

*М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, Д.В. Харишин  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

### **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА УМОВ НАГРІВАННЯ**

Розглядається напружено-деформований стан трубо бетонної колони при її нагріві. Проведений огляд робіт, присвячених дослідженню поведінки трубобетонних колон при силових навантаженнях. Встановлено, що дослідження вогнестійкості трубобетонних конструкцій відсутні в науковій літературі. В статті проведено математичне моделювання та досліджено температурні напруження в трубобетонній колоні. Одержані аналітичні вирази для знаходження радіальних і кільцевих температурних напружень при нагріві колони на деяку постійну температуру. Проведені розрахунки температурних напружень. Результати представлено графічно. Проведений аналіз залежності величини напружень по товщині колони від теплофізичних і механічних характеристик металу і бетону.

**Ключові слова:** трубобетонні колони, температурні напруження, коефіцієнт температурного лінійного розширення.

*М. М. Semerak, D.V. Kharyshyn*

### **STRAIN-STRESS STAGE OF STEEL TUBE CONFINED CONCRETE ELEMENTS AT ELEVATED TEMPERATURES**

In the article the stress-strain state of concrete pipe column when it is heated. The review of works devoted to the study of behavior trubobetonnyh columns at power loads. Found that fire investigation trubobetonnyh no structures in the scientific literature. In the article the mathematical modeling and research of thermal stress in trubobetonniy column. Analytical expressions for the radial and ring of thermal stresses during heating of the column at a constant temperature value. The calculations of stresses. Results representation graphically. The analysis of the dependence of stress on the thickness of the column and thermal characteristics of metal and concrete.

**Key words:** trubobetonni column temperature stress, the coefficient of linear expansion.

*М.М. Семерак, Д.В. Харишин*

### **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НАГРЕВА**

Рассматривается напряженно-деформированное состояние трубобетонной колонны при ее нагреве. Проведен обзор работ, посвященных исследованию поведения трубобетонных колонн при силовых нагрузках. Установлено, что исследования огнестойкости трубобетонных конструкций отсутствуют в научной литературе. В статье проведено математическое моделирование и исследованы температурные напряжения в трубобетонных колонне. Получены аналитические выражения для нахождения радиальных и кольцевых температурных напряжений при нагреве колонны на некоторую постоянную температуру. Проведены расчеты температурных напряжений. Результаты представлены графически. Проведен анализ зависимости величины напряжений по толщине колонны и теплофизических характеристик металла и бетона.

**Ключевые слова:** трубобетонные колонны, температурные напряжения, коэффициент температурного линейного расширения.

**Актуальність теми.** Труبوبетонні конструкції набули широкого застосування в світовій будівельній практиці. Порівняно із залізобетонними вони більш технологічні у виготовленні і монтажі, легші і зручні у транспортуванні. Для їх виготовлення не потрібні арматурні каркаси, опалубки та закладні деталі. Використовувати конструкції з труبوبетону найвигідніше в елементах, що сприймають великі зусилля стиску. До таких елементів належать бетонні колони [1-6]. На даний час досліджена робота труبوبетонних колон, що працюють на стиск і згин у своїй основній частині, однак дослідження, пов'язані зі станом таких елементів при різних видах температурних навантажень, і особливо при пожежі, практично відсутні.

Широке застосування труبوبетонних колон обумовлене їх високою несучою здатністю при порівняно менших габаритних розмірах завдяки блокуванню тріщиноутворення у бетоні сталеву обіймою. Також до переваг слід віднести більш спрощені умови їх технології виготовлення та монтажу на їх основі несучих конструкцій перекриття поверхів. Щодо пожежної безпеки об'єктів будівництва, зведених на основі каркасів із труبوبетонними колонами, то необхідно відзначити, що методи розрахункової оцінки вогнестійкості таких колон відсутні. Це показує аналіз робіт, що присвячені вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій та відповідних стандартів для розрахункових методів [7-9].

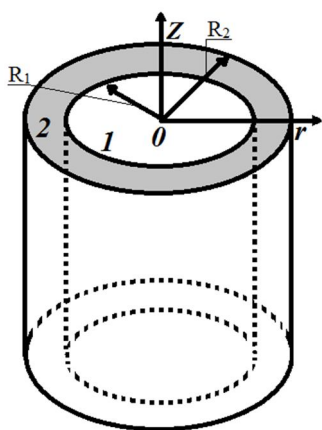
Враховуючи, що сталева труба відіграє ключову роль при забезпеченні несучої здатності труبوبетонної колони, її вихід з ладу або зменшення її жорсткості сильно позначається на її роботі в умовах пожежі. Під дією теплового впливу пожежі сталева труба зменшує свою міцність та модуль пружності дуже швидко, оскільки знаходиться на поверхні колони, і контактує з полум'ям.

В даний час існує ряд нормативно-методичних, довідкових і рекомендаційних документів, які відносяться до дослідження, розрахунку, проектування та експлуатації труبوبетонних та сталезалізобетонних конструкцій. Але сьогодні ці питання недостатньо висвітлені відносно їх поведінки при зміні температури і особливо за умов пожежі.

Актуальність теми обумовлена необхідністю дослідження напружено-деформованого стану труبوبетонних елементів із врахуванням впливу теплофізичних і механічних характеристик металу і бетону за умов зміни температури розглядуваної конструкції, а також створення практичного методу їх розрахунку з урахуванням вибору оптимальних параметрів.

**Метою роботи є** створення методики визначення межі вогнестійкості труبوبетонних колон розрахунковим шляхом на основі застосування теорії термопружності кусково – однорідних конструкцій.

**Постановка задачі.** Розглянемо сталеву трубу зовнішній радіус якої  $R_2$ , а внутрішній  $R_1$ . Труба заповнена бетоном. Якщо бетон заливається влітку і його тверднення проходить при температурі  $t_0 = \text{const}$ , то при цій температурі напруження відсутні. Цю температуру приймемо за початкову. Для аналітичних досліджень виберемо циліндричну систему координат центр якої помістимо в центрі поперечного перерізу колони (рис. 1)



**Рисунок 1** – Розрахункова схема труبوبетонної колони

Визначимо і дослідимо напружено-деформований стан колони залежної від зміни температури і координати  $r$ . Якщо колону, яка мала початкову температуру  $t_0$  нагріти до температури  $t_1$ , то у ній через різницю температур  $t = t_1 - t_0$  і різні коефіцієнти лінійного температурного розширення металу і бетону, виникнуть температурні переміщення і температурні напруження.

Величина напружень і переміщень залежить від фізико-механічних характеристик сталі і бетону. При нагріванні, як правило, геометричні розміри збільшуються, а при охолодженні – зменшуються. Якщо температура в усіх точках змінюється одночасно на величину  $t$ , то кожна точка перерізу колони буде переміщатись в напрямку полярного радіуса  $r$ , і не буде залежати від полярного кута  $\varphi$ .

При аналітичних дослідженнях величини, які відносяться до центрального циліндра (бетону) будемо позначати індексом 1, а величини, які відносяться до зовнішнього циліндра (сталевій обійми) – індексом 2. Наприклад переміщення в бетоні –  $u_1$ , а переміщення в металі –  $u_2$ .

Радіальне переміщення  $u_i$  вздовж радіуса можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння [10]

$$\frac{d^2 u_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_i}{dr} - \frac{u_i}{r^2} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

де  $u_i$  – переміщення  $i$ -го шару вздовж радіуса  $r$ , м.

Для зручності інтегрування запишемо рівняння (1) у вигляді

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d(ur)}{dr} \right) = 0. \quad (2)$$

Проінтегрувавши його двічі по  $r$ , знайдемо загальний розв'язок рівняння (1)

$$U = A_i r + \frac{B_i}{r}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

де  $A_i$  і  $B_i$  – сталі інтегрування, які знаходяться з граничних умов. Для області  $0 \leq r \leq R_1$ , а для області 2 –  $R_1 \leq r \leq R_2$ .

При зміні температури в труобетонній колоні стальна труба і бетонний циліндр будуть розширюватися. Ці деформації будуть різними через різницю їх фізико-механічних характеристик:  $\alpha_i$ ,  $E$ ,  $\nu$ . Обмеження деформацій зумовлює виникнення температурних напружень. [10].

$$\sigma_r^{(i)} = \frac{E_i}{1 + \nu_i} \left[ \frac{du_i}{dr} + \nu_i \frac{u_i}{r} - \alpha_i^i (1 + \nu_i) t \right], \quad (4)$$

$$\sigma_\phi^{(i)} = \frac{E_i}{1 + \nu_i} \left[ \nu_i \frac{du_i}{dr} + \frac{u_i}{r} - \alpha_i^i (1 + \nu_i) t \right], \quad i = 1, 2$$

де  $\sigma_r^{(i)}$ ,  $\sigma_\phi^{(i)}$  – радіальні і кільцеві температурні напруження, Па;  $E_i$  – модуль пружності, Па;  $\nu_i$  – коефіцієнт Пуассона,  $\alpha_i^i$  – коефіцієнт температурного лінійного розширення, (КТЛР),  $\frac{1}{K}$ .

Враховуючи вираз для переміщень (3), формули (4) набувають вигляду

$$\sigma_r^i = \frac{E_i}{1 - \nu_i} \left[ A_i (1 + \nu_i) - \frac{B_i}{r} (1 - \nu_i) - \alpha_i^i (1 + \nu_i) t \right], \quad (5)$$

$$\sigma_\phi^i = \frac{E_i}{1 - \nu_i} \left[ A_i (1 + \nu_i) + \frac{B_i}{r} (1 - \nu_i) - \alpha_i^i (1 + \nu_i) t \right].$$

Постійні інтегрування  $A_i$  і  $B_i$  знаходяться з рівності переміщень (3) і радіальних напружень (5) на поверхні контакту металу і бетону  $r = R_1$ , а також з рівності нулю переміщень  $u_i$  при  $r = 0$  і радіальних напружень  $\sigma_r^{(2)}$  при  $r = R_2$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2, \quad \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)} \quad \text{при } r = R_1 \\ u_1 &= 0 \quad \text{при } r = 0, \quad \sigma_r^{(2)} = 0 \quad \text{при } r = R_2. \end{aligned} \quad (6)$$

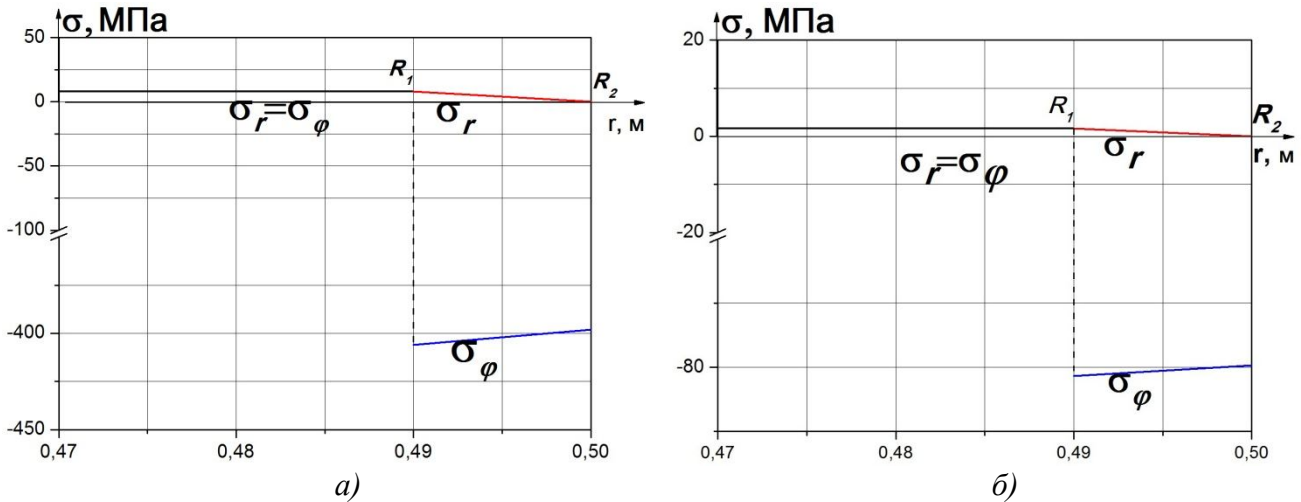
Розглянуто випадок, коли температура змінилася на деяку постійну величину  $t = const$ . Підставивши вирази (3) і (5) в умови (6) одержимо систему з чотирьох алгебраїчних рівнянь, для знаходження чотирьох постійних  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $i=1,2$ . Розв'язок системи здійснювався з використанням методу Крамера в системі Mathcad. Для конкретних значень геометричних розмірів та фізико-механічних характеристик розглядуваного коаксіального циліндра обчислювались елементи матриці, які є коефіцієнтами при змінних  $A_i$ ,  $B_i$ .

Проведемо розрахунки радіальних  $\sigma_r$  і кільцевих  $\sigma_\varphi$  температурних напружень в трубобетонному коаксіальному циліндрі при його нагріві на  $t = 500^\circ\text{C}$ , і  $t = 100^\circ\text{C}$ . При цьому приймемо, що радіус  $R_1 = 49 \cdot 10^{-2}\text{ м}$ , зовнішній радіус сталеві обійми  $R_2 = 50 \cdot 10^{-2}\text{ м}$ . Механічні і теплофізичні характеристики приймалися рівними:

$$E_1 = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \nu_1 = 0,17, \alpha_t^{(1)} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}},$$

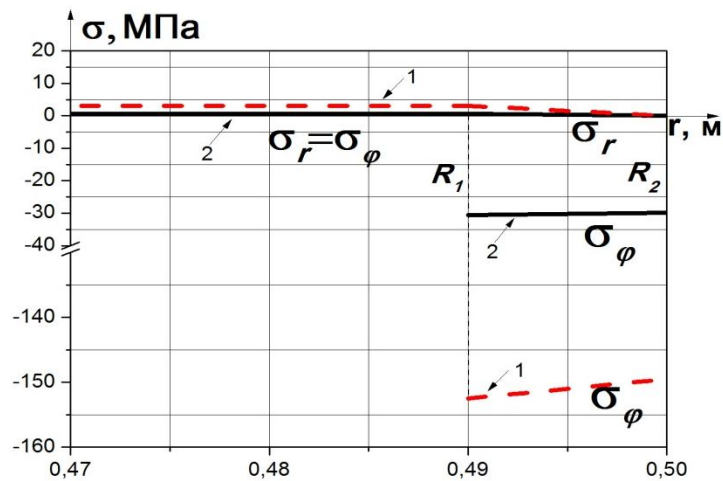
$$E_2 = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \nu_2 = 0,3, \alpha_t^{(2)} = 14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}$$

Результати розрахунків показано графічно на рис. 2-5.



**Рисунок 2** – Зміна радіальних і кільцевих температурних напружень вздовж радіуса а) при температурі  $t = 500^\circ\text{C}$ ; б) при температурі  $t = 100^\circ\text{C}$

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) показує, що в бетоні радіальні і кільцеві температурні напруження є розтягувальними і за величиною однакові ( $\sigma_r = \sigma_\varphi$ ). На поверхні з'єднання бетону і металу кільцеві температурні напруження мають розрив. Вони з області розтягу в бетоні переходять в область стиску в металі. За величиною вони є значно більшими від напружень в бетоні (рис. 2а). При нагріві на  $100^\circ\text{C}$  характер зміни напружень не змінюється, але їх величини значно менші (рис. 2б).



**Рисунок 3** – Зміна радіальних і кільцевих температурних напружень вздовж радіуса 1) при  $100^\circ\text{C}$ ; 2) при  $500^\circ\text{C}$

На рис. 3 показано зміну температурних напружень в колоні за умов, що КТЛР металу і бетону є однаковими за величиною, тобто  $\alpha_t^{(1)} = \alpha_t^{(2)}$ . В цьому випадку максимальні температурні напруження зменшуються за величиною на 265%, але вони існують.

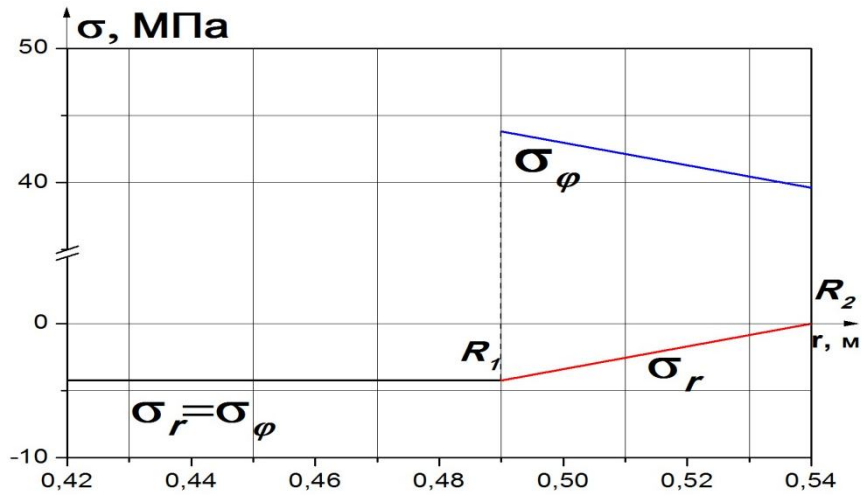


Рисунок 4 – Зміна напружень в бетонній колоні зі стальним осердям

На рис.4 показані напруження в колоні, якщо поміняти місцями метал і бетон. Температура нагріву  $t=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зіставлення графіків рисунка 4 і рисунка 2а показує, що в бетоні максимальні кільцеві напруження є розтягувальними і мають критичну величину 44МПа.

Одержані аналітичні залежності для визначення температурних напружень справедливі і для від’ємних температур. На рис. 5 показана залежність в колоні при температурах  $t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і  $t=-35\text{ }^{\circ}\text{C}$

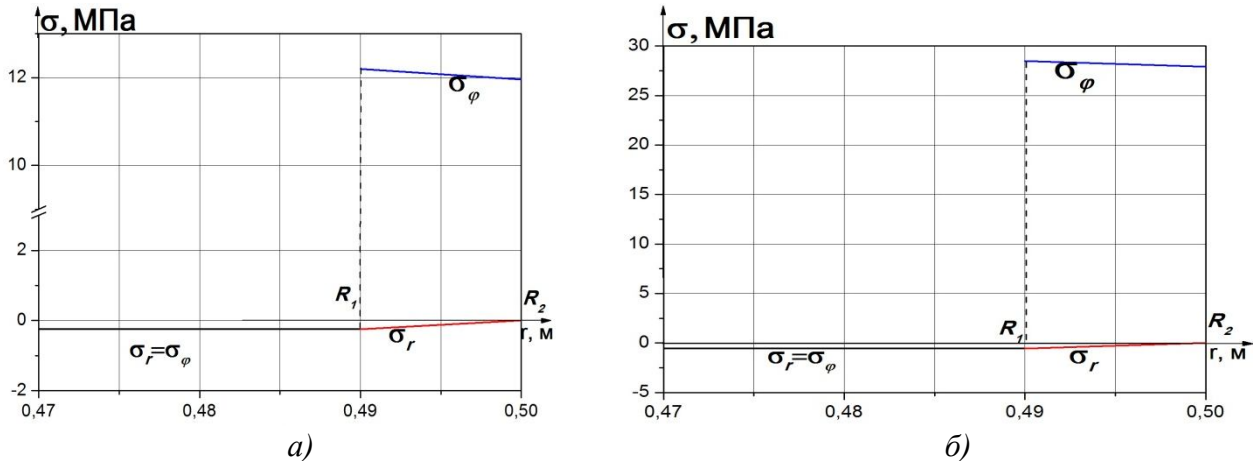


Рисунок 5 – Зміна радіальних і кільцевих температурних напружень вздовж радіуса а) при температурі  $t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б) при температурі  $t = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз графічних залежностей показує, що при від’ємних температурах (зимовий період) температурні напруження в бетоні і в сталі є стискальними, а кільцеві напруження в металі є розтягувальними.

#### Висновки

1. Розроблено методику визначення та дослідження температурних напружень в трубобетоні залежно від геометричних розмірів та фізико-механічних характеристик сталі і бетону при зміні температури.

2. Проведені дослідження показують, що температурні напруження зумовлені пожежею є досить великими. Температурні напруження додаються до силових напружень і можуть призвести до руйнування колони за умов зміни температури.

#### Список літератури:

1. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація / Л.І. Стороженко, В.М. Сурдін, В.І. Єфіменко, В.І. Вербицький. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – 448 с.
2. Несучі конструкції зі сталевих труб, заповнених центрифугованим бетоном: дисертація доктора технічних наук: 05.23.01/ Єфіменко В.І. – Дніпропетровськ – 2009. – 414 с.
3. Кикин А.И. Конструкции из стальных труб заполненных бетоном / А.И. Кикин, Р.С. Сенжаровский, В.А. Трулль – М.: 1974. – 145 с.
4. Воскобойник С.П. Напряжено-деформований стан вузлів з'єднання трубобетону з залізобетоном при позациентрованому стиску та згині : дисертація кандидата технічних наук : 05.23.01/ Воскобійник С.П. – Полтава 2002. – 150 с.
5. Стальные трубчатые конструкции за рубежом. Опыт зарубежного строительства. М., 1968.
6. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с внешним армированием: К.: УМК ВО, 1989. – 99с.
7. Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: Дисс. докт. техн. наук. Кривой Рог, 1984. – 587 с.
8. EN 1994-1-2:2009 Eurocode 2: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2009.
9. Кириллов А.П. Железобетонные корпуса ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

#### References:

1. Storozhenko L.I. Stalezalizobetonni konstruktsiyi. Doslidzhennya, proektuvannya, budivnytstvo, ekspluatatsiya / L.I. Storozhenko, V.M. Surdin, V.I. Yefimenko, V.I. Verbyts'kyu. – Kryvyi Rih: KТУ, 2007, – 448 s.
2. Nesuchi konstruktsiyi zi stalevykh trub, zapovnenykh tsentryfuhovanyim betonom: dysertatsiya doktora tekhnichnykh nauk: 05.23.01/ Yefimenko V.I. – Dnipropetrovs'k – 2009. – 414 s.
3. Voskoboynyk S.P. Napruzhenno – deformovanyy stan vuzliv z"yednannya trubobetonu z zalizobetonom pry pozatsentrovvanomu stysku ta z-hynu : dysertatsiya kandydata tekhnichnykh nauk : 05.23.01/ Voskobiynyk S.P. – Poltava 2002. – 150 s.
4. Voskoboynyk S.P. Napruzhenno – deformovanyy stan vuzliv z"yednannya trubobetonu z zalizobetonom pry pozatsentrovvanomu stysku ta z-hynu : dysertatsiya kandydata tekhnichnykh nauk : 05.23.01/ Voskobiynyk S.P. – Poltava 2002. – 150 s. .
5. Stal'nye trubchatye konstruktsyy za rubezhom. Opyt zarubezhnoho stroytel'stva. M., 1968.
6. Storozhenko L.Y. Zhelezobetonnye konstruktsyy s vneshnym armyrovanyem: K.: УМК ВО, 1989. – 99s.
7. Storozhenko L.Y. Ob"emnoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanye zhelezobetonu s kosvennym armyrovanyem: Dyss. dokt. tekhn. nauk. Kryvoy Roh, 1984. - 587 s.
8. EN 1994-1-2:2009 Eurocode 2: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2009.
9. Kyryllov A.P. Zhelezobetonnye korpusa yadernykh reaktorov. – М.: Enerhoatomyzdat, 1988.
10. Tymoshenko S.P., Hud'er Dzh. Teoryya upruhosity. – М.: Nauka, 1975. – 576 s.

