat steel welded structures]. *Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 16(2), 295-302 [in Ukrainian].

6. Beyko, I.V., Zinko, P.M., Nakonechnyy, O.H. (2011). Zadachi, metody i alhorytmy optymizatsiyyi [Optimization problems, methods and algorithms]. Rivne: NUVHP, 644 s., from <https://ep3.nuwm.edu.ua/2017/1/715823%20zah.pdf> [in Ukrainian].

7. Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2020). Searching for optimal prestressing of steel bar structures based on sensitivity analysisfile. *Archives of Civil Engineering*. 2020, Vol LXVI, Issue 3, 525-540 [in English].

8. Permyakov, V.O., Yurchenko, V.V., Peleshko, I.D. (2006). An optimum structural computer-aided design using hybrid genetic algorithm. *Proceeding of the International Conference "Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures"*. Taylor & Francis Group, London, 819-826 [in English].

9. Lavrinenko, L., Oliynyk, D. (2020). Areas of optimal parameters of steel corrugated beams. *Building structures. Theory and practice*, 7, 45–56. DOI:10.32347/2522-4182.7.2020.45-56 [in Ukrainian].
10. Bilyk, S.I. (2012). Metodyka vyznachennya optymal'noyi vysoty stalevoyi dvotavrovoyi balky zi zminnym pererizom stinky pry rozvytku obmezhenykh plastychnykh deformatsiy [The method of determining the optimal height of a steel I-beam with a variable wall cross-section during the development of limited plastic deformations]. *Collection of scientific works of UNDPISK named after V.M.Shymanovskiy*, 9, 28-33, from <https://www.urdisc.com.ua/rl/info/9'2012.pdf> [in Ukrainian].
11. Bilyk, S.I., Nedokhodyuk, I.D. (2009). Ratsional'ni stalevi elementy ram dvotavrovoho pererizu zi zminnoyu vysotoyu stinky [Rational steel elements of I-beam frames with variable wall height]. *Collection of scientific works of UNDPISK named after V.M.Shymanovskiy*, 4, 133-142, from <https://www.urdisc.com.ua/rl/info/4'2009.pdf> [in Ukrainian].
12. Bilyk, S.I., Ayed, Al'taye N., Lavrinenko, L.I. (2017). Konstruktyvni koefitsiyenty ta ratsional'na vysota stalevoyi korobchastoyi balky postiyneho pererizu [Structural coefficients and rational height of a steel box beam of constant section]. *Construction production*, 62/1, 33-38 [in Ukrainian].
13. Hordeyev, V.M. (2009). Elementarni zadachi optymizatsiyi dvotavra [Elementary optimization problems of the I-beam]. *Collection of scientific works of UNDPISK named after V.M.Shymanovskiy*, 3, 27-48 [in Ukrainian].
14. Permyakov, V.A., Perelmuter, A.V., Yurchenko, V.V. (2008). Optymal'ne proektuvannya stalevykh stержnevykh konstruksiy [Optimal design of steel rod structures]. K., Stal. 538 s. [in Ukrainian].
15. Sudeok, S., Sangwook, J., Seungjae, L. (2017). Minimum Weight Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-Coded Genetic Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*, 9184292, 13 pages. DOI:10.1155/2017/9184292 [in English].
16. Nilov, O.O., Permyakov, V.O., Shymanovskyy, O.V., et al (2010). Metalevi konstruksiyi: Zahal'nyy kurs [Metal constructions: General course]. K.: Stal, 869 s. [in Ukrainian].
17. Pysarenko, H.S., Kvitka, O.L., Umansky, E.S. (2004). Opir materialiv [The resistance of materials]. K.: Vyscha shkola. 655 s. [in Ukrainian].
18. Some issues of engineering protection of critical infrastructure: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 26, 2024 No. 471.
19. Koval, M.V. (2023). Osnovy inzhenerneho zakhystu ob'yektiv krytychnoyi infrastruktury enerhetychnoyi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitryanoho napadu protyvyuka [Fundamentals of engineering protection of objects of critical infrastructure of the energy industry of Ukraine against enemy air attack means]: monohrafiya. K.: Lira-K. 185 s. [in Ukrainian].
20. DBN A.2.2-3:2014 Composition and content of project documentation for construction. With Amendments No. 1 and No. 2. [Effective from 2022-07-01] from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58105.

Artem BILYK, Maksym TERNOVIY

Rational constructive solution of protective structures of covering trusses under dynamic loads

The article presents the results of studies on the search for rational parameters of protective structures of small-span roof trusses under dynamic loads. The main properties of such structures, the requirements they must meet, and the adopted provisions are considered. The main principles of designing protective structures of steel structure roofs are formulated to ensure the required strength and stability of the structure under impulse loads. The aim of the work is to develop a methodology for alternative design to determine the rational (limitedly optimal) height of a steel truss roof with a cross lattice under short-term impulse loads. For the selected type of structure with known general parameters of the structure, the main technical solutions are adopted in alternative design. According to the refined classification, the technical and economic criteria for comparing alternatives are described by various functions: static, dynamic, convex non-convex, polymodal, nonlinear, discrete, discontinuous, undifferentiated and partially separable. The search for a global optimum of such target functions for a generalized problem of optimal design of a spatial structural system using existing analytical methods has certain difficulties. This is due to the fact that various design solutions with different topology, different calculation schemes and a discrete set of geometric characteristics of element sections cannot be reduced to the description of a single system of functional dependencies, since private criteria of parameters of individual equations depend on different variables. It is known that in a weakly structured problem, parametric dependencies between ascending and variable parameters are described not only by explicit analytical expressions, but also by discrete mathematics methods based on predicate calculation, and the functions of private comparison criteria are algorithmic. For the variant design and determination of the rational height of the steel truss, a beam analogy is used. As a calculation scheme, a calculation scheme of an ideal I-beam is adopted taking into account the shear deformation of the cross section. Shear deformations of the section take into account the increase in deflections of the beam-rod steel truss relative to the I-beam. The target function of steel consumption is recorded depending on the height and purlin of the steel roof truss, the dynamic factor is also taken into account. Analytical dependencies for determining the height of trusses are obtained, taking into account their dynamic characteristics with additional load from the action of a blast wave at the end of the roof block. The target criterion is the mass of structures, which allows us to move on to cost indicators.

Keywords: *steel structures, rational design, dynamic loads, trusses.*