



КІЧАЄВА О.В.

Канд. технічних наук, доц.,
зав. каф., Харківський
національний університет
міського господарства імені
О.М. Бекетова,
м. Харків, Україна,
e-mail: o_kichaeva@ukr.net,
тел. +38 (067) 953-84-06
ORCID: 0000-0002-1493-3958

ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ ЦЕГЛЯНИХ СТІН БУДІВЕЛЬ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ

АНОТАЦІЯ

Міцність цегляних конструкцій залежить від низки випадкових величин, таких як: деформаційні і міцнісні характеристики цегляної кладки, діючі навантаження і впливи. Таким чином, застосування імовірнісних методів для оцінювання надійності і безпеки цегляних конструкцій є важливим і актуальним завданням, що дотепер не знайшло відображення в літературі.

У статті запропонована методологія і розроблено алгоритм вирішення задачі з визначення ймовірності (ризик) руйнування цегляних конструкцій в межах системної теорії надійності; при цьому використано метод статистичних випробувань (Монте-Карло).

Розроблено комп'ютерну програму, що реалізує запропоновану методологію.

Виконано розрахунки реальної цегляної конструкції з визначення ймовірності (ризик) руйнування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ймовірність, системна теорія надійності, метод статистичних випробувань, функція розподілу випадкової величини, конструкції з цегли.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КИРПИЧНЫХ СТЕН ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

КИЧАЕВА О.В. Канд. технических наук, доц.,
зав. каф., Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А.Н. Бекетова,
г. Харьков, Украина,
e-mail: o_kichaeva@ukr.net,
тел. +38 (067) 953-84-06
ORCID: 0000-0002-1493-3958

АННОТАЦІЯ

Прочность кирпичных конструкций зависит от ряда случайных величин, таких как: деформационные и прочностные характеристики кирпичной кладки, действующие нагрузки и воздействия. Таким образом, применение вероятностных методов для оценки надежности и безопасности кирпичных конструкций является важной и актуальной задачей, которая до сих пор не нашла отражение в литературе.

В данной статье предложена методология и разработан алгоритм решения задачи по определению вероятности (риска) разрушения кирпичных конструкций в рамках системной теории надежности; при этом использован метод статистических испытаний (Монте-Карло).

Разработана компьютерная программа, реализующая предложенную методологию.

Выполнены расчеты реальной кирпичной конструкции по определению вероятности (риска) разрушения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вероятность, системная теория надежности, метод статистических испытаний, функция распределения случайной величины, конструкции из кирпича.

DETERMINATION OF THE PROBABILITY OF BRICK WALLS DESTRUCTION OF OPERATED BUILDINGS

KICHAEVA O.V. PhD, Ass. Prof., Head
of Department, O.M. Beketov National
University of Urban Economy in Kharkiv,
Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o_kichaeva@ukr.net,
tel. +38 (067) 953-84-06
ORCID 0000-0002-1493-3958



ABSTRACT

The strength of brick structures depends on a number of random variables, such as: deformation and strength characteristics of brickwork, operating loads and impacts (own weight of structures, snow, wind, payload, and the load from uneven sediment, air temperature). Thus, the application of probabilistic methods for assessing the reliability and safety of brick structures is an important and urgent task, which has not yet been reflected in the literature.

Failures of brick structures occur due to the achieving of the limiting state associated with the exhaustion of the strength of the brickwork for compression, the exhaustion of the strength of the brickwork for local compression (crushing), the exhaustion of the strength of the brickwork for shearing (shearing), the depletion of the strength of the brickwork for stretching when bent in the corresponding plane. The estimation of the risk of occurrence of each of the limiting states was determined by solving the probabilistic task of the parametric reliability theory on the basis of an analysis of the strength and stability conditions regulated by the design standards. To solve these problems, we used the parameters of the distributions of random variables that are the initial data. The estimation of the generalized risk was carried out on the basis of the analysis of the risk values for the onset of each of the limiting states.

In this article, a technique is proposed and an algorithm is developed for solving the problem of determining the probability (risk) of destruction of brick structures within the framework of the system reliability theory; wherein the method of statistical tests (Monte-Carlo) is used.

A computer program has been developed that implements the proposed calculation methodology.

The calculations of a real brick structure are performed to determine the probability (risk) of destruction for some section. The value of the probability of destruction of a brick structure is obtained.

KEY WORDS: probability, system reliability theory, statistical test method, distribution function of random variable distribution, brick structure.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время для оценки надежности и безопасности каменных конструкций используется традиционный подход, основанный на полувероятностном методе предельных состояний. Такой подход не во всех случаях позволяет получить объективную оценку надежности и безопасности сооружений из кирпича, поэтому более объективная оценка надежности и безопасности кирпичных конструкций может быть получена вероятностными методами современной теории надежности сложных технических систем. В Украине в настоящее время действуют требова-

ния государственных норм ДБН В.1.2-14-2009 [1], которые устанавливают общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий и сооружений, строительных конструкций и оснований. В указанных нормах рекомендуется выполнять вероятностные расчеты по оценке вероятности отказа конструкций (и оснований). Однако до сих пор в технической и нормативной литературе отсутствуют указания по вероятностной оценке каменных конструкций.

Прочность кирпичных конструкций зависит от ряда случайных величин, таких как: деформационные и прочностные характеристики кирпичной кладки, действующие нагрузки и воздействия (собственный вес конструкций, снег, ветер, полезная нагрузка, нагрузка от неравномерных осадок, температура воздуха). Таким образом, применение вероятностных методов для оценки надежности и безопасности кирпичных конструкций является важной и актуальной задачей, которая до сих пор не нашла отражение в литературе.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В системе Еврокодов был разработан ряд нормативных документов, регламентирующих вероятностный подход к строительным конструкциям и сооружениям [2, 3]. Проблемы оценки надежности и безопасности строительных конструкций рассмотрены в работах А.И. Вайнберга [4], В.Д. Райзера [5], А.В. Перельмутера [6], А.С. Лычева [7], С.Ф. Пичугина [8], N.P. Hoesj [9], P. Sêco e Pinto [10] и др.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Разработка методологии расчетов, которая позволила бы выполнить вероятностную оценку прочности кирпичных конструкций.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Отказы кирпичных конструкций возникают вследствие достижения предельного состояния, связанного с исчерпанием прочности кирпичной кладки на сжатие; на местное сжатие (смятие); на сдвиг (срез); на растяжение при изгибе в соответствующей плоскости.

Оценка риска (вероятности) наступления каждого из предельных состояний определяется путем решения вероятностной задачи параметрической теории надежности на основе анализа регламентированных нормами проектирования условий прочности и устойчивости таких систем. Для решения этих задач необходимо знать параметры распределений случайных величин, являющиеся исходными данными. Оценка обобщенного риска выполняется на основе анализа значений риска наступления каждого из предельных состояний.

Выполняя комплексную вероятностную оцен-



ку риска возникновения отказов кирпичных конструкций, целесообразно использовать метод статистических испытаний (Монте-Карло). В результате возможно получить значение обобщенного риска (вероятности) возникновения отказа кирпичной конструкции.

Обобщенный риск возникновения отказов кирпичных конструкций может быть определен по формуле:

$$P = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_n). \quad (1)$$

Каменные конструкции во всех случаях рассчитываются по предельным состояниям первой группы, а по предельным состояниям второй группы – в необходимых случаях.

Расчет сводится к определению допустимых экстремальных значений усилий (N , M , Q) по расчетным нагрузкам и сравнению их с предельными усилиями по несущей способности или по раскрытию трещин, которые определяются по расчетным сопротивлениям или допускаемым деформациям.

Горизонтальные и наклонные сечения стен или отдельных их участков должны быть рассчитаны на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок с учетом способа их передачи.

Горизонтальные сечения стен должны быть проверены на сжатие, внецентренное сжатие или же на сжатие и изгиб, вызванное горизонтальными нагрузками.

При изгибе в плоскости стены производится проверка наклонных сечений на главные растягивающие напряжения.

Таким образом, расчет элементов каменных конструкций при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок сводится к следующим проверкам:

- на сжатие и растяжение от продольной силы (внецентренное сжатие);
- на сжатие и растяжение от поперечной силы;
- на сдвиг (срез);
- на смятие.

При этом эти варианты могут комбинироваться.

В данной статье рассмотрен вероятностный расчет кирпичных конструкций на сжатие как самый распространенный вид напряженного состояния кладки.

Для того, чтобы оценить риск (вероятность) наступления предельного состояния того или иного вида, необходимо решить задачу параметрической теории надежности с привлечением аппарата теории вероятности. В результате решения такой задачи может быть найдено значение вероятности разрушения кирпичной конструкции, которое учитывает возможность ее разрушения при различных воздействиях. При этом могут быть выделены следующие этапы расчета:

- составление уравнений связи между вход-

ными параметрами (нагрузки и воздействия, свойства материалов) и выходными (результаты расчета) параметрами для рассматриваемого элемента. Такое уравнение может быть составлено на основе анализа расчетных зависимостей, которые регламентируются нормами проектирования;

- подготовка исходных данных для расчета, заключающаяся в выделении входных параметров на случайные и неслучайные (детерминированные);
- определяются параметры распределения случайных величин, которые являются исходными данными;
- определение вероятности (риска) разрушения кирпичной конструкции на основе соответствующего решения статистической динамики.

Запишем уравнения связи из условий прочности кирпичного элемента: на сжатие; на смятие. Такие уравнения могут быть составлены на основе анализа расчетных зависимостей, которые регламентируются нормами проектирования. По А.Р. Ржаницыну [11], условие возможно записать в виде некоторого совокупного фактора Y от усилий в рассматриваемом сечении, геометрических размеров этого сечения, расчетных значений сопротивления кладки сжатию (растяжению, изгибу, срезу, смятию). Совокупный фактор Y представляет собой запас прочности, равный разности соответствующего расчетного сопротивления кладки и сжимающей либо растягивающей силы, либо момента. Совокупный фактор Y зависит от переменных, входящих в эти уравнения.

В предельном состоянии при утрате несущей способности величина вертикальной нагрузки N_{Ed} , приложенной к стене из каменной кладки, должна быть меньше или равна расчетной величине вертикальной прочности стены N_{Rd} (в соответствии с ДБН В.2.6-162:2010 [12]):

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}. \quad (2)$$

Расчетная несущая способность N_{Rd} однослойной стены из неармированной кладки (для единичной длины стены) при вертикальной нагрузке вычисляется по формуле:

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_d, \quad (3)$$

где Φ – коэффициент уменьшения несущей способности стены, в соответствующих случаях Φ_i сверху или снизу стены, или Φ_m в середине стены, в зависимости от гибкости и эксцентриситета, рассчитываемый по формуле 11.4 [12]; t – толщина стены; f_d – расчетное значение прочности кладки на сжатие.

В предельном состоянии при утрате несущей способности расчетная величина сосредоточен-



ной вертикальной нагрузки N_{Edc} , приложенной к стене из каменной кладки, должна быть меньше или равна расчетной величине сопротивления сосредоточенной нагрузке стены N_{Rdc} :

$$N_{Edc} \leq N_{Rdc}. \quad (4)$$

Если стена из каменной кладки группы 1 загружена сосредоточенной нагрузкой (за исключением стен с кладкой с заполнением крайних полос раствором), расчетная величина сопротивления стены вертикальной нагрузке определяется так:

$$N_{Rdc} = \beta \cdot A_b \cdot f_d, \quad (5)$$

где β – коэффициент увеличения сосредоточенных (локальных) нагрузок, определяется графически или аналитически (6):

$$\beta = \left(1 + 0,3 \frac{a_1}{h_c} \right) \left(1,5 - 1,1 \frac{A_b}{A_{ef}} \right), \quad (6)$$

при этом β не должно быть менее 1,0 и более $1,25 + \left(\frac{a_1}{2h_c} \right)$ или 1,5 в зависимости от того, которое из них меньше;

a_1 – расстояние от конца стены до ближайшего края нагруженной площади, h_c – высота стены до уровня прикладываемой нагрузки;

A_b – нагруженная площадь;

f_d – расчетное значение прочности кладки на сжатие;

A_{ef} – значение величины эффективной площади, определяемой как $l_{efm} \cdot t$;

l_{efm} – значение эффективной длины площади распределения нагрузки под опорой, которое измеряется в основании трапеции на $\frac{1}{2}$ высоты стены или пилястры;

t – толщина стены с учетом не полностью заполненных швов на глубину более 5 мм; A_b/A_{ef} – соотношение площадей, которое не должно превышать 0,45.

Выражения для уравнений связи при сжатии и смятии могут быть записаны следующим образом:

$$Y_1 = N_{Rd}(f_d, b, t) - F(\gamma_{constr}, q, S_0, A_f, E, a, b) - F_1(\gamma_{constr}, q) \geq 0. \quad (7)$$

$$Y = N_{Rdc}(f_d, h, t, l_{efm}, A_b) - N_{Edc} \geq 0. \quad (8)$$

В общем случае все входные параметры уравнений (7, 8) являются случайными величинами, однако некоторые из них могут рассматриваться как детерминированные величины. Детерминированными величинами в данном случае являются: геометрические характеристики сечения кон-

струкции и размеры рассматриваемого здания. Все остальные параметры уравнений являются случайными: нагрузка от собственного веса конструкций, нагрузка от снега, полезная нагрузка, нагрузка от ветра и неравномерных осадок. Случайные значения максимальных расчетных напряжений в сечениях каменных конструкций определяются в зависимости от случайных значений усилий, возникающих в конструкциях от случайных воздействий, упомянутых выше. Вероятностные значения напряжений для каждого расчетного случая определяются с помощью известных методов сопротивления материалов.

В настоящей работе приняты следующие законы распределения случайных входных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Законы распределения случайных входных параметров

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Среднее значение	Коэфф. вариации V_x	Закон распределения
Постоянная нагрузка	G	кН	G	0,1	Нормальный
Полезная (50 лет)	Q	кН/м ²	$0,6Q$	0,35	Гумбеля
Снеговая нагрузка (50 лет)	S	кН/м ²	$0,7S_0$	0,5	Гумбеля
Ветровая нагрузка	W	кН/м ²	$0,75W_0$	0,35	Гумбеля
Воздействие от неравномерных осадок (усилия в фундаменте)	D	кПа	P	0,59	Нормальный
Прочность кирпичной кладки при сжатии	f_d	кПа	$0,85 f_d$	0,15	Нормальный

Алгоритм расчета кирпичных конструкций с использованием метода Монте-Карло предлагается в следующем виде:

- выполняется N статистических испытаний;
- задаются случайными вероятностями расчетных нагрузок: от собственного веса конструкций P_G , от снега P_S , ветра P_W , полезной нагрузки P_Q , нагрузки от неравномерных осадок P_D и местной нагрузки P_L ;
- по известным значениям P_G, P_S, P_Q, P_D, P_L определяем квантили нагрузок G, S, W, Q, D, L ;
- определяем случайные значения вертикальной нагрузки N_{Ed} при центральном сжатии в зависимости от значений G, S, Q, D ;
- определяем случайные значения вертикальной нагрузки N_{Edc} при смятии в зависимости от L ;



- задаемся случайными вероятностями прочности кирпичной кладки на сжатие P_{fd} ;
- по значению P_{fd} определяем квантили вертикальной прочности стены при сжатии N_{Rd} и при смятии N_{Rdc} в соответствии с размерами нагруженных участков;
- вычисляется значение совокупных факторов Y_1 и Y_2 по формулам (4, 5);
- определяется количество испытаний, при которых не выполняются условия (7) и (8) и определяется вероятность потери прочности кирпичной конструкции соответственно от сжатия и смятия;
- определяется обобщенный риск (обобщенная вероятность) потери прочности кирпичной конструкции, которая связана с наступлением предельного состояния по формуле (1).

После выполнения всех N испытаний вычисляется риск (вероятность) разрушения элемента каменной конструкции в течение расчетного срока службы P_T как отношение числа испытаний n , при которых $Y < 0$, к числу всех испытаний N . Отметим, что число испытаний N должно быть достаточно большим, чтобы более точно определить значение Y , в данном случае число испытаний принималось $N = 1 \times 10^5$. Автором была разработана компьютерная программа для выполнения расчетов по определению риска (разрушения) кирпичной конструкции в среде Mathcad.

Пример расчета кирпичной конструкции на сжатие и смятие.

Вычислим вероятность отказа для кирпичной конструкции со следующими параметрами: b (длина сечения) $\times t$ (толщина стены) = $1 \times 0,51$ м, $H = 3$ м, $H_1 = 2,5$ м, $c = 0,12$ м, $A' = 3$ м², принят полнотелый силикатный кирпич размерами $250 \times 120 \times 65$ мм, расчетное сопротивление кладки сжатию $f_d = 2,160$ МПа (с учетом коэффициента 0,9), эксцентриситет $e = 0,215$ м, $c = 0,12$ м, также были учтены соответствующие коэффициенты по ответственности здания, по нагрузкам и по материалам; остальные характеристики сведены в табл. 2.

По результатам расчетов определяем обобщенный риск разрушения кирпичной конструкции по формуле (1):

Таблица 2. Статистические параметры нагрузок и материалов, использованные в примере

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Математическое ожидание μ	Среднеквадратическое отклонение σ
1	Удельный вес кирпичной кладки стен и перегородок $\gamma_{кк}$	кН/м ³	18,844	0,517
2	Удельный вес железобетонных конструкций γ_b	кН/м ³	25,0	0,75
3	Полезная нагрузка q	кН/м ²	0,9	0,315
4	Нагрузка от снега S	кН/м ²	0,115	0,02624
5	Воздействие от неравномерных осадок D	кН	165,5	97,645
6	Местная нагрузка L	кН	77	3,85

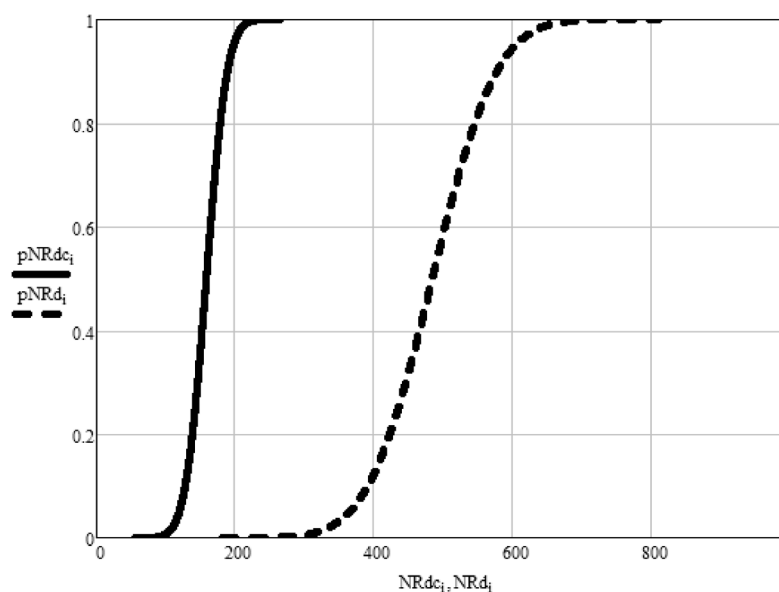


Рис. 1. Функции распределения расчетной величины сопротивления стены вертикальной нагрузке N_{Rdc} и вертикальной прочности стены N_{Rd}

$$P = 1 - \left(1 - 1,03 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \left(1 - 4,1 \cdot 10^{-4}\right) = 1,44 \cdot 10^{-3}.$$

На рис. 1 показаны функции распределения расчетной величины сопротивления стены вертикальной нагрузке N_{Rdc} и вертикальной прочности стены N_{Rd} .

ВЫВОДЫ

1. Предложена методология и разработан алгоритм решения задачи по определению вероятности (риска) разрушения кирпичных конструкций в рамках системной теории надежности; при этом использован метод статистических испытаний (Монте-Карло).
2. Разработана компьютерная программа, реализующая предложенную методологию.



3. Выполнены расчеты реальной кирпичной конструкции по определению вероятности (риска) разрушения для некоторого сечения. Получено значение вероятности разрушения кирпичной конструкции, равное $p=1,44 \cdot 10^{-3}$.
4. Анализ вероятностного расчета показывает необходимость создания новых методологических подходов по определению вероятности (риска) разрушения каменных конструкций.

БИБЛІОГРАФІЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій і основ: ДБН В.1.2-14-2009. - [Чинні від 2009-12-01]. - Київ: ДП «Укравхбудінформ», 2009. – 49 с. – (Буд. норми України).
2. ENV 1991-1. Eurocode 1: Basis of Design and Actions of Structures/ Part 1: Brussels: CEN. 1993. – 87 p.
3. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures - International Organization for Standardization. 2015. – 111 p.
4. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы: монография / А.И. Вайнберг. – Харьков, 2008. – 304 с.
5. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / В.Д. Райзер. – М.: АСВ, 1998. – 304 с.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. - М.: АСВ, 2007. – 256 с.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций: учебное пособие / А.С. Лычев. – М.: АСВ, 2008. – 184 с.
8. Пичугин С.Ф. Надежность строительных конструкций производственных зданий: монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава: ООО «Асми», 2009. – 452 с.
9. Høj, N.P. Risk and Safety Considerations at Different Project Phases / Safety, risk, and reliability – trends in engineering. Intern. Conf. Malta, 2001. - P. 1–8.
10. Sêco e Pinto, P. Some reflections about risk analysis of geotechnical structures: Proc. of the 12th Danube-European Conf. Passau, 2002. – P. 41–46.
11. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
12. Кам'яні та армокам'яні конструкції: ДБН В.2.6-162-2010. – [Чинні від 2011-09-01]. – Київ: ДП «Укравхбудінформ», 2011. – 97 с. - (Буд. норми України).

REFERENCES

1. Zagalni printsiipi zabezpechennya nadiynosti ta konstruktivnoyi bezpeki budsvel, sporud, budivelnih konstruksiy i osnov: DBN V.1.2-14-2009. - [Chinni vid 2009-12-01]. – K. : DP «Ukrarhbudininform», 2009. – 49 s. – (Bud. normi Ukraini).
2. ENV 1991-1. Eurocode 1: Basis of Design and Actions of Structures / Part 1: Brussels: CEN. 1993. – 87 p.
3. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures - International Organization for Standardization. 2015. – 111 p.
4. Vaynberg, A.I. Nadezhnost i bezopasnost gidrotehnicheskikh sooruzheniy. Izbrannyye problemy: monografiya / A.I. Vaynberg. – Harkov, 2008. – 304 s.
5. Rayzer, V.D. Teoriya nadezhnosti v stroitelnom proektirovanii / V.D. Rayzer. – M.: ASV, 1998. – 304 s.
6. Perelmuter, A.V. Izbrannyye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitelnykh konstruksiy / A.V. Perelmuter. - M.: ASV, 2007. – 256 s.
7. Lychev, A.S. Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy: uchebnoe posobie / A.S. Lychev. – M.: ASV, 2008. – 184 s.
8. Pichugin, S.F. Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy proizvodstvennykh zdaniy: monografiya / S.F. Pichugin. – Poltava: OOO «Asmi», 2009. – 452 s.
9. Høj, N.P. Risk and Safety Considerations at Different Project Phases / Safety, risk, and reliability – trends in engineering. Intern. Conf. Malta, 2001. - P. 1–8.
10. Sêco e Pinto, P. Some reflections about risk analysis of geotechnical structures: Proc. of the 12th Danube-European Conf. Passau, 2002. – P. 41–46.
11. Rzhantsyn, A.R. Teoriya rascheta stroitelnykh konstruksiy na nadezhnost. – M.: Stroyizdat, 1978. – 239 s.
12. Kam'yanі ta armokam'yanі konstruksiyi. DBN V.2.6-162-2010. – [Chinni vid 2011-09-01]. – K.: DP «UkrarhbudInform», 2011. – 97 s. - (Budivelni normi Ukraini).

Стаття надійшла до редакції 15.08.2017р.