

**УДК 624.014.2**

**DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.155.2015.92117>**

**РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КАРКАСУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД ПРИ ДІЇ СНІГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**Кандидати техн. наук В.О. Северин, Л.В. Карабаш, Д.М. Лазарєв**

**РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ**

**Кандидаты техн. наук В.А. Северин, Л.В. Карабаш, Д.Н. Лазарев**

**CALCULATION OF RELIABILITY OF STEEL ELEMENTS OF FRAMEWORK BUILDINGS ON ACTION SNOW LOAD**

**Ph.D V.A. Severyn, Ph.D L.V. Karabash, Ph.D D.N. Lazariev**

*У статті представлена методика для оцінки надійності сталевих конструкцій будівель та споруд при дії снігового навантаження та отримані та проаналізовані реальні оцінки надійності даних елементів для різних регіонів України. Результати імовірнісних розрахунків підтвердили припущення про недостатню надійність окремих сталевих елементів існуючих будівель, запроектованих за попередніми нормами до 2006 року. Крім того, явним є неоднакова ступінь надійності аналогічних елементів конструкцій будівлі в різних регіонах України. Викладена методика придатна як для імовірнісних розрахунків сталевих конструкцій при проектуванні або реконструкції унікальних будівель та споруд (імовірнісні моделі базуються на вихідних даних окремих метеостанцій, що дозволяє більш точно врахувати усі особливості навантажень), так і для імовірнісних розрахунків сталевих конструкцій масового виробництва (імовірнісні моделі базуються на узагальнених характеристиках тимчасових навантажень для районів України).*

**Ключові слова:** залізобетонна балка, склеювання, сумісна робота, навантаження, несуча здатність, прогин.

*В статье представлена методика для оценки надежности стальных конструкций зданий и сооружений при воздействии снеговой нагрузки и полученные и проанализированные реальные оценки надежности данных элементов для различных регионов Украины. Результаты вероятностных расчетов подтвердили предположение о недостаточной надежности отдельных стальных элементов существующих зданий, запроектированных за предыдущим нормами до 2006 года. Кроме того, явным является неодинаковая степень надежности аналогичных элементов конструкций здания в разных регионах Украины. Изложена методика может использоваться как для вероятностных расчетов стальных конструкций при проектировании или реконструкции уникальных зданий и сооружений (вероятностные модели базируются на исходных данных отдельных метеостанций, что позволяет более точно учесть все особенности нагрузок), так и для вероятностных расчетов стальных конструкций массового производства (вероятностные модели базируются на обобщенных характеристиках временных нагрузок для районов Украины).*

**Ключевые слова:** надежность, вероятность отказа, постоянная нагрузка, снеговая нагрузка.

*The article deals with methodology for evaluating the reliability of steel structures of buildings and structures under the action of snow load and received and analyzed real assessment of the reliability of the data elements for different regions of Ukraine. Results probabilistic calculations confirmed the assumption about the lack of reliability of certain steel elements existing buildings, designed by the previous rules until 2006. In addition, there is a various similar degree of reliability of structural elements of the building in different regions of Ukraine. The method of suitable probability calculations for steel structures in the design and reconstruction of buildings and unique structures (probabilistic models based on the initial data of individual weather stations that can more accurately take into account all features loads) and probability calculations for steel constructions of mass production (based probabilistic models on generalized characteristics temporary loads to regions of Ukraine).*

**Keywords:** reliability, probability of failure, continuous load, snow load.

**Вступ.** Відповідно до чинних норм [1] під надійністю слід розуміти властивість об'єкта зберігати в визначених межах значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах експлуатації та технічного обслуговування, протягом встановленого строку служби. Визначення реальних показників надійності сталевих конструкцій є досить складною задачею, вирішення якої можливо лише на основі точного математичного опису випадкових факторів, що впливають на стан конструкцій в період їх зведення та експлуатації. При цьому, важливими питаннями є отримання моделей навантажень з урахуванням усіх особливостей їх стохастичної природи, точного врахування особливостей сумісної дії випадкових навантажень на сталеві конструкції.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Треба зазначити, що з уведенням в дію ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» [2] характеристичні значення снігового навантаження значно збільшились. Таким чином, значна частина конструкцій будівель та споруд, запроектованих за попередніми нормами заздалегідь має недостатній рівень надійності. Це може призвести до значних капіталовкладень при виникненні на протязі періоду експлуатації відмов та аварій будівельних конструкцій, не говорячи вже про більш трагічні наслідки. Таким чином, на даному етапі важливим є розробка методики виявлення потенційно небезпечних груп будівельних конструкцій. Наведена у статті методика розроблена для оцінки надійності сталевих конструкцій будівель та споруд при дії снігового навантаження та

отримані реальні оцінки надійності даних елементів для різних регіонів України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даному напрямку імовірнісні розрахунки вже отримали певний розвиток: розроблено ряд моделей в різних імовірнісних формах, на базі яких отримані практичні оцінки надійності ряду будівельних (в тому числі сталевих) конструкцій [3 - 6], однак ці моделі мали більш науковий, ніж практичний характер. Тому досить актуальним є завдання: визначити реальний рівень надійності широкого кола конструкцій, виділити групи потенційно небезпечних будівель і споруд та для них запропонувати рекомендації щодо подальшої експлуатації.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Підсумовуючи вищесказане, метою проведених досліджень та задачею статті є викладення методики для оцінки надійності сталевих конструкцій будівель та

споруд при дії снігового навантаження та отриманні реальних оцінок надійності сталевих елементів будівель та споруд для різних регіонів України.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розглянемо сталеві елементи каркасу будівель та споруд, на які діє постійне (доля впливу  $C_1$ ) та снігове (доля впливу  $C_2$ ) навантаження. Значну їх частину складають елементи конструкцій покриття: кроквяні балки, ферми, прогони і т.п.

Вихідні параметри випадкових процесів постійного (1) та снігового (2) навантажень незалежні між собою, тому це є достатньою та необхідною умовою застосування формул згорток для знаходження композиції розподілів  $f_1(u_1)$  та  $f_2(u_2)$ :

$$f_{12}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(u_1) f_2(u - u_1) du_1 \quad \text{або} \quad f_{12}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(u - u_1) f_2(u_1) du_1, \quad (1)$$

де  $u = u_1 + u_2$ .

Щільність розподілу постійного навантаження представляється у вигляді нормованого нормального розподілу, а снігового навантаження – у вигляді

$$f_{12}(\gamma) = [(1 + p^2)/2\pi]^{\frac{1}{2}} \int_{Z1}^{Z2} \exp(C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3) \exp(-0.5 Z^2) dZ, \quad (2)$$

де  $E = \gamma \sqrt{1 + p^2} - Z p$ ;

$$Z1 = -1/V_{u(2)};$$

$$Z2 = D\gamma + 1/(V_{u(2)} p),$$

$$D = (\sqrt{1 + p^2})/p;$$

$$p = \hat{u}_1 / \hat{u}_2;$$

$$\gamma = (u - \bar{u}_1 - \bar{u}_2) / \hat{u};$$

Приклад сумісного розподілу нормального (1) та поліномо-експоненційного (2) законів наведено на

рисунку 1, з якого видно, що сумісні розподіли відрізняються від вихідних розподілів, ступінь наближеності до вихідних розподілів залежить від співвідношення стандартів, тобто від параметра  $P$ .

Згортки для даних щільностей розподілів не беруться у замкненому вигляді і тому інтегруються чисельно.

Різниця щільностей нормального  $f_{\xi}(\bullet)$  та поліномо - експоненційного  $f_u(\bullet)$  розподілів визначається як:

Різниця щільностей нормального  $f_{\xi}(\bullet)$  та поліномо - експоненційного  $f_u(\bullet)$  розподілів визначається як:

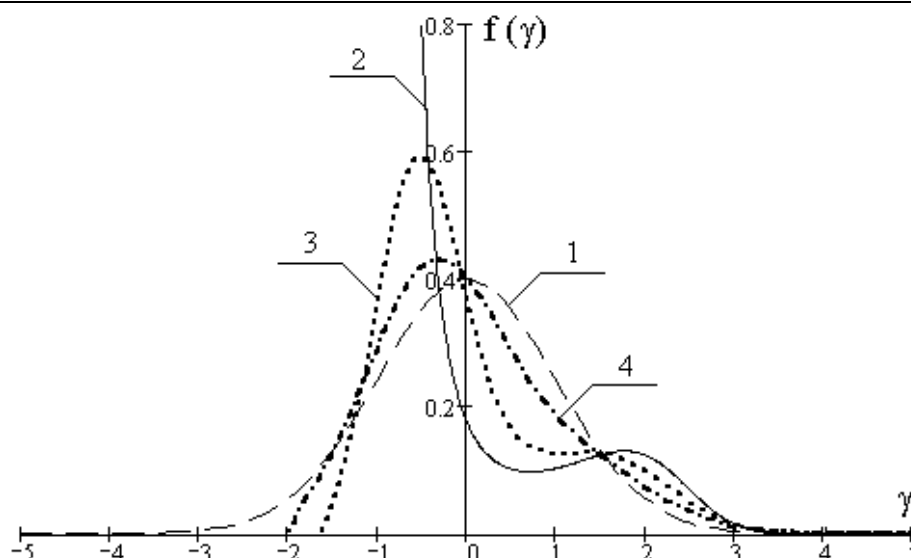


Рис. 1. Композиція розподілів нормального (1) та поліномо-експоненційного (2) при відношенні стандартів  $p = 0.5$  (3) та  $p = 1.0$  (4)

$$f_Y(\gamma) = \sqrt{\frac{1+p^2}{2\pi}} \int_{Z1}^{Z2} \exp(C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3) \exp(-0.5 Z^2) dZ, \quad (3)$$

де:  $E = -\gamma \sqrt{1+p^2} + Z p$ ;

$$Z1 = D\gamma - 1/(V_u p);$$

$$D = (\sqrt{1+p^2})/p;$$

$$p = \hat{\xi} / \hat{u};$$

$$\gamma = (Y - \bar{\xi} + \bar{u}) / \hat{Y},$$

$Z2$  визначається методом підбору виходячи із точності отриманих результатів.

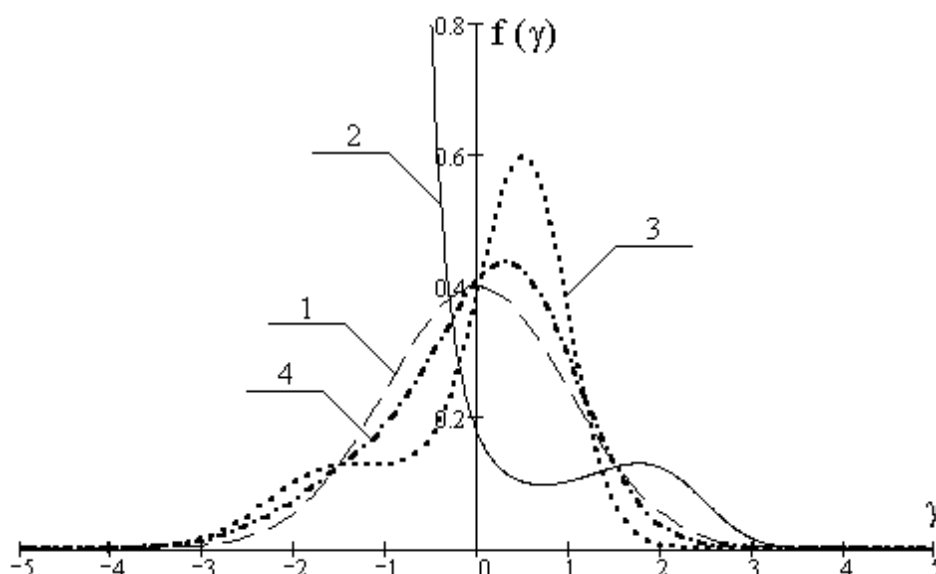


Рис. 2. Різниця розподілів нормального (1) та поліномо-експоненційного (2) при відношенні стандартів  $p = 0.5$  (3) та  $p = 1$  (4)

Імовірність відмови сталевих елементів кількістю викидів сумарного нормованого на протязі часу  $t$  будемо визначати за

випадкового процесу  $u(t)$  за нормований рівень  $\xi$  за формулою:

$$Q(\xi; t) \approx N_+(\xi; t) = \frac{\omega_{e(u)} t}{\beta_{\omega(u)} \sqrt{2\pi}} f_u(\xi) \quad , (4)$$

$$\omega_{e(12)} = \left[ \frac{\omega_{e(1)}^2 \hat{u}_1^2 + \omega_{e(2)}^2 \hat{u}_2^2}{\hat{u}_1^2 + \hat{u}_2^2} \right]^{0.5} = \left[ \frac{\omega_{e(1)}^2 + p^2 \omega_{e(2)}^2}{1 + p^2} \right]^{0.5} ; \quad (5)$$

$\omega_{e(i)}$  – середня (ефективна) частота процесу навантаження (середнє число перетинів процесом нульового рівня), яка дорівнює відношенню стандарту першої похідної процесу до стандарту його ординати;

$f_u(\bullet)$  – нормована щільність розподілу сумарного випадкового процесу  $u(t)$ , що визначається з урахуванням узагальнених річних характеристик тимчасових навантажень на сталевий елемент;

$$\beta_{\omega(u)} = [(\beta_{\omega(1)}^2 + \beta_{\omega(2)}^2 p^2 \Theta^4)(1 + p^2)]^{0.5} / (1 + p^2 \Theta^2) \quad . \quad (6)$$

де  $p = \hat{u}_2 / \hat{u}_1$  – відношення стандартів вихідних параметрів;

$\Theta = \omega_{e(2)} / \omega_{e(1)}$  – відношення їх ефективних частот.

Використаємо наведену методику для практичної оцінки надійності сталевих балок покриття одноповерхової будівлі, розташованих в різних регіонах України. Статистичні характеристики матеріалу та навантажень, а також підбір поперечного перерізу сталевих балок були прийняті згідно чинних будівельних норм. Оцінку надійності сталевих балок за несучою здатністю виконано у просторі нормальних напружень, де функцію резерву несучої здатності було представлено у формі випадкового процесу.

Доля напружень в сталевій балці від дії постійного ( $C_1$ ) та снігового ( $C_2$ ) навантажень в загальному напруженні визначаються за формулами:

де  $\omega_{e(u)}$  – ефективна частота сумарного випадкового процесу  $u(t)$ , що визначається за формулою

$\beta_{\omega(u)}$  – коефіцієнт широкополосності сумарного випадкового процесу  $u(t)$ , що визначається за формулою.

$$C_1 = \frac{k \gamma_{f(1)}}{k \gamma_{f(1)} + \mu \gamma_{f(2)}} ; \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{\mu \gamma_{f(1)}}{k \gamma_{f(1)} + \mu \gamma_{f(2)}} , \quad (8)$$

де  $k = q_1^H / s_0$  – відношення нормативного значення постійного рівномірно розподіленого навантаження ( $q_1^H$ , кПа) до нормативного значення ваги снігового покриву на 1 м<sup>2</sup> горизонтальної поверхні землі ( $s_0$ , кПа);

$\mu$  – коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву на землі до снігового навантаження на конструкції покриття;

$\gamma_{f(1)}$  та  $\gamma_{f(2)}$  – коефіцієнт надійності відповідно за постійним та сніговим навантаженням.

За деформаціями розрахунок сталевих балок виконувався у просторі прогинів, а постійне та снігове навантаження було

## Будівельні матеріали, конструкції та споруди

представлено у формі абсолютних максимумів. Долі прогинів сталеві балки від дії постійного та снігового навантажень від загального прогину визначаються:

$$C_1 = k / (\mu + k); \quad (9)$$

$$C_2 = \mu / (\mu + k). \quad (10)$$

Імовірність відмови при цьому визначається:

$$Q(t) \approx N_+(t) = \frac{K_3 f_{12}[(f_u - \bar{u}_{12}) / \hat{u}_{12}]}{\sqrt{1 + (\hat{u}_1 / \hat{u}_2)^2} f_1(\gamma_{02})}, \quad (11)$$

де  $f_{12}(\bullet)$  – композиція розподілів прогинів від постійного та снігового навантажень

$f_u$  – граничний прогин балки (визначається згідно норм [2]);

(композиція нормованих нормального  $f_1(\bullet)$

$\gamma_{02}$  – характеристичний максимум снігового навантаження, що відповідає періоду повтору  $t$ .

та поліномо-експоненційного  $f_2(\bullet)$  розподілів);

Таблиця 1.

Параметри снігового навантаження, отримані при обробці даних спостережень на різних метеостанціях України

№ п/п	Назва параметрів	Числові значення параметрів для метеостанцій		
		Івано-Франківськ	Вінниця	Семенівка
1	2	3	4	5
1	Дата появи стійкого снігового покрову $t_n$	24.XI	3.XI	30.X
2	Дата сходу стійкого снігового покрову $t_k$	5.IV	13.IV	27.IV
3	Параметр НКФ $\alpha$ , 1/добу	0.029	0.033	0.0219
4	Зона кореляції $t_{кор}$ , діб	101	92	136
5	Ефективна частота $\omega_e$ , 1/добу	0.111	0.131	0.0809
6	Частота за екстремумами $\omega_m$ , 1/добу	0.297	0.317	0.2185
7	Коефіцієнт варіації $V$	2.037	1.560	1.540
8	Асиметрія $A$	1.806	1.268	0.811
9	Математичне сподівання, що відповідає максимуму тренда $\bar{X}_{max}$ , Па	276.84	315.44	535.44
10	Коефіцієнти поліному тренда математичного сподівання			
	$P_0$	-153.561	-238.440	-174.744
	$P_1$	-2.9700	4.0861	-1.9629
	$P_2$	0.0882	0.0187	0.10741
	$P_3$	$-3.3 \cdot 10^{-4}$	$-1.4 \cdot 10^{-4}$	$-4.2 \cdot 10^{-4}$
11	Коефіцієнти поліномо-експоненційного розподілу			
	$C_0$	-2.366	-1.428	-1.2625
	$C_1$	-2.100	-1.504	-0.9326
	$C_2$	4.383	0.958	-0.1924
	$C_3$	-2.865	-0.506	-0.1849

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Результати імовірнісних розрахунків показують недостатню надійність сталевих елементів, підібраних за чинними нормами при дії снігового навантаження (див. табл. 2). Крім того, явним є неоднакова ступінь надійності елементів в різних регіонах України (див. табл.2). Проведені дослідження виявили загальну тенденцію до збільшення значень імовірності відмови сталевих елементів по мірі зменшення впливу постійного навантаження та росту значення  $C_2$ , що визначає долю напружень від снігового

навантаження в загальному напруженні в елементі. Викладена методика придатна як для імовірнісних розрахунків сталевих конструкцій при проектуванні або реконструкції унікальних будівель та споруд (імовірнісні моделі базуються на вихідних даних окремих метеостанцій, що дозволяє більш точно врахувати усі особливості навантажень), так і для імовірнісних розрахунків сталевих конструкцій масового виробництва (імовірнісні моделі базуються на узагальнених характеристиках тимчасових навантажень для районів України згідно норм [2]).

Таблиця 2.

Імовірність відмови кроквяних сталевих балок з покрівлею різної конструкції,  
(проліт  $L_B = 12$  м, крок  $B = 6$  м) з періодом експлуатації  $t = 50$  років

Тип покрівлі	Переріз № I	Результати розрахунку згідно норм проектування		Результат імовірнісного розрахунку конструкцій						
				Граничний стан 1 групи			Граничний стан 2 групи			
		$\sigma$ , МПа	$\frac{f}{L_B}$	Доля впливу		Імовірність відмови	Нижнє значення імовірності відмови	Доля впливу		Верхнє значення імовірності відмови
				$C_1$	$C_2$			$C_1$	$C_2$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Івано-Франківськ АМСГ</b>										
T1	55Б2	246	1/266	0.86	0.14	$1.59 \cdot 10^{-5}$	$8.53 \cdot 10^{-3}$	0.89	0.11	<b>0.416</b>
T2	45Б1	224	1/293	0.70	0.30	$1.87 \cdot 10^{-4}$	$6.13 \cdot 10^{-5}$	0.73	0.27	<b>0.611</b>
T3	35Б1	256	1/292	0.42	0.58	<b>0.0583</b>	$3.30 \cdot 10^{-9}$	0.52	0.48	<b>2.022*</b>
<b>Вінниця</b>										
T1	55Б2	259	1/266	0.82	0.18	$9.29 \cdot 10^{-3}$	$8.54 \cdot 10^{-3}$	0.84	0.16	<b>1.270*</b>
T2	45Б1	252	1/293	0.62	0.38	<b>0.0399</b>	$6.13 \cdot 10^{-5}$	0.66	0.34	<b>1.521*</b>
T3	35Б3	249	1/378	0.34	0.66	<b>0.5491</b>	$3.26 \cdot 10^{-14}$	0.44	0.56	<b>2.228*</b>
<b>Семенівна</b>										
T1	60Б1	242	1/331	0.76	0.24	$3.43 \cdot 10^{-3}$	$9.36 \cdot 10^{-9}$	0.78	0.21	<b>1.038*</b>
T2	45Б2	253	1/343	0.54	0.46	<b>0.1177</b>	$9.05 \cdot 10^{-11}$	0.57	0.43	<b>4.963*</b>
T3	40Б2	252	1/543	0.26	0.74	<b>0.5984</b>	$3.04 \cdot 10^{-16}$	0.36	0.64	<b>5.184*</b>

Примітки:

1. Типи покрівлі: T1 – покрівля з утеплювачем по залізобетонним панелям; T2 – покрівля з утеплювачем по сталевому профільованому настилу; T3 – покрівля без утеплювача по сталевому профільованому настилу.

2.  $C_1$  та  $C_2$  – відповідно долі впливу постійного та снігового навантажень.

3. Імовірності відмови за граничним станом 2 групи визначаються: нижнє значення – при дії постійного навантаження (влітку); верхнє – при дії постійного та снігового навантажень (взимку).

### Список використаних джерел

1. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ / Мінрегіонбуд України. –Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи /Мінбуд України.–Київ: Мінбуд України, 2006. – 75 с.
3. Пичугин, С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: монография / С.Ф. Пичугин. – Полтава: ООО «Асми», 2009. – 452 с.
4. Северин, В.О. Імовірнісний розрахунок сталевих конструкцій на сумісну дію випадкових навантажень: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. тех. наук: 05.23.01 / В.О. Северин. – Полтава: ПолтНТУ, 2001. –19 с.
5. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – К.: Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 1999. – 212 с.
6. Северин, В.О. Чисельне імовірнісне моделювання випадкового процесу снігового навантаження на покриття одноповерхових виробничих будівель / В.О. Северин, А.М. Пащенко, П.Ю. Винников, А.В. Батіг // ПолтНТУ, 2012. – С.127-134

Рецензент д-р техн наук Воскобійник О.П.

---

*Северин Віталій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної та теоретичної механіки імені Л.І. Сердюка, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.*

*Карабаш Леонід Віталійович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри будівельної та теоретичної механіки імені Л.І. Сердюка, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.*

*Лазарєв Дмитро Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної та теоретичної механіки імені Л.І. Сердюка, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.*

*Severyn Vitaliy Alekseevych Ph.D., associate professor at the chair of “Building and Theoretical Mechanics named after L.I. Serdyuk”, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. E-mail: navis12@ukr.net*

*Karabash Leonid Vytalevych Ph.D., senior lecturer at the chair of “Building and Theoretical Mechanics named after L.I. Serdyuk”, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. E-mail: Karabash.Poltava@mail.ru*

*Lazarev Dmitriy Nikolaevych Ph.D., associate professor at the chair of “Building and Theoretical Mechanics named after L.I. Serdyuk”, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. E-mail: lazaryev\_dmitriy@mail.ru*

Стаття прийнята 25.05.2015 р