

## ІМОВІРНІСНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ВІТЧИЗНЯНІ БУДІВЕЛЬНІ НОРМИ

© Воскобійник О.П., Семко О.В., 2013

Окреслено низку вирішених питань, що виникають під час запровадження нелінійних деформаційних методів (деформаційної моделі) розрахунку сталезалізобетонних конструкцій у сучасні вітчизняні будівельні норми з погляду вимог та механізмів забезпечення необхідного рівня надійності об'єктів будівництва.

**Ключові слова:** сталезалізобетонні конструкції, нелінійні деформаційні методи розрахунку, показники надійності, мінливість розрахункових параметрів, нормування надійності.

The article is devoted to outlining range of outstanding issues during the implementation of deformation designing methods (deformation model) of composite steel and concrete structures in modern national building codes from the point of view of requirements and supports of structures reliability levels.

**Key words:** composite steel and concrete structures, non-linear deformation designing methods, reliability indexes, designing data variability, reliability standardizations.

### Постановка проблеми

Історично склалося так, що чинна донедавна і тепер в Україні нормативна база з питань проектування та сертифікації будівельної продукції була сформована ще в минулому сторіччі за часів Радянського Союзу і залишилася нам у спадок зі всіма перевагами та недоліками. Сучасна нормативна база в галузі будівництва в Україні поки що перебуває на стадії формування – переходу від багато в чому застарілих пострадянських норм до нових нормативних документів, гармонізованих із європейськими стандартами.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, у яких розпочато вирішення цієї проблеми [1, 2, 13]** свідчить, що однією з основних особливостей нових будівельних норм розрахунку залізобетонних конструкцій ДБН В.2.6-98:2009 «Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» [5] та ДБН В.2.6-160:2010 «Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення» [6] є запровадження нелінійних деформаційних методів розрахунку (деформаційної моделі), що має на меті гармонізувати вітчизняні норми з аналогічними Європейськими стандартами Єврокодами [17, 18], у яких також реалізовані аналогічні підходи.

Запровадження нелінійних деформаційних методів розрахунку залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій у сучасні вітчизняні норми ДБН та ДСТУ [5, 6, 7] зумовлює не лише певне уточнення розрахункових передумов та процедур, і як наслідок, несучої здатності конструктивних елементів, з одного боку, а й необхідність перегляду досить довгого статистичного ланцюжку нормування вихідних параметрів розрахунку, а також дослідження та нормування показників проектною надійності конструкцій з урахуванням надійності прийнятих розрахункових моделей [16, 19], що є **невирішеною частиною загальної проблеми, на що звернено увагу в цій статті.**

Так, **основною метою статті** є окреслення кола невирішених питань з погляду вимог та механізмів забезпечення необхідного рівня надійності об'єктів будівництва, що виникають під час

запровадження нелінійних деформаційних методів розрахунку сталезалізобетонних конструкцій у сучасні вітчизняні будівельні норми, а також імплементацією Європейських норм (Eurocode) [4, 17, 18].

### Виклад основного матеріалу

Правила застосування європейських нормативних документів (Єврокодів), прийнятих як ідентичні національні стандарти-настанови, устанавлюються затвердженим у 2010 році ДБН А.1.1-94:2010 «Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення» [4], що набуває чинності з 1 червня 2013 року. Досвід ЄС та суттєва відмінність чинної дотепер нормативної бази у будівництві в Україні від Євронорм, а також необхідність підготовки фахівців відповідного рівня зумовлює доцільність запровадження нормативних документів так званого «перехідного періоду» або «періоду співіснування», до яких належать розроблена протягом останніх 5 років низка ДБН та ДСТУ, зокрема з питань розрахунку залізобетонних [5, 7] та сталезалізобетонних конструкцій [6]. Метою цих норм є врахування вимог національних нормативних документів, разом із тим зберігаючи принципи, закладені в Єврокодах стосовно усталених методів розрахунків [2].

Тому водночас паралельно розпочато розроблення стандартів-настанов, ідентичних до європейських нормативних документів. Тобто утворюються дві незалежні системи нормативних документів, які будуть діяти одночасно. Це дасть змогу учасникам будівельного ринку вийти на європейський простір та надасть право реального вибору, за якою саме системою нормативних документів проектувати – національною чи європейською.

Порівняння основних вимог та механізми забезпечення рівня надійності під час проектування будівельних конструкцій (зокрема залізобетонних та сталезалізобетонних) за різними нормами: добре апробованими в вітчизняних умовах радянських правил проектування СНиП [15], національними документами, так званого «перехідного періоду» ДБН та ДСТУ [5, 6, 7] та Європейськими стандартами Eurocode [17, 18], потім може слугувати вихідними параметрами для ймовірного розрахунку. Такий підхід дасть змогу не лише якісно, а й кількісно обґрунтувати параметри, що призначені в Єврокодах для національного вибору, зокрема в питаннях, пов'язаних із забезпеченням надійності та конструктивної безпеки об'єктів будівництва.

У всіх трьох типах розглянутих нормативних документів (СНиП, ДБН та Eurocode) реалізований метод розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами, що, як відомо, передбачає статистичний опис навантажень та властивостей матеріалів і є за своєю формою напівімовірнісним. Розрахунок ведеться у детерміністичній формі, а необхідний рівень надійності за такого підходу забезпечується нормуванням навантажень та міцності матеріалів, а також введенням диференційованих (ймовірно обґрунтованих) коефіцієнтів надійності, що враховують умови роботи конструкції та інші фактори, що не можуть бути введені в розрахунок опосередковано.

Запровадження нелінійних деформаційних методів розрахунку залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій у сучасні вітчизняні норми ДБН та ДСТУ [5, 6, 7] зумовлює не лише певне уточнення розрахункових передумов та процедур, і як наслідок, несучої здатності конструктивних елементів, з одного боку, а й необхідність перегляду досить довгого статистичного ланцюжку нормування вихідних параметрів розрахунку. Адже, застосування деформаційної моделі в межах методу граничних станів, коли під час розрахунку враховується приріст не зусиль (дій), а деформацій у перерізі, передбачає зміну (порівняно з класичним методом граничної рівноваги, реалізованим у радянському СНиП 2.03.01-84\* [15]) критеріїв досягнення граничного стану, що потребує детальнішого аналізу.

Так, на відміну від СНиП 2.03.01-84\* [15], згідно з ДБН В.2.6-98:2009 однією із нормованих величин разом з міцністю на стиск та розтяг є деформаційні властивості бетону. Ці характеристики знаходяться у функціональному зв'язку між собою, для опису якого в літературі встановлено досить добре апробовані емпіричні залежності. Очевидно, що будь-які емпіричні залежності, що апроксимують експериментальні дані, навіть за результатами аналізу репрезентативних однорідних вибірок, як правило, добре описують функціональний взаємозв'язок між досліджуваними

параметрами в околі їх середніх значень та завжди характеризуються певним розсіюванням (ентропією). Тому додатковим випадковим фактором за такого підходу буде мінливість функціонального взаємозв'язку (співвідношення) між призмовою міцністю бетону ( $\tilde{f}_{cm}$ ) та його граничною деформативністю, що характеризується згідно з прийнятими в [5, 7, 17] передумовами двох нормованих точок кривої  $\sigma_c - \epsilon_c$ :  $\tilde{\epsilon}_{c1}$  – значеннями відносної деформації стиску за максимальних напружень та  $\tilde{\epsilon}_{cu}$  – значення відносних граничних деформацій стиску бетону.

Ентропію, пов'язану з мінливістю співвідношення цих параметрів, за аналогією з випадковим коефіцієнтом призмової міцності ( $\tilde{k}_c$ ), коефіцієнт варіації якого ( $V_{k_c}$ ) характеризує мінливість співвідношенням між середньою кубиковою та призмовою міцністю ( $\tilde{f}_{cm,cube} / \tilde{f}_{cm,prism}$ ), можна оцінити за допомогою статистичного аналізу коефіцієнтів  $\tilde{k}_{e_{c1}}$  (для  $\tilde{f}_{cm} = f(\tilde{\epsilon}_{c1})$ ) та  $\tilde{k}_{e_{cu}}$  (для  $\tilde{f}_{cm} = f(\tilde{\epsilon}_{cu})$ ), що визначає мінливість прийнятих детерміністичних залежностей. Треба зауважити, що на відміну від вітчизняних норм [5] у EC2 не наведено значення нормативної мінливості міцності бетону при осьовому стиску, а надані лише її середні та характеристичні значення, скориставшись якими можна підрахувати відповідний коефіцієнт варіації (рис. 1, a), величина якого змінюється в межах від 24 до 9 %, зменшуючись зі зростанням класу бетону.

Прийняті в ДБН В.2.6-98:2009 підходи щодо забезпечення надійності (нормування) передбачають застосування двох різних кривих залежності  $\sigma_c - \epsilon_c$  під час розрахунку за граничними станами I та II груп, які, як відомо, у зв'язку з різним ступенем небезпеки переходу конструкції в позаграничний стан мають відповідно різну ймовірнісну забезпеченість, що встановлюється за допомогою нормування випадкових розрахункових параметрів та системи часткових коефіцієнтів надійності. Так, відповідно до рекомендацій ДБН В.2.6-98:2009 [5] разом із міцнісними характеристиками нормованими параметрами є характерні значення деформацій, зокрема для стисненого бетону – це величини  $e_{c1}$  та  $e_{cu}$  ( $e_{cu1}$  – при застосуванні криволінійної діаграми деформування та  $e_{cu3}$  – для дволінійної діаграми деформування), для яких у нормах [5] наведено характеристичні ( $e_{c1,ck}$  та  $e_{cu1,ck}$ ,  $e_{cu3,ck}$ ) та розрахункові ( $e_{c1,cd}$  та  $e_{cu2,cd}$ ,  $e_{cu3,cd}$ ) значення залежно від класу бетону за міцністю.

На сьогодні сформувалось загальноприйнятне уявлення про характер взаємозв'язку між граничними деформаціями та міцністю бетону в детерміністичній постановці, що свідчить про загальну тенденцію до зростання величини  $e_{c1}$ , яку спостерігають під час досягнення бетоном призмової міцності  $f_{c,prism}$ , з підвищенням міцності бетону, що супроводжується відповідним певним зменшенням значень граничних відносних деформацій стиску  $e_{cu}$ . Ці особливості встановлено ще в роботах О.Я. Берга [5] та потім їх підтвердили інші дослідники [11]. Так, доходимо висновку, що змінюючи міцність бетону під час її нормування (переходу від її середнього до нормативного та розрахункового значення) проектувальник тим самим так би мовити штучно змінює його деформаційні властивості. У такому разі досить важливим є той факт, що повні деформації бетону, навіть під час короточасного завантаження характеризуються найбільшою (порівняно з іншими характеристиками бетону) мінливістю, що за [10] залежно від рівня діючих напружень можуть сягати 35...60 %.

Необхідно також вважати, що при переході від характеристичних до розрахункових характеристик деформативності бетону в [5] застосовані загальноприйняті підходи до нормування, тобто використовуються часткові коефіцієнти надійності, що визначають співвідношення відповідних характеристичних та розрахункових значень величин, тому для подальшого аналізу введемо такі показники

$$g_{E_c} = \frac{E_{ck}}{E_{cd}}; \quad g_{e_{c1}} = \frac{e_{c1,ck}}{e_{c1,cd}}; \quad g_{e_{c3}} = \frac{e_{c3,ck}}{e_{c3,cd}}; \quad g_{e_{cu1}} = \frac{e_{cu1,ck}}{e_{cu1,cd}}, \quad g_{e_{cu,3}} = \frac{e_{cu,3,ck}}{e_{cu,3,cd}}. \quad (1)$$

Підраховані за залежностями (1) значення часткових коефіцієнтів надійності залежно від класу бетону змінюються в досить широких межах, про що свідчать графіки на рис. 1, б та 2, хоча нормативне значення мінливості міцності бетону в нормах [5] є величиною постійною, а отже, постає питання про певну методологічну неузгодженість застосованих підходів до нормування цих величин.

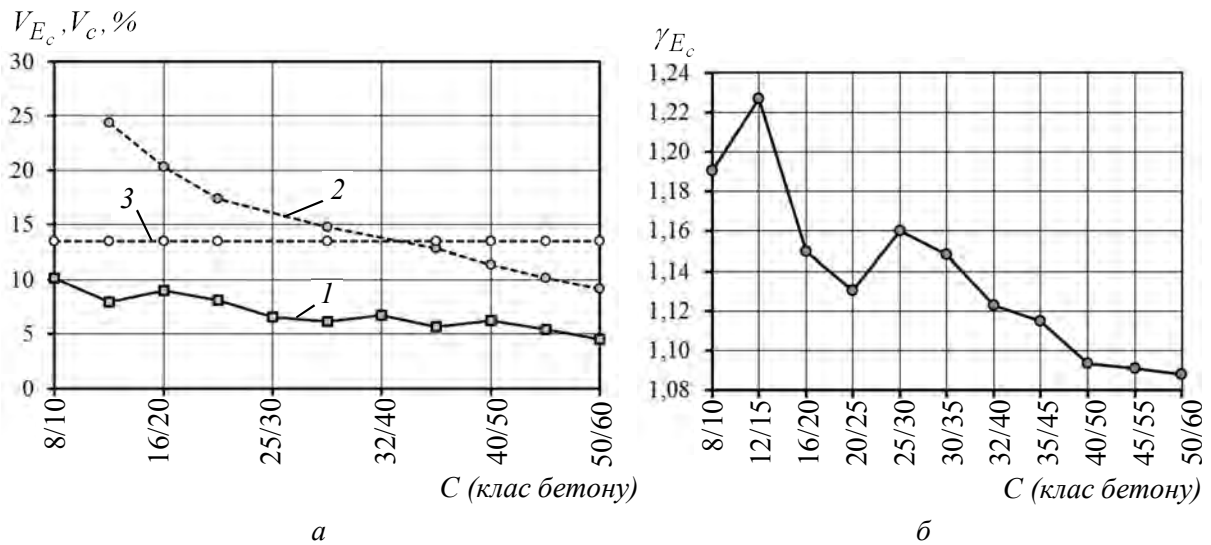


Рис. 1. Графік зміни коефіцієнта  $g_{E_c}$  та нормативної мінливості початкового модуля пружності ( $V_{E_c}$ ) та міцності бетону ( $V_c$ ) залежно від класу бетону за міцністю, отриманий за даними табл. 3.1 [5] та [17]: 1 –  $V_{E_c}$ , підраховане за даними табл. 3.1 [5]; 2 –  $V_c$ , підраховане за даними таблиці 3.1 [17]; 3 –  $V_c = 13,5\%$

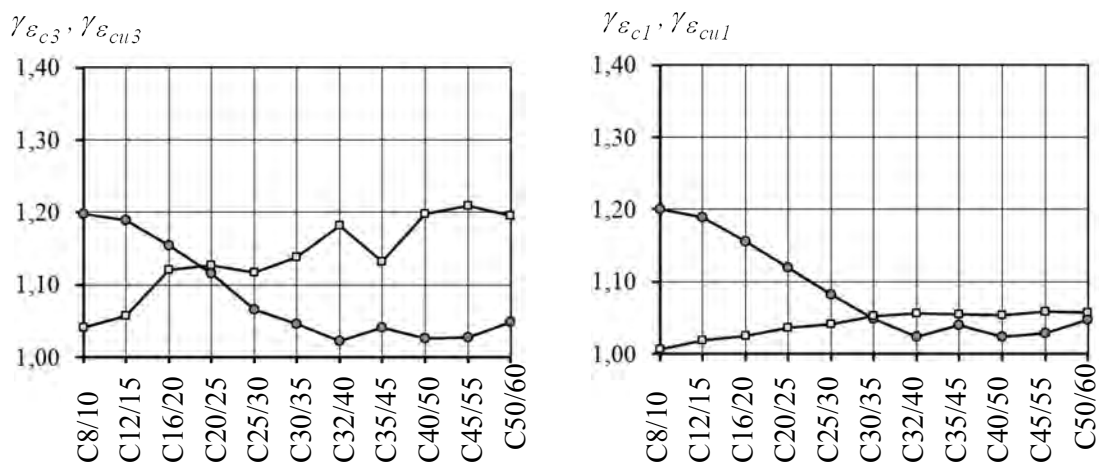


Рис. 2. Графік зміни коефіцієнтів  $g_{e_{c1}}, g_{e_{c11}}$  та  $g_{e_{c3}}, g_{e_{c33}}$  залежно від класу бетону за міцністю, отриманий за даними таблиці 3.1 [5]:  
 —□— залежності, отримані для значень відносних деформації стиску за максимальних напружень;  
 —●— залежності, отримані для відносних граничних деформації стиску

З іншого боку, в зниженні міцності бетону до її характеристичного чи розрахункового значення беруть участь фактори, що мають стохастичну та детерміновану природу. На цю особливість статистичного ланцюжку нормування звернено увагу ще в роботах О.О. Гвоздева [11] та враховано під час розробки СНиП 2.03.01-84\*, визначаючи та нормуючи коефіцієнт повноти епюри  $w$ , що встановлений з урахуванням мінливості міцності бетону  $V_c = 13,5\%$  та коефіцієнта надійності за матеріалом  $g_c = 1,3$ .

Аналогічний характер залежності нормованих точок діаграми прийнятий і в Європейських нормах [17] з тією відмінністю, що в Eurocode 2 встановлене єдине значення величини граничної деформативності бетону, що незалежно від класу становить 3,5 ‰ (для криволінійної та параболічно-прямокутної діаграм) та 1,75 ‰ (для дволінійної діаграми) незалежно від класу бетону.

Зважаючи на це, докладнішого обґрунтування потребують застосовані в ДБН В.2.6-98:2009 [5] принципи нормування розрахункових значень параметрів характерних точок діаграми деформування бетону. З цього боку, на перший погляд, обґрунтованішим здається підхід, застосований у Eurocode 2, за якого нормуються лише міцнісні характеристики бетону, тим самим забезпечуючи необхідний рівень проектної надійності конструктивних елементів.

Виконання ймовірнісного розрахунку передбачає аналіз середніх значень несучої здатності (поздовжньої сили  $N_m$  або згинального моменту  $M_m$ ), отриманих за середніми характеристиками вихідних параметрів або з експериментальну. Тому для аналітичного визначення середніх значень несучої здатності необхідно мати відповідні середні оцінки параметрів деформативності:  $e_{c1,m}$  та  $e_{cu1,m}$ ,  $e_{c3,m}$ .

У разі застосування спрощеної дволінійної діаграми  $s_c - e_c$  значення  $e_{cu3,m}$  можна досить просто підрахувати, використовуючи в встановлених залежностях [5, табл. 3.1] замість характеристичних ( $f_{ck,prism}$ ,  $E_{ck}$ ) або розрахункових ( $f_{cd}$ ,  $E_{cd}$ ) параметрів відповідно їх середніх значень:

$$e_{c3,m} = \frac{f_{cm,prism}}{E_{cm}} \quad \text{та} \quad e_{cu3,m} = 0,9e_{cu1,m}, \quad (2)$$

що не викликає ніяких ускладнень, адже середнє значення початого модуля пружності бетону  $E_{cm}$  наведене в [5], а середнє значення призмової міцності можна підрахувати, використовуючи встановлений у цих же нормах її нормативний коефіцієнт варіації.

Застосовуючи криволінійну залежність  $s_c - e_c$  виникають ускладнення зі встановленням величин  $e_{c1,m}$ , адже ДБН В.2.6-98:2009 [5] не містить аналітичних залежностей для встановлення цих параметрів, а також даних щодо застосованих принципів нормування.

Аналізуючи особливості ДБН В.2.6-98:2009 [5], потрібно зауважити, що нормування початкового модуля пружності бетону у вітчизняній історії нормування розрахунку залізобетонних конструкцій у цьому документі введено вперше. Так, у [5] встановлено середні ( $E_{cm}$ ), характеристичні ( $E_{ck}$ ) та розрахункові ( $E_{cd}$ ) значення початкового модуля пружності бетону. Потрібно зауважити, що в радянському СНиП 2.03.01-84\* встановлено лише середні значення початкового модуля пружності бетону (із забезпеченістю 0,5), визначені за нормованої мінливості міцності бетону 13,5 % [9].

Що стосується величини нормативної мінливості цього параметру, то хоча в ДБН В.2.6-98:2009 [5] безпосередньо не вказаний коефіцієнт варіації початкового модуля пружності ( $V_{E_c}$ ), його можна досить легко підрахувати, використовуючи відповідні середні ( $E_{cm}$ ) та характеристичні значення ( $E_{ck}$ ) у припущенні нормального розподілу та нормованій забезпеченості 0,95 величини  $\tilde{E}_c$ . Виконавши відповідні розрахунки, отримаємо характер зміни коефіцієнта варіації початкового модуля пружності бетону залежно від його класу за міцністю (рис. 1, а), що змінюється від 10,2 до 4,6 % зі зростанням класу бетону та свідчить про більшу однорідність деформаційних властивостей бетону порівняно з його міцнісними властивостями. Водночас прямі дослідження, проведені з метою статистичного вивчення початкового модуля пружності бетону [10], не підтверджують ці висновки і свідчать про значне (майже удвічі) перевищення мінливості деформаційних властивостей бетону над його міцнісними характеристиками.

Для подальшого порівняльного аналізу надійності розрахункового апарату за різними нормами, перш за все, необхідно встановити можливі «джерела» ентропії досліджуваних розрахункових моделей, а також кількісно описати всі стохастичні параметри, сукупність яких загалом і визначає показники проектної надійності конструктивних елементів.

## Висновки

У статті окреслено низку невирішених питань, що виникають під час запровадження нелінійних деформаційних методів (деформаційної моделі) розрахунку сталезалізобетонних конструкцій у сучасні вітчизняні будівельні норми з боку вимог та механізмів забезпечення необхідного рівня надійності об'єктів будівництва. Проведений аналіз дає змогу зробити висновок, що втрати інформації за рахунок суттєвої невизначеності (ентропії) вихідних даних подекуди можуть суттєво перевищувати її уточнення внаслідок ускладнення розрахункової моделі. Так, постає питання про обґрунтування доцільності та меж уточнення розрахункових моделей у випадку, коли вихідні дані мають суттєву ентропію, адже точність отриманих результатів розрахунку не може бути вищою від точності вихідних даних. Це, своєю чергою, зумовлює необхідність перегляду досить довгого статистичного ланцюжку нормування вихідних параметрів розрахунку, а також дослідження та нормування показників проектної надійності конструкцій з урахуванням надійності прийнятих розрахункових моделей.

1. Бамбура А. М. Точність та надійність розрахункового апарату за ДСТУ Б В.2.6-156:2010 / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение* : сб. науч. трудов. – Дн-ск : ПГАСА, 2012. – Вып. 65. – С. 14–18.
2. Барзилович Д. В. Развитие национальной нормативной базы в строительстве Украины / Д. В. Барзилович, В. Г. Тарасюк, П. І. Кривошеев // *Будівельні конструкції* : сб. науч. праць : у 2-х кн. – К. : ДП. НДІБК, 2011. – Кн. 1, Вып. 75. – С. 9–17.
3. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1961. – 96 с.
4. ДБН А.1.1-94:2010. Система стандартизації та нормування у будівництві. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення : уведено вперше ; чинний з 2013–07–01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2012. – 22 с.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : на заміну СНиП 2.03.01-84\* ; чинний з 2011–07–01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 70 с.
6. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення : чинний з 2011–09–01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
7. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : чинний з 2011–06–01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
8. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Настанова. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDN) : чинний з 2009–04–30 – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 81 с.
9. Краковский М. Б. Надежность конструкций, проектируемых по советским и зарубежным нормам // *Бетон и железобетон*. – 1989. – №6. – С. 38 – 40.
10. Лычев А. С. Надежность строительных конструкций : учеб. пособие / А. С. Лычев. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.
11. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / [А. А. Гвоздев, С. А. Дмитриев, Ю. П. Гуца и др.] ; под ред. А. А. Гвоздева. – М. : Стройиздат, 1978. – 204 с.
12. Пичугин С. Ф. Оптимизация рисков в строительстве с учетом параметра экономического ущерба / С. Ф. Пичугин, А. В. Семко, Е. П. Воскобойник // *Сборник докладов всероссийской научной конференции с элементами научной школы для молодежи «Научные чтения памяти Ю.Б. Монфреда»* ; под ред. Ю. Н. Кулакова. – М. : МГСУ, 2011. – С. 59 – 70.
13. Семко О. В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій : монографія / О. В. Семко. – К. : Сталь, 2004. – 316 с.
14. Семко О. В. Керування ризиками при проектуванні та експлуатації сталезалізобетонних конструкцій : монографія / О. В. Семко, О. П. Воскобойник. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – 514 с.
15. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст] / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 77 с.
16. Усаковский С. Б. С какой точностью вести расчеты сооружений : монография / С. Б. Усаковский. – К. : КНУСА, 2005. – 160 с.
17. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. EN 1992-1-1:2004 Part 1-1: General rules and rules for building.
18. EN 1992 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. EN 1994-1-1:2004 Part 1-1: General rules and rules for building.
19. Sykora M., Cervenka V., Holisky M. Assessment of model uncertainties in the analysis of reinforcement concrete structures // *18<sup>th</sup> International Conference «Engineering Mechanics 2012»*. – Svatka, Czech Republic, May 14–17, 2012. – P. 1263–1272.