

ДЕЯКІ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТРУБОБЕТОННИХ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ

*Ляхоцький В.О. ДМ-41-18., Комісаренко І.М. ДМ-26т1-18
Науковий керівник: к.т.н., доцент Синьковська О.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Відмітимо, що перші передумови про роботу сталеві труби, заповненої бетоном, які однак суперечать один одному запропоновані ще на підставі проведених дослідів, О.О. Гвоздєвим і В.А. Росновським [1,2].

В результаті початкових теоретичних і експериментальних досліджень роботи стиснутих в центрі трубобетонних конструктивів різними авторами були запропоновані відмінні один від одного формули для визначення руйнівного навантаження (рис 1.).

В.А. Катаєв [3] вважає, що матеріал зовнішньої металеві оболонки знаходиться в плоскому напруженому стані, а найбільше зусилля обтиску бетону при збереженні його цілісності можуть виникнути, коли деформації труби ще не досягли межі текучості, а поперечні деформації бетонного ядра максимальні. При цьому особливості роботи трубобетону залежать від співвідношення міцності матеріалів бетонного ядра і металеві оболонки, і від геометричних характеристик оболонки.

Несуча здатність при досягненні прийнятого граничного стану визначається за формулою:

$$N \leq A_s \sigma_{s,z} + A_g \sigma_{g,z}, \quad (1)$$

де $-\sigma_{s,z}$ і $\sigma_{g,z}$ – напруження в сталевій трубі і бетонному ядрі, яке визначається за формулами:

$$\text{для металеві труби } \sigma_{s,z} = \left[E_s - \frac{2\nu_s (\nu_g - \nu_s) r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2) d} \right] \epsilon_z;$$

Витоки визначення руйнівного навантаження
трубобетонних елемента при осьовому стисканні

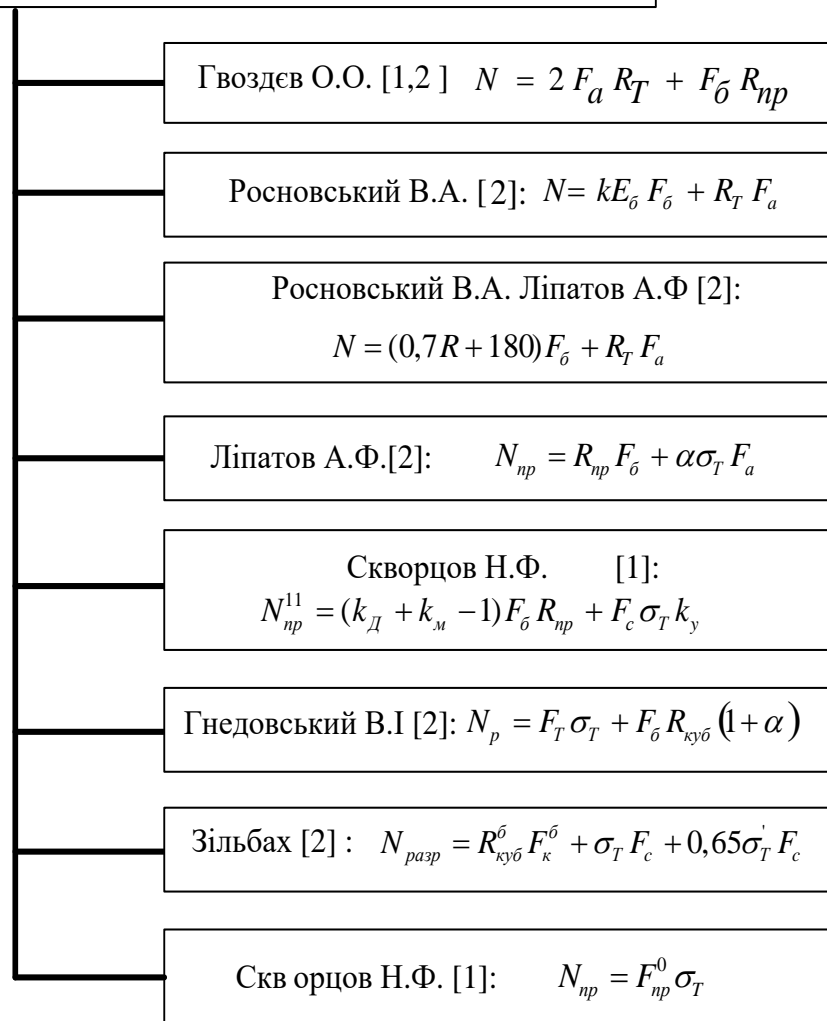


Рисунок 1 – Перші формули визначення руйнівного навантаження:

де F_a, F_c – площа перерізу труби; R_T – напруження, відповідне межі текучості метала; F_{σ} – площа перерізу бетонного ядра; R_{np} – призмova міцність бетону; k – постійний коефіцієнт, отриманий з досвіду; E_{σ} – початковий модуль деформації 1-го роду для бетону; R, R_{κ}^{σ} – кубикова міцність бетону; α – коефіцієнт в межах від 1,40 до 4,65, в залежності від бокової дії стінок труб на бетонне ядро; σ_T – межа текучості труби; k_D і k_M – масштабні коефіцієнти впливу, відповідно довжини і поперечних розмірів (в межах від 1,85 до 3,5), які визначаються за відповідними графіками; k_y – коефіцієнт досвідчений для визначення критичного напруження порожніх товстостінних труб, який

дорівнює $k_y = 0,765$ при величині діаметрів труб від 40δ до 100δ ; $\alpha = k\sigma_3/R_p^n$ – коефіцієнт по Бергу, визначений дослідницьким шляхом в формулі В.І. Гнедовського; σ_3 – напруження бетону на відрив в граничному стані; σ_T' – межа текучості металу повздож труби; F_{np}^0 – інтегральна площа перерізу елемента, приведена до матеріалу труби. Коефіцієнт k_d можна узяти за графіком. з врахуванням марки бетону.

$$\text{для бетону } \sigma_{\epsilon,z} = \left[E'_\epsilon + \frac{2\nu_\epsilon(\nu_\epsilon - \nu_s)}{d} \right] \epsilon_z;$$

$$\text{де } d = \frac{1 + \nu_s}{(r_2^2 - r_1^2)E_s} [r_1^2(1 - 2\nu_s) + r_2^2] + \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)}{E'_\epsilon}.$$

Дослідження сталобетонних колон наведені також в роботах Л.І. Стороженко [3,4]. Так, для розрахунку трубобетонних елементів при центральному стиску була запропонована формула:

$$N \leq m_{T\sigma} \varphi_{T\sigma} (\beta R_{np} F_\sigma + \alpha R_m F_m), \quad (2)$$

де $m_{T\sigma}$ – коефіцієнт умов роботи елемента; $\varphi_{T\sigma}$ – коефіцієнт, що враховує гнучкість; β і α – коефіцієнти ефективності роботи бетону і труби, які визначаються за формулами або таблицями, в залежності від класу бетону і товщини стінки труби.

У роботі Л.К. Лукші [3,4] наводиться розрахунковий апарат, в якому основним критерієм міцності при осьовому стиску трубобетонних елемента є залежність:

$$N_{se} \leq \sum_i \sigma_i A_i, \quad (3)$$

де N_{se} – поздовжня стискаюча сила в елементі від зовнішнього навантаження; $\sigma_i A_i$ – несуча здатність окремих прошарків поперечного перерізу; $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер шару елемента; A_i – площа поперечного перерізу i -го шару; σ_i – міцність матеріалу i -го шару при складному напруженому стані, що залежить від виду матеріалу і його взаємодії з матеріалами інших прошарків.

Несуча спроможність негнучкого двошарового сталобетонного елемента за умови, що бетонне ядро знаходиться в стані трьохосьового стиску, визначається автором [4] за формулою:

$$N_{sc} \geq (f_c + K\sigma_o)A_c + \sigma_{se}A_{se}, \quad (4)$$

залежність для визначення бічного тиску має вигляд:

$$\sigma_o = (f_{ye} + \alpha_c f_c) \left[1 - \beta^{\frac{\xi}{(1+\nu_s)}} \right] / \xi;$$

$$\alpha_c = E_s / E_c; \quad \beta_s = d_{se} / d_{si},$$

де A_c, A_{se} площі поперечних перерізів бетонного ядра і зовнішньої сталеві труби; $\xi = \alpha_c (K - 2\nu_c) - 1$; $\nu_s = \nu_c = 0,5$ – значення коефіцієнтів Пуассона бетону і сталі в граничному стані елемента; f_{ye}, f_c – нормативний або розрахунковий опір сталі зовнішньої труби і бетонного ядра; d_{se}, d_{si} – відповідно зовнішній і внутрішній діаметр труби.

Міцність зовнішньої сталеві труби буде:

$$\sigma_{se} = f_{ye} - \sigma_o \beta_{se} / (\beta_{se} - 1),$$

Значення коефіцієнта ефективності бічного тиску для бетону в дослідженнях інших авторів (Р. Залігер, Річаст, М. Консідер, О. О. Гвоздєв) коливалися в межах від 4 до 5.

Згідно з єврокоду 4 (частина 2) [5] для труб круглого перерізу, заповнених бетоном, підвищення міцності бетону враховується за рахунок його обмеження (укладення в обойму). За умови, що відносна гнучкість $\bar{\lambda} = \sqrt{N_{pl,Rk} / N_{cr}}$ не перевищує $0,5 < e/d < 0,1$, а коефіцієнт вкладу сталі становить

$$0,2 \leq \delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \leq 0,9,$$

де: e – ексцентриситет навантаження, d – зовнішній діаметр стійки, $N_{pl,Rk}$ – характеристичне значення пластичного опору стисненню, N_{cr} – пружна

критична нормальна сила для відповідної форми втрати стійкості; $N_{pl,Rd}$ – опір пластичної деформації при стисканні сталезалізобетонного перерізу; A_a – площа поперечного перерізу сталеві частини; f_{yd} – розрахункове значення умовної межі текучості сталі.

Пластичний опір стисненню визначається з урахуванням вищевикладеного [5] за наступним виразом:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + A_c f_{yd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \right) + A_s f_{sd}, \quad (5)$$

де t – товщина стінки сталеві труби; A_c , A_a – площа поперечного перерізу бетону і арматури; f_{cd} , f_{ck} – розрахункове і характеристичне значення циліндричної міцності бетону на стиск; η_c – коефіцієнт, що стосується обмеження для бетону; f_y , f_{sd} – нормальне і розрахункове значення умовної межі текучості конструкційної сталі.

Повне повздовжнє зусилля в короткому центрально стиснутому трубобетонному елементі А.Л Крішаном та його учнями [4] на любій стадії їх роботи пропонується визначати, як суму вкладів компонентів системи «бетонне ядро – стальна оболонка»

$$N = (R_b + k\sigma_{br})A_b + \left(\frac{A_s}{6} - A_b \right) \sigma_{br} + \sqrt{(R_s A_s)^2 - \left(3A_b^2 - \frac{1}{3}A_b A_s + \frac{A_s^2}{12} \right) \sigma_{br}^2}, \quad (6)$$

де N – повне повздовжнє зусилля в короткому центрально стиснутому трубобетонному елементі; R_b і R_s – розрахунковий опір осьовому стиску бетону і сталі; k – коефіцієнт бокового тиску (КБТ), прийнятий тут постійним і рівним 4; σ_{br} – боковий тиск по поверхні контакту труби з бетоном; A_b і A_s – площі поперечних перерізів бетонного ядра і оболонки зі сталі.

Остаточний вираз для визначення руйнуючого навантаження короткого центрально стиснутого ТБЕ має вигляд:

$$N = (R_b + k\sigma_{br})A_b + \alpha_s R_s A_s, \quad (7)$$

Таким чином, цей вираз має більш повніше враховувати особливості напруженого стану ТБЕ. Причому варто також зазначити, що в залежності від конструктивних геометричних параметрів величина коефіцієнта α_s в формулі (7) може змінюватися в достатньо широкому діапазоні, але частіше знаходиться в інтервалі від 0,1 до 0,5.

Ще один напрямок дослідження трубобетону базується на припущенні, що несуча здатність трубобетонного елемента обумовлюється міцністю ядра [4], а роль труби зводиться до створення реактивного бокового тиску. В даному випадку передбачається, що труба не чинить опір в осьовому напрямку. Розрахункова формула В.Ф. Мареніна має вигляд:

$$N_{т.б} = F_б R_{пр} \sqrt{1 + 2\beta k \frac{\sigma_{т\delta}}{R_p r} + (\beta^2 k^2 - \frac{2}{C_1^2}) (\frac{\sigma_{т\delta}}{R_p r})^2}, \quad (8)$$

де k – коефіцієнт із теорії міцності О.Я. Берга, що залежить від рівня мікротріщинутворення: $k = 1 - \frac{R_{т}}{R_{пр}}$; β – коефіцієнт впливу обойми, який залежить від марки бетону: $\beta = 0,65 + 0,002R_{пр}$; C_1 – коефіцієнт залежний від марки бетону: $C_1 = \frac{R_{пр}}{R_p}$; $R_{т}$ – напруження в одноосно стиснутому бетоні при утворенні перших тріщин; r – середній радіус сталеві оболочкі.

Потрібно також згадати цікаву по структурі формулу, запропоновану в 1930 р. Меллером :

$$N_{(м.б)} = R_{пр} F_б + \sigma_m F_m + 0,65 \sigma'_m F_m \quad (9)$$

де $\sigma_{т}$, $\sigma'_т$ – межа текучості оболонки в осьовому і тангенціальному напрямку.

У своїй роботі по розрахунку міцності центрально-стиснутих трубобетонних елементів І.В. Резван [4] запропонував формулу визначення міцності при центральному стисненні:

$$N = \left(1 + 5 \frac{\beta_p}{m} - 1,25 \left(\frac{\beta_p}{m}\right)^2\right) R_b A_b + \alpha R_c A_c, \quad (10)$$

В той же час згідно з с EN 1994-1-1 [5] без врахування наведеної гнучкості елемента:

$$N = R_b \left(1 + 4,9 \frac{t R_c}{D R_b}\right) A_b + 0,75 R_c A_c, \quad (11)$$

Також дослідження методів розрахунку трубобетонних елементів на дію осьового стискаючого навантаження ведуться закордоном.

«Уніфікований китайський» метод, запропонований китайськими вченими Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye, Yuting Li [6, 7] для розрахунку міцності і стійкості трубобетонних елементів.

У цьому методі визначаються величини несучої здатності при стисненні трубобетонних елементів за міцністю N_0 і стійкості $N_{уст}$. Причому цей підхід можна застосувати не тільки до трубобетонних елементів круглого поперечного перерізу, але і до елементів з полігональним перерізом, в тому числі і прямокутним.

Відповідно до цього методу несуча здатність по міцності при осьовому стисненні визначається з виразу:

$$N_0 = (1 + \eta)(f_y A_s + f_c A_{ck}), \quad (12)$$

де: η – коефіцієнт збільшення міцності за рахунок стиснення бетону в трубі, що залежить від кількості граней в трубі n , властивостей матеріалів, а також коефіцієнта суцільності ψ (для випадку не суцільних трубобетонних елементів).

Література:

1. Скворцов Н.Ф. Применение сталетрубобетона в мостостроении / Н.Ф.Скворцов. – М.: Научно-техническое издательство автотранспортной литературы, 1955. – 87с.
2. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 110 с.

3. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с косвенным армированием//Л.И. Стороженко. – К.: УМКО ВО, 1989. – 99с.
4. Стороженко Л.И. Трубобетон / Л.И. Стороженко, Д.А. Ермоленко, О.И. Лапенко. – Полтава: Тов. «АСМІ», 2010. – 306с.
5. Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures European Committee for Standardization – Part 1: Eurocode No.4: ENV. 1994 - 1-1: 1992. [перевод Палтава,1997] - 180р.
6. Young-Soo Chung Residual Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Piers After Moderate Earthquakes / Young -Soo Chung, Chang Kyu Park, and Christian Meyer . ACI Structural Journal/ January-February 2008 – p.p. 87-95.
7. Z. Canan Girgin. Modified Failure Criterion to Predict Ultimate Strength of Circular Columns Confined by Different Materials /ACI Structural Journal/ November-Desember 2009 – p.p. 800-809.