

УДК 624.954

*М.В. Бібік, к.т.н., доцент
П.С. Мороз, магістрант*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВЕРТИКАЛЬНІ СТІНИ ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РІЗНИМИ НОРМАМИ

Наведено аналіз світових норм з визначення тиску сипких матеріалів на вертикальні стіни ємнісних конструкцій. Для спектра силосних конструкцій визначено тиск від дії сипких матеріалів відповідно до українських і європейських норм. Наведено аналіз результатів. Указано на недоліки та відмінності різних норм.

Ключові слова: *силос, бункер, теорія Янсена-Кенона.*

УДК 624.954

*Н.В. Бибик, к.т.н., доцент
П.С. Мороз, магистрант*

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СТЕНЫ ЁМКОСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РАЗНЫМ НОРМАМ

Приведен анализ мировых норм по определению давления сыпучих материалов на вертикальные стены ёмкостных конструкций. Для спектра силосных конструкций определено давление от действия сыпучих материалов согласно украинским и европейским нормам. Приведен анализ результатов. Указаны недостатки и отличия разных мировых норм.

Ключевые слова: *силос, бункер, теория Янсена-Кенона.*

UDC 624.954

*M.V. Bibik, PhD, Associate Professor
P.S. Moroz, master student*

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

DETERMINATION OF HORIZONTAL LOADS ON VERTICAL WALLS OF SILOS ACCORDING TO DIFFERENT STANDARTS

The analysis of world standards of determination of pressure of bulk materials on vertical walls of silos is provided in the article. Pressure from the influence of bulk materials is determined for a range of silo constructions in accordance with Ukrainian and Europe standards. The analysis of results is provided. Imperfections and differences of different design standards are indicated.

Keywords: *silo, storage bunker, Jansen-Canan's theory.*

Вступ. Сучасна промисловість і сільське господарство вимагає великої кількості ємнісних конструкцій для зберігання сипких матеріалів. Для їх зберігання будують ємнісні конструкції: силоси і бункери. На стіни цих конструкцій діє цілий спектр впливів і навантажень. Основне

навантаження – це тиск від сипкого матеріалу, що зберігається. Досвід експлуатації цих конструкцій демонструє необхідність удосконалення методики визначення тисків від сипких матеріалів.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Останнім часом дослідженням тиску сипкого матеріалу на стіни ємнісних конструкцій займалися О.С. Маркович [1, 6, 7], О.Е. Голіотто [2], Д.О. Банніков [3, 4], О.О. Короткий [5] та інші.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Історія використання ємнісних конструкцій налічує більше ста років. Однак за весь цей час конструкції бункерів і силосів не зазнали значних змін, так само, як і методика визначення навантажень на стіни ємнісних конструкцій. Існуючі ж методики не враховують мінливість напруженого стану сипкого матеріалу при витіканні зерна з ємності. Саме ці факти демонструють, що такий тип конструкцій є недостатньо вивченим.

Мета статті полягає в порівнянні сучасних світових норм з визначення тиску на стіни ємнісних конструкцій від сипких матеріалів.

Основний матеріал та результати. Стіни силосів зазнають постійних і тимчасових навантажень від власної ваги, вітрових та снігових впливів. Крім того, із середини на силоси діють значні горизонтальні й вертикальні навантаження від сипких матеріалів, що зберігаються. Ці фактори утворюють складні умови роботи конструкції в складному напруженому стані.

Питанню розподілення тиску в силосах присвячено достатню кількість теоретичних і експериментальних робіт. Фактичний тиск від сипкого матеріалу дуже нерівномірно розподіляється на стіни силосних конструкцій. У багатьох джерелах зазначають, що існує тимчасове підвищення тиску на стіни конструкцій під час вивантаження матеріалу. Стосовно величини підвищення тиску в різних джерелах існує розбіжність, яка коливається в межах від двох до трьох разів.

Одна з перших методик з визначення тиску від сипких матеріалів була запропонована Х.А. Янсенем і М. Кеноном у 1895 році [10]. Вони рекомендували використовувати такі формули для визначення горизонтального та вертикального тиску від зерна на стіни ємнісної конструкції:

$$P_h = \frac{\gamma\rho}{f} \left(1 - e^{-\frac{\lambda fz}{\rho}}\right), \quad (1)$$

$$P_v = \frac{P_h}{\lambda}, \quad (2)$$

де P_h – горизонтальний тиск, кгс/м²;

P_v – вертикальний тиск, кгс/м²;

ρ – гідравлічний радіус поперечного перерізу силоса, м;

γ – питома вага сипких матеріалів, кгс/м³;
 f – коефіцієнт тертя сипких матеріалів об стіну;
 λ – коефіцієнт бокового тиску сипкого матеріалу;
 z – глибина від верху засипки, для якої розраховується тиск.

За пропозицією М. Кенона відношення горизонтального тиску до вертикального (коефіцієнт бокового тиску) визначається як

$$\lambda = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

де φ – кут внутрішнього тертя.

Слід зауважити, що ці формули теоретичного рішення не враховують варіативність форм потоку. Дослідження, що проводилися, виділяють три форми витоку сипкого матеріалу із силоса [2, 8].

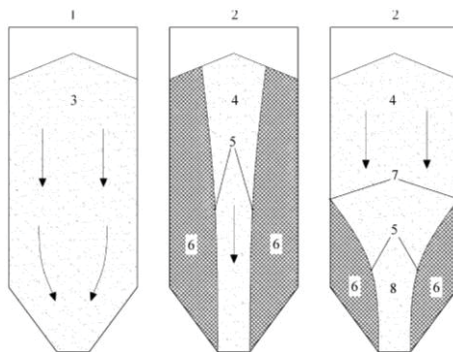


Рис. 1 – Форми потоку: 1 – масовий потік; 2 – конічний потік; 3 – весь матеріал у русі; 4 – текучий матеріал; 5 – межі каналу потоку; 6 – нерухомий матеріал; 7 – ефективний перехід; 8 – ефективна воронка

Масовий потік – форма потоку, при якому всі частки сипкого матеріалу рухаються одночасно під час вивантаження.

Потік у трубі – форма потоку, при котрому сипкий матеріал рухається у вертикальному або майже вертикальному каналі з основою у формі вихідного отвору, при цьому поблизу каналу матеріал знаходиться в нерухомому стані.

Змішаний потік – форма потоку, що звужується до вихідного отвору, при якому канал витоку стикається з вертикальною стінкою бункера у так званому ефективному переході (див. рис.1, 7) [8].

У цілому, теорія Янсена щодо визначення тиску на стіни ємнісних конструкцій має такі недоліки:

1. У цій теорії властивості сипких матеріалів є ідеалізованими і не враховують силу зчеплення між частками.

2. Сипкий матеріал при завантаженні та вивантаженні силосів переміщується рівномірно зі сталою швидкістю по всьому горизонтальному перерізу, що не відповідає дійсній картині переміщень сипких матеріалів у природі.

3. Геометрія силосних конструкцій приймається ідеальною, тобто не враховуються радіальні переміщення стін.

Але, незважаючи на всі ці припущення, теорія Янсена залишається єдиною прийнятною моделлю з визначення тиску від сипких матеріалів. Для врахування існуючих недоліків цієї теорії вченими і проектувальниками вводилися поправкові коефіцієнти надійності й додаткових локальних тисків.

У межах статті буде розглянуто і порівняно будівельні норми [8, 9].

Українські норми: ДБН В.2.2-8-98. Вони встановлюють вимоги до проектування і розрахунку силосів, бункерів. Розділ IV цього нормативу визначає навантаження і впливи, які діють на тонкостінні конструкції. Для встановлення горизонтального тиску на стіни ємнісних конструкцій від сипкого матеріалу враховуються рівномірно розподілений по периметру тиск та місцеві підвищені тиски – кільцеві, локальні смугові.

У цих нормах не враховуються форми потоку сипкого матеріалу, крім ситуації пристінного випуску матеріалу.

Рівномірно розподілений по периметру горизонтальний тиск сипких матеріалів на стіни визначається за формулою Янсена (1).

Кільцевий горизонтальний тиск сипких матеріалів приймається рівномірно розподіленим по всьому периметру стін силосів з висотою зони, що дорівнює $\frac{1}{4}$ діаметра силоса. Зона прикладання навантаження може займати будь-яке положення за висотою силоса. Кільцевий горизонтальний тиск визначається за формулою

$$P_{h1}^n = a_1 P_h^n. \quad (4)$$

Відповідно локальний горизонтальний тиск приймається розподіленим по двох діаметрально розташованих площадках. Останні займають будь-яке положення по периметру і висоті силоса. Визначається цей тиск наступним чином:

$$P_{h2}^n = a_2 P_h^n. \quad (5)$$

Коефіцієнти a_1 та a_2 – це коефіцієнти місцевого підвищення тиску, вони приймаються за таблицею 1 джерела [9].

Недоліком українських норм є те, що не враховується статистичний розкид характеристик матеріалів, а деякі важливі характеристики матеріалів відкидають. Наприклад, за ДБН В.2.2-8-98 кут природного укосу визначає кут внутрішнього тертя. Відсутні вказівки для комбінування навантажень і впливів, що діють на ємнісні конструкції, а також не враховуються форми потоку.

Європейські норми: ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Цей нормативний документ визначає лише дії на конструкції, всі розрахунки відповідних конструкцій наводяться в нормах [11].

Документ складається зі вступної частини, сімох розділів та дев'ятьох додатків, має значний обсяг і детально описує всі можливі розрахункові ситуації для прийняття проектних рішень на початку збору навантажень

для забезпечення надійності конструкцій. Для початку за другим розділом визначається клас за впливами, що дає можливість створювати проект з однаковим рівнем надійності з урахуванням витрат і заходів для зниження ризику відмов конструкцій. За бажанням проектанта завжди можна вибирати більш високий клас впливів.

Також детально наведені різні варіанти форм потоку сипкого матеріалу: симетричний, несиметричний, пристінний тощо. Для врахування впливу форм потоку за європейськими нормами бункери поділяють за гнучкістю:

- гнучкі бункери зі співвідношенням висоти до діаметра $2,0 \leq h_c/d_c$;
- бункери проміжної гнучкості $1,0 \leq h_c/d_c < 2,0$;
- бункери малої гнучкості $0,4 < h_c/d_c < 1,0$;
- опорні бункери з горизонтальним днищем $h_c/d_c \leq 0,4$.

При визначенні тисків від сипких матеріалів ураховуються крайні характеристичні значення параметрів статистичного розподілу матеріалу. Тобто для кожної конструкції приймається найбільш небезпечне значення параметрів матеріалу для встановлення найбільшого можливого впливу від тисків. У нормативі наводиться два підходи для визначення параметрів сипкого матеріалу: спрощений підхід (параметри добре відомих матеріалів приймаються за додатком, і враховується статистичний розкид значень параметрів); визначення характеристик за експериментальними випробуваннями.

Впливи на вертикальні стінки бункерів визначаються для ситуацій, наведених на рис. 2.

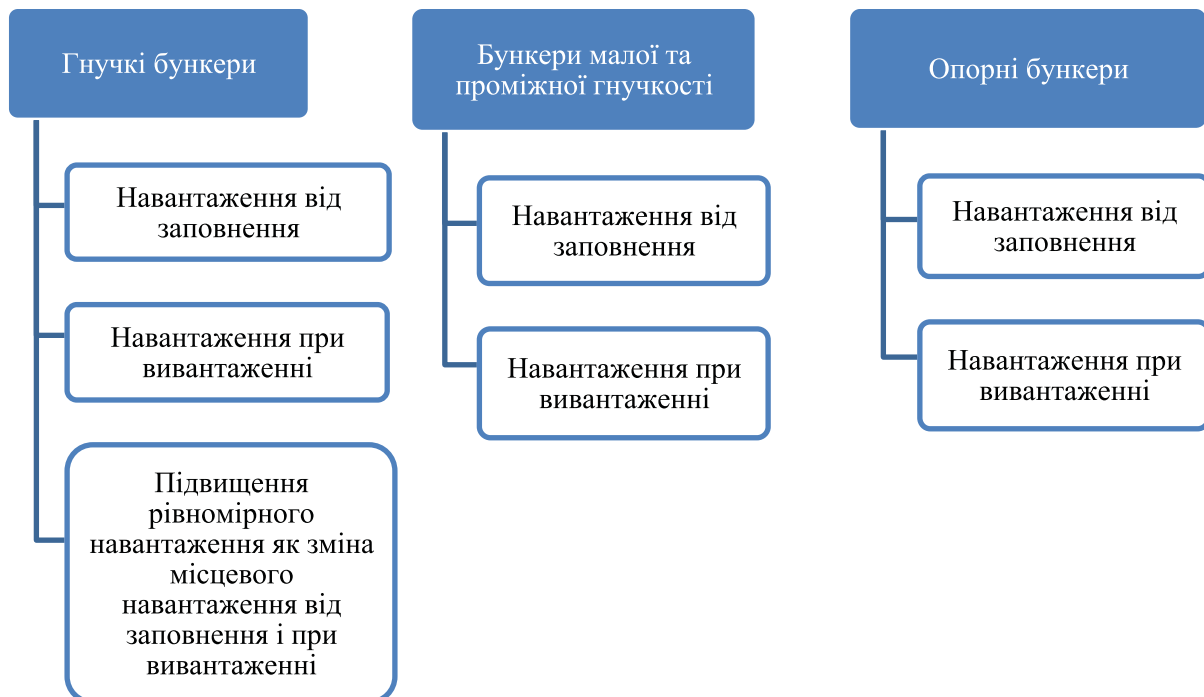


Рис. 2 – Впливи на вертикальні стіни бункерів

Для гнучкого бункера значення горизонтального тиску обчислюється за формулами:

$$p_{hf}(z) = p_{h0}Y_j(z); \quad (6)$$

$$p_{h0} = \gamma K z_0; \quad (7)$$

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U}; \quad (8)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}, \quad (9)$$

де $p_{hf}(z)$ – горизонтальний тиск після заповнення на глибині z під еквівалентною поверхнею матеріалу;

Y_j – змінна функція тиску від глибини за теорією Янсена;

γ – характеристичне значення питомої ваги;

K – характеристичне значення коефіцієнта бокового тиску;

z_0 – характеристична глибина за теорією Янсена;

μ – характеристичне значення коефіцієнта тертя об стінки матеріалу;

A – площа внутрішнього поперечного перерізу бункера;

U – периметр внутрішнього поперечного перетину бункера.

Для бункерів малої та проміжної гнучкості значення горизонтального тиску обчислюється за формулами:

$$p_{hf}(z) = p_{h0}Y_R; \quad (10)$$

$$p_{h0} = \gamma K z_0 = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U}; \quad (11)$$

$$Y_R = \left(1 - \left\{\left(\frac{z-h_0}{z_0-h_0}\right) + 1\right\}^n\right); \quad (12)$$

$$n = -(1 + \tan \varphi_r)(1 - h_0/z_0), \quad (13)$$

де Y_R – зміна функції тиску від глибини для бункера малої гнучкості;

h_0 – відстань між еквівалентною поверхнею сипкого матеріалу і нижньою точкою насипного конуса, яка визначається для циліндричного бункера за формулою

$$h_0 = \frac{r}{3} \tan \varphi_r, \quad (14)$$

де φ_r – кут природного укосу матеріалу.

Для опорних бункерів значення горизонтального тиску визначається за формулою

$$p_h = \gamma K (1 + \sin \varphi_r) z_s, \quad (15)$$

де z_s – глибина під найвищою точкою контакту матеріалу, що зберігається, зі стінкою.

Порівняння стандартів. Для порівняння цих будівельних норм визначимо горизонтальний нормальний тиск, що діє на стіни ємнісних конструкцій за обома стандартами. Для розрахунку використані наступні вихідні дані.

Сипкий матеріал: пшениця. Характеристики матеріалу наведені в таблиці 1.

Геометричні параметри силосів: діаметр незмінний і дорівнює 12 м, а висота змінюється в межах 4,8 – 24 м. Зміна висоти конструкції обумовлена необхідністю порівняння розрахунків для різних типів гнучкості бункерів. Відповідно маємо:

$$h_c/d_c = 24/12 = 2,0 \leq 2 - \text{гнучкий бункер};$$

$$1 < h_c/d_c = 18/12 = 1,5 < 2 - \text{бункер проміжної гнучкості};$$

$$0,4 < h_c/d_c = 8,4/12 = 0,7 < 1 - \text{бункер малої гнучкості};$$

$$h_c/d_c = 4,8/12 = 0,4 \leq 0,4 - \text{опорний бункер}.$$

Таблиця 1 – Характеристика сипкого матеріалу

Назва матеріалу	Питома вага γ , кН/м ³	Кут природного укошу φ_0	Кут внутрішнього тертя φ_{int}^0	Коефіцієнт бокового тиску К	Коефіцієнт місцевого навантаження C_{op}	Коефіцієнт тертя об стінку μ
Пшениця	9,0	34	30	0,54	0,5	0,38

Результати порівняння наведені на графіках рис. 4 – 7.

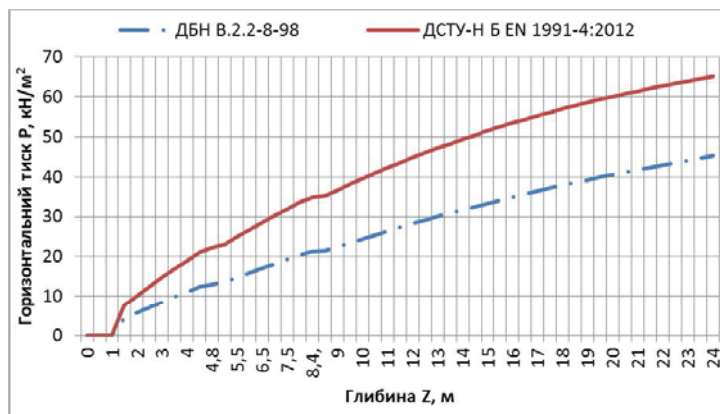


Рис. 4 – Розрахункове значення рівномірно розподіленого по периметру нормального тиску сипкого матеріалу на стіні гнучкого бункера

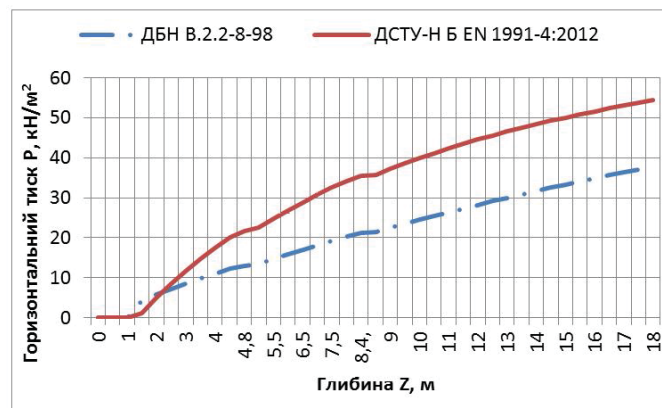


Рис. 5 – Розрахункове значення рівномірно розподіленого по периметру нормального тиску сипкого матеріалу на стіні бункера проміжної гнучкості

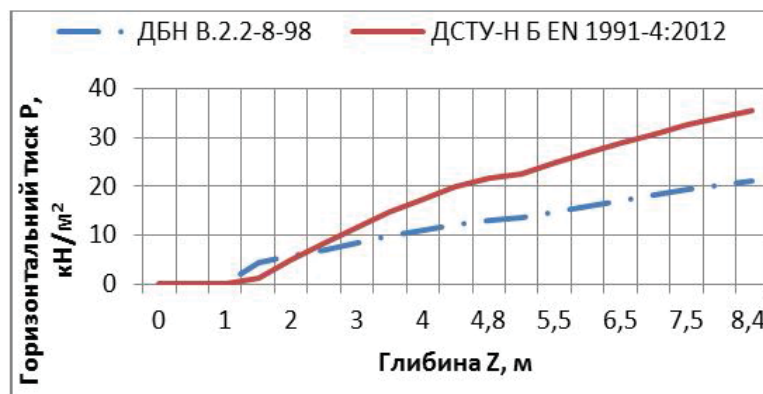


Рис. 6 – Розрахункове значення рівномірно розподіленого по периметру нормального тиску сипкого матеріалу на стіни бункера малої гнучкості

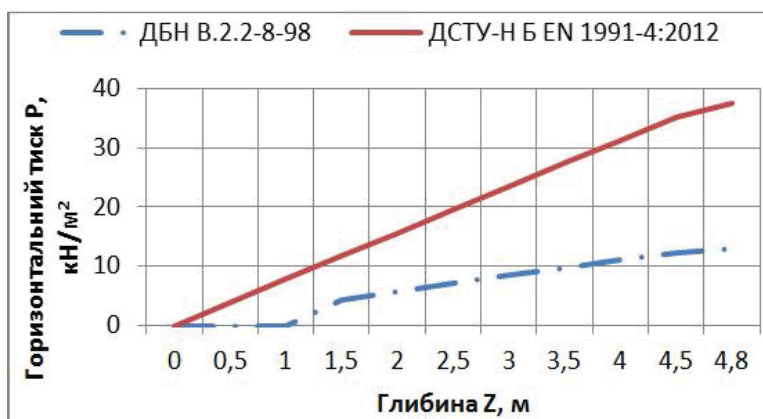


Рис. 7 – Розрахункове значення рівномірно розподіленого по периметру нормального тиску сипкого матеріалу на стіни опорного бункера

Таблиця 2 – Різниця значень горизонтальних тисків за нормами [8, 9]

Умовна позначка	Гнучкий бункер	Бункер проміжної гнучкості	Бункер малої гнучкості	Опорний бункер
Δ, %	30,6	30,4	40,1	65,3

У таблиці 2 Δ – це різниця значень горизонтального тиску сипкого матеріалу на максимальній глибині бункера.

Висновки. На основі аналізу українських і європейських стандартів щодо визначення дій на ємнісні конструкції робимо висновок, що європейські норми порівняно з вітчизняними є більш опрацьованими й описують більшу кількість розрахункових ситуацій. Незважаючи на те, що обидва стандарти спираються на єдину модель визначення тиску сипких матеріалів (теорія Янсена – Кенона), за результатами розрахунків виявлено відмінність значень горизонтальних тисків. Це пов'язано із наступними відмінностями ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012: європейські норми мають поділ за гнучкістю силосних конструкцій і відповідно різні підходи до визначення горизонтального тиску, враховується статистичний розкид характеристик сипкого матеріалу; вітчизняний стандарт розрізняє кути природного укосу і внутрішнього тертя сипкого матеріалу.

Література

1. Маркович, А.С. Теоретические исследования давления сыпучего материала на стены силосных сооружений / А.С. Маркович // Вестник ВолгГАСУ. – 2011. – С. 60 – 65.
2. Голлиотто, О.Е. Исследования напряженно-деформированного состояния стенок силосов в елеваторах / О.Е. Голлиотто // Белорусский национальный технический университет. – 2010. – №3 – С. 8 – 11.
3. Банніков, Д.О. Експериментальні дослідження статистичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції / Д.О. Банніков // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – №4 – С. 79 – 88.
4. Банніков, Д.О. Континуальна модель тиску сипкого матеріалу в замкненій ємнісній конструкції / Д.О. Банніков // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – 2008. – Вип. 17. – С. 333 – 340.
5. Короткий, О.А. Совершенствование конструкции цилиндрических силосов, используемых в сельском хозяйстве / О.А. Короткий. – М.: Калужский филиал Московского Государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 2009. – 18 с.
6. Маркович, А.С. К вопросу повышения долговечности инженерных силосных сооружений / А.С. Маркович // Вестник ТГТУ. – 2004. – Т. 17. № 3. – С. 775 – 779.
7. Маркович, А.С. Определение расчетной нагрузки сыпучего материала, действующей на стены цилиндрических силосов, в результате экспериментальных и теоретических исследований / А.С. Маркович. – М.: Московский государственный строительный университет, 2013. – 20 с.
8. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1. Дії на конструкції. Ч. 4. Бункери і резервуари. – К. : Мінбуд України, 2012. – 168 с.
9. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. – К.: Мінбуд України, 1998. – 39 с.
10. Janssen, H.A. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen / H.A. Janssen // Vereines deutscher Ingenieure. – 1895. – Vol. 39. – №35. – P. 1045 – 1049.
11. ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:201X. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4 – 1: Силоси (проект). – К. : Мінбуд України, 2012. – 166 с.

Надійшла до редакції 02.04.2014

©М.В. Бібік, П.С. Мороз