



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2011, ТОМ 17, НОМЕР 4, 285–297

УДК 624.046.5

(11)-0254-0

ДО ПИТАНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

А. В. Махінько

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,

Першотравневий пр., 24, м. Полтава, Україна, 36011.

E-mail: pasargada@mail.ru

Отримана 8 липня 2011; прийнята 25 листопада 2011.

Анотація. У статті розглянуті питання визначення оптимального рівня надійності будівельних об'єктів з позицій економіко-ймовірнісних методів та теорії апріорних ризиків. При побудові моделі використовується багаторічний досвід розрахунку надійності металоконструкцій у різній ймовірнісній техніці. У тому числі загальні закономірності для кривих відмов, їх асимптотична поведінка, положення у порівняльному ряді надійності конструкцій, що знаходяться у стані експлуатації. Матеріал викладається безвідносно до розрахункових схем будівель та споруд і виду їх завантаження випадковими впливами. У практичних розрахунках пропонується оперувати простими математичними моделями із безрозмірними параметрами. Соціально-економічна значимість об'єктів враховується добре відомим «Параметром Економічних Збитків». Застосування запропонованої моделі проілюстровано на прикладі ймовірнісної оптимізації баштових опор радіорелейного зв'язку. Сформульовані підходи можуть бути покладені в основу нормування коефіцієнта відповідальності будівель та споруд, а також використані для визначення актуарних ризиків при страховій оцінці будівельних об'єктів.

Ключові слова: оптимальний рівень надійності, ймовірність відмови, ризик відмови, параметр економічних збитків, економіко-ймовірнісні методи, випадкові впливи, ймовірнісна оптимізація, соціально-економічна значимість.

К ВОПРОСАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. Махінько

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

Первомайский пр., 24, г. Полтава, Украина, 36011.

E-mail: pasargada@mail.ru

Получена 8 июля 2011; принята 25 ноября 2011.

Аннотация. В статье затронуты вопросы определения оптимального уровня надёжности строительных объектов с позиций экономико-вероятностных методов и теории апріорных рисков. При построении модели используется многолетний опыт расчёта надёжности металлоконструкций в различной вероятностной технике. В том числе общие закономерности для кривых отказов, их асимптотическое поведение, положение в сопоставительном ряду надёжности эксплуатируемых конструкций. Материал излагается безотносительно к расчётным схемам сооружений и вида их загрузки случайными воздействиями. В практических расчётах предлагается оперировать простыми математическими моделями с безразмерными параметрами. Социально-экономическая значимость объектов учитывается общеизвестным и хорошо зарекомендовавшим себя «Параметром Экономического Ущерба». Применение предлагаемой модели проиллюстрировано на примере вероятностной оптимизации башенных

опор радиорелейной связи. Сформулированные подходы могут быть положены в основу нормирования коэффициента ответственности зданий и сооружений, а также использованы для определения актуарных рисков при страховой оценке строительных объектов.

Ключевые слова: оптимальный уровень надёжности, вероятность отказа, риск отказа, параметр экономического ущерба, экономико-вероятностные методы, случайные воздействия, вероятностная оптимизация, социально-экономическая значимость.

TO QUESTIONS OF OPTIMUM RELIABILITY OF BUILDING STRUCTURES

Anton Makhinko

*Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk,
24, Pervomaysky pr., Poltava, Ukraine, 36011.
E-mail: pasargada@mail.ru*

Received 8 July 2011; accepted 25 November 2011.

Abstract. In this article questions of optimum level reliability of building structures are considered from economic-probabilistic positions and aprioristic risks theory. The model is formulated on the basis of long-term experiences of reliability estimation of steel structures in the various probabilistic technic. In the model are used general laws for structures failure, property of failure curve, structures reliability which is designed on codes. The material is stated regardless to design schemes of structures and stochastic loads. In practical calculations it is offered to operate with simple mathematical models with dimensionless parameters. The social and economic importance of building structures is considered by all known and well proved Parameter of the Economic Damage. Application of offered model is illustrated on an example of probabilistic optimisation of steel community tower. The formulated approaches can be taken as a principle rationing of responsibility factor of buildings structures and also are used for definition of risks at insurance estimation of building structures.

Keywords: reliability optimum level, failure probability, failure risk, parameter of an economic damage, economic-probabilistic methods, stochastic loads, probabilistic optimisation, social and economic importance.

Формулювання проблеми

Проектування будівельних об'єктів різного призначення та різного конструктивного вирішення пов'язано із аналізом необхідного рівня надійності. Якщо мова йде про економічні збитки, які можуть бути наслідком відмови, то всі питання вирішуються шляхом співставлення витрат на забезпечення необхідного рівня надійності та збитків від можливої відмови. Для будівельних об'єктів з неекономічною відповідальністю, відмова яких пов'язана із людськими жертвами, математичний аспект задачі додатково підсилюється компромісними міркуваннями про допустимий рівень національної моралі. Обидва сформульовані

напрями є предметом оптимізаційної теорії апріорних ризиків, яка в сучасних дискусійних питаннях надійності будівельних конструкцій посідає далеко не останнє місце. На цей момент дана теорія, отримала доволі потужного розвитку і претендує, якщо не на економіко-ймовірнісне обґрунтування ряду розрахункових коефіцієнтів методу граничних станів, то на закулісний аргумент в питаннях аналізу проектної надійності конструкцій. Проте більшість сучасних положень теорії «будівельних» ризиків носять узагальнений якісний характер, не акцентуючи увагу на кількісних властивостях складових ризику, а зроблені висновки дійсні тільки для обмежених задач реального проектування.

Аналіз останніх досліджень та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Питання визначення оптимальної надійності будівельних об'єктів неодноразово ставилось протягом всієї історії розвитку ймовірнісних методів. Відмітимо у зв'язку з цим піонерні роботи О. Р. Ржаніцина, Б. І. Снарскиса, А. Я. Дривінга та Ю. Д. Сухова [4, 13, 17, 18]. Корисними для даної публікації будуть економіко-ймовірнісні дослідження Ю. Д. Арсеньєва [1], Г. Аугусті, А. Баратта, Ф. Кашіати [2], В. М. Гордеева, М. О. Микитаренка, А. В. Перельмутера [3, 8, 9], А. П. Мельчакова [7], О. В. Семка [14–16], О. Г. Тамразяна [19], М. Б. Лісюка, В. М. Уліцького [20], С. Б. Усаковського [21, 22], Г. Шпете [23], Т. Bedford, R. Cooke [24], Н. Kumamoto, E. J. Henley [25], B. R. Ellingwood [26], а також наукові пошуки, виконанні автором у співпраці із С. Ф. Пічугіним [5, 6, 10, 11, 12]. Вказані роботи по суті сформували сьогоденне бачення оптимізаційних проблем надійності будівель та споруд, але більшість з них носили або постановочний характер, або орієнтувались на деякі прості розрахункові ситуації без формулювання узагальнених висновків та рекомендацій.

Формулювання цілей статті

У цій роботі, на базі набутого досвіду попередніх досліджень, автор намагався сформулювати загальний підхід до оцінки оптимального рівня надійності будівельних об'єктів. При цьому як вихідні положення не накладалися обмеження на вигляд кривої відмов конструкцій та специфіку їхньої роботи під впливом випадкових навантажень.

Виклад основного матеріалу

В умовах сьогодення існує безліч визначень ризику, породжених у різних ситуаційних контекстах і різноманітними особливостями застосування. З найбільш розповсюдженої точки зору, ризик виступає скалярною величиною, пропорційною збиткам, які можуть бути завдані ризиковою подією, та ймовірності реалізації цієї події. Різниця у визначеннях ризику залежать від контексту збитків та їх оцінки і виміру. Загалом можна виділити дві давно сформовані точ-

ки зору на ризик. Перша оснований на наукових і технічних оцінках: так званий теоретичний ризик, друга залежить від людського сприйняття ризику: так званий ефективний ризик. Незважаючи на те, що ці дві точки зору безперервно конфліктують на суперечливому полі людської моралі, вони доволі тісно переплітаються і навіть підмінюють одна одну в задачах порівняльного аналізу ризиків. В останні роки у зв'язку із появою нового напрямку теорії ймовірності – евентології – виникло поняття «евентологічного ризику», яке можна розглядати як перший вагомий крок об'єднати в одному понятті теоретичний та ефективний ризик. В рамках цієї роботи головний акцент буде зроблений на ефективному ризику, як найбільш вживаного у технічних дисциплінах.

Ефективний ризик, орієнтуючись на багатогранність людського сприйняття, безпосередньо та однозначно виміряти неможливо, але існують багато неформальних методів, які залучаються для його кількісної оцінки. Одним з таких прийомів неформальних методів є метод вартісних оцінок VaR (Value at Risk – вартісна міра ризику), який формалізує ризик R_Q у вигляді добутку ймовірності реалізації небажаної події Q та кількості втрачених коштів C в результаті цієї події. У будівельній галузі як «небажана подія» розуміється настання граничного стану (відмова) будівельного об'єкта, а кількісна міра завданої шкоди звичайно оцінюється безрозмірним параметром економічних збитків (ПЕЗ) [8, 9], як відношення міри C до кошторисної вартості об'єкта $C_H(Q)$, функціонально пов'язаної із ймовірністю Q . Очевидно, що ймовірність реалізації відмови можна зменшити за рахунок додаткових капіталовкладень $C_H(Q)$, але це породжує іншого роду ризик – ризик перевитрат коштів $R_C(Q)$. В результаті сумарний ризик R_Σ визначається класичною алгебраїчною сумою (рис. 1):

$$\begin{aligned} R_\Sigma(Q) &= R_C(Q) + R_Q(Q) = \\ &= C_H(Q) \cdot k_C + C \cdot Q = C_H(Q) \cdot k_C \cdot (1 + \text{ПЕЗ} \cdot Q), \quad (1) \end{aligned}$$

де k_C – деякий коефіцієнт пропорційності між $C_H(Q)$ та $R_C(Q)$.

Мінімізуючи вираз (1) за ймовірністю відмови Q , можна встановити ті її значення Q_{opt} , які можна буде вважати оптимальними із суто економічних або еквівалентно-економічних вимог. Неважко помітити, що процедура оцінки

цих значень багато в чому визначатиметься математичною структурою функції $C_H(Q)$, зокрема її асимптотичними властивостями. Як не дивно, на це майже не звертається уваги в роботах із теорії «будівельних» ризиків, а тому представляється цікавим розглянути її більш

детально. Багаторічний аналіз ймовірнісних розрахунків на різні комбінації випадкових навантажень, описаних до того ж різними ймовірнісними моделями, дає підстави зробити висновок про те, що залежність $C_H(Q)$ можна представити у вигляді (рис. 2):

$$\lg[Q(C_H)] = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq C_H < C_{H,A}; \\ \lg(Q_0) \cdot (C_H - C_{H,A}) / \Delta C_H & \text{при } C_{H,0} \leq C_H < C_{H,B}; \\ \lg(Q_0) & \text{при } C_H \geq C_{H,B}; \end{cases} \quad (2)$$

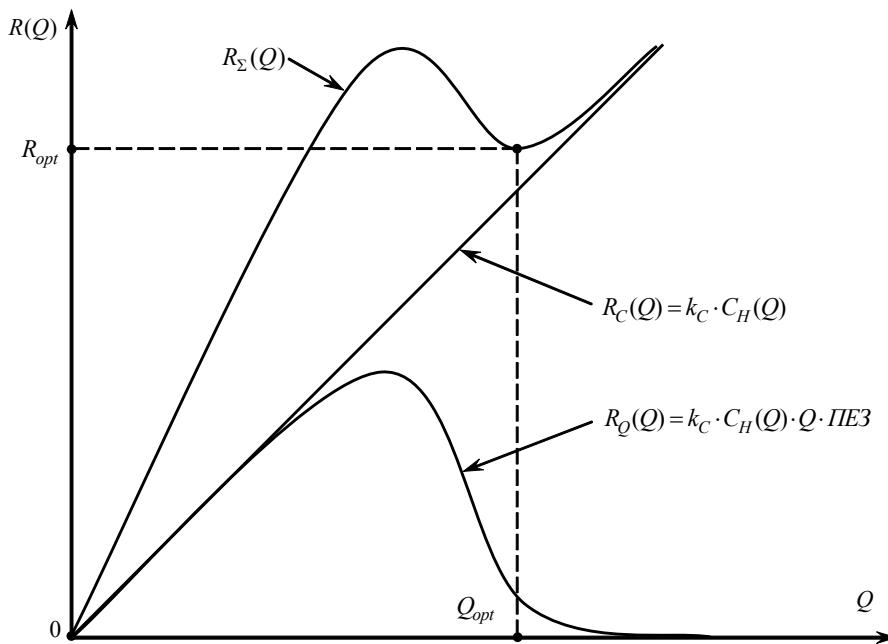


Рисунок 1. Нормування надійності конструкцій з позицій економіко-ймовірнісних методів.

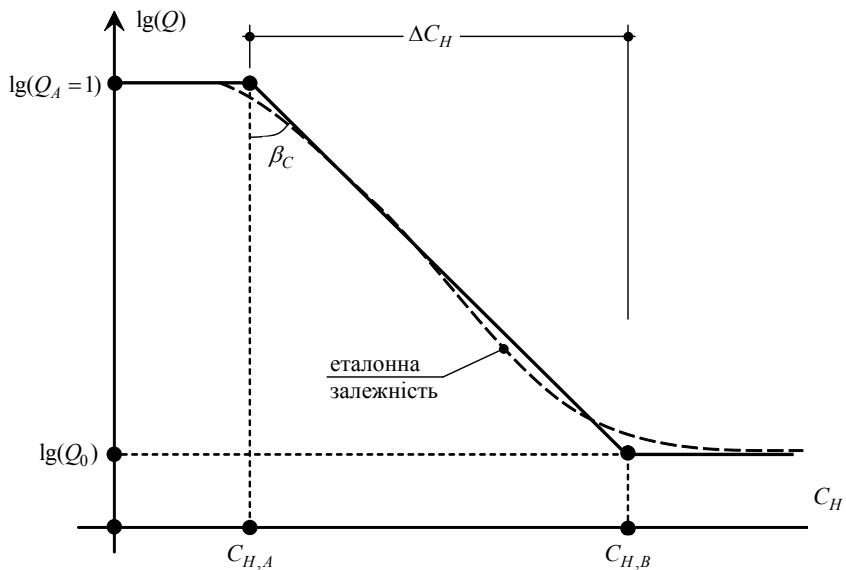


Рисунок 2. Фундаментальна залежність ймовірності відмови конструкції від її вартості.

Звідси можна отримати, що кошторисна вартість об'єкта запишеться як

$$C_H(Q) = C_{H,A} + \Delta C_H \cdot \lg(Q) / \lg(Q_0). \quad (3)$$

Підставимо залежність (3) у загальний вираз (1):

$$\begin{aligned} \Sigma R &= [C_{H,A} + \Delta C_H \cdot \lg(Q) / \lg(Q_0)] \cdot [1 + Q \cdot ПЕЗ] = \\ &= C_{H,A} + \Delta C_H \cdot \ln(Q) / \ln(Q_0) + \\ &+ ПЕЗ \cdot [C_{H,A} \cdot Q + \Delta C_H \cdot \ln(Q) \cdot Q / \ln(Q_0)]. \quad (4) \end{aligned}$$

Введемо для скорочення форми запису позначення вигляду:

$$ПНО = 1 + \ln(Q_0) \cdot C_{H,A} / \Delta C_H. \quad (5)$$

Коефіцієнту *ПНО*, який виступає однозначною характеристикою функціонального зв'язку $C_H(Q)$, дамо назву параметра надійності об'єкта. Для сумарного ризику на основі прийнятого позначення запишемо:

$$\Sigma R = C_{H,A} \cdot k_c \cdot [1 + ПЕЗ \cdot Q] \cdot \left[1 + \frac{\ln(Q)}{(ПНО - 1)} \right]. \quad (6)$$

Мінімізуючи даний вираз за ймовірністю відмови, будемо мати:

$$1/Q + ПЕЗ \cdot [ПНО + \ln(Q)] = 0. \quad (7)$$

Слід відмітити, що розв'язання рівняння (7) не виражається через елементарні функції, але його можна представити через *W*-функцію Ламберта $W_{Lam}(z)$:

$$Q_{opt} = \exp \left\{ -ПНО + W_{Lam} \left[-\frac{\exp(ПНО)}{ПЕЗ} \right] \right\}. \quad (8)$$

Функція Ламберта $W_{Lam}(z)$ не є типовою функцією класичного курсу вищої математики і до кінця 80-х років минулого століття взагалі не мала самостійного визначення та назви. Як самостійна функція була вперше введена у системі комп'ютерної алгебри Maple, а на сьогодні реалізована у більшості провідних математичних пакетів (Maple, MathCAD, MatLab, QCDINS та ін.).

Таким чином, рівень надійності Q_{opt} , який можна буде вважати оптимальним із чисто економічних умов, залежить від двох безрозмірних величин: параметра економічних збитків *ПЕЗ* і параметра надійності об'єкта *ПНО*. На рис. 3 наведені деякі корисні резуль-

тати, отримані на основі залежності (8) при різних значеннях параметра *ПНО*.

Порівнюючи криві, побудовані при різних вихідних даних, легко помітити, що оптимальний рівень надійності зростає по мірі росту (за модулем) параметра *ПНО*, при цьому швидкість цього зростання зберігає приблизно сталі значення. Звертає на себе увагу і прямолінійний характер кривих на подвійній логарифмічній площині, що дозволяє без особливих ускладнень виконувати апроксимацію еталонних залежностей. Важливою особливістю виразу (8) є те, що при *ПНО* = 1 ймовірність Q_{opt} набуває своїх найменших значень, а тому являє собою нижню границю оптимальної надійності об'єкта. До речі, очевидно, що для того, щоб *ПНО* = 1, необхідно, щоб кошторисна вартість будівельного об'єкта, при якій спостерігається монотонне зростання його надійності (рис. 3), дорівнювала нулю. Незважаючи на певну ідеалізацію такого випадку, до нього можна звести цілий ряд задач. Головне, щоб характерна характеристика поперечного перерізу змінювалась в доволі вузьких межах.

Сформульована схема оцінки оптимального рівня надійності будівельних об'єктів виглядає доволі універсальним інструментом оптимального проектування, так як незалежно від конструктивних схем останніх дозволяє узагальнити зміст та реалізацію розрахункових процедур. Проте очевидно, що вона має силу лише для тих об'єктів, для яких кошторисна вартість $C_H(Q)$ знаходиться у безпосередньому функціональному зв'язку від вартості складових об'єкта. Наприклад, розглянемо суцільночасту та ґратчасту опори зв'язку, критерієм відмови для яких є недотримання вимог жорсткості. Для першої опори зміна кошторисної вартості завжди буде тягти за собою зміну її надійності, а для другої опори – ця тенденція буде мати не обов'язковий характер. Справа в тому, що кошторисна вартість ґратчастої опори може бути змінена як за рахунок варіювання поперечних перерізів як поясів, так і решітки. Остання, як відомо, на жорсткість опори впливає опосередковано, а тому збільшення поперечних перерізів її елементів викликати зростання величини C_H при сталості Q . В геометричному сенсі це відповідатиме появи додаткової горизонтальної ділянки на рис. 2.

Подібна ситуація матиме місце, коли за відмову гратчастої опори приймається відмова одного із її поясів на конкретному висотному рівні (наприклад, на рівні основи). Дійсно, кошторисна вартість башти в цілому визначатиметься вартістю відповідальних елементів (поясів) $C_{H,0}$, яка буде функціонально пов'язана із ймовірністю відмови Q та вартістю інших елементів $C_{H,E}$ не пов'язаних або слабо пов'язаних із Q (елементи решітки або пояси суміжних ярусів). При такому підході сумарний ризик $R_{\Sigma}(Q)$ запишеться у більш розгорнутому вигляді:

$$R_{\Sigma}(Q) = k_C \cdot [C_{H,E} + C_{H,0}(Q)] \cdot (1 + ПЕЗ \cdot Q). \quad (9)$$

Використаємо для функції $C_{H,0}(Q)$ апроксимацію (2) і виконаємо ряд алгебраїчних спрощень та перетворень:

$$R_{\Sigma}(Q) = k_C \cdot \Delta C_H \cdot (1 + ПЕЗ \cdot Q) \cdot [ПНО + ПСВ - 1 + \ln(Q)] / \ln(Q_0), \quad (10)$$

$$ПСВ = \ln(Q_0) \cdot C_{H,E} / \Delta C_H, \quad (11)$$

де параметр $ПСВ$ позиціонуватимемо як параметр системної відповідальності об'єкта; підкреслимо, що при визначенні параметрів

$ПНО$ і $ПСВ$ величини $C_{H,A}$, ΔC_H характеризують кошторисну вартість тих елементів, які безпосередньо впливають на надійність об'єкта в цілому, а величина $C_{H,E}$ – кошторисну вартість інших елементів.

Мінімізуючи вираз (10) за ймовірністю відмови Q , дістанемо розширений аналог рівняння (7):

$$1/Q + ПЕЗ \cdot [ПНО + ПСВ + \ln(Q)] = 0. \quad (12)$$

Розв'язуючи дане рівняння відносно Q , остаточно отримаємо:

$$Q_{opt} = \exp \left\{ -ПНО - ПСВ + W_{Lam} \left[-\frac{\exp(ПНО + ПСВ)}{ПЕЗ} \right] \right\}. \quad (13)$$

Для вироблення узагальнених практичних рекомендацій зауважимо, що ймовірність Q_0 не обов'язково призначати кожного разу, керуючись специфікою розрахункової ситуації. Достатньо обрати один раз таке її значення, яке обмежуватиме праворуч зону можливих значень економічно доцільної ймовірності відмови Q_{opt} . Як таке значення нами рекомендується

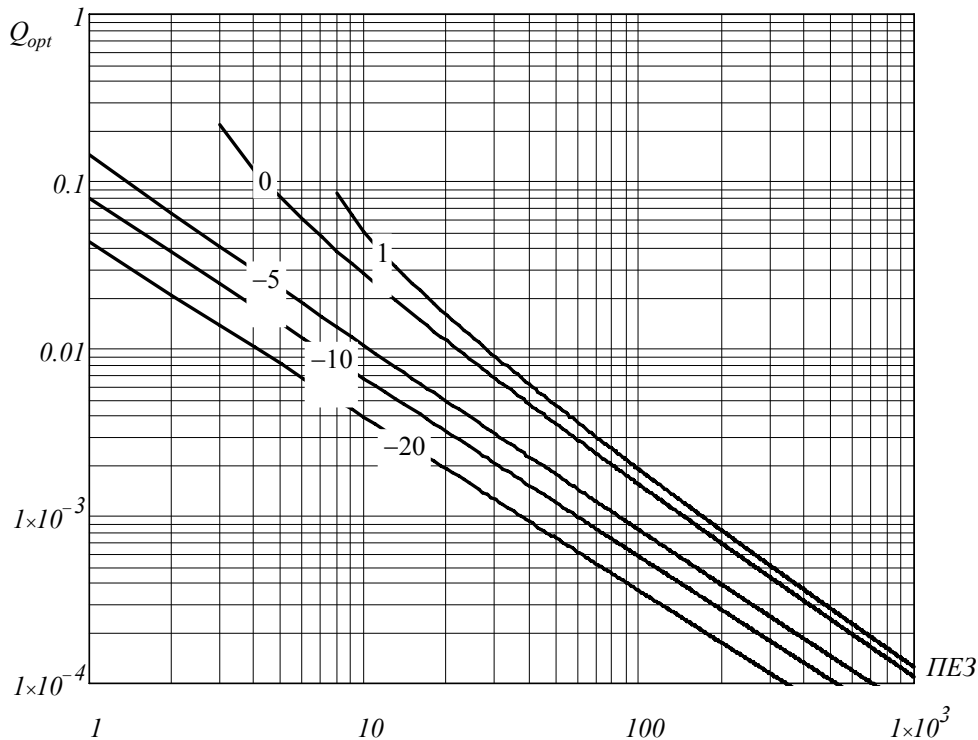


Рисунок 3. Оптимальні рівні надійності будівельних об'єктів як функції ПЕЗ та ПНО.

ся $Q_0 = 1,4 \cdot 10^{-11}$. Це дозволить вирази для параметрів надійності об'єкта і системної відповідальності спростити, записавши їх тільки через аргументи вартості:

$$\begin{aligned} ПНО &= 1 - 25 \cdot C_{H,A} / \Delta C_H \\ ПСВ &= -25 \cdot C_{H,E} / \Delta C_H \end{aligned} \quad (14)$$

Графічна інтерпретація виразу (13) для різних значень параметра ПСВ наведена на рис. 4. Із графічних побудов можна спостерігати, що в цілому залежність оптимального рівня надійності має характер подібний до описаного вище на рис. 3. При цьому зростання ймовірності Q_{opt} із збільшенням параметра системної відповідальності пояснюється не тільки математичною структурою виразу (13), але й чисто логічними міркуваннями: чим важливішу роль відіграють відповідальні елементи у складі будівельного об'єкта, тим раціональніше призначити високу нормативну ймовірність їх відмови.

Для ілюстрації сформульованих положень розглянемо баштову опору, відмова якої настає у випадку перевищення випадковим напруженням в поясах на рівні основи випадкового рівня межі плинності сталі. Так як опора являє

собою звичайну просторову стрижневу систему, то її кошторисна вартість становитиме:

$$C_H(Q) = C_{H,0}(Q) + C_{H,E} = k_C \cdot \rho_s \cdot n_0 \cdot A_0(Q) \cdot \ell_0 + k_C \cdot \rho_s \cdot \sum_i A_i \cdot \ell_i, \quad (15)$$

де ρ_s – щільність матеріалу опори; ℓ_0 і $A_0(Q)$ – довжина та площа поперечного перерізу елементів, відмова яких призводить до відмови опори в цілому, а n_0 – кількість таких елементів; ℓ_i та A_i – довжини та площі поперечних перерізів інших елементів опори.

Беручи до уваги наші попередні роботи [5, 6], площу поперечного перерізу $A_0(Q)$ можна виразити через відношення математичних сподівань $k_s(Q)$ несучої здатності елемента у просторі напружень $\bar{\sigma}_y$ та максимумів осевих зусиль \bar{N}_{max} . Тоді вираз (15) переписеться у наступній формі:

$$C_H = k_C \cdot (a_H \cdot k_s + b_H), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} a_H &= \rho_s \cdot n_0 \cdot \ell_0 \cdot \bar{N}_{max} / \bar{\sigma}_y, \\ b_H &= \rho_s \cdot \sum_i A_i \cdot \ell_i \end{aligned} \quad (17)$$

де коефіцієнт k_s визначається за нижченаведеним виразом при $Q(t) = n_0 \cdot Q$:

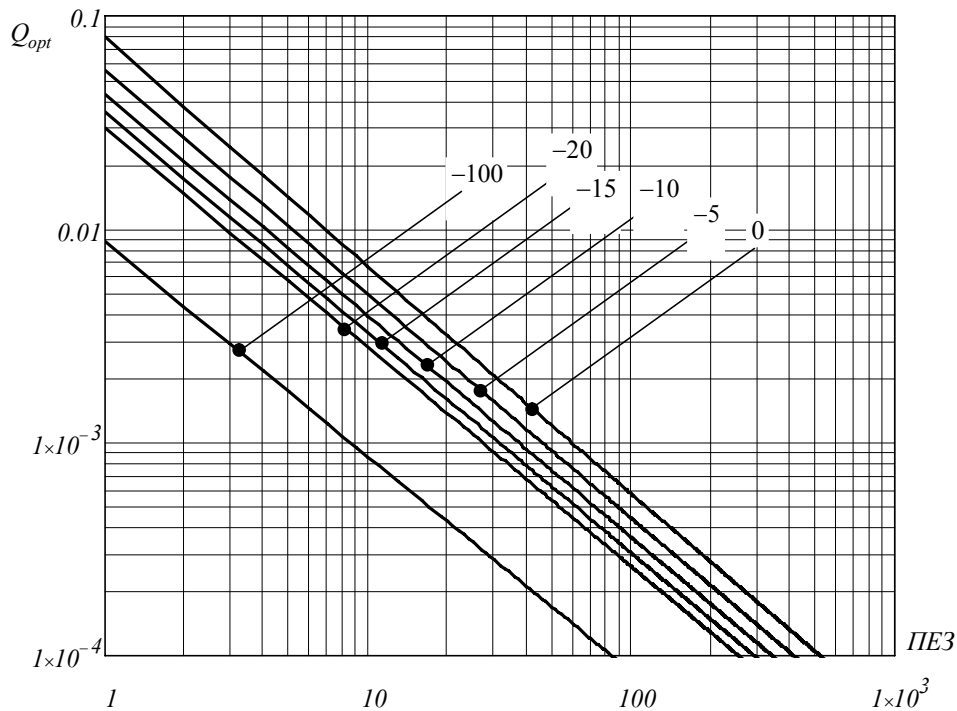


Рисунок 4. Оптимальні рівні надійності будівельних об'єктів як функції ПЕЗ та ПСВ (при ПНО = -10).

$$k_S = \frac{\sqrt{6} \cdot V_{R,max}}{\pi \cdot V_S^2} \times \left[1 - \sqrt{1 + 2 \cdot V_S^2 \cdot \left(\ln Q(t) - \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{V_{R,max}} + C_{Ei} \right)} \right], \quad (18)$$

де V_S – коефіцієнт варіації несучої здатності поясу опори у просторі поздовжніх зусиль; $V_{R,max}$ – коефіцієнт варіації випадкового процесу максимумів поздовжніх зусиль в поясі опори; $C_{Ei} = 0,577$ – постійна Ейлера-Маскерони; Q – ймовірність відмови поясу.

Неважко буде впевнитися, що в рамках прийнятих позначень параметри ПНО та ПСВ за формулами (14) будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} \text{ПНО} &= 1 - 25 \cdot \frac{k_{S,A}}{k_{S,B} - k_{S,A}}, \\ \text{ПСВ} &= -25 \cdot \frac{\mu_{ba}}{k_{S,B} - k_{S,A}}, \end{aligned} \quad (19)$$

де коефіцієнти $k_{S,B}$ та $k_{S,A}$ відшукуються за формулою (18) при відповідній ймовірності відмови: $Q_0 = 1,4 \cdot 10^{-11}$ для $k_{S,B}$ та $Q_A = 1,0$ для $k_{S,A}$; $\mu_{ba} = b_H/a_H$ – безрозмірний коефіцієнт, який слугує характеристикою важливості тих елементів опори, відмова яких аналізується та призводить до каскадної відмови інших елементів опори металоємністю b_H .

Слід відмітити, що навіть побіжного погляду на формулу параметра системної відповідальності у формі (19) достатньо, щоб помітити можливу реалізацію великих значень останньої. Наприклад, для опор висотою більше ніж 150 м параметр ПСВ може бути за модулем більше за 1 000. Відповідно й рівень надійності, який буде розцінюватись економічно доцільним для заданого конструктивного елемента, також буде достатньо високим. Проте підкреслимо, що це буде оптимальна надійність тільки елемента, а не всього об'єкта, а тому, якщо цей елемент (або елементи) суттєво впливає на надійність будівельного об'єкта в цілому, то абсолютно логічно висувати до нього підвищені вимоги надійності. Очевидно, що даними міркуваннями, які сприймаються на напівінтуїтивному рівні, завжди керуються досвідчені інженери, приймаючи для нижніх секцій поясів або опорних розкосів перерізи стержнів дещо більшими, ніж того вимагають нормативні

підходи і дозволяють собі підбирати «без запасу» перерізи менш відповідальних елементів, наприклад розпірок, допоміжних розкосів або діафрагм.

Для подальшої конкретизації виразів (19) виконаємо обчислення коефіцієнтів $k_{S,A}$ та $k_{S,B}$, які, відповідно до виразу (18), залежать від трьох аргументів: коефіцієнтів варіації несучої здатності V_S і максимумів реакції $V_{R,max}$ та ймовірності відмови Q . Коефіцієнти V_S , $V_{R,max}$ характеризуються доволі вузьким діапазоном можливих значень: $V_S \in [0,05; 0,15]$ та $V_{R,max} \in [0,1; 0,3]$, що дозволяє розглянути чотири розрахункових випадки: (А) $V_S = 0,05$, $V_{R,max} = 0,10$; (В) $V_S = 0,05$, $V_{R,max} = 0,30$; (С) $V_S = 0,15$, $V_{R,max} = 0,10$ та (D) $V_S = 0,15$, $V_{R,max} = 0,30$. Результати обчислень коефіцієнтів $k_{S,A}$ та $k_{S,B}$, а також їх різниці $\Delta k_S = k_{S,B} - k_{S,A}$ наведені нижче:

Випадок	А	В	С	Д
$k_{S,A}$	1,0	0,9	1,0	0,9
$k_{S,B}$	3,0	6,9	3,15	7,3
Δk_S	2,0	6,0	2,15	6,4

Підставляючи обчислені значення у формули (19) параметрів надійності будівельного об'єкта та системної відповідальності, після нескладних обчислень отримаємо їх двосторонні оцінки у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{ПНО}_\downarrow &= -2,5; & \text{ПСВ}_\downarrow &= -3,9 \cdot \mu_{ba}; \\ \text{ПНО}_\uparrow &= -11,5; & \text{ПСВ}_\uparrow &= -12,5 \cdot \mu_{ba}. \end{aligned} \quad (20)$$

На рис. 5а показані функціональні залежності ймовірності відмови баштової опори від коефіцієнта k_S для чотирьох задекларованих вище випадків, а на рис. 5б – часткові та повні ризики для двох крайніх випадків. Із рисунків можна бачити, що коефіцієнт варіації несучої здатності відповідального елемента несуттєво впливає на положення точки оптимальної надійності (криві $Q(k_S)$ при різних V_S проходять на незначному віддаленні одна від одної). Тому при формулюванні узагальнених висновків стохастичною мінливістю несучої здатності доцільно знехтувати, оперуючи її максимальним значенням. Для коефіцієнта варіації реакції $V_{R,max}$ подібна тенденція немає місця. Більше того, точка оптимальної надійності при зрос-

танні $V_{R, \max}$ поступово зміщується праворуч, тобто із збільшенням стохастичної невизначеності зовнішнього впливу, оптимальний рівень надійності зменшується. Цей дивний, на перший погляд, феномен можна пояснити тим, що економічно доцільніше витратити кошти на вивчення випадкових впливів на будівельні об'

єкти, ніж висувати до них підвищені вимоги надійності в умовах невизначеності.

Підставивши формули (20) у загальний вираз оптимальної надійності (13), отримуємо двосторонню оцінку величини Q_{opt} як функцію параметра економічного збитку ПЕЗ та коефіцієнта важливості μ_{ba} :

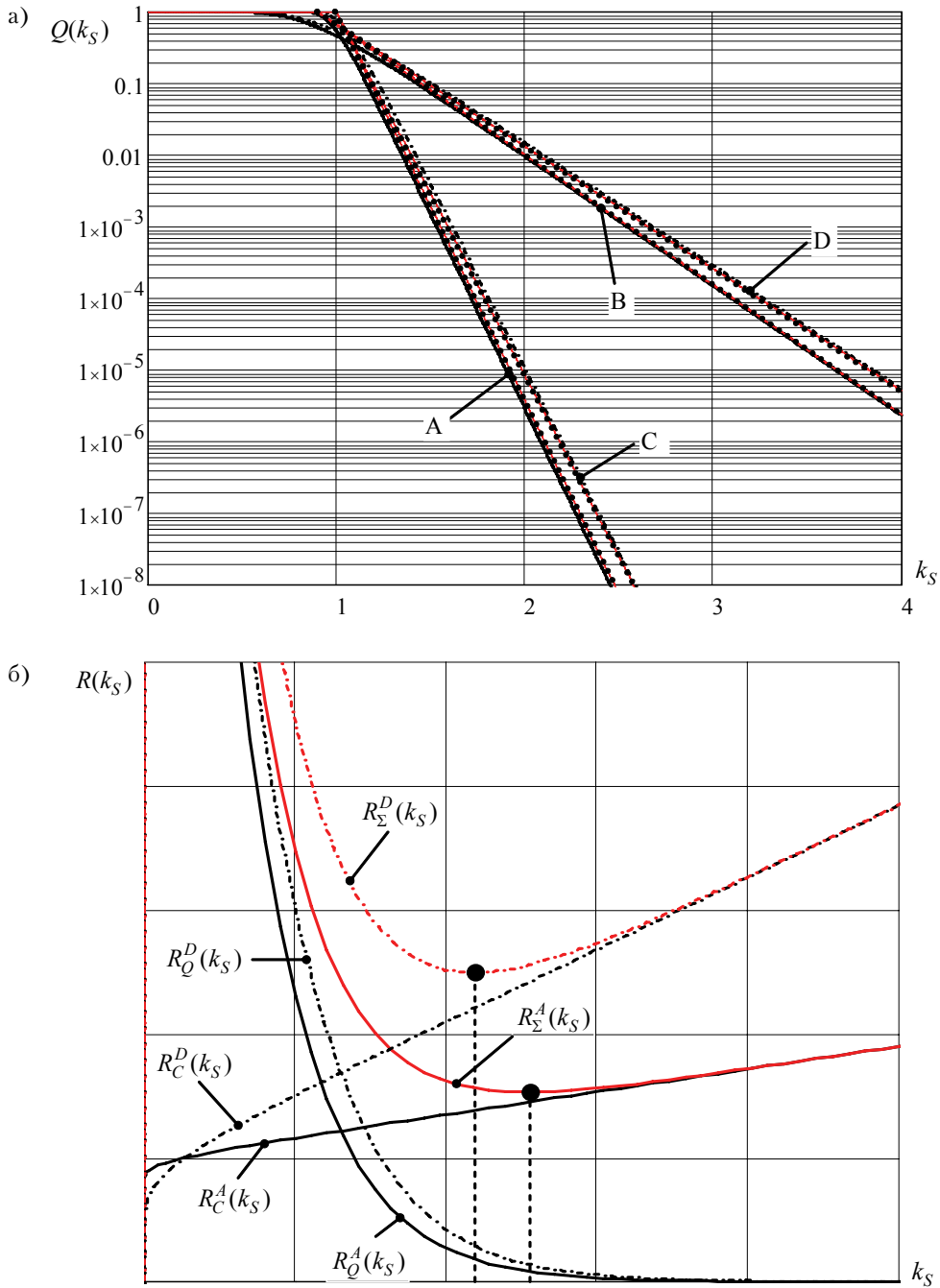


Рисунок 5. До обґрунтування оптимального рівня надійності ґратчастих баштових опор: (а) залежність ймовірності відмови від k_s – точками виконана апроксимація за виразом (2); (б) залежність ризиків від k_s для випадків А та D.

$$Q_{opt\downarrow} = \exp\{2,5 + 3,9 \cdot \mu_{ba} + W_{Lam} [-\exp(-2,5 - 3,9 \cdot \mu_{ba}) / ПЕЗ]\}, \quad (21)$$

$$Q_{opt\uparrow} = \exp\{11,5 + 12,5 \cdot \mu_{ba} + W_{Lam} [-\exp(-11,5 - 12,5 \cdot \mu_{ba}) / ПЕЗ]\}. \quad (22)$$

Графічна інтерпретація отриманих залежностей як функція коефіцієнта μ_{ba} показана на рис. 6. Вузкий діапазон значень параметра економічних збитків на цьому рисунку пояснюється тим, що опори зв'язку, на які був орієнтований цей приклад, відносяться до споруд із обмеженою відповідальністю, не пов'язаних прямо із загрозою для життя та здоров'я людей. Тому збиток, навіть від повного руйнування опори, в основному визначається коштами на зведення аналогічної споруди та розміщенням аналогічного обладнання. Винятком, мабуть, слід вважати опори, розміщені на покрівлях цивільних будівель, аварія яких може призводити до часткової або повної руйнації покрівлі та виникненню ризику для людей.

Звертає також на себе увагу доволі широкий розрив між нижньою та верхньою оцінкою оптимальної надійності, викликаний стохастичною мінливістю максимумів реакції у «відповідальному» елементі. Тому, очевидно, що узагальнених рекомендацій для залежності $Q_{opt}(\mu_{ba})$, позбавлених впливу коефіцієнта

$V_{R,max}$, дати неможливо. Проте це не пов'язано із великими складнощами, так як потрібну криву $Q_{opt}(\mu_{ba})$ для заданого коефіцієнта варіації $V_{R,max}$ можна завжди отримати на базі лінійної інтерполяції між двома граничними оцінками. При цьому такий, почасти вольовий підхід супроводжуватиметься помірною в інженерному сенсі похибкою. Наприкінці слід нагадати, що розібраний вище приклад і зроблені висновки дійсні тільки для обмеженої задачі проектування, розглянутої тут, а саме – для обрання декількох геометричних характеристик при заданій конструктивній схемі (баштова опора). Для інших конструктивних схем результати, подібні до отриманих, можливо приведуть до інших відповідей на питання економічної доцільності при «бажаний» надійності.

Висновки

Описана методика дозволяє достатньо обґрунтовано визначати оптимальні рівні надійності будівельних об'єктів, користуючись оцінками параметра ризику її відмови. Методика може бути використана для будь-якої розрахункової схеми конструкції і методу визначення у ній внутрішніх зусиль. Підхід також може бути реалізований при страховій оцінці будівельних об'єктів.

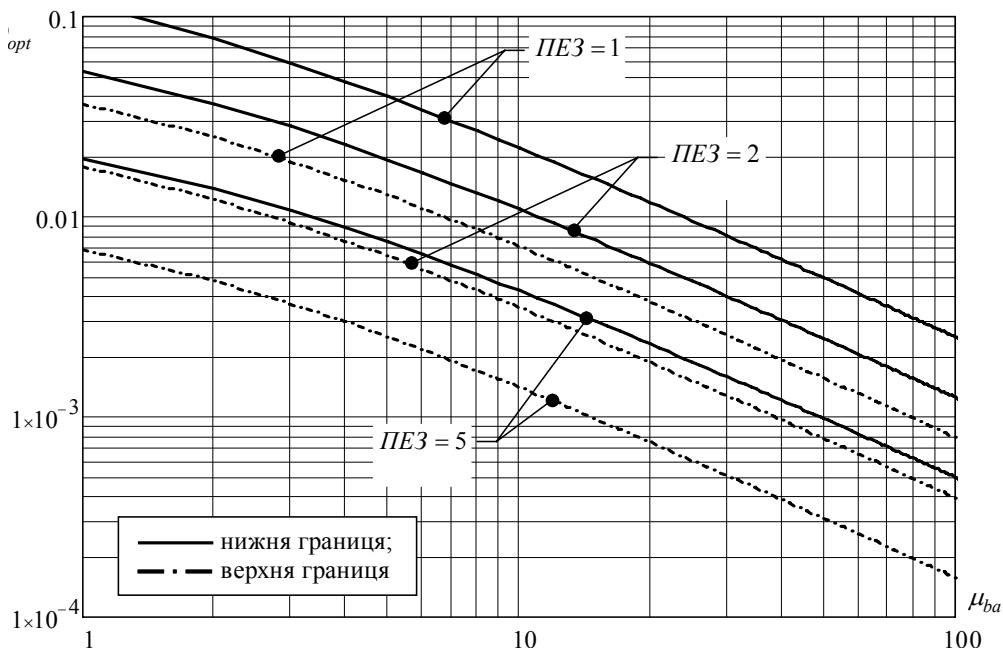


Рисунок 6. Оптимальні рівні надійності елементів баштових опор зв'язку.

Література

1. Арсеньев, Ю. Д. Инженерно-экономические расчёты в обобщённых переменных [Текст] / Ю. Д. Арсеньев. – М. : Высшая школа, 1979. – 215 с.
2. Августин, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] / Г. Августин, А. Баратта, Ф. Кашиаи ; пер. с англ. Ю. Д. Сухов. – М. : Стройиздат, 1988. – 584 с.
3. Гордеев, В. Н. О проекте ДБН «Общие принципы обеспечения надёжности и безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований» [Текст] / В. Н. Гордеев, М. А. Микитаренко, А. В. Перельмутер // Строительное производство : межведомственный науч.-техн. сб. – К., 2003. – Вып. 44. – С. 50–58.
4. Дривинг, А. Я. Рекомендации по применению экономико-статистических методов при расчете сооружений с чисто экономической ответственностью [Текст] / А. Я. Дривинг. – М. : ЦНИИСК, 1972. – 61 с.
5. Махінко, А. В. Економіко-ймовірнісне обґрунтування надійності конструкцій опор зв'язку [Текст] / А. В. Махінко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. / Одесская гос. академия строительства и архитектуры. – Одесса : ОГАСА, 2011. – № 15, Ч. 3. – С. 134–141.
6. Махінко, А. В. Надійність елементів металоконструкцій під дією випадкових змінних навантажень [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / А. В. Махінко. – Полтава : ПолтНТУ, 2006. – 24 с.
7. Мельчаков, А. П. Оценка и обеспечение конструктивной безопасности строящихся зданий и сооружений [Текст] : автореф. дис. ... доктора техн. наук / А. П. Мельчаков. – Челябинск, 1998. – 30 с.
8. Научно-технический отчёт по теме № 0190 [Текст] / Государственный проектный и научно-исследовательский институт УкрНИИпроектстальконструкция. – К. : Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 1991. – 164 с.
9. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 2000. – 216 с.
10. Пичугин, С. Ф. К определению коэффициента надёжности по назначению с учётом рисков в строительстве [Текст] / С. Ф. Пичугин, А. В. Семко, А. В. Махінко // Известия вузов. Серия строительство. – 2005. – № 11–12. – С. 104–109.
11. Пічугін, С. Ф. До оцінки оптимального рівня надійності сталевих конструкцій [Текст] / С. Ф. Пічугін, О. В. Семко, А. В. Махінко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. Ч. 1. / пред. ред.

References

1. Arsenev, Yu. D. Engineering and economical analysis at generalized changes. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 215 p. (in Russian)
2. Avgusti, G.; Baratta, A.; Kashiati, F. Probabilistic methods of building design. Moscow: Stroyizdat, 1988. 584 p. (in Russian)
3. Gordeev, V. N.; Mikitarenko, M. A.; Perelmuter, A. V. Basic principles of reliability and safety of building structures and foundations. In *Construction production*. Kyiv, 2003. Vol. 44, p. 50–58. (in Russian)
4. Driving, A. Ya. Recommended guideline for the use of economical and statistical methods under the analysis of structures with economic responsibility. Moscow: TsNIISK, 1972. 61 p. (in Russian)
5. Mahinko, A. V. Economical ground of safety of structures of communication supports. In compendium *Modern constructions of metal and wood*. Odessa: OGASA, 2011, No. 15, Vol. 3, p. 134–141. (in Ukrainian)
6. Mahinko, A. V. Reliability of elements of metal structures under the effect of occasional changeable loads: PhD (Eng.) thesis 05.23.01 «Building and construction structures». Poltava: PoltNTU, 2006. 24 p. (in Ukrainian)
7. Melchakov, A. P. Estimation and safety provision of buildings and structures: DSc (Eng.) thesis. Chelyabinsk, 1998. 30 p. (in Russian)
8. Scientific and technical report on subject No. 0190. Kyiv: UkrNIIProektstalkonstruksiya, 1991. 164 p. (in Russian)
9. Perelmuter, A. V. Select problems of reliability and safety of building structures. The second issue, processing and add. Kyiv: UkrNIIProektstalkonstruksiya, 2000. 216 p. (in Russian)
10. Pichugin, S. F.; Semko, A. V.; Mahinko, A. V. To the determination of the reliability index according to the assignment considering building rich. In *Higher school proceedings. Buildings*, 2005, No. 11–12, p. 104–109. (in Russian)
11. Pichugin, S. F.; Semko, O. V.; Mahinko, A. V. Estimation of optimal level of reliability of metal structures. In compendium *Modern building structures made of metal and wood. Vol. 1*. Odessa: OGASA, 2006., p. 153–162. (in Ukrainian)
12. Pichugin, S. F.; Semko, O. V.; Mahinko, A. V. Economical aspects of normalization of reliability index according to the determination of building to the determination of building structures. In compendium *Building structures. Building*. Kyiv: NDIBK, 2006. Vol. 65, p. 133–138. (in Ukrainian)
13. Rzhantsin, A. P. The theory of calculation of building structures on the reliability. Moscow: Stroiizdat, 1978. 239 p. (in Russian)
14. Semko, O. V. To the determination of insurance integrity of the structures intensification. In compendium *Building, material-control, machine-building*. Dnepropetrovsk: PGASA, 2005. No. 35: Innovation technologies of diagnosis, repairing

- кол. В. В. Стоянов ; Одесская гос. академия строительства и архитектуры. – Одесса : ОГАСА, 2006. – С. 153–162.
12. Пічугін, С. Ф. Економіко-імовірнісні аспекти нормування коефіцієнту надійності за призначенням будівельних конструкцій [Текст] / С. Ф. Пічугін, О. В. Семко, А. В. Махінько // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-тех. зб. наук. пр. Будівництво. – К. : НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 133–138.
 13. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
 14. Семко, О. В. До визначення страхової доцільності підсилення конструкцій [Текст] / О. В. Семко // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – № 35 : Инновационные технологии диагностики, ремонта и восстановления объектов строительства и транспорта. – С. 222–226.
 15. Семко, О. В. Застосування теорії ризиків для визначення коефіцієнту надійності за призначенням [Текст] / О. В. Семко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : Сб. научных трудов / Одесская гос. академия строительства и архитектуры. – Одеса : ОГАСА, 2005. – С. 178–185.
 16. Семко, О. В. Надійність сталезалізобетонних конструкцій [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О. В. Семко. – Полтава : ПолтНТУ, 2006. – 34 с.
 17. Снарскис, Б. И. К статико-экономическому обоснованию запасов несущей способности конструкций [Текст] / Б. И. Снарскис // Труды АН Литовской ССР, Серия Б. – 1962. – № 2(29). – С. 229–241; 1963. – № 1(32). – С. 157–203.
 18. Сухов, Ю. Д. Вероятностно-экономическая модель процесса эксплуатации строительных конструкций [Текст] / Ю. Д. Сухов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1975. – № 2. – С. 6–11.
 19. Тамразян, А. Г. К оценке определения риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружения [Текст] / А. Г. Тамразян // Бетон и железобетон. – 2001. – № 5. – С. 8–10.
 20. Улицкий, В. М. Оценка риска и обеспечение безопасности в строительстве [Текст] / В. М. Улицкий, М. Б. Лисюк // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – № 5. – С. 160–166.
 21. Усаковский, С. Б. Вероятностные методы оценки неопределенности от неточности расчетов сооружений [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / С. Б. Усаковский. – М. : МИСИ, 1991. – 24 с.
 22. Усаковский, С. Б. С какой точностью вести расчёты прочности сооружений [Текст] : Монография reconstructing of installation building and transport, p. 222–226. (in Ukrainian)
 15. Semko, O. V. The use of risk theory for the of reliability index determination according to the assignment. In compendium *Modern building constructions of metal and wood*. Odessa: OGASA, 2005, p. 178–185. (in Ukrainian)
 16. Semko, O. V. Reliability of steel, metal and concrete structures: DSc (Eng.) thesis 05.23.01 «Building and construction structures». Poltava: PoltNTU, 2006. 34 p. (in Ukrainian)
 17. Snarskis, B. I. To the static-economical grounds of reserves of carrier structures. In *Works of Lithuanian Ripablic*, 1962, No. 2(29), p. 229–241; 1963, No. 1(32), p. 157–203. (in Russian)
 18. Suhov, Yu. D. Probable economical model of the building construction exploitation. In *Construction Mechanics and Building Design*, 1975, No. 2, p. 6–11. (in Russian)
 19. Tamrazyan, A. G. To determine the risk assessment of emergency situations on the basic characteristics of its manifestation in the structure. In *Concrete and Reinforcedconcrete*, 2001, No. 5, p. 8–10. (in Russian)
 20. Ulitskiy, V. M.; Lisyuk, M. B. Risk assessment and safety in civil engineering. In *The Reconstruction of Cities and Geotechnical Engineering*, 2003, No. 5, p. 160–166. (in Russian)
 21. Usakovskiy, S. B. Probabilistic methods for assessing the uncertainty of the uncertainty calculation constructions: PhD (Eng.) thesis 05.23.01 «Building and construction structures». Moscow: MISI, 1991. 24 p. (in Russian)
 22. Usakovskiy, S. B. How precise calculations of the strength of structures: Monograph. Kyiv: KNUSA, 2005. 160 p. (in Russian)
 23. Shpete, G. The reliability of bearing constructions. Moscow: Stroyizdat, 1994. 288 p. (in Russian)
 24. Bedford, T.; Cooke, R. Probabilistic Risk Analysis (Foundations and Methods). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 393 p.
 25. Kumamoto, H.; Henley, E. J. Probabilistic Risk Assessment for Engineers and Scientists. 2-nd ed. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996. 597 p.
 26. Ellingwood, B. R. Earthquake Risk Assessment of Building Structures. In *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, Vol. 74, No. 3, p. 251–262.

- фия / С. Б. Усаковський. – К. : КНУСА, 2005. – 160 с.
23. Шпете, Г. Надёжность несущих строительных конструкций [Текст] / Г. Шпете, Пер. с нем. О. О. Андреева. – М. : Стройиздат, 1994. – 288 с.
 24. Bedford, T. Probabilistic Risk Analysis (Foundations and Methods) [Текст] / T. Bedford, R. Cooke. – Cambridge : Cambridge University Press, 2001. – 393 p.
 25. Kumamoto, H. Probabilistic Risk Assessment for Engineers and Scientists [Текст] / H. Kumamoto, E. J. Henley. – 2-nd ed. – New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996. – 597 p. – ISBN 978-0-7803-6017-4.
 26. Ellingwood, B. R. Earthquake Risk Assessment of Building Structures [Текст] / B. R. Ellingwood // Reliability Engineering & System Safety. 2001. – Vol. 74, № 3. – P. 251–262.

Махінько Антон Володимирович – к. т. н., доцент кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: методи оцінки проектної й експлуатаційної надійності будівельних конструкцій, опис випадкових навантажень у різній імовірнісній техніці, розв'язання задач сполучення навантажень, математичні методи опису відмов будівельних конструкцій.

Махінько Антон Владимирович – к. т. н., доцент кафедри конструкцій из металла, дерева и пластмасс Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: методы оценки проектной и эксплуатационной надёжности строительных конструкций, описание случайных нагрузок в различной вероятностной технике, решение задач сочетания нагрузок, математические методы описания отказов строительных конструкций.

Anton Makhinko – PhD (Eng), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department of the Poltava National Technical University named in honor of Yuri Kondratyuk. Scientific interests: methods of evaluation of the design and operational reliability of building structures; description of random loads in different probabilistic technics; solution of the problem of combination of loads; mathematical methods of describing building structure failures.