

Дубик О.М.

**РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ ЗАХИСНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ОБОЙМ БЕЗНАПІРНИХ ТРУБ ДОЩОВИХ МЕРЕЖ ВІД ДІЇ
ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ І ТИСКУ ТЯГАЧА НК-80**

Анотація. Виконано розрахунок на міцність захисних залізобетонних обойм безнапірних труб дощових мереж віадуків термінального комплексу «Д» Міжнародного аеропорту «Бориспіль». Запропоновано алгоритм інженерного розрахунку вільно розміщеної балки-обойми на пружній основі за методом початкових параметрів з використанням гіперболо-тригонометричних функцій. Для визначення вимогливої точності та достовірності результатів розрахунків для різних граничних умов застосований найбільш ефективний чисельний метод скінченних елементів. Для цього за результатами інженерного розрахунку визначаються параметри еквівалентного перерізу балки-обойми скінченної довжини і виконуються розрахунки за МСЕ із різними схемами навантаження за алгоритмами, що виконані в [1]. За отриманими результатами розрахунків сформульовані пропозиції для проектування залізобетонних обойм прямокутного перерізу для безнапірних труб з дощової каналізації різних діаметрів.

Ключові слова: Міцність захисних залізобетонних обойм, дорожнє покриття, безнапірні труби, дощова мережа, віадук.

Аннотация. Выполнен расчет на прочность защитных железобетонных обойм безнапорных труб дождевых сетей виадук терминала «Д» Международного аэропорта «Борисполь». Предложен алгоритм инженерного расчета свободно размещенной балки-обоймы на упругом основании методом начальных параметров с использованием гиперболо-тригонометрических

функций. Для определения требовательной точности и достоверности результатов расчетов для различных граничных условий применен наиболее эффективный численный метод конечных элементов. Для этого по результатам инженерного расчета определяются параметры эквивалентного сечения балки-обоймы конечной длины и выполняются расчеты по МСЭ с различными схемами нагрузки по алгоритмам, выполненным в [1]. По полученным результатам расчетов сформулированы предложения для проектирования железобетонных обоек прямоугольного сечения для безнапорных труб с дождевой канализации различных диаметров.

Ключевые слова: Прочность защитных железобетонных обоек, дорожное покрытие, безнапорные трубы, дождевая сеть, виадук.

Annotation. The calculation of the strength of the protective concrete clips pressurized pipe networks rain viaduct terminal "D" International airport "Borispol". The algorithm engineering calculation freely placed beams-clips on elastic foundation by the method of initial parameters using hyperbole-trigonometric functions. To determine the demanding accuracy and reliability of simulation results for different boundary conditions applied most efficient numerical method of finite elements. To do this, the results of engineering calculations determined parameters of the equivalent section beams-clips finite length and performed calculations with different schemes ITU load on algorithms that are taken in [1]. According to the results of calculations set out proposals for the design of reinforced concrete rectangular clips for free-flow of rain water pipes of different diameters.

Keywords: strength concrete protective clips, road surface, non-pressure pipes, rainwater network viaduct.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для відводу води з приймальних лотків віадуків термінального комплексу «Д» Міжнародного аеропорту «Бориспіль» до загальної мережі дощової каналізації запроектовані труби типу PVC-USN 8 з матеріалу ПХВ [2] вторинного виробництва, які

мають кільцеву жорсткість $SN=8 \text{ кН/м}^2$ ($0,8 \text{ тс/м}^2=0,08 \text{ кгс/см}^2$). Значення кільцевої жорсткості відповідає граничному значенню питомого статичного навантаження ґрунту та дії транспортних засобів на поверхню труби, при якому деформація має пружний характер, а труба задовольняє вимогам своїх функціональних властивостей [3]. Виходячи з [2] сумарний тиск від дорожнього покриття і дії колісного навантаження тягача літаків НК-80 набагато перевищує кільцеву жорсткість труби «SN-8»:

$$D_A + D_D = 5,183 \frac{\delta \bar{n}}{i^2} \gg 0,8 \frac{\delta \bar{n}}{i^2}, \quad (1)$$

де P_D – тиск від конструкції дорожнього покриття; P_T – тиск на верх труби від дії колісного навантаження тягача НК-80.

Тому при використанні зазначеного типу труб на ділянках під дорогою треба застосувати захисну залізобетонну обойму, яка буде сприймати відповідне навантаження. Балка-обойма є скінченної довжини на пружній основі, схема навантаження і граничні умови якої представлені на рис.1. Тиск і погонне навантаження на поверхню балки-обойми визначено для покриття дороги першої категорії, що має наступний переріз:

- асфальтобетон дрібнозернистий, фракція 0-10 мм, товщина шару – 0,05 м; питома вага – $2,2 \text{ тс/м}^3$.

- асфальтобетон дрібнозернистий, фракція 0-25 мм, товщина шару – 0,06 м; питома вага – $2,2 \text{ тс/м}^3$.

- асфальтобетон крупнозернистий, фракція 0-40 мм, товщина шару – 0,10 м; питома вага – $2,2 \text{ тс/м}^3$.

- піщаний цементобетон, товщина шару - 0,15 м; питома вага – $2,0 \text{ тс/м}^3$.

- щебінь оброблений бітумом, товщина шару – 0,25 м; питома вага – $1,65 \text{ тс/м}^3$.

- гранітний відсів з додаванням цементу, товщина шару – 0,30 м; питома вага – $1,95 \text{ тс/м}^3$.

- щебінь фракцією 20-40 мм, вдавнений в ґрунт, товщина шару – 0,40-0,50 м; питома вага – $2,26 \text{ тс/м}^3$.

- ущільнений ґрунт, товщина шару – 0,05 м; питома вага – $1,7 \text{ тс/м}^3$.

Загальна товщина конструкції покриття становить 1,41 м.

Тиск від дорожнього покриття на поверхню балки-обойми, з урахуванням питомої ваги матеріалу кожного шару конструкції дорожнього покриття і коефіцієнту запасу міцності $K_{\bar{A}} = 1,1$ визначається за формулою (2):

$$P_{\bar{A}} = K_{\bar{A}} \cdot \sum_{i=1}^{n=8} \gamma_i \cdot h_i = 0,3054 \frac{\text{êãñ}}{\tilde{\text{ñ}}^2}, \quad (2)$$

де $K_{\bar{A}} = 1,1$ - коефіцієнт запасу міцності конструкції дорожнього одягу при її розрахунку за I-ю групою граничних станів; γ_i - питома вага шару ³конструкції дорожнього одягу; h_i - товщина шару ³ дорожнього одягу.

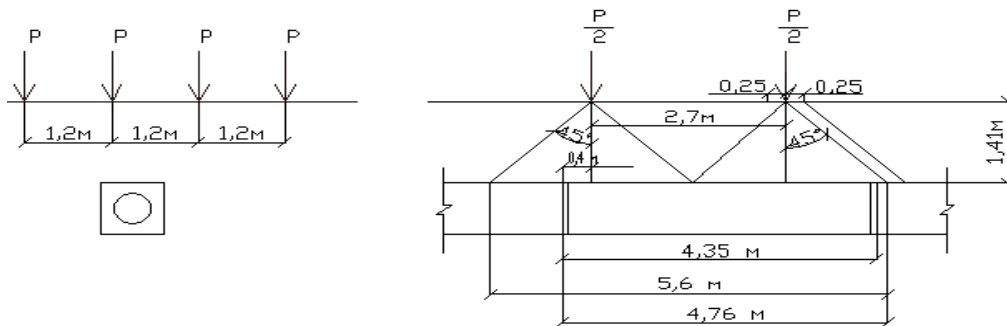


Рисунок 1 – Схема навантаження від колісної дії тягача НК-80 на залізобетонну балку-обойму

Тиск від колісної дії тягача літаків НК-80 дорівнює обчислюється за формулою (3):

$$P_{f\bar{E}-80} = \frac{D}{F_{f\bar{E}-80}} = 0,350 \frac{\text{êãñ}}{\tilde{\text{ñ}}^2}, \quad (3)$$

де $F_{f\bar{E}-80} = 4,76 \cdot 1,2 = 5,71 \tilde{\text{ñ}}^2$ - площа розподілу навантаження від сил $\frac{D}{2} + \frac{D}{2}$ (див. рис. 1); для тягача НК-80 $P = 20,0 \delta \tilde{\text{ñ}}$ [3].

Сумарне напруження на рівні верху балки-обойми дорівнює $P_s = 0,3054 + 0,3503 = 0,656 \frac{\text{êãñ}}{\tilde{\text{ñ}}^2}$. Зі схеми навантаження (див. рис 1) видно, що тиск від колісної дії тягача НК-80 на глибині 1,41 м, на поверхні балки-обойми буде рівномірно розподіленим. Сумарне рівномірно розподілене навантаження на 1м'балки-обойми складає:

$$q = P_s \cdot b_a = 4920 \frac{\hat{e} \tilde{a} \tilde{n}}{\hat{i}}, \quad (4)$$

де P_s - сумарне напруження на рівні верху балки-обойми; $b_a = 0,75\hat{i}$ - ширина дійсного перерізу балки-обойми (див. рис. 3, а).

Розрахункова схема балки-обойми зводиться до скінченно-мірної шарнірно-опертої балки на пружній основі, довжиною 4,35 м (рис. 2).

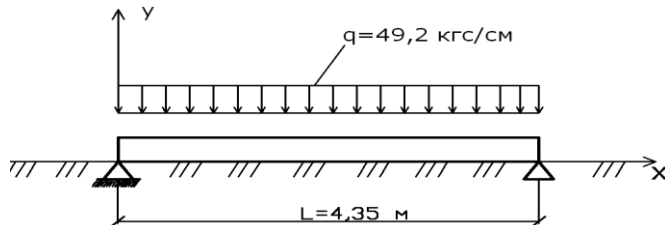


Рисунок 2 – Розрахункова схема балки-обойми

Для заданої балки рівняння пружної лінії за методом початкових параметрів має наступний вигляд [4]:

$$\delta(\delta) = \delta_0 \hat{A}_\delta + \frac{1}{\beta} \theta_0 \hat{A}_\delta + \frac{4\beta^2}{\hat{E}} \hat{i}_0 \tilde{N}_\delta + \frac{4\beta}{\hat{E}} Q_0 D_x + f(x), \quad (5)$$

де $\delta_0, \theta_0, \hat{i}_0, Q_0$ - початкові параметри; $\hat{A}_\delta = \tilde{n} h \beta x \cdot \cos \beta x$;

$$\hat{A}_\delta = \frac{1}{2} (\tilde{n} h \beta x \cdot \sin \beta x + sh \beta x \cdot \cos \beta x); \quad \tilde{N}_\delta = \frac{1}{2} sh \beta x \cdot \sin \beta x;$$

$$D_\delta = \frac{1}{4} (ch \beta x \cdot \sin \beta x - sh \beta x \cos \beta x),$$

де $\hat{A}_\delta, \hat{A}_\delta, \tilde{N}_\delta, D_\delta$ - гіперболо-тригонометричні функції; $f(x)$ - вплив заданих навантажень, що діють на балку.

За еквівалентною згинальною і поздовжньою жорсткостями балки-обойми визначено її еквівалентний переріз $h_e \times b_e$ (рис.3, б).

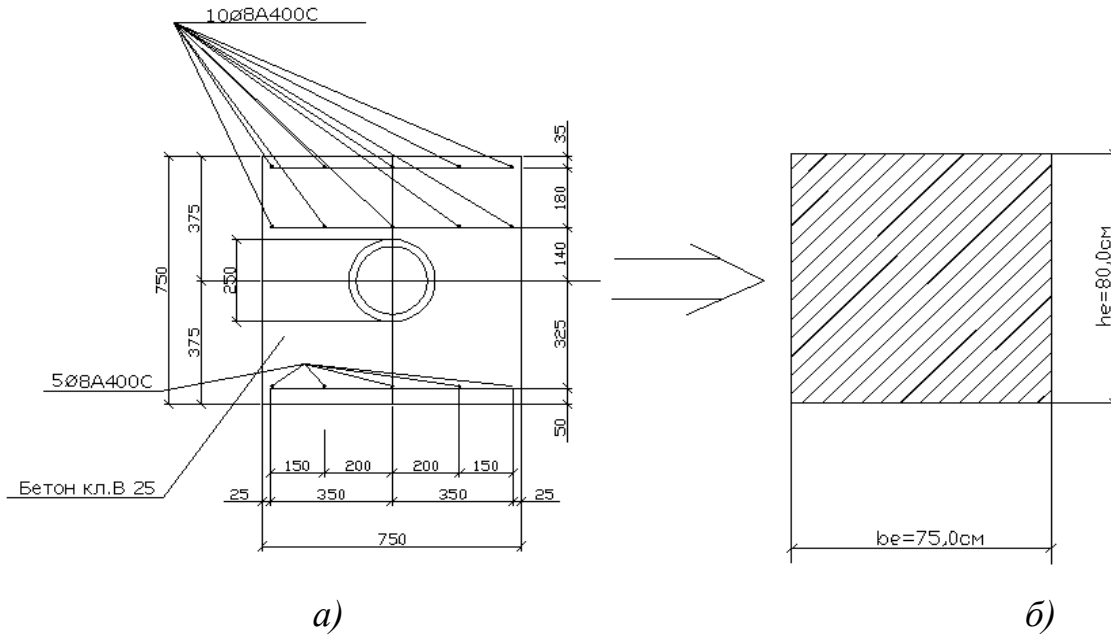


Рисунок 3 – Дійсний та еквівалентний перерізи балки-обойми

Згинальна жорсткість дійсного перерізу визначається за формулою

(6):

$$\mathring{A}_{\dot{a}}^2 = \mathring{A}^{\dot{a}2\dot{a}} = \mathring{A}_a^2 + \mathring{A}_{\dot{n}\dot{o}}^2, \quad (6)$$

де $\mathring{A}_{\dot{a}}^2$ - еквівалентна згинальна жорсткість перерізу балки-обойми;

$\mathring{A}_a = 3,1 \cdot 10^5 \frac{\text{êãñ}}{\text{ñì}^2}$, $\mathring{A}_{\dot{n}\dot{o}} = 2,1 \cdot 10^6 \frac{\text{êãñ}}{\text{ñì}^2}$ - модулі пружності бетону і сталі відповідно;

2_a , $^2_{\dot{n}\dot{o}}$ - моменти інерції бетонного і сталюого елемента в перерізі балки-

обойми відповідно. Дійсний переріз балки-обойми складається з бетонного

елементу і трьох рядів арматурної сталі: два ряди сталюї арматури

розташовані у верхній зоні перерізу, а один ряд – у нижній (див. рис. 3, а). Тому

формула для обчислення моменту інерції сталюого елемента запишеться у

вигляді: $^2_{\dot{n}\dot{o}} = ^2_{\dot{o}}^1 + ^2_{\dot{o}}^2 + ^2_{\dot{o}}^3$.

Площа одного елемента арматурної сталі класу А400С становить:

$F_a = 0,503\text{ñì}^2$. Далі замінюємо арматуру в перерізі трьома еквівалентними

прямокутниками (ця операція виконується з метою полегшення обчислення

моментів інерції арматурної сталі), висота яких обчислюється за наближеною формулою: $\delta = \frac{5F_a}{b - 2 \cdot 2,5} = 2,52\tilde{n}\tilde{i}$.

Далі обчислюються моменти інерції кожного із трьох еквівалентних прямокутників за формулою: $I_{\tilde{n}\tilde{o}}^3 = \frac{\delta^3}{12} \cdot (b - 2 \cdot 2,5) + 5 \cdot F_a \cdot \tilde{\alpha}^2$.

де i – номер прямокутника; δ - висота еквівалентного прямокутника; b - ширина дійсного перерізу балки-обойми; F_a - площа одного елементу арматурної сталі; $\tilde{\alpha}$ - відстань від центру тяжіння прямокутника i до центру тяжіння всього дійсного перерізу балки-обойми.

За формулою (7) визначається момент інерції бетонного елемента в перерізі балки-обойми:

$$I_a^2 = \frac{h \cdot b^3}{12} - \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 2,6176\tilde{n}\tilde{i}^4, \quad (7)$$

де h, b - висота і ширина дійсного перерізу балки-обойми; $d = 250\tilde{i}$ - діаметр труби, під яку ставиться залізобетонна обойма.

Згинальні жорсткості бетонного елемента і арматурної сталі відповідно становлять:

$$A_a^2 = 8,11 \cdot 10^{11} \hat{e}\tilde{\alpha}\tilde{n} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2; A_{\tilde{n}\tilde{o}}^2 = 1,306 \cdot 10^{10} \hat{e}\tilde{\alpha}\tilde{n} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2.$$

Дійсна згинальна жорсткість:

$$A^2 = 8,241 \cdot 10^{11} \hat{e}\tilde{\alpha}\tilde{n} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2.$$

Поздовжня жорсткість дійсного перерізу обчислюється за формулою:

$$AF^a = A_a F_a + A_{\tilde{n}\tilde{o}} \cdot F_{\tilde{n}\tilde{o}} = 1,605 \cdot 10^9 \hat{e}\tilde{\alpha}\tilde{n}, \quad (8)$$

Прирівнявши дійсні та еквівалентні згинальні і поздовжні жорсткості балки-обойми отримали:

$$\begin{cases} A^2 = A_a \frac{b_a \cdot h_a^3}{12} = 8,241 \cdot 10^{11} \hat{e}\tilde{\alpha}\tilde{n} \cdot \tilde{n}\tilde{i}^2, \\ EF^a = A_a \cdot F_e = E_e \cdot b_e \cdot h_e \end{cases}, \quad (9)$$

З системи рівнянь (9) отримали вираз для обчислення висоти еквівалентного перерізу балки-обойми:

$$h_e = \sqrt{\frac{12E^{\ddot{a}}I^{\ddot{a}}}{E_e \cdot F_e}} = 78,5\tilde{n}\dot{i} \quad , \quad (10)$$

Приймаємо $h_e = 80\tilde{n}\dot{i}$.

Визначаємо еквівалентний модуль пружності:

$$\dot{A}_{\ddot{a}} = \frac{\dot{A}_{\ddot{a}} \cdot h_e}{b_e \cdot h_e} = 2,68 \cdot 10^5 \frac{\hat{e}\tilde{a}\tilde{n}}{\tilde{n}\dot{i}^2} \quad , \quad (11)$$

Визначається коефіцієнт постелі \hat{E} і параметр β :

$$K = \hat{E}_0 \cdot b_e = 340,5 \frac{\hat{e}\tilde{a}\tilde{n}}{\tilde{n}\dot{i}^2} ; \beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}} = 0,00319 \quad , \quad (12)$$

де $\hat{E}_0 = 4,54 \frac{\hat{e}\tilde{a}\tilde{n}}{\tilde{n}\dot{i}^3}$ - початковий коефіцієнт постелі пружної основи.

Використовуючи табл.5.19 в [4] запишемо початкові параметри:

$$\theta_0 = -\frac{\beta}{\hat{E}} q \frac{4D_l \cdot (C_l - C_0) + B_l \cdot (A_l - A_0)}{4 \cdot D_l^2 + B_l^2} \quad , \quad (13)$$

$$Q_0 = \frac{q}{\beta} \frac{B_l \cdot (C_l - C_0) - D_l \cdot (A_l - A_0)}{4 \cdot D_l^2 + B_l^2} \quad , \quad (14)$$

де $A_0, A_l, B_l, C_0, C_l, D_l$ - значення гіперболо-тригонометричних функцій при $x=0$ та $x=l=435$ см (див. пояснення до формули (5)).

Остаточну рівняння пружної лінії (5) для заданої балки-обойми запишеться у вигляді:

$$\acute{o}(\delta) = 0,1445 \cdot \dot{A}_{\delta} - 0,0557 \cdot \hat{A}_{\delta} + 0,3596 \cdot D_x - 0,1445 \quad , \quad (15)$$

Для отримання рівняння згинального моменту двічі про диференціюємо (15), використовуючи таблиці 5.20 в [4] і домножимо результат на $E^{\ddot{a}}2^{\ddot{a}}$:

$$\dot{I}_{\delta} = \dot{A}^{\ddot{a}}2^{\ddot{a}} \cdot \acute{o}''(\delta) = 8,241 \cdot 10^{11} \cdot \acute{o}''(\delta) \quad , \quad (16)$$

При диференціюванні $\acute{o}(\delta)$ (15) другі похідні функцій \hat{A}_{δ}, D_x беруться із таблиці 5.20 [4], а $f''(\delta)$ - із таблиці 5.21 [4].

Остаточну рівняння згинальних моментів запишеться у вигляді:

$$\dot{I}_{\delta} = 3,3544 \cdot 10^7 (0,05577D_x + 0,0899B_x - 0,1445 \cdot C_x) \quad , \quad (17)$$

Рівняння для поперечних зусиль дістанемо після диференціювання (17):

$$Q_{\sigma} = 1,07 \cdot 10^5 (0,05577C_x + 0,0899A_x - 0,1445 \cdot B_x), \quad (18)$$

Після обчислення значень гіперболо-тригонометричних функцій $\hat{A}_{\sigma}, \hat{A}'_{\sigma}, \hat{N}_{\sigma}, D_{\sigma}$ для точок при $x=0, x=0,25l, x=0,5l, x=0,75l$ та $l=435$ см і підстановці цих значень у (17) і (18) будуються епюри згинальних моментів та поперечних зусиль по всій довжині балки-обойми за методом початкових параметрів (рис.4 і рис.5).

Для уточнення розрахунку на міцність захисних залізобетонних обойм дощових мереж при дії власної ваги дорожнього покриття і колісного тиску тягача НК-80 застосовується найбільш ефективний чисельний метод скінченних елементів (МСЕ). Цей метод дозволяє природним чином враховувати граничні умови, зовнішні статичні і динамічні дії на дану конструкцію. МСЕ відноситься до варіаційних методів і є одним з найбільш використовуваних способів побудови наближених рішень задач математичної фізики.

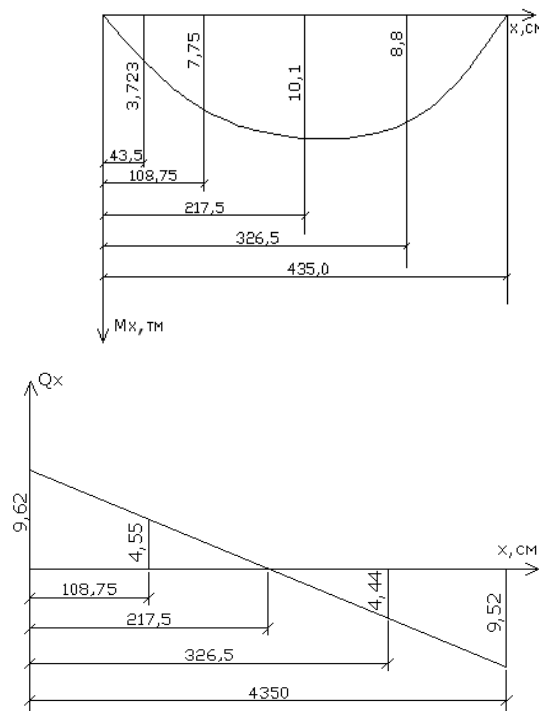


Рисунок 4 - Епюра згинальних моментів за

Рисунок 5 – Епюра поперечних зусиль за методом початкових параметрів

Дискретна модель і розрахункова схема балки-обойми при розрахунку МСЕ наведена на рис.6. Початок сіткових координат S_1, S_2, S_3 і глобальних координат OZ^1, OZ^2, OZ^3 розрахункового фрагменту взято на пересіченні осі

симетрії (зліва) і нижньої кромки моделі. Розміри сіткової області наступні: $M1 \times M2 \times M3$, точніше $2 \times 8 \times 33 = 528$, що відповідає системі рівнянь рівноваги $k = 3 \times 528 = 1584$.

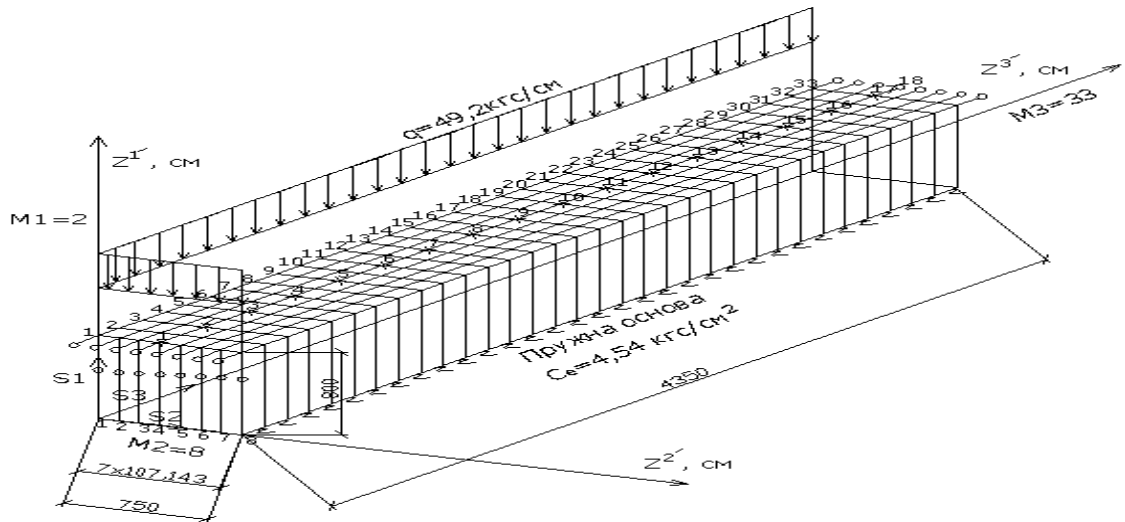


Рисунок 6 – Розрахункова схема і дискретна модель балки-обойми при розрахунку МСЕ

Відповідно до отриманих результатів чисельного розрахунку представлені епюри переміщень, погонних згинальних моментів і реакцій основи в характерних точках балки-обойми.

Різниці між отриманими значеннями згинальних моментів та поперечних зусиль за методом початкових параметрів та МСЕ склали відповідно 1,35% та 5%.

Далі пропонується алгоритм розрахунку перерізів залізобетонної конструкції балки скінченної довжини на пружній основі. Розглядається еквівалентний переріз балки із звичайним армуванням згідно розрахункової схеми для прямокутного перерізу, наведеного на рис. 3, б. Визначаємо площу робочої арматури в еквівалентному елементі прямокутного перерізу. Алгоритм визначення площі робочої арматури прийнятий відповідно до [5]. Для бетону класу В25 згідно з [6]: .

Визначається параметр \dot{A}_0 :

$$\dot{A}_0 = \frac{\dot{I}_{\max}}{b_e h_0^2 R_a} = 0,0145, \quad (19)$$

де $\dot{I}_{\max} = 10,1 \delta \cdot \dot{i}$ - максимальне значення згинального моменту, яке було отримане при розрахунку балки-обойми за методом початкових параметрів (див. рис. 4); $R_a = 189 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ - розрахунковий опір арматури класу А400С [6]; $h_0 = h_e - 2 \cdot 5 = 70 \text{ см}$ - робоча висота еквівалентного перерізу балки.

$b_e = 75 \text{ см}$ - ширина еквівалентного перерізу балки-обойми.

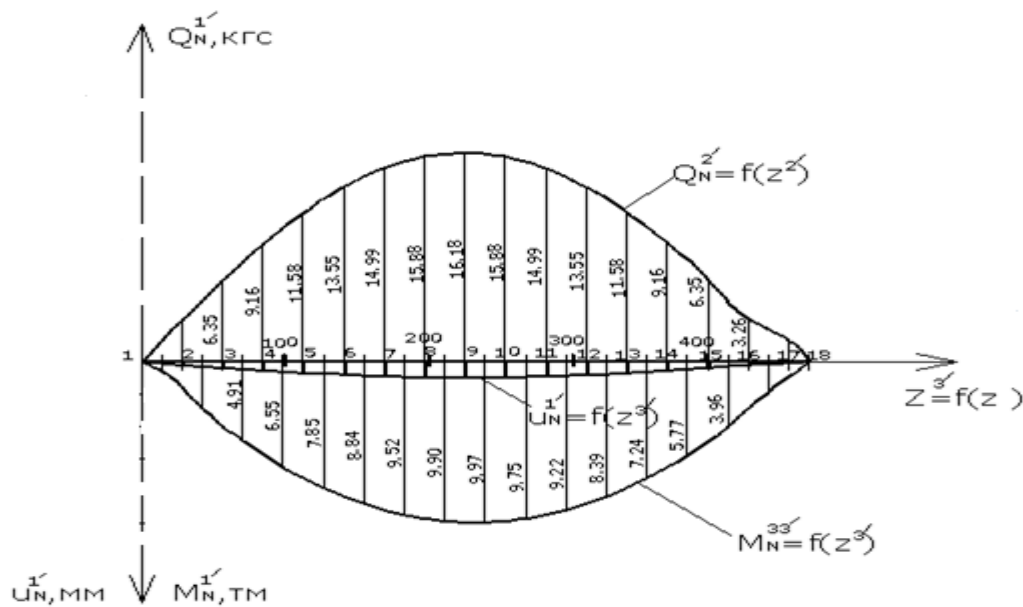


Рисунок 7 – Епюри згинальних моментів, реакцій основи та переміщень для балки-обойми на пружній основі за МСЕ

Оскільки $\dot{A}_0 < \dot{A}_{0\max} = 0,4$, то переходимо до п.14 табл. 4.9. в [5]: $\dot{A}_0 = 0,0145 \rightarrow \gamma = 0,971$. Площа робочої арматури визначається за формулою (20):

$$F_a = \frac{\dot{I}_{\max}}{R_a \gamma h_0} = 4,37 \text{ см}^2, \quad (20)$$

Приймаємо 10 \varnothing 8А400С – $F_a = 5,03 \text{ см}^2$. Робоча арматура за розрахунком повинна розміщуватися у нижній зоні, а у верхній – конструктивно.

ВИСНОВКИ

В даній роботі була розроблена методика уточненого розрахунку балки-обойми скінченної довжини на пружній основі. В процесі дослідження розроблені практичні рекомендації щодо визначення оптимального армування залізобетонної обойми. Викладена порівняльна характеристика двох вищенаведених методів розрахунку і виявлено, що метод початкових параметрів висуває більш жорсткіші вимоги щодо армування залізобетонної обойми, ніж МСЕ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цыхановский В.К., Козловец С.М., Коряк А.С. Расчёт тонких плит на упругом основании методом конечных элементов. – К.: Издательство «Сталь», 2008 – 234 с.
2. Звіт 15 – 09/01 – ЗК2 – РК3 «Розрахунок міцності перепусків від дощоприймачів до мережі ЗК2 (труби PVC – U SN8)/ТОВ «Київавіапроект» (ДПМА «Бориспіль», Термінальний комплекс «D». – Київ: ТОВ «Київавіапроект», 2009. – 17с.
3. ДСТУ БВ. 2.5 – 32: 2007 «Мости та труби. Правила проектування».
4. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Издательство «Будівельник», 1970. – 308 с.
5. Улицкий И.Н. и др. Железобетонные конструкции (расчет и конструирование). – К.: Издательство «Будівельник», 1972. – 992 с.
6. СНИП 2.03.01 – 84* Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР