

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКРИТТЯ КРУГЛОЇ У ПЛАНІ
БУДІВЛІ З РАДІАЛЬНИМ РОЗТАШУВАННЯМ БАЛОК****Янін О.Є.**, - к.т.н., доцент,*Херсонський Державний Аграрний Університет, м. Херсон*
yanin_a@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0230-8669**Новікова С.М.**, - старший викладач,*Херсонський Державний Аграрний Університет, м. Херсон*
novikova_svetla@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0012-521X

Анотація. У статті наведені результати оптимізації кута між радіальними балками у перекритті круглої у плані будівлі. З одного боку вони спираються на центральну стійку, а з другого на вертикальні несучі конструкції уздовж кола. На балки укладається сталевий настил. Оптимальний кут між балками визначався таким чином, щоб маса балки і настилу була мінімальною. Задача визначення цього вирішувалась виходячи із забезпечення міцності балок за нормальними напруженнями. На підставі розв'язання системи рівнянь міцності і жорсткості, отримана формула для мінімального кута між балками із умови жорсткості. Для підтвердження практичної доцільності використання запропонованого методу, задача була вирішена при певних числових даних. Отримані результати підтвердили, що задача має практичний сенс при відносно низькій міцності сталі. Окрім цього, виявилось, що оптимальний кут між балками не залежить від її прольоту.

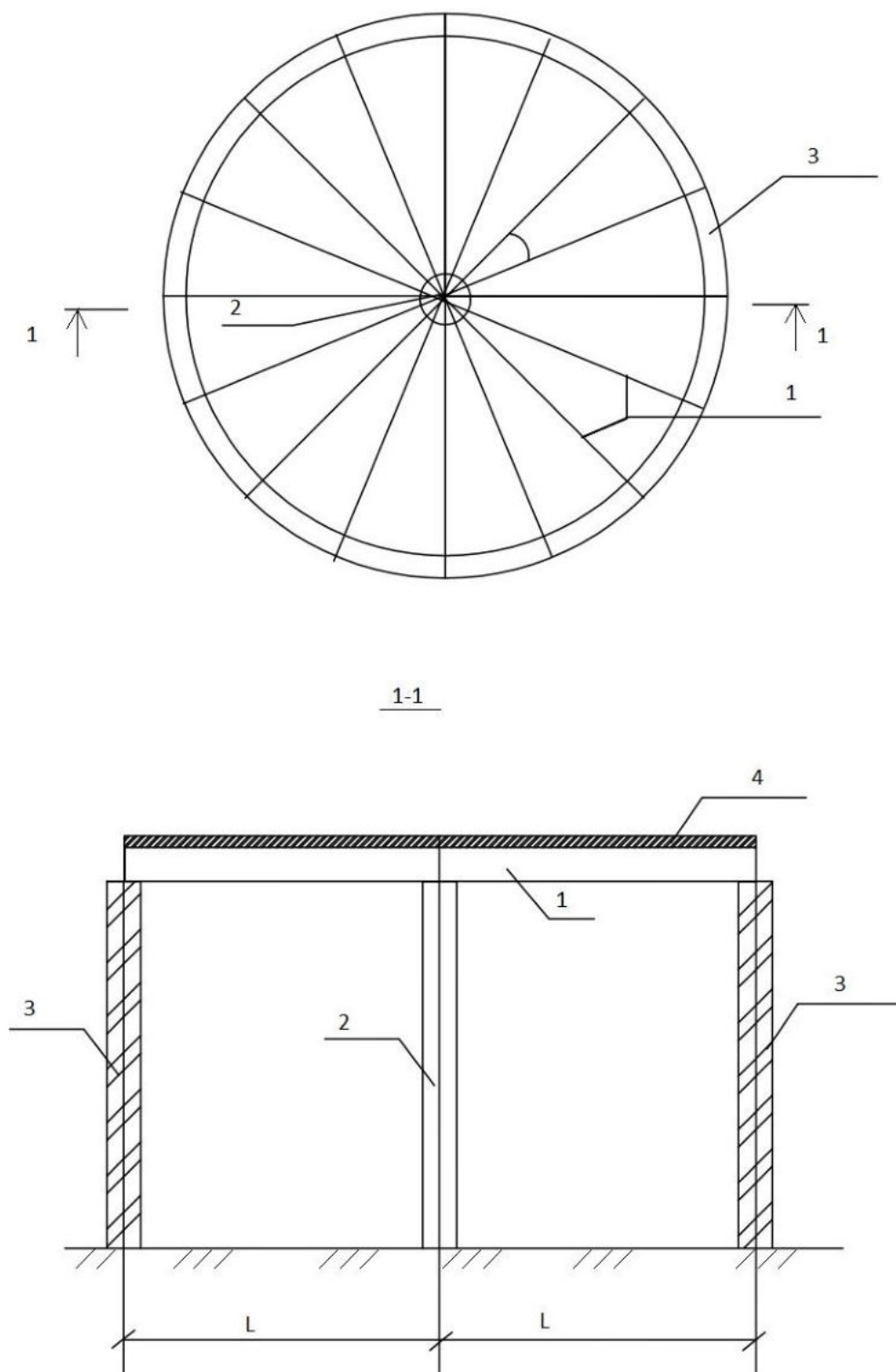
Ключові слова: радіальні балки, сталевий настил, кут між балками, оптимізація, міцність, жорсткість, радіус будівлі.

Вступ. З метою створення архітектурної виразності виникає необхідність використання круглої у плані будівлі. Для її перекриття можна застосовувати радіально розташовані балки. Проект перекриття необхідно виконати таким чином, щоб при заданому діючому навантаженні витрати сталі були зведені до мінімуму.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Задача конструювання економічно вигідного покриття будівлі з використанням сталевих балок розглядається у працях провідних вітчизняних та закордонних вчених [1-4]. При розробці покриття із радіальними сталевими балками, вирішується задача підбору кута між ними виходячи з максимального використання їх несучої здатності при раціональному двотавровому поперечному перерізі [5-7]. Якщо, кут між радіальними сталевими балками досить малий, то виникає проблема одночасного забезпечення їх жорсткості і міцності за нормальними напруженнями при мінімальному запасі [5-7]. Це може привести до того, що перекриття може стати економічно невикладним. Вирішення задачі оптимізації кроку балок у балочній клітці спрощеного типу наведено у роботі [8]. Використання цільової функції вартості конструкції відкрило можливість проектування економічно вигідних балок, розташованих паралельно з певним кроком. Але часто, виходячи з архітектурних міркувань і призначення об'єкту, виникає необхідність зведення економічно вигідної круглої у плані будівлі з радіально розташованими балками.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Доцільним є дослідження можливості підбору кута між балками покриття круглої в плані будівлі, виходячи з критерію економічності при умові забезпечення несучої здатності та жорсткості. Таким критерієм можуть бути витрати сталі на конструкцію всього перекриття.

Постановка завдання. Розглянемо перекриття круглої у плані будівлі радіальними балками. З одного боку вони спираються на центральну стійку, а з другого на вертикальні несучі конструкції уздовж кола, радіусом L . На балки укладається сталевий настил (рис.1).



- 1- радіальні балки
- 2- центральна стійка
- 3- несучі конструкції уздовж кола
- 4- сталевий настил

φ - кут між балками

L – радіус будівлі.

Рис. 1. Кругла у плані будівля з радіальними балками.

Кут між балками φ спробуємо підібрати так, щоб сумарні витрати сталі на балки і настил були мінімальними. Такий кут $\varphi = \varphi_0$ будемо називати оптимальним. Для його знаходження складемо цільову функцію вартості сталі для настилу і балок на 1 м^2 перекриття, перемінним аргументом якої кут між балками φ . Потім дослідимо цю функцію на екстремум [6]. Якщо екстремум буде відповідати мінімуму функції і позитивному значенню аргументу, то оптимальний кут між балками φ може бути знайдений.

Основний матеріал і результати. Виділимо ділянку покриття у межах бісектрис між суміжними балками. Вартість сталі для настилу і балок на цій ділянці перекриття, площа якої дорівнює $0.5L^2\varphi$

$$St = \Pi_{\text{н}} \cdot t \cdot 0.5 \cdot L^2 \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{ст}} + \Pi_{\text{б}} \cdot A_{\text{б}} \cdot L \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (1)$$

де $\Pi_{\text{н}}$ і $\Pi_{\text{б}}$, грн/кг – ціна 1 кг сталі відповідно для настилу і балок;

$\rho_{\text{ст}}$, кг/м³ – щільність сталі;

t – товщина настилу;

$A_{\text{б}}$ – площа поперечного перерізу двотаврової балки;

$$A_{\text{б}} = 2A_{\text{ф}} + A_{\omega} \approx 2b_{\text{ф}}t_{\text{ф}} + ht_{\omega}, \quad (2)$$

де $A_{\text{ф}}$ – площа поперечного перерізу однієї полиці;

A_{ω} – площа поперечного перерізу стінки.

Вартість сталі для настилу і балок на 1 м^2 перекриття

$$S = \frac{St}{0.5 \cdot L^2 \cdot \varphi} = \rho_{\text{ст}} \left(\Pi_{\text{н}} t + \Pi_{\text{б}} \frac{A_{\text{б}}}{0.5 \cdot L \cdot \varphi} \right). \quad (3)$$

Величини t і $A_{\text{б}}$ залежать від φ . Виразимо їх через φ і підставимо у формулу (3).

Граничне відношення $\varphi L/t$ виходячи з рівності прогину настилу посередині прольоту гранично припустимому прогину виражається формулою [3]

$$\frac{\varphi L}{t} = \frac{4n_{\text{он}}}{15} \left(1 + \frac{72E_1}{n_{\text{он}}^4 q_{1\text{н}}} \right), \quad (4)$$

де $n_{\text{он}}$ – величина, зворотна гранично припустимому прогину;

$q_{1\text{н}}$, кН/м² – корисне експлуатаційне навантаження на перекриття;

E_1 – модуль пружності сталі при неможливості поперечних деформацій настилу.

Права частина формули (4) не залежить від φ . Тоді функцію $t_{(\varphi)}$ можна записати у вигляді

$$t_{(\varphi)} = \varphi L \cdot \frac{1}{\frac{4n_{\text{он}}}{15} \left(1 + \frac{72E_1}{n_{\text{он}}^4 q_{1\text{н}}} \right)} = \varphi L \cdot p_1, \quad (5)$$

де

$$p_1 = \frac{1}{\frac{4n_{OH}}{15} \left(1 + \frac{72E_1}{n_{OH} q_{1H}} \right)} = \text{const} . \quad (6)$$

Прийmemo, що дві однакові полиці і стінка двотаврової балки мають вигляд прямокутників. При цьому висота балки h є оптимальною і обчислюється за формулою [7]

$$h = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \lambda_{\omega} W} , \quad (7)$$

де $\lambda_{\omega} \approx h/t_{\omega}$ – задана гнучкість стінки ($\lambda_{\omega} = \text{const}$);

$W = M/R_y \gamma_c$ – потрібний момент опору поперечного перерізу із умови міцності балки за нормальними напруженнями [9];

R_y – розрахунковий опір сталі, встановлений за межею текучості;

γ_c – коефіцієнт умов роботи.

Максимальний згинаючий момент M у балки з трикутним розподіленням навантаженням залежить від невідомого кута φ і виражається формулою

$$M = \frac{q_{1H} \varphi L \gamma_f L^2}{9\sqrt{3}} . \quad (8)$$

де γ_f – коефіцієнт надійності за навантаженням;

L – проліт балки.

Тоді W є функцією від φ :

$$W_{(\varphi)} = \frac{q_{1H} \varphi \gamma_f L^3}{9\sqrt{3} R_y \gamma_c} = \varphi \cdot p_2 , \quad (9)$$

де

$$p_2 = \frac{q_{1H} \gamma_f L^3}{9\sqrt{3} R_y \gamma_c} = \text{const} . \quad (10)$$

Величину W виразимо через розміри поперечного перерізу

$$W = \frac{I}{0.5h} = \frac{1}{0.5h} \left[\frac{t_{\omega} h^3}{12} + 2A_f (0.5h) \right] = \frac{h^3}{6\lambda_{\omega}} + A_f h , \quad (11)$$

де I – момент інерції поперечного перерізу.

З формули (11) виражаємо площу поперечного перерізу однієї полиці A_f через W і представляємо у вигляді функції від φ з урахуванням формул (7) і (9)

$$A_{f(\varphi)} = \frac{1}{h} \left(W - \frac{h^3}{6\lambda_{\omega}} \right) = \frac{3}{4} \sqrt[3]{\frac{2\varphi^2 p_2^2}{3\lambda_{\omega}}} . \quad (12)$$

Площу поперечного перерізу стінки A_{ω} також представляємо у вигляді функції від φ з урахуванням формул (7) і (9)

$$A_{\omega(\varphi)} = ht_{\omega} = \frac{h^2}{\lambda_{\omega}} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{2\varphi^2 p_2^2}{3\lambda_{\omega}}} = 2A_{f(\varphi)}. \quad (13)$$

Функція площі поперечного перерізу балки прийме вигляд

$$A_{\sigma(\varphi)} = 2A_{f(\varphi)} + A_{\omega(\varphi)} = 3 \sqrt[3]{\frac{2\varphi^2 p_2^2}{3\lambda_{\omega}}} = \varphi^{2/3} p_3, \quad (14)$$

де

$$p_3 = 3 \sqrt[3]{\frac{2p_2^2}{3\lambda_{\omega}}} = \text{const}. \quad (15)$$

З формули (3) з урахуванням формул (5) і (14) отримаємо цільову функцію вартості сталі для настилу і балок на 1м^2 перекриття

$$S(\varphi) = \rho_{\text{ст}} \left(\Pi_{\text{н}} t(\varphi) + 2\Pi_{\sigma} \frac{A_{\sigma(\varphi)}}{L\varphi} \right) = \rho_{\text{ст}} \left(\Pi_{\text{н}} p_1 \varphi L + \frac{2\Pi_{\sigma} p_3 \varphi^{-\frac{1}{3}}}{L} \right). \quad (15)$$

Перша похідна цільової функції

$$\frac{dS(\varphi)}{d\varphi} = \rho_{\text{ст}} \left(\Pi_{\text{н}} L p_1 - \frac{2}{3} \frac{\Pi_{\sigma} p_3 \varphi^{-\frac{4}{3}}}{L} \right). \quad (16)$$

Дорівнюючи її нулю знайдемо значення $\varphi = \varphi_0$, при якому цільова функція має екстремум

$$\varphi_0 = \left(\frac{2}{3} \frac{\Pi_{\sigma} p_3}{L^2 \Pi_{\text{н}} p_1} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (17)$$

Легко переконатись, що цей екстремум відповідає мінімуму функції.

Після підстановки у формулу (17) виразів для постійних параметрів p_1 і p_3 отримаємо

$$\varphi_0 = \sqrt[4]{\left(\frac{2}{3}\right)^3 \left(\frac{\Pi_{\sigma}}{\Pi_{\text{н}}}\right)^3 3^2 \frac{2}{\lambda_{\omega}} \left(\frac{q_{1\text{н}} \gamma_f}{9\sqrt{3} R_{\gamma} \gamma_c}\right)^2 \left[\frac{4n_{\text{оН}}}{15} \left(1 + \frac{72E_1}{n_{\text{оН}}^4 q_{1\text{н}}}\right)\right]^3}. \quad (18)$$

У цю формулу не входить L . Тому оптимальний кут між балками не залежить від її прольоту.

При виводі формули для φ_0 передбачалося, що поперечний переріз балки підбирався виходячи із забезпечення міцності за нормальними напруженнями. При цьому жорсткість балки при оптимальному куті між ними φ_0 може бути не забезпечена.

З'ясуємо, для яких значень кута між балками φ її жорсткість забезпечена при рівності лівої та правої частин умови міцності за нормальними напруженнями. Для цього розв'яжемо таку систему:

$$\begin{cases} \frac{q_{1H} \varphi_f L^3}{9\sqrt{3}W} = R_y \gamma_c & (19) \\ 0,00652 \frac{q_{1H} \varphi L^4}{EI} \leq \frac{1}{n_o} & (20) \\ I = W \cdot 0.5h & (21) \\ h = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \lambda_\omega W} & (22) \end{cases}$$

де $1/n_o$ граничний відносний прогин балки.

Нерівність (20) виражає собою умову жорсткості балки, а рівняння (19) впливає із умови міцності.

Виключивши з системи I ; W ; і h , отримаємо таку умову

$$\varphi \geq \left(0,00652 \cdot 18\sqrt{3} \frac{R_y \gamma_c n_o}{E \gamma_f} \right)^3 \frac{6\sqrt{3} R_y \gamma_c}{q_{1H} \gamma_f \lambda_\omega} = \varphi_{\text{жорстк}}, \quad (23)$$

де $\varphi_{\text{жорстк}}$ мінімальний кут між балками із умови жорсткості.

Із виразу (23) випливає, що для забезпечення жорсткості балок, кут між ними повинен бути не менше величини $\varphi_{\text{жорстк}}$.

З'ясуємо, у якому випадку при знайденому φ_0 забезпечена жорсткість балок. Для цього треба підставити $\varphi = \varphi_0$ із формули (18) в умову (23). Після перетворень отримаємо:

$$\lambda_\omega \geq \left(0,00652 \cdot 18\sqrt{3} \frac{R_y \gamma_c n_o}{E \gamma_f} \right)^4 \left(\frac{6\sqrt{3} R_y \gamma_c}{q_{1H} \gamma_f} \right)^2 \frac{3}{4} \frac{\Pi_H}{\Pi_B} \frac{1}{\frac{4n_{OH}}{15} \left(1 + \frac{72E_1}{n_{OH}^4 q_{1H}} \right)} = \lambda_{\omega, \min}. \quad (24)$$

Права частина цієї умови ($\lambda_{\omega, \min}$) пропорційна R_y у шостому ступені, тобто дуже швидко зростає при збільшенні R_y . Тому, щоб забезпечити жорсткість балок при $\varphi = \varphi_0$, R_y повинно бути достатньо малим.

З метою з'ясування практичної застосовності отриманих результатів, задача була розв'язана при таких даних:

$$R_y = 18 \text{ кН/см}^2; q_{1H} = 30 \text{ кПа}; L = 12 \text{ м}; \lambda_\omega = 48; n_{OH} = 150; n_o = 250; \gamma_f = 1,2.$$

Після виконання розрахунків за наведеними вище формулами були отримані такі результати:

$$\varphi_0=0,0568\text{рад}; t=0,796\text{см}; h=44,44\text{см}; \varphi_{\text{жорстк}}=0,0548\text{рад}; \lambda_{\omega,\text{min}}=45,78 < \lambda_{\omega}=48.$$

Значення φ_0 виявилось трохи більше, ніж $\varphi_{\text{жорстк}}$, тобто жорсткість балок при φ_0 забезпечена. З формули (23) випливає, що $\varphi_{\text{жорстк}}$ пропорційне R_y^4 тобто дуже швидко зростає при збільшенні цього параметру. З іншого боку, аналізуючи формулу (18) можна зробити висновок, що при збільшенні R_y , φ_0 – зменшується. Тому, при $R_y > 18 \text{кН/см}^2$ $\varphi_0 < \varphi_{\text{жорстк}}$, тобто жорсткість забезпечена не буде. Це підтверджує раніше зроблений висновок про те, що треба застосовувати сталь низької міцності.

Товщина настилу $t=0,796\text{см} \approx 0,8\text{см}$ відповідає значенню, яке рекомендується для застосування.

Висновки. У результаті проведених досліджень було встановлено, що:

- існує принципова можливість підібрати кут між балками, який відповідає мінімальній вартості перекриття;
- цей кут має відносно мале значення, тому його рекомендується приймати мінімальним виходячи з міркувань конструювання покриття;
- задача має практичний сенс при відносно низькій міцності сталі;
- оптимальний кут між балками не залежить від її прольоту.

Література

1. Металеві конструкції: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В. та ін.. – К.: Вид-во «Сталь», 2010. – 869 с.
2. Зорин З.Я. Стальные конструкции. Проектирование на стадии КМД / З.Я. Зорин, А.А. Новицкий. – Киев: Сталь, 2015 – 268 с.
3. Гоголь М.В. Регулювання зусиль у металевих конструкціях / М.В. Гоголь, М.Р. Більський, С.І. Віхоть, М.М. Гоголь // Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – Львів, 2012. - №737. – С.64-70.
4. Максимов Ю.С. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой / Ю.С. Максимов, Г.М. Остриков, В.В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. - №1. – С. 68-70.
5. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов / Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Г.С. Ведеников и др.; Под. общ. ред. Е.И. Беленя. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с., ил.
6. Металлические конструкции. Н.С. Стрелецкий, А.Н. Гениев, Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Е.Н. Лессиг; Под. общ. ред. Н.С. Стрелецкого. 3-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1961. – 776 с., ил.
7. Муханов К.К. Металлические конструкции. Учебник для вузов. Изд. 3-е, испр. и доп. М., Стройиздат, 1978. 572 с.
8. Янін О.Є., Новікова С.М. Підбір раціонального кроку балок настилу для балочної клітки спрощеного типу. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. Збірник наукових праць*. Вип. 23. – Одеса, Україна: 2019. – С. 96-103.
9. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування». – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2014. – 199с.

References

- [1] Nilov O.O., Permyakov V.O., Shymanovskyy O.V, “Metalevi konstruktsiyi: pidruch. [dlya stud. vyshch. navch. zakl.]”, Kyev, Stal, 2010.
- [2] Z.YA. Zoryn, A.A. Novytskyy, “Stalnye konstruktsyy. Proektyrovanye na stadyy KMD”, Kyev, Stal, 2015.

- [3] M.V. Hohol, M.R. Bilskyu, S.I. Vikhot, M.M. Hohol, “Rehulyuvannya zusyl u metalevykh konstruktsiyakh”, Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnikha» «Teoriya i praktyka budivnytstva» vol. 737, Lviv, 2012.
- [4] YU.S. Maksymov, H.M. Ostrykov, V.V. Dolynskyy “Yssledovanye nesushchey sposobnosti stalnykh dvutavrovyykh balok s vertykalno hofryrovannoy stenкой”, Stroytel'naya mekhanyka y raschet sooruzhenyy, pp. 68-70, vol. 1, 1983.
- [5] E.Y. Belenya, V.A. Baldyn, H.S. Vedenkov, “Metallycheskiye konstruktsyy. Obshchyy kurs: Uchebnyk dlya vuzov”, M.: Stroyizdat, 1986.
- [6] N.S. Streletskyy, A.N. Henyev, E.Y. Belenya, V.A. Baldyn, E.N. Lessyh,” Metallycheskiye konstruktsyy”, M.: Stroyizdat, 1961.
- [7] K.K. Mukhanov, “Metallycheskiye konstruktsyy”, M., Stroyizdat, 1978.
- [8] Yanin O.YE., Novikova S.M. Pidbir ratsionalnoho kroku balok nastylu dlya balochnoyi klitky sproshchenoho typu. Suchasni budivelni konstruktsiyi z metalu ta derevyny. Zbirnyk naukovykh prats. Vyp. 23. – Odesa, Ukrayina: 2019. – S. 96-103.
- [9] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya». – Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrayiny, 2014.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКРЫТИЯ КРУГЛОГО В ПЛАНЕ ЗДАНИЯ С РАДИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ БАЛОК

Янин А.Е., - к.т.н., доцент,

Херсонский Государственный Аграрный Университет г. Херсон
yanin_a@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0230-8669

Новикова С.Н., - старший преподаватель,

Херсонский Государственный Аграрный Университет г. Херсон
novikova_svetla@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0012-521X

Аннотация. В статье приведены результаты оптимизации угла между радиальными балками в перекрытии круглого в плане здания. С одной стороны они опираются на центральную стойку, а с другой на вертикальные несущие конструкции вдоль круга. На балки укладывается стальной настил.

Угол между балками определяется так, чтобы масса балки и настила была минимальной. Такой угол считается оптимальным. Для решения задачи используется целевая функция стоимости настила и радиальных балок на единицу площади перекрытия. Эта функция зависит от угла между балками. С помощью математических методов дифференцирования был найден минимум целевой функции и соответствующее значение оптимального угла. Толщина настила определялась исходя из обеспечения его жесткости. Принято, что составные сварные радиальные балки имеют двутавровое поперечное сечение с двумя осями симметрии. Высота балки соответствует равенству площадей полок и стенки.

Задача определения оптимального угла между балками решалась исходя из обеспечения прочности балок по нормальным напряжениям. В расчетной схеме балки принята треугольная распределенная нагрузка. Размеры поперечного сечения балки определялись исходя из равенства требуемого и фактического моментов сопротивления, и входили в целевую функцию стоимости.

В исследовании учтено, что прогиб балки при оптимальном угле между ними, может превысить предельное нормативное значение. На основании решения системы уравнений прочности и жесткости, получена формула для минимального угла между балками из условия жесткости.

Проведенные математические исследования показали, что при оптимальном угле между балками, можно обеспечить ее жесткость. Это возможно, когда гибкость стенки балки превышает определенное минимальное значение. Анализ формулы для минимального значения гибкости стенки показал, что она пропорциональна расчетному сопротивлению

стали в шестой степени. Поэтому, чтобы прогиб балки не превышал предельное значение при оптимальном угле, нужно использовать сталь низкой прочности.

Для подтверждения практической целесообразности использования предложенного метода, задача была решена при определенных числовых данных. Полученные результаты подтвердили, что задача имеет практический смысл при относительно низкой прочности стали. Кроме этого, оказалось, что оптимальный угол между балками не зависит от ее пролета.

Ключевые слова: радиальные балки, стальной настил, угол между балками, оптимизация, прочность, жесткость, радиус здания.

MATHEMATICAL MODELING OF THE COVERING OPTIMIZATION OF THE ROUND BUILDINGS IN A PLAN WITH A RADIAL BEAM POSITION

Yanin A.E., - PhD, Assistant Professor,

Kherson State Agrarian University, Kherson

yanin_a@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0230-8669

Novikova S.N., - Senior Lecturer,

Kherson State Agrarian University, Kherson

novikova_svetla@ukr.net, ORCID ID 0000-0003-0012-521X

Abstract. The article presents the results of optimization of the angle between radial beams in the floor of a circular building in the plan. On the one hand, they rest on the central post, and on the other, on vertical supporting structures along the circle. Steel decking is laid on the beams.

The angle between the beams is determined so that the mass of the beam and the deck is minimal. This angle is considered optimal. To solve the problem, the target function of the cost of flooring and radial beams per unit floor area is used. This function depends on the angle between the beams. Using mathematical methods of differentiation, the minimum of the objective function and the corresponding value of the optimal angle were found. The thickness of the flooring was determined on the basis of ensuring its rigidity. It is assumed that composite welded radial beams have I-beams with two axes of symmetry. The height of the beam corresponds to the equality of the areas of the shelves and the wall.

The problem of determining the optimal angle between the beams was solved on the basis of ensuring the strength of the beams under normal stresses. In the design diagram of the beam, a triangular distributed load is adopted. The dimensions of the cross-section of the beam were determined based on the equality of the required and actual moments of resistance, and were included in the target cost function.

The study took into account that the deflection of the beam at the optimal angle between them can exceed the limiting standard value. Based on the solution of the system of equations of strength and stiffness, a formula is obtained for the minimum angle between the beams from the stiffness condition.

The carried out mathematical studies have shown that at the optimal angle between the beams, it is possible to ensure its rigidity. This is possible when the flexibility of the beam wall exceeds a certain minimum value. Analysis of the formula for the minimum value of the wall flexibility showed that it is proportional to the design steel resistance to the sixth power. Therefore, to ensure that the deflection of the beam does not exceed the limiting value at the optimum angle, it is necessary to use low strength steel.

To confirm the practical feasibility of using the proposed method, the problem was solved with certain numerical data. The results obtained have confirmed that the problem has a practical meaning at a relatively low steel strength. In addition, it turned out that the optimal angle between the beams does not depend on its span.

Key words: radial beams, steel decking, angle between beams, optimization, strength, stiffness, building radius.