

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВОЇ МАЛОЕЛЕМЕНТНОЇ ФЕРМИ З ДВОТАВРОВИМ ВЕРХНІМ ПОЯСОМ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ

FEATURES OF THE CALCULATION METHOD OF A STEEL SMALL-ELEMENT FRAMEWORK WITH A DOUBLE-BEAM UPPER BELT OF VARIABLE RIGIDITY

Налепа О.І., к.т.н., доцент, ORCID.ORG/0009-0008-0749-5663, **Філіпчук С.В.**, к.т.н., доцент, ORCID.ORG/0000-0002-4464-4620 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Баран Д.Я.**, к.т.н., доцент, **Конончук О.П.**, к.т.н., доцент (Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя)

Nalepa O.I., candidate of engineering sciences, associate professor, **Filipchuk S.V.**, candidate of engineering sciences, associate professor, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Baran Denys**, candidate of engineering sciences, associate professor, **Kononchuk Oleksandr**, candidate of engineering sciences, associate professor (Ternopil Ivan Pulu National Technical University)

Наведений аналіз роботи малоелементної сталеві ферми прольотом 18 м під навантаженням. Обґрунтований вибір перерізу верхнього поясу у вигляді перфорованого двотавра змінної висоти по довжині поясу. Викладена методика пошуку раціональних параметрів ферми з перфорованим верхнім поясом змінної жорсткості. Встановлені закономірності процесу зміни внутрішніх зусиль у верхньому поясі і залежності між ними. Отримане таке поєднання епюри згинаючого моменту і схеми розрізу вихідного двотавра, за якого задовольняються всі міцнісні та конструктивні обмеження за мінімально можливою вагою ферми.

One of the ways to reduce the material consumption of steel trusses is the use of initial systems with a minimum number of elements, the concentration of material in the main bearing elements, the use of highly efficient profiles. The researched truss in the form of a sprengel system, which consists of a two-sloped upper belt, a lower broken belt and two risers connecting the belts, can correspond to such design directions. The upper belt in the areas between the support and ridge nodes is a rigid, inseparable rod that receives all three types of internal forces: bending moment M , longitudinal force N and transverse force Q . The main role here is played by the bending moment, the value of

which along the belt varies from zero values to certain extreme values. The possibility of using perforated I-beams of constant and variable stiffness in the upper belt has been studied. The characteristic curves of the bending moment in the upper belt and the structural solutions of the rods for each of the given stiffness change schemes are considered. The final proposed constructive solution of the upper belt of the truss with a span of 18 meters in the form of a perforated I-beam of variable height. The permissible range of changes in the values of the bending moment is obtained. A geometric interpretation of the area of possible moment values is established. The method of finding rational parameters of a truss with a perforated upper belt of variable stiffness is described. The regularities of the process of changing internal forces in the upper belt and the dependence between them have been established. Such a combination of the bending moment plot and the cross-section scheme of the original I-beam was obtained, which satisfies all strength and design constraints with the minimum possible weight of the truss.

Ключові слова:

Балка, ферма, двотавр, тавр, різка.
Beam, truss, H-beam, tee-beam, cutting.

Вступ. Одними з напрямків зменшення матеріаломісткості сталевих кроквяних ферм є використання вихідних систем з мінімальною кількістю елементів, концентрація матеріалу в основних несучих елементах, використання високоефективних профілів. Таким напрямком при проектуванні може відповідати досліджувана в [1, 2, 3, 4] ферма у вигляді шпренгельної системи, яка складається з двосхилого верхнього поясу, нижнього ламаного поясу та двох стояків, що з'єднують пояси (рис. 1).

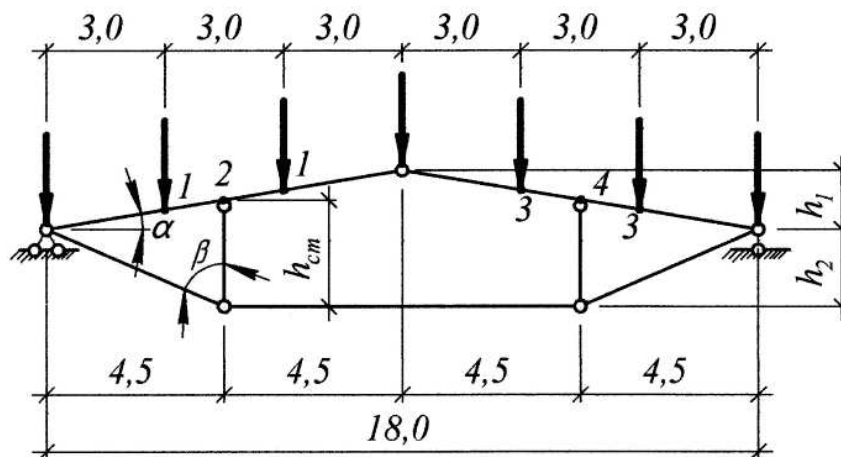


Рис.1. Вихідна система ферми

Мета і задачі досліджень. Мета досліджень - знайти таке поєднання епюри згинаючого моменту і схеми розкрою вихідного профілю, за якого будуть задовольнятися всі міцнісні та конструктивні обмеження при

мінімально можливій вазі ферми. Нижче викладена методика пошуку раціональних параметрів ферми з перфорованим верхнім поясом (перфорованим двотавром) змінної жорсткості. Характер зміни жорсткості вздовж пояса завдяки зміні висоти перфорованого двотавра досліджений у [3]. Аналіз ефективності різних конструктивних форм показав, що в найбільшій мірі критерію раціональності з врахуванням витрат на виготовлення відповідає стержень верхнього поясу півферми у вигляді перфорованого двотавра зі змінною висотою стінки, у якого максимально розвинутий переріз розміщений в середині півпрольоту і сприймає найбільше значення згинаючого моменту за відповідних значень геометричних параметрів розрахункової схеми.

Методика та результати досліджень. Існує декілька різних методів розрахунку перфорованих стержнів в пружній стадії роботи сталі: за елементарною теорією згину, як безрозкісної ферми Віренделя, чисельними методами теорії пружності.

В наведених дослідженнях для міцнісного розрахунку верхнього поясу прийнятий метод, заснований на теорії складених стержнів [5, 6, 7]. Перфорований стержень верхнього поясу ферми можна уявити у вигляді стержня, який складається з двох поясів, з'єднаних між собою абсолютно жорсткими поперечними в'язями і пружними в'язями зсуву. Роль обох видів в'язів виконують суцільні ділянки стінки, які утворюються зварюванням виступаючих частин двох половинок вихідного прокатного стержня. В цьому випадку робота перфорованого двотавра розглядається як робота складеного стержня. Напружений стан розглядається як сума напруженого стану ферми (в поясах виникають однакові нормальні напруження по перерізу пояса) і двох балок (поясів), які працюють незалежно, якби прибрати в'язі зсуву. Такий стан має місце по межах комірки (рис. 2).

З цього витікає [7]:

$$M_x = M_\phi + 2M_m; \quad (1)$$

$$Q_x = Q_\phi + 2Q_m,$$

де $M_\phi = N_\phi \cdot v = \psi \cdot M_x$ - згинаючий момент, що виникає як у фермі;

$M_m = 0,5(1 - \psi)M_x$ - згинаючий момент, що виникає в тавровому поясі за умови відсутності в'язів зсуву;

Q_ϕ, Q_m - те ж, для поперечних сил;

$\psi = 1 + 2I_m E y'' / M_x$ - коефіцієнт розподілу зусиль за [6];

I_m - момент інерції тавра відносно власної осі;

y - загальна деформація складеної балки.

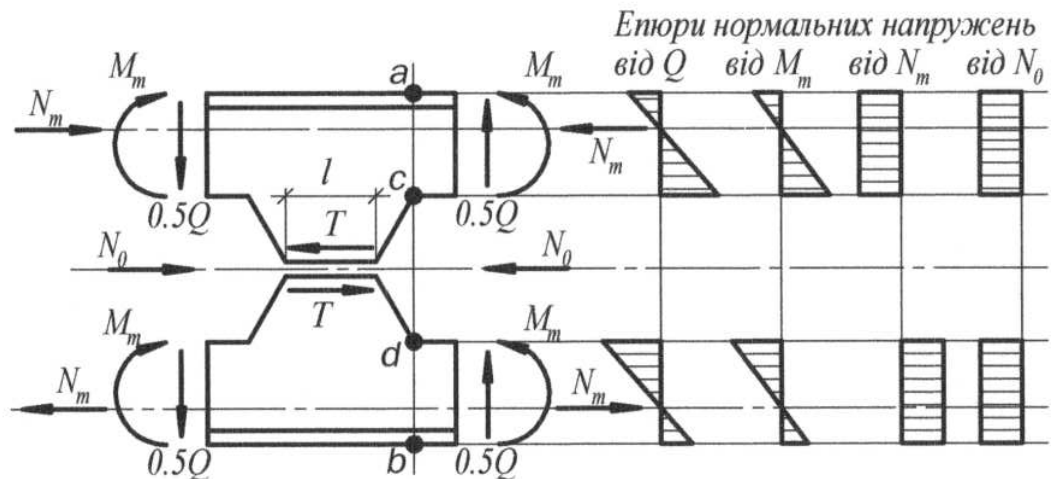


Рис. 2. До визначення внутрішніх силових характеристик в "типовому" елементі перфорованого стержня

Аналіз коефіцієнта ψ показав [8], що в більшості випадків він без великої похибки рівний:

$$\psi = 1 - 1/\alpha_c, \quad (2)$$

де $\alpha_c = \frac{I}{2I_m}$

I

- модуль зсуву пружних в'язів;
- момент інерції двотавра по перерізу з отвором відносно осі всього стержня.

За такого виразу впливає, що у формулах (1) моменти M_ϕ та M_m розподіляються пропорційно згинальним жорсткостям всього стержня і поясів.

Нормальні напруження в точках "a" і "b" та умова міцності виражаються формулою:

$$\sigma = \pm \frac{M_x \left(1 - \frac{1}{\alpha_c}\right)}{0.5 A v} \pm \frac{Q_x l}{4 W_{m,max}} \pm \frac{M_x}{2 W_{m,max} \alpha_c} - \frac{N_x}{A} \leq R_y \gamma_c. \quad (3)$$

Те ж в точках "c" і "d":

$$\sigma = \pm \frac{M_x \left(1 - \frac{1}{\alpha_c}\right)}{0.5 A v} \pm \frac{Q_x l}{4 W_{m,min}} \pm \frac{M_x}{2 W_{m,min} \alpha_c} - \frac{N_x}{A} \leq \frac{R_u}{\gamma_u} \gamma_c. \quad (4)$$

Умова стійкості верхнього поясу в площині дії моменту згідно [9]:

$$\frac{N_x}{\varphi_e A} \leq R_y \gamma_c. \quad (5)$$

Умова стійкості верхнього поясу з площини дії моменту:

$$\frac{N_x}{c \varphi_y A} \leq R_y \gamma_c. \quad (6)$$

Гнучкість окремих трапецеподібних елементів верхнього поясу визначалась за [10], як приведена гнучкість наскрізного стержня змінного симетричного перерізу з врахуванням деформації зсуву:

$$\lambda_{ef}^2 = \lambda_{x,o} + \frac{\pi^2}{12} \lambda_e^2 \left(T_1 + \frac{2b_n I_{b,o}}{c_e I_{sm}} + \frac{12Ek_e A_{e,o}}{\sigma \lambda_e^2 A_{e,n}} + \frac{24Ek_s c_e A_{e,o}}{\sigma \lambda_e^2 A_{sm} b_n} \right), \quad (7)$$

де λ_x - гнучкість стержня без врахування деформації зсуву, прийнята середньою з усіх її значень, визначених за дійсних величин радіусів інерції в кожному ослабленому перерізі; λ_e - гнучкість таврової вітки стержня довжиною, рівною кроку перфорації; $I_{e,o}$ та $A_{e,o}$ - відповідно момент інерції та площа перерізу таврової вітки в найбільш розвинутому перерізі; $A_{e,n}$ та b_n - відповідно площа перерізу таврової вітки та відстань між осями таврів в найменш розвинутому перерізі; A_{sm} - площа перерізу планки, яка з'єднує таврові вітки; T_1, k_s, k_e - коефіцієнти за [10].

За розрахункову довжину верхнього поясу в площині ферми прийнята відстань між опорним (коньковим) вузлом та вузлом приєднання стояка. Розрахункова довжина з площини ферми рівна відстані між вузлами приєднання в'язів, які розкріпляють пояс в цій площині, і прийнята 1,5 м.

Умова місцевої стійкості, яка обмежує висоту стінки стиснутого тавра верхнього поясу в ослабленому перерізі в загальному вигляді:

$$\left[\frac{h_{ef}}{t} \right] - \frac{h_{m,x}}{t} \geq 0. \quad (8)$$

Напруження зсуву у шві, який з'єднує гребені, за методикою [11] слід визначати за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S \cdot L}{I \cdot t \cdot l} \leq R_{\omega s} = R_s = 0.58 R_y, \quad (9)$$

де S - статичний момент тавра, який зсувається; L - крок отворів; I - момент інерції перерізу між отворами; t - товщина стінки.

Розрахунок перерізів нижнього поясу і стояків виконується за [9] як розтягнутих та стиснутих елементів.

Параметри геометрії перфорованих двотаврів зі змінною по довжині висотою перерізу. Параметри розпуску стінки конкретного вихідного двотавра завжди мають певні граничні значення. Мінімальне значення h_i (рис. 3) приймається з конструктивних і технологічних вимог.

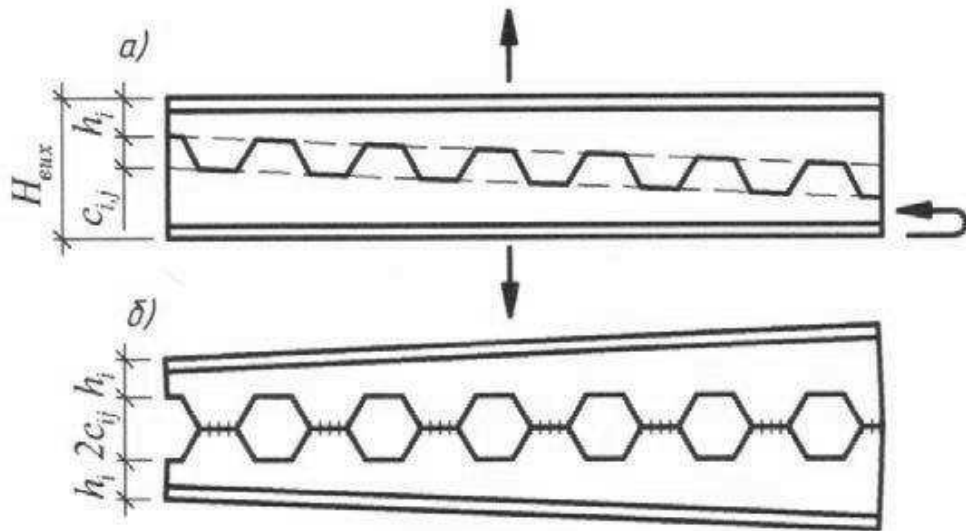


Рис. 3. Схема утворення перфорованого двотавра змінної жорсткості:
а) вихідний двотавр; б) отриманий перфорований двотавр

З конструктивних вимог це значення повинне бути не менше суми товщини полиці і радіуса заокруглення. Розміри газових або плазмових пальників дозволяють виконувати операцію розкрою за мінімального значення h_i , рівного 4 см. Обмеження для значення h_i має вигляд:

$$4 \text{ см} \leq h_i \leq \frac{H_{\text{вих}} - c_{i,j}}{2}. \quad (10)$$

За наявності в правій частині виразу (10) знаку рівності розпуск вихідного профілю виконується вздовж осі двотавра. Отриманий таким чином розвинутий елемент має постійну по довжині висоту перерізу. При цьому враховується, що мінімальне значення висоти зигзагу лінії різі $c_{i,j}$ з технологічних і конструктивних міркувань рівне 4 см. Наявність двох індексів в позначенні висоти зигзагу пояснюється тим, що за фіксованого i -того значення h існує певна j -та кількість значень c . Обмеження для значень $c_{i,j}$ має вигляд:

$$4 \text{ см} \leq c_{i,j} \leq H_{\text{вих}} - 2h_i. \quad (11)$$

Геометричні параметри отворів перфорованого стержня визначаються залежно від значень $c_{i,j}$ (рис. 4):

$$h_{\text{отв}} = 2c_{i,j}; \quad e = c_{i,j} / \text{tg}60^\circ. \quad (12)$$

При цьому крок перфорації рівний:

$$L = 6c_{i,j} / \operatorname{tg} 60^\circ. \quad (13)$$

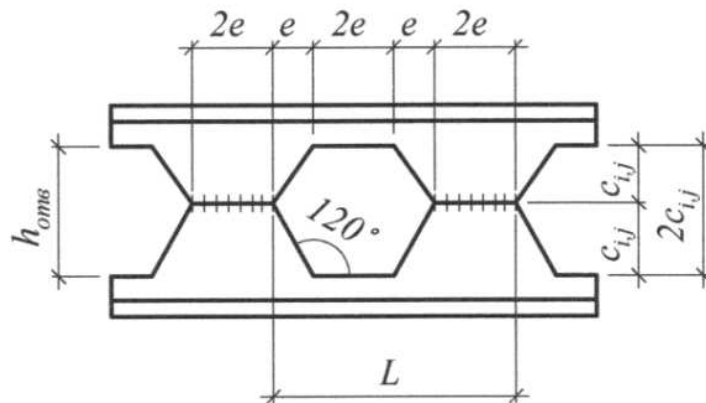


Рис. 4. Геометричні параметри отворів

В дослідженнях виведені формули для визначення геометричних характеристик ослаблених перерізів перфорованих двотаврів зі змінною висотою поперечного перерізу, виражених через параметри вихідного двотавра з сортаменту.

Розрахунок зводиться до знаходження такого розподілу згинаючого моменту по довжині верхнього поясу, за якого останній буде відповідати названому критерію раціональності за відповідної схеми розкрою вихідного профілю. Складність розрахунку полягає в тому, що з одного боку існує певний допустимий діапазон схем розподілу згинаючого моменту [3], з якого необхідно вибрати лише одну схему, а з другого боку для одного вихідного двотавра верхнього поясу існує безліч варіантів розрізу, з числа яких також необхідно вибрати лише один.

В результаті повинно бути знайдене таке поєднання епюри згинаючого моменту і схеми розкрою профілю, за якого задовольняються всі міцнісні та конструктивні обмеження при мінімально можливій вазі ферми. А оскільки вага ферми залежить, в основному, від ваги верхнього поясу, то розрахунок зводиться до забезпечення в першу чергу мінімальної ваги останнього.

Виходячи з цього, шуканими параметрами є параметри розрізу вихідного двотавра h_i та $c_{i,j}$, від яких залежать жорсткісні характеристики, і параметричний коефіцієнт φ_n [4], який визначає схему розподілу згинаючого моменту. Слід зауважити, що для вихідного двотавра певного номера існує велика кількість можливих варіантів розрізки. Наприклад, за кроку зміни параметрів h_i та $c_{i,j}$, рівного 1 см, кількість названих варіантів для двотавра №20Б - 25, для двотавра №23Б - 42, для двотавра №26Б - 64 і т.д. Для більшої переконливості сказаного на рис. 5 представлені графіки залежностей висот крайніх перерізів утворених трапецеподібних елементів, які складають верхній пояс ферми, від параметрів розрізу.

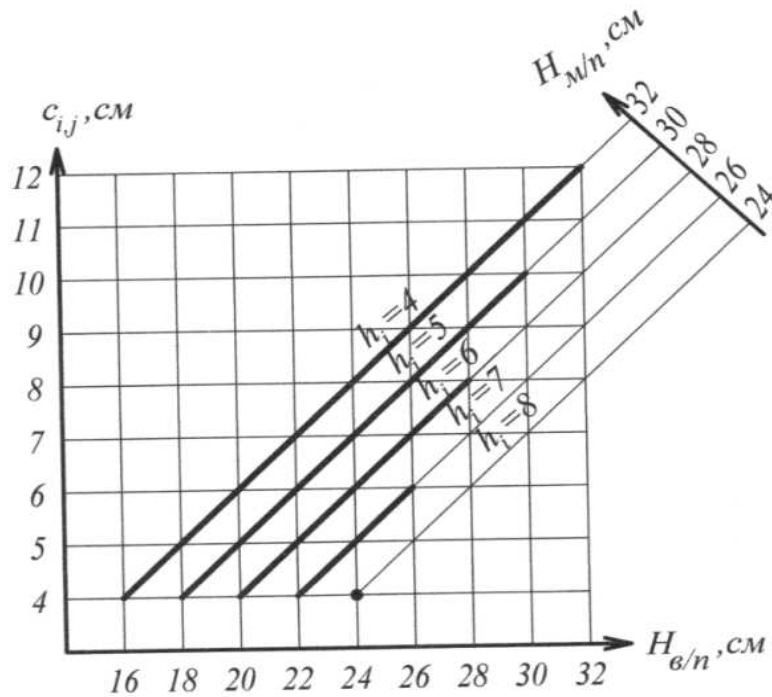


Рис. 5. Графік залежності висот крайніх перерізів трапецеподібних елементів від параметрів розрізу вихідного двотавра № 20Б

На графіку: $H_{М/П}$ та $H_{В/П}$ - відповідно висоти малого і великого перерізів стержня.

Дослідженнями встановлені закономірності процесу зміни внутрішніх зусиль у верхньому поясі і залежності між ними. Результати формалізовані у вигляді:

$$\begin{aligned}
 M_i &= f(M_1; P); \\
 N_i &= f(M_2; P; V_p); \\
 Q_i &= f(M_2; P; V_p),
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

де M_i - екстремальне i -те значення згинаючого моменту; N_i - значення i -тої поздовжньої сили по довжині верхнього поясу; Q_i - значення i -тої поперечної сили по довжині верхнього поясу; P - значення зовнішнього навантаження; V_p - горизонтальна сила від рамності за розрахунку ферми у складі поперечника виробничих будівель.

Залежності дозволяють, довільно задаючись одним з екстремальних значень згинаючого моменту, визначити всі значення внутрішніх зусиль як за симетричного, так і несиметричного зовнішнього навантаження. Перехід від довільно заданої схеми розподілення внутрішніх зусиль у верхньому поясі до відповідного значення параметричного коефіцієнта φ_n за симетричного зовнішнього навантаження здійснюється за емпіричною залежністю:

$$\varphi_n \cdot 10^3 = 620 + 4,73M_2 + 1,24 \cdot 10^{-2} M_2^2 - 2,533 \cdot V_p
 \tag{15}$$

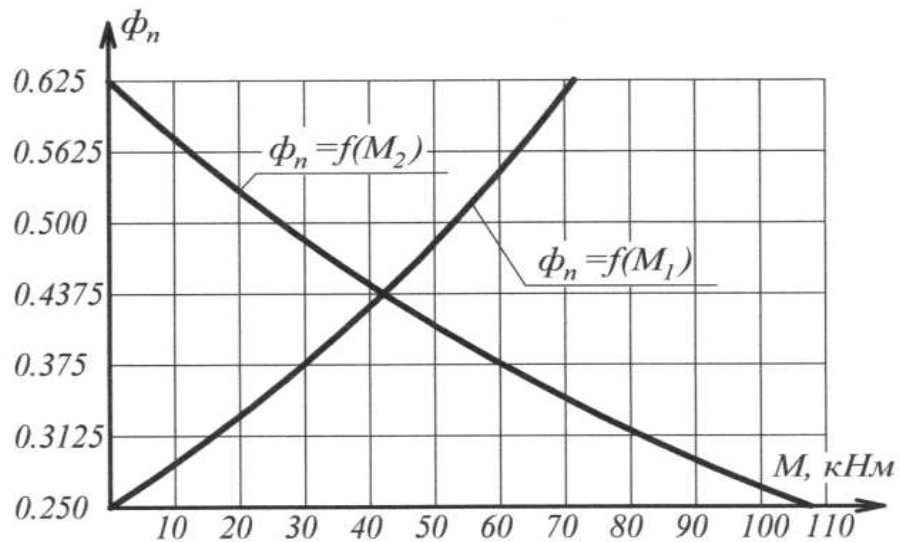


Рис. 6. Графіки залежностей між екстремальними значеннями згинаючого моменту і параметричним коефіцієнтом φ_n за симетричного навантаження з вузловою силою $P=72$ кН

Графічне відображення залежності наведене на рис. 6. За даними графіка, задаючись одним з екстремальних значень M , можна визначити друге значення моменту і значення φ_n , яке забезпечує ці величини моментів, і навпаки. Точка перетину функцій $\varphi_n = f(M_1)$ та $\varphi_n = f(M_2)$ дає значення φ_n за рівномірної схеми розподілення згинаючого моменту вздовж верхнього поясу.

Зовнішній вигляд досліджуваної ферми наведений на рис. 7.



Рис. 7. Зовнішній вигляд малоелементної кроквяної ферми прольотом 18 м з перфорованим верхнім поясом змінної жорсткості

1. Жербін М.М., Дробязко Л.Є. Эффективность замены железобетонных конструкций особо легкими стальными. - Строительство и архитектура, 1984, №2, с. 17-19.

Zherbin M.M., Drobiazko L.Ie. Effektivnost zameny zhelezobetonnykh konstruktsiyi osobo lehkymu stalnyму. - Stroitelstvo y arkhytektura, 1984, №2, s. 17-19.

2. Налєпа О.І., Чорнолоз В.С. Ефективні металеві конструкції виробничих будівель з використанням перфорованих двотаврів змінної жорсткості та одинарних профілів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2018. – Випуск 36. – С. 203 – 211.

Nalera O.I., Chornoloz V.S. Efektyvni metalevi konstruktsii vyrobnychykh budivel z vykorystanniam perforovanykh dvotavriv zminnoi zhorstkosti ta odynarnykh profiliv. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2018. – Vypusk 36. – S. 203 – 211.

3. Налєпа О.І., Філіпчук С.В., Шолота Т.Ю. Дослідження раціональної конструктивної форми сталеві малоелементної ферми прольотом 18 м. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2022. – Випуск 41. - С. 159 - 172.

Nalera O.I., Filipchuk S.V., Sholota T.Iu. Doslidzhennia ratsionalnoi konstruktyvnoi formy stalevoi maloelementnoi fermi prolutom 18 m. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats.–Rivne: NUVHP, 2022.– Vypusk41.-S.159-172.

4. Налєпа О.І., Філіпчук С.В., Мисливий Т.А.,Крейч М.М. Дослідження раціональності використання перфорованих двотаврів змінної жорсткості в сталевій малоелементній фермі. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2022. – Випуск 42. - С. 141 - 149.

Nalera O.I., Filipchuk S.V., Myslyvyi T.A.,Kreich M.M. Doslidzhennia ratsionalnosti vykorystannia perforovanykh dvotavriv zminnoi zhorstkosti v stalevii maloelementnii fermi. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2022. – Vypusk 42. - S. 141 - 149.

5. Бирюлев В.В., Добрачев В.М. Стальные неразрезные балки из сквозных двутавров. - Известия вузов. Строительство и архитектура, 1978, №11, с. 7-11.

Biryulev V.V., Dobrachev V.M. Stalnye nerazreznye balki iz skvoznyh dvutavrov. Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arhitektura, 1978, №11, s. 7-11.

6. Бирюлев В.В., Клячин А.З. Экспериментальное исследование предварительно напряженных стальных составных балок. - Известия вузов. Строительство и архитектура, 1966, № 1, с.47-56.

Biryulev V.V., Klyachin A.Z. Eksperimentalnoe issledovanie predvaritelno napryazhennykh stalnykh sostavnykh balok. - Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arhitektura, 1966, № 1, s.47-56.

7. Добрачев В.М. Пути повышения эффективности стальных балок с перфорированной стенкой. :Автореф. дис. ... канд. техн. наук.-Новосибирск, 1982, 19с.

Dobrachev V.M. Puti povysheniya effektivnosti stalnykh balok s perforirovannoj stenkoj. : Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. - Novosibirsk, 1982, - 19 s.

8. Бирюлев В.В. Проектирование и расчет несущих элементов легких металлических конструкций. Новосибирск, изд. НИСИ, 1981, 78 с.

Biryulev V.V. Proektirovanie i raschet nesushih elementov legkih metallicheskih konstrukcij. Novosibirsk, izd. NISI, 1981, 78 s.

9. ДБН В.2.6–198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування.–Київ, 2014. – 199с.

DBN V.2.6–198:2014. Stalevi konstrukciyi. Normi proektuvannya.– Kiyiv,2014.199s.

10. Билык С.И. Стальные колонны с перфорированной стенкой переменной высоты для бескрановых производственных зданий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1987, - 18 с.

Bilyk S.I. Stalnye kolonny s perforirovannoj stenkoj peremЕННОj vysoty dlya beskranovyh proizvodstvennyh zdaniy: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. - Kiev, 1987,- 18s.

11. Складнев А.И. Расчет балок с перфорированной стенкой по разрушающим нагрузкам. - Реф. информ. /ЦИНИСиА. сер. 17, 1977, вып. 4, с. 29; 1978, вып. 1, с.30.

Sklyadnev A.I. Raschet balok s perforirovannoj stenkoj po razrushayushim nagruzkam. - Ref. inform. /CINISiA. ser. 17, 1977, vyp. 4, s. 29; 1978, vyp. 1, s. 30.