

## РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ В ОБИЧАЙЦІ З ДНИЩАМИ БАНДАЖУ ТРУБОПРОВОДУ НА РОЗШИРНОМУ БЕТОНІ

© Білобран Б.С., Якимечко Р.Я., 2009

Представлені результати теоретичних досліджень напружено-деформованого стану зовнішньої обичайки з днищами бандажу на розширеному бетоні. Розрахункову модель розроблено на основі теорії кругових циліндричних оболонок та кільцевих пластинок. Дослідження проведено на прикладі сталобетонного бандажу магістрального газопроводу діаметром 1220 мм.

In this article scientifically proved results of theoretical research of the stress-strain state of the expanding concrete bandage's outer shell with bottoms was carried out and the results were presented. The mathematical model for stress definition was developed using the cylindrical shells and circular plates theory. The expanding concrete bandage, mounted on 1220 mm diameter pipeline, was used as a subject of investigations.

**Постановка проблеми.** Останнім часом для відновлення несучої здатності пошкоджених різними дефектами зон лінійної частини магістральних газопроводів без заміни пошкоджених ділянок застосовують бандажі (неприварні муфти з днищами) на розширеному бетоні [1, 2].

Основними перевагами такого конструктивного рішення, що сприяють його впровадженню, є відсутність потреб зупинки транспортування продукту, зниження внутрішнього тиску та приварювання днищ до робочої труби, можливість встановлення на мокру поверхню та створення ефекту регульованого зменшення кільцевих напружень у зоні дефекту.

Для оцінки міцності робочої труби у місці встановлення бандажу та основних його конструктивних елементів важливе значення має вірогідне визначення їх напруженого стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання, пов'язані з дослідженням напружено-деформованого стану робочого трубопроводу в зоні встановлення сталобетонного бандажу з урахуванням ефекту його обтискування під час тверднення бетонної композиції, розглянуто у [3–5]. Результати досліджень розподілу напружень у зовнішній обичайці з днищами бандажу в доступній нам літературі відсутні.

**Мета та задачі досліджень.** Мета роботи – розробити розрахункову модель оцінки напружено-деформованого стану зовнішньої обичайки з днищами сталобетонного бандажу трубопроводу на розширеному бетоні та її апробація на конкретному прикладі.

**Теоретичні дослідження.** Розрахункову схему металевої частини бандажу вибираємо у вигляді спряжених між собою кругової циліндричної оболонки і кільцевої пластинки, навантажених внутрішнім тиском від розширення бетонної суміші  $p$ , як показано на рис. 1. Деформаціями пластини як мембрани нехтуємо. Оскільки цей тиск виникає на початковому етапі тверднення, коли суміш ще перебуває у незакам'янілому стані, наближено вважаємо його еквівалентним гідростатичному.

Розрахунок напружено-деформованого стану системи пластинки і оболонки зводиться до розв'язання рівнянь прогинів для пластини [6, 7]

$$w_p\{r\} = C_1 + C_2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 r^2 \ln r + \frac{pr^4}{64D_p} \quad (1)$$

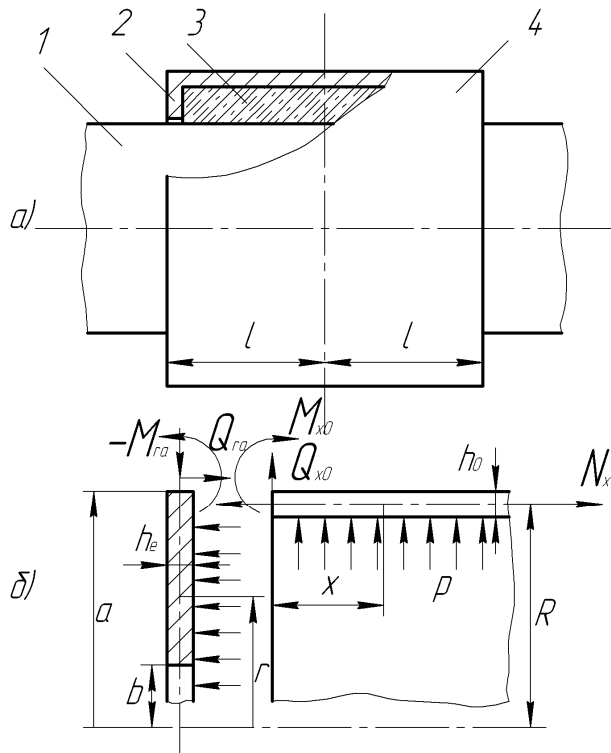


Рис. 1. Розрахункова схема  
1 – трубопровід, 2 – днище, 3 – бетонний циліндр,  
4 – зовнішня обичайка

Для визначення сталих  $C_i$ ,  $i=1...8$  скористаємось граничними умовами та умовами спряження в місці стикування пластинки і оболонки, які з урахуванням прийнятих в теоріях тонких пластинок і оболонок правил знаків [6, 7] мають вигляд

$$w_p = 0 \quad \text{за } r = a;$$

$$M_r = -D_p \left( \frac{d^2 w_p}{dr^2} + \frac{m}{r} \cdot \frac{dw_p}{dr} \right) = 0; \quad Q_r = -D_p \frac{d}{dr} \left( \frac{d^2 w_p}{dr^2} + \frac{m}{r} \cdot \frac{dw_p}{dr} \right) = 0 \quad \text{за } r = b;$$

$$\Theta_p = \frac{dw_p}{dr} = -\Theta_o = \frac{dw_o}{dx}; \quad M_r = -D_p \left( \frac{d^2 w_p}{dr^2} + \frac{m}{r} \cdot \frac{dw_p}{dr} \right) = -M_x = -D_o \frac{d^2 w_o}{dx^2} \quad \text{за } r = a, x = 0;$$

$$w_o = 0 \quad \text{при } x = 0; \quad \Theta_o = \frac{dw_o}{dx} = 0; \quad Q_x = D_o \frac{dw_o^3}{dx^3} = 0 \quad \text{за } x = l, \quad (3)$$

де  $D_o = \frac{Eh_o^3}{12(1-m^2)}$  – циліндрична жорсткість оболонки.

Після підстановки в ці умови рівнянь (1), (2) одержимо

$$C_1 + C_2 \ln a + C_3 a^2 + C_4 a^2 \ln a + \frac{pa^4}{64D_p} = 0;$$

$$\frac{1}{a} C_2 + 2aC_3 + (2a \ln a + a)C_4 + bC_5 - bC_6 - bC_7 - bC_8 + \frac{pa^3}{16D_p} = 0;$$

$$\frac{m-1}{b^2} C_2 + 2(1+m)C_3 + (2 \ln b(1+m) + 3+m)C_4 + \frac{(3+m)pb^2}{16D_p} = 0; \quad (4).$$

та рівняння радіальних переміщень для циліндричної оболонки:

$$w_o(x) = \frac{pR^2}{Eh_t} \left( 1 - \frac{m}{2}(1-a^2) \right) + e^{-bxx} (C_5 \cos bx + C_6 \sin bx) + e^{bxx} (C_7 \cos bx + C_8 \sin bx), \quad (2)$$

де  $R$  – радіус серединної поверхні оболонки;  $a = \frac{b}{a}$ ,  $a, b$  – зовнішній і внутрішній радіуси пластини;

$D_p = \frac{Eh_p^3}{12(1-m^2)}$  – циліндрична жорсткість пластини;  $h_p$  – товщина пластини;  $h_o$  – товщина оболонки;

$b = 4 \sqrt{\frac{3(1-m^2)}{R^2 h_o^2}}$ ;  $E, m$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини і оболонки.

$$D_p \left( \frac{m-1}{a^2} C_2 + 2(1+m)C_3 + (2(1+m)\ln a + 3+m)C_4 \right) + 2D_o b^2 C_6 - 2D_o b^2 C_8 + \frac{(3+m)pa^2}{16} = 0;$$

$$C_4 + \frac{pb^2}{8D_p} = 0; \quad C_5 + C_7 + \frac{p \left( 1 - \frac{m}{2}(1-a^2) \right) R^2}{Eh_o} = 0;$$

$$-e^{-bl}(\cos bl + \sin bl)C_5 + e^{-bl}(\cos bl - \sin bl)C_6 + e^{bl}(\cos bl - \sin bl)C_7 + e^{bl}(\cos bl + \sin bl)C_8 = 0;$$

$$e^{-bl}(\cos bl - \sin bl)C_5 + e^{-bl}(\cos bl + \sin bl)C_6 - e^{bl}(\cos bl + \sin bl)C_7 + e^{bl}(\cos bl - \sin bl)C_8 = 0.$$

За відомих сталих  $C_i$ ,  $i=1..8$  необхідні для знаходження напружень в пластинці та оболонці внутрішні зусилля визначаються такими виразами:

$$M_r = -D_p \left( \frac{m-1}{r^2} C_2 + 2(1+m)C_3 + (2\ln r(1+m) + 3+m)C_4 \right) - \frac{(3+m)pr^2}{16}; \quad (5)$$

$$M_{tp} = -D_p \left( \frac{1-m}{r^2} C_2 + 2(1+m)C_3 + (2(1+m)\ln r + 3m+1)C_4 \right) - \frac{(3m+1)pr^2}{16}; \quad (6)$$

$$M_x = 2D_o b^2 \left( e^{-bx}(C_5 \sin bx - C_6 \cos bx) + e^{bx}(C_8 \cos bx - C_7 \sin bx) \right); \quad (7)$$

$$N_t = \frac{Eh_o}{R} \left( \frac{pR^2}{Eh_t} \left( 1 - \frac{m}{2}(1-a^2) \right) + e^{-bxx}(C_5 \cos bx + C_6 \sin bx) + e^{bxx}(C_7 \cos bx + C_8 \sin bx) \right) + mN_x; \quad (8)$$

$$N_x = (1-a^2) \frac{pR}{2}; \quad (9)$$

$$M_{to} = mM_x, \quad (10)$$

де  $M_r, M_t$  – радіальний і кільцевий згинальні моменти в пластинці;  $M_x, M_{to}$  – поздовжній і кільцевий момент в оболонці;  $N_x, N_t$  – поздовжнє і кільцеве зусилля в оболонці.

Напруження в точках біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь визначаються за формулами: радіальні та кільцеві в пластинці

$$s_r = \pm \frac{6M_r}{h^2}; \quad s_t = \pm \frac{6M_t}{h^2}; \quad (11)$$

поздовжні та кільцеві в оболонці

$$s_x = \frac{N_x}{h_o} m \frac{6M_x}{h_o^2}; \quad s_{to} = \frac{N_t}{h_o} m \frac{6mM_x}{h_o^2}. \quad (12)$$

У формулах (11), (12) верхні знаки належать до зовнішньої, а нижні – до внутрішньої поверхонь.

Інтенсивність напружень в оболонці (еквівалентні напруження за четвертою теорією):

$$s_i = \sqrt{s_x^2 - s_x s_t + s_t^2}. \quad (13)$$

Наведені вище розрахункові залежності застосовано для оцінки напружено деформованого стану металеві частини сталобетонного бандажу магістрального газопроводу діаметром 1220 мм. Зовнішній діаметр обичайки (оболонки) 1420 мм ( $R=702$  мм), товщина стінки  $h_o=15,7$  мм, довжина  $2l=600$  мм. Розміри кільцевої пластинки: зовнішній радіус  $a=694$  мм, внутрішній радіус  $b=615$  мм, товщина  $h_p=14$  мм. Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона  $E=2.06$  МПа,  $m=0.3$ . Внутрішній тиск створений під час отверднення бетону  $p=3,6$  МПа.

Побудовано (рис. 2, 3 і 4) графіки розподілу напружень в оболонці і в пластинці у приповерхневих точках.

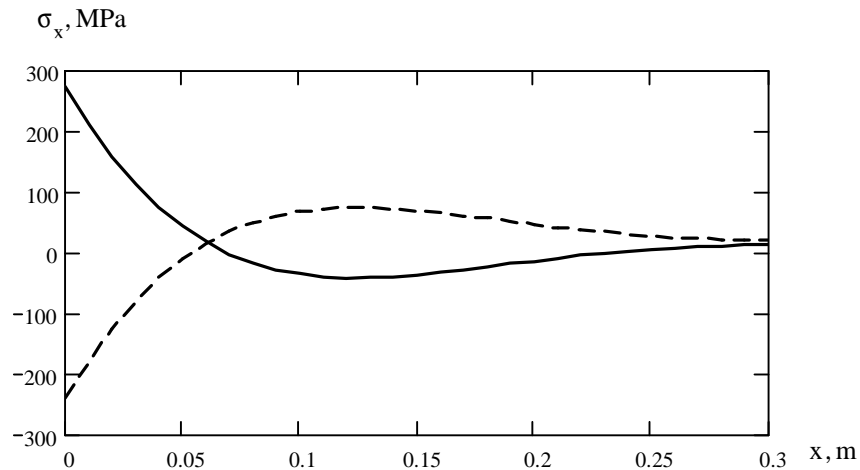


Рис. 2. Графіки розподілу поздовжніх напружень в оболонці (суцільна крива в точках біля внутрішньої поверхні, штрихова – біля зовнішньої поверхні)

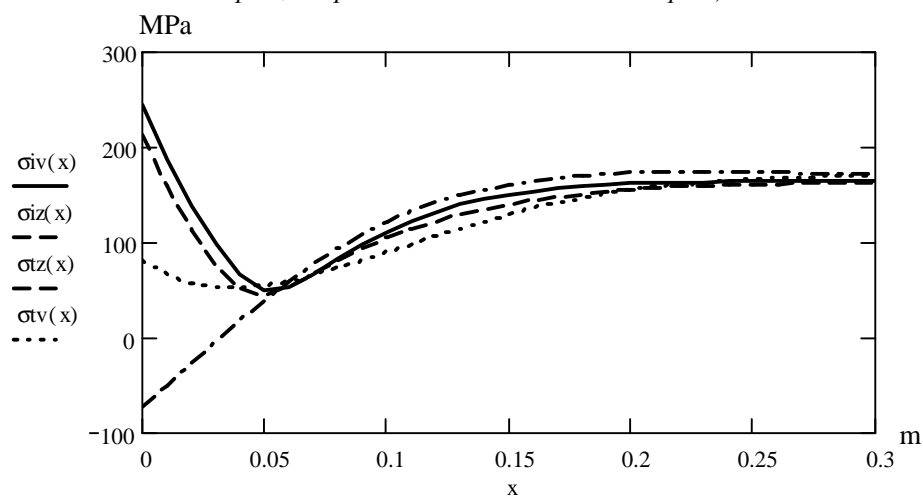


Рис. 3. Графіки розподілу інтенсивності напружень ( $S_i$ ) та кільцевих напружень ( $S_t$ ) в оболонці (індекс  $z$  в точках біля зовнішньої поверхні, індекс  $v$  – біля внутрішньої поверхні)

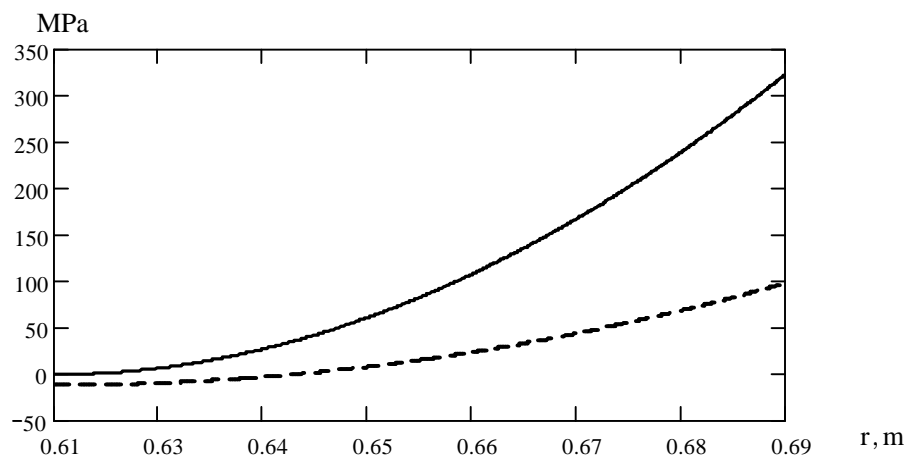


Рис. 4. Графіки розподілу радіальних (суцільна лінія) і кільцевих (штрихова лінія) напружень в точках біля внутрішньої поверхні пластинки

З рис. 2, 3, 4 бачимо, що максимальні поздовжні напруження та інтенсивність напружень в оболонці (обичайці), як і радіальні напруження в пластинці (днищі), виникають в місці їх спряження. При цьому найбільші поздовжні напруження дещо більші від найбільшого значення інтенсивності напружень. Пояснюється це тим, що в місці з'єднання пластинки з оболонкою у їх найнебезпечніших точках обидві складові напружень є одного знака.

На рис. 5 показано залежності напружень у характерних перерізах оболонки від її довжини.

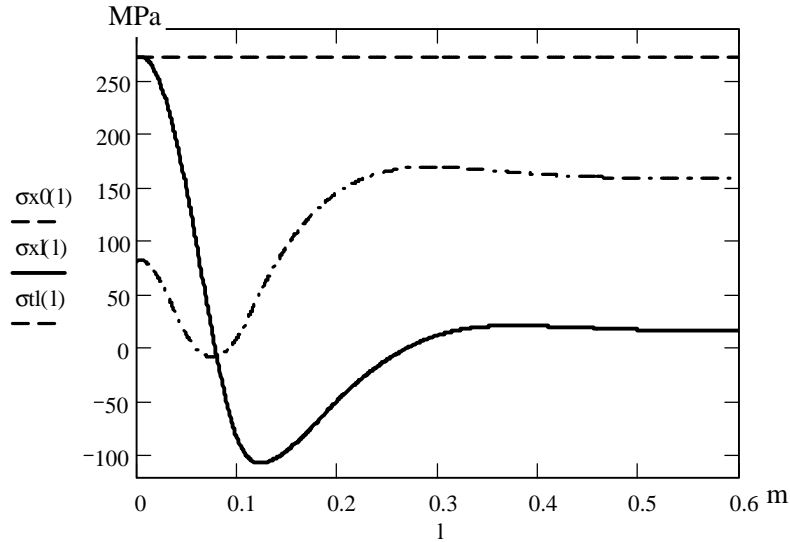


Рис. 5. Залежність поздовжніх напружень  $S_x$

на краю (штрихова лінія) і посередині (суцільна лінія) та кільцевих напружень  $S_t$  посередині (штрих пунктирна лінія) на внутрішній поверхні оболонки від половини її довжини  $l$

Як бачимо з рис. 5 найбільші напруження в оболонці  $x=0$  та відповідно в пластинці  $r=a$  фактично не залежать від довжини оболонки (ширини бандажу). Що стосується поздовжніх та кільцевих напружень в інших перерізах оболонки, у тому числі і в середньому перерізі  $x=l$  (рис. 5), то взаємний вплив торців бандажу істотно впливає на значення цих напружень тільки для вузьких бандажів. За  $l \geq 0.35$  м поздовжні та кільцеві напруження в середній зоні бандажу істотно не залежать від його ширини і бандаж можна вважати достатньо широким.

Для спрощення розрахункової моделі можна наближено прийняти, що зовнішній контур пластинки жорстко закріплений ( $\Theta_o = \frac{dw_o}{dx} = 0$ ), а бандажна оболонка є доволі довга. У цьому разі рівняння прогинів пластинки має вигляд [6]

$$w_p(r) = \frac{pa^4}{64D_p} \left( -1 + 2(1 - k - 2a^2)(1 - r^2) + r^4 - 4k \ln r - 8a^2 \ln r \right), \quad (13)$$

а радіальний і кільцевий згинальні моменти в пластинці визначаються за формулами

$$M_r = -\frac{pa^2}{16} \left( (1 + m)(k - 1 - 4a^2 \ln r) + (3 + m)r^2 + \frac{(1 - m)k}{r^2} - 4a^2 \right); \quad (14)$$

$$M_t = -\frac{pa^2}{16} \left( (1 + m)(k - 1 - 4a^2 \ln r) + (1 + 3m)r^2 + \frac{(1 - m)k}{r^2} - 4ma^2 \right), \quad (15)$$

де  $r = \frac{r}{a}$   $a \leq r \leq 1$  – безрозмірна координата.

$$k = \frac{\left( (1 - m)a^2 + (1 + m)(1 + 4a^2 \ln a) \right) a^2}{(1 - m) + (1 + m)a^2}.$$

На зовнішньому контурі пластинки (за  $r=1$ ) одержимо

$$M_{ra} = -\frac{pa^2}{16} (2(1 + k) - 4a^2). \quad (16)$$

Далі відповідно до розрахункової схеми (рис. 1) розглядаємо довгу оболонку, що знаходиться під дією крайових згинальних моментів  $M_{x0} = -M_{ra}$  з урахуванням умови  $w_o = 0$  за  $x = 0$ .

З рівнянь (2), (4) для довгої оболонки ( $C_7 = C_8 = 0$ ) одержимо

$$C_5 = -\frac{p\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right)R^2}{Eh_o}; \quad C_6 = \frac{M_{x0}}{2D_o b^2}.$$

Після підстановки значення цих сталих у вирази (2) і (7), (8) знаходимо

$$w_o(x) = \frac{pR^2}{Eh_o}\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right) + e^{-bxx} \left[ -\frac{p\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right)R^2}{Eh_o} \cos bx + \frac{M_{x0}}{2D_o b^2} \sin bx \right]; \quad (17)$$

$$M_x = e^{-bx} \left[ -\frac{p\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right)R^2 b^2 h_o^2}{6(1 - m^2)} \sin bx + M_{x0} \cos bx \right]; \quad (18)$$

$$N_t = \frac{Eh_o}{R} \left[ \frac{pR^2}{Eh_t}\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right) + e^{-bxx} \left[ -\frac{p\left(1 - \frac{m}{2}(1 - a^2)\right)R^2}{Eh_o} \cos bx + \frac{M_{x0}}{2D_o b^2} \sin bx \right] \right] + mN_x. \quad (19)$$

У таблиці наведено порівняння результатів розрахунку значень напружень та прогинів пластинки і оболонки у характерних точках, одержаних за основною та спрощеною моделями. ( $x_m = 0.123$  м – відстань від краю оболонки до точки першого екстремального значення функції поздовжніх напружень (рис. 2).

### Порівняння результатів розрахунків

а) для пластинки

| $r$ | $S_{rv}, \text{МПа}$ |        | $S_{tv}, \text{МПа}$ |        | $w, \text{мм}$ |        |
|-----|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------|--------|
|     | основ.               | спрощ. | основ.               | спрощ. | основ.         | спрощ. |
| $b$ | 0,0                  | 0,0    | -11,7                | -13,1  | 0,290          | 0,338  |
| $a$ | 323,0                | 322,8  | 98,1                 | 96,8   | 0,0            | 0,0    |

б) для оболонки

| $x$     | $S_{xv}, \text{МПа}$ |        | $S_{tv}, \text{МПа}$ |        | $w, \text{мм}$ |        |
|---------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------|--------|
|         | основ.               | спрощ. | основ.               | спрощ. | основ.         | спрощ. |
| 0       | 271,4                | 271,4  | 82,2                 | 82,2   | 0,0            | 0,0    |
| $x_m =$ | -40,5                | -41,6  | 109,9                | 109,8  | 0,429          | 0,426  |
| $l$     | 13,4                 | 15,4   | 98,1                 | 96,8   | 0,584          | 0,565  |

Із таблиці випливає, що результати розрахунків за двома вищевикладеними моделями задовільно узгоджуються між собою. Максимальні значення визначальних для оцінки міцності напружень – поздовжніх в оболонці та радіальних у пластинці фактично збігаються до трьох значущих цифр. Найбільше відхилення стосується прогину точок на внутрішньому контурі пластинки, що сягає 16,5 %.

**Висновки.** Побудовано методика визначення напружень у зовнішній обичайці з днищами бандажу трубопроводу на розширеному бетоні. За результатами числових досліджень, на взятому з практики прикладі ремонту магістрального газопроводу з'ясовано, що максимальні напруження в

обичайці і кільцевому днищі, які виникають в місці їх спряження, фактично не залежать від ширини бандажу. Їх значення простіше знаходити за спрощеною розрахунковою моделлю. В обичайці, виготовленій із тонкостінних труб, що використовують у магістральних трубопроводах, вплив крайового ефекту розповсюджується приблизно на половину радіуса від її торця.

1. Спосіб ремонтування магістрального трубопроводу.: Пат. 38190 А, Україна // М.М. Дрогомирецький, Б.С. Петровський, Б.С. Рильніков, Б.С. Білобран, Я.Б. Якимечко (UA). – №2000063271. Заявлено 06.06.00. Опубл. 15.05.01. Бюл. №4. – 2 с. 2. Білобран Б.С., Якимечко Я.Б., Савула С.Ф., Банахевич Ю.В., Якимечко Р.Я. Підсилення магістральних трубопроводів бандажами на розширеному бетоні // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – № 3 (12). – С. 97–101. 3. Білобран Б.С., Рильніков Б.С., Я.Б. Якимечко Я.Б. Оцінка напруженого стану трубопроводу, підсиленого бандажем на розширеному бетоні // Бетон и железобетон в Украине. – 2005. – №3. – С. 13–16. 4. Білобран Б.С., Рильніков Б.С., Якимечко Я.Б., Дрогомирецький М.М., Петровський Б.С. Стендові випробування труби підсиленої бандажем на розширеному бетоні / Зб. наук. праць. ФМІ ім. Г.В. Карпенка “Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій”. Львів: Каменяр. – 2005. – Вип.7. – С. 13–18. 5. Білобран Б., Якимечко Р. Напружений стан трубопроводу в зоні підсилення бандажем на розширеному бетоні: 9-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові.: Праці. – Львів: Кінпатрі ЛТД. – 2009. – С. 19–20. 6. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. шк., 1970. – 288 с. 7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 512 с.

УДК 624.014.2

М.Р. Більський

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра будівельного виробництва

## **РОБОТА МЕТАЛЕВИХ СТРИЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПІДСИЛЕНИХ З РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУЖЕНЬ**

© Більський М.Р., 2009

**Наведено результати досліджень роботи металевих стрижневих конструкцій, підсилення з регулюванням напружень під навантаженням, а також основні результати теоретичних і експериментальних досліджень.**

**In this article deals with the results of research of steel columns stability intensified under the loading and main results of theoretical an experimental researches are given.**

**Постановка проблеми і її актуальність.** Металеві стрижневі конструкції каркасів будівель та споруд, маса яких в Україні становить близько 30 мільйонів тонн, необхідно періодично підсилювати у зв'язку з їх фізичним зношуванням та реконструкцією. Серед сталевих конструкцій одними з найвідповідальніших є поздовжньо стиснуті, несуча здатність яких вичерпується через втрату ними стійкості. Останнє, як показує багаторічний досвід їх експлуатації було основною причиною майже половини (44 %) аварій будинків та споруд [3, с. 12–13]. Тому проблема вивчення роботи підсилюваних під навантаженням поздовжньо стиснутих стрижневих металевих конструкцій є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Реконструкція і підсилення металевих конструкцій тісно пов'язані з проблемами експлуатаційної надійності та безпеки будівельних