

УДК 624.954

Проектування сталевих силосних ємностей за панельною конструктивною схемою

Банніков Д. О., д.т.н.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, Україна

Анотація. Існуюча традиційна конструктивна схема сталевих силосних ємностей для сипучих матеріалів відрізняється низкою недоліків, які знижують надійність та довговічність таких споруд. У теперішній час продовжується пошук та розробка більш досконалих та сучасних конструктивних рішень. Одним із них є запропонована автором панельна конструктивна схема на основі використання сталевих гофрованих листів. У публікації наведено співставлення конструкції силосної ємності, запроєктованої у відповідності до традиційного підходу та у відповідності до панельної схеми. Показано, що використання панельної конструктивної схеми дозволяє суттєво покращити основні конструктивні показники бункерних ємностей для сипучих матеріалів, отримати більш рівномірну картину напружено-деформованого стану, зменшивши при цьому матеріаломісткість приблизно до 1,5 разів.

Аннотация. Существующая традиционная конструктивная схема стальных силосных емкостей для сыпучих материалов отличается рядом недостатков, которые снижают надежность и долговечность таких сооружений. В настоящее время продолжается поиск и разработка более совершенных и современных конструктивных решений. Одним из них является предложенная автором панельная конструктивная схема на основе использования стальных гофрированных листов. В публикации приведено сопоставление конструкции силосной емкости, запроектированной в соответствии с традиционным подходом и в соответствии с панельной схемой. Показано, что использование панельной конструктивной схемы позволяет существенно улучшить основные конструктивные показатели бункерных емкостей для сыпучих материалов, получить более равномерную картину напряженно-деформированного состояния, снизив при этом материалоемкость приблизительно до 1,5 раз.

Abstract. The existing traditional structural scheme of steel silo capacities for granular materials differs in a number of failings, which decrease reliability and longevity of such structures. A search and development of more perfect and modern structural decisions proceeds presently. One of them is the panel structural scheme offered by the author on the basis of the use of the steel corrugated sheets. Comparison of construction of silo capacity projected in accordance with traditional approach and in accordance with a panel scheme is resulted in a publication. It is shown that the usage of panel structural scheme allows substantial improving of basic structural indexes of bunker capacities for granular materials to get a smoother picture of the stress-deformed state, reducing metal-capacity approximately up to 1,5 times.

Ключові слова. Силосна ємність, сипучий матеріал, панельна конструктивна схема.

Проблема підвищення надійності й довговічності силосних ємностей. Силосні ємнісні будівельні конструкції призначені для зберігання різноманітних сипучих речовин та мають досить широке розповсюдження

у сільському господарстві, харчовій та будівельній промисловостях. Цьому сприяє їх значний об'єм, який дозволяє одночасно накопичувати суттєві обсяги завантаженої сировини, матеріалів та продукції. Проте при цьому перевагу частіше віддають створенню та експлуатації силосів, виконаних із залізобетону, ніж зі сталі. Це пов'язано з низкою обставин, які обмежують тривале використання сталевих споруд ємнісного типу.

Основним нормативним документом в Україні, що регламентує проектування сталевих силосних ємностей, є ДБН [1], який був виданий на заміну СНиП [2]. Додатково деякі вимоги наведені також у СНиП [3], який поки що залишається не оновленим. Низку практичних рекомендацій і прикладів розрахунку та конструювання різноманітних силосних споруд представлено в довідковому виданні [4], а також викладено в спеціалізованій фаховій літературі [5–7].

Відповідно до цих джерел сталеві силосні ємності проектуються за традиційною конструктивною схемою. Вона передбачає круглу в плані форму споруди, утворену із замкнених сталевих листів відносно невеликої товщини. По периметру такі листи підкріплюються горизонтально розташованими ребрами жорсткості, які виконують підсилюючу функцію (рис. 1). Обпирання всієї споруди передбачається на колони, що приєднуються до корпусу через спеціальний пояс жорсткості.



Рис. 1. Традиційна конструктивна схема сталевих силосних ємностей

На жаль, подібна конструктивна схема має низку недоліків, які на практиці призводять до різноманітних відмов та аварій [8–11]. Серед цих недоліків слід відмітити високу нерівномірність напружено-

деформованого стану в різних зонах конструкції, наявність концентраторів напружень, підвищену матеріаломісткість, утрудненість монтажу при значних розмірах конструкції тощо.

Сучасні розробки конструктивних рішень. Останнім часом проводиться пошук більш досконалих конструктивних рішень. Основним напрямком при цьому є розробка легкозбірних силосних конструкцій із застосуванням гнучких елементів [12] або простих одиночних гофрованих листів [13, 14]. Останній тип конструкцій набув нині значного розповсюдження і в Україні (рис. 2).

Між тим, накопичений досвід використання та експлуатації подібних конструктивних схем силосних ємностей свідчить про їх низьку надійність та вкрай невисоку живучість. Так, на рис. 3 наведено фотографії різноманітних відмов та аварій, які сталися із силосами подібної конструкції в останні роки [15, 16].



Рис. 2. Конструктивна схема сталевих силосних ємностей на основі гофрованих листів



Рис. 3. Відмови та аварії сталевих силосних ємностей з конструктивною схемою на основі гофрованих листів

Мета досліджень. Зважаючи на подібну ситуацію, стає зрозумілою необхідність продовження досліджень у цьому напрямку та пошуку більш досконалих рішень. Тому автором розроблено та запропоновано нову панельну конструктивну схему для сталевих силосних споруд [17, 18], основні принципи рішення якої було запатентовано [19, 20]. Вона має багат шарову складну конструкцію, що відрізняє її від інших існуючих конструктивних схем. Ефективність використання такої схеми обумовлена не тільки самими конструктивними рішеннями, а й комплексним підходом до проектування сталевих силосних ємностей у цілому. Сутність та зміст цього підходу викладені в роботах автора [17, 18, 21]. Основним питанням при цьому є оцінка ефективності запропонованої панельної конструктивної схеми в порівнянні з існуючою традиційною реберною конструктивною схемою. Проведення подібного співставлення і є метою даної публікації.

Ефективність панельної конструктивної схеми. В якості базового конструктивного варіанту силосної ємності круглого поперечного

перерізу, спроектованого відповідно до рекомендацій традиційного підходу, була використана силосна ємність для зберігання цементу за роботою [9]. Як було зазначено в цій роботі, така ємність зруйнувалася невдовзі після початку експлуатації.

Ємність має наступні геометричні розміри: діаметр у плані 10 м, висота вертикальної частини 21 м, висота похилої нижньої випускної частини 5,6 м, кут нахилу стінок її бокових граней 50° . Загальний об'єм ємності – 1830 м^3 . У конструктивному відношенні ємнісна споруда являє собою двоступінчасту конструкцію, нижня частина якої складається лише зі сталеві обшивки товщиною 10 мм без підкріплення ребрами жорсткості. Верхня частина виконана у вигляді прямого циліндру, розділеного ребрами жорсткості з двох спарених кутиків $180 \times 110 \times 10$ мм на 7 секцій. Товщина їх обшивки змінювалася від 6 мм для верхньої секції до 12 мм для нижньої. Загальна маса ємності становить близько 60 т.

Для проведення досліджень використовувався метод комп'ютерного моделювання на основі одного з сучасних чисельних методів будівельної механіки – методу скінченних елементів. Його практична реалізація здійснювалася на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows [22]. Створення моделей та їх дискретизація виконувались у відповідності до рекомендацій попередніх досліджень [23]. Тиск від сипучого матеріалу передбачався заданим за традиційним підходом – відповідно до гідростатичного закону. Приймалася до уваги й власна вага конструкції. Розрахунки виконувались у геометрично нелінійній постановці, яка відповідає дійсній роботі конструкції під навантаженням.

Отримані в результаті картини напружено-деформованого стану (НДС) даної ємності наведені на рис. 4. Більш темним ділянкам відповідає більш високий рівень напружень. Окремо аналізувалася стійкість елементів ємності та спектр її власних коливань. Основні результати наведені в порівняльній таблиці.

Даний конструктивний варіант був перепроєктований у відповідності до рекомендацій розробленої автором теоретичної концепції формоутворення. Діаметр випускного отвору був залишений таким, як і в базовому варіанті – 60 см. За результатами визначення оптимальної зовнішньої форми кут нахилу бокових граней був відкорегований і склав $\alpha = 55^\circ$, що є дещо більшим, ніж у базовому варіанті. Розраховані оптимальні висоти кожної частини дорівнюють: $y_1 = 12,4$ м і $y_2 = 3,0$ м. Діаметр у плані при цьому склав 18 м. Слід звернути увагу на те, що перепроєктована конструкція виявилася невисокою, але широкою. Проте така споруда приблизно в 1,5 рази є більш економічною за масою, ніж вузька і висока.

Нова споруда була запроєктована у відповідності до панельної конструктивної схеми з використанням гофрованих листів. Внутрішній лист був прийнятий товщиною 2 мм, а зовнішній – гофр із розмірами, які змінювалися від $320 \times 80 \times 2$ мм до $550 \times 120 \times 2$ мм. Це дозволило отримати рівень напружень приблизно такий, як і в базовому варіанті.

Розрахунки НДС велись, як і в попередньому випадку, методом скінченних елементів на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows. Отримані за його результатам основні показники наведені в порівняльній таблиці 1, а картини НДС – на рис. 5 і 6.

В якості матеріалу конструкції для обох випадків було прийнято сталь ВСт3пс6 із розрахунковим опором 240 МПа.

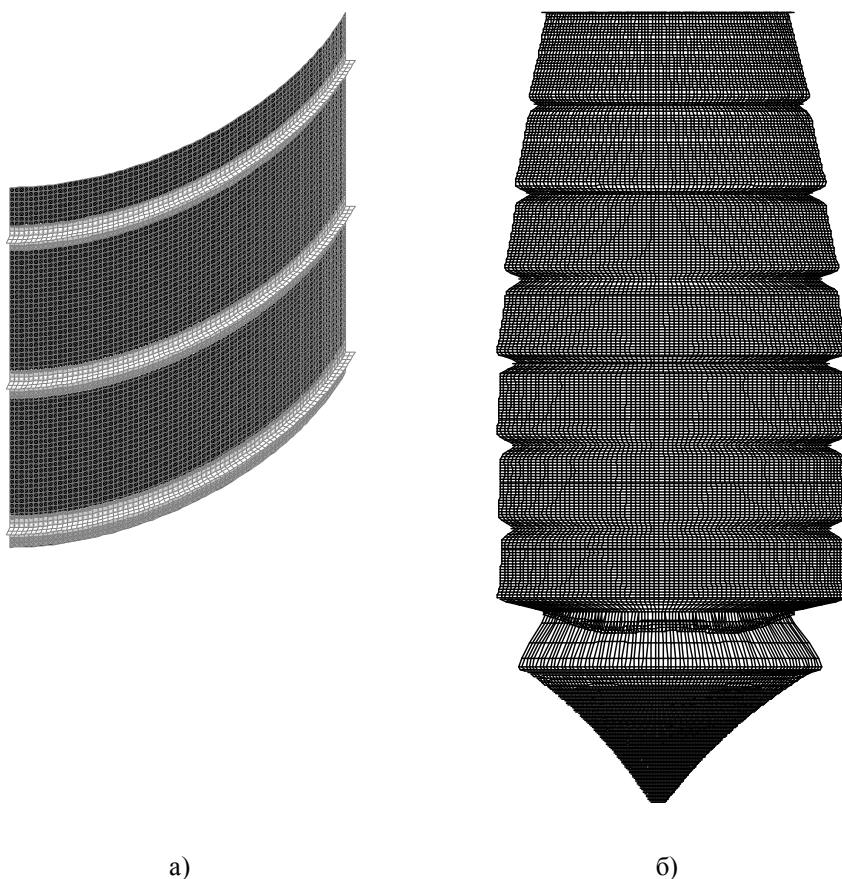


Рис. 4. Фрагмент напруженого стану (а) і деформований стан (б) сталевій силосній ємності традиційної конструктивної схеми

Аналізуючи отримані результати, слід зауважити, що питання визначення основних техніко-економічних показників, які мають використовуватися при порівняльній оцінці ефективності різних конструктивних рішень для різноманітних видів будівельних конструкцій, достатньо докладно розроблені Я. М. Ліхтарніковим [24]. Проте ринкові економічні умови, в яких зараз перебувають більшість країн світу, включаючи й Україну, не дають можливості застосувати такі підходи. Адже вартість проектування, виготовлення та експлуатації будівельних конструкцій у теперішній час формується стихійно, з урахуванням швидкозмінних стрибків цін на різні види товарів та послуг на світових ринках. Тому автору здається цілком логічним не використовувати будь-які кошторисні показники при оцінці ефективності різних конструктивних рішень, а застосовувати більш традиційні і об'єктивні, на його думку, конструктивні показники.

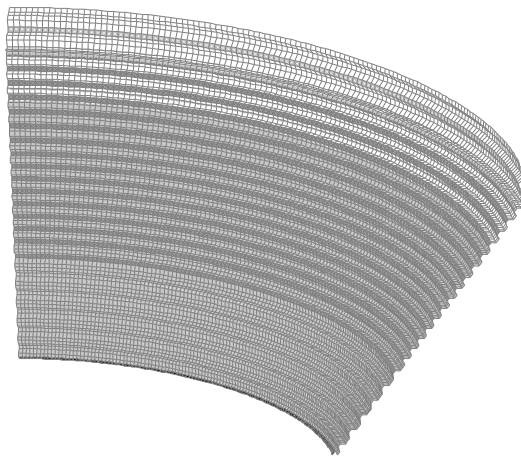


Рис. 5. Фрагмент напруженого стану сталевій силосній ємності панельної конструктивної схеми

Сучасні дослідження будівельних конструкцій так чи інакше спрямовуються на використання певних техніко-економічних показників. Але при цьому необхідно розробляти нові сучасні методики оцінки, придатні для ринкових економічних умов. Так, у роботі [25] наводиться розроблена авторами методика техніко-економічного аналізу для варіантного проектування мембранних покриттів. Вона включає до свого складу ряд технологічних параметрів, необхідних при оцінці трудомісткості виконаних робіт. Проте, на жаль, для ємнісних будівельних конструкцій подібні підходи відсутні. Тому здається цілком логічним

обмежитися на даному етапі порівнянням лише показників напружено-деформованого стану силосних споруд (величин напружень та деформацій), а також їх якісного розподілу.

Ще одним важливим кількісним показником по відношенню до розглядуваного типу будівельних конструкцій є довжина зварних з'єднань, оскільки саме вони в багатьох випадках виявляються найбільш слабким місцем таких споруд. Основні з подібних показників відображені в таблиці 1.

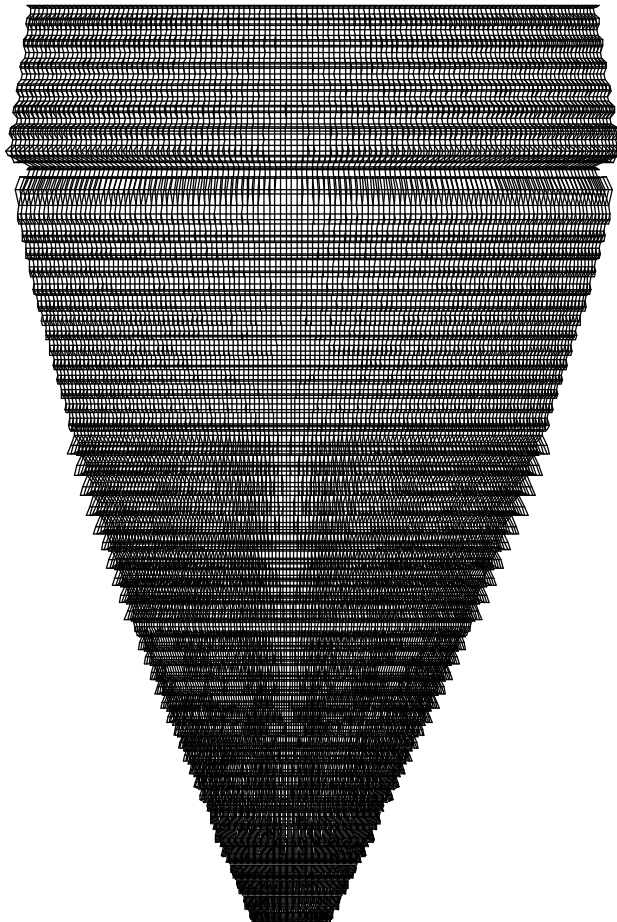


Рис. 6. Деформований стан сталеві силосної ємності панельної конструктивної схеми

Таблиця 1

Співставлення показників конструктивних варіантів

№ з/п	Показник, одиниці виміру	Конструктивна схема ємності	
		Традиційна	Панельна
1	Еквівалентні напруження в верхній частині, МПа	110	56
2	Еквівалентні напруження в перехідній зоні, МПа	184	152
3	Еквівалентні напруження в нижній частині, МПа	96	176
4	Прогин у верхній частині, мм	3,2	2,2
5	Прогин у нижній частині, мм	2,5	5,5
6	Перша власна частота коливань, Гц	8,26	23,65
7	Друга власна частота коливань, Гц	11,98	29,29
8	Коефіцієнт запасу стійкості	43,6	26,4
9	Довжина зварних швів, м	1 920	1 560
10	Маса, кг	60 700	38 100
11	Об'єм, м ³	1 830	1 840

Основні результати та висновки. З аналізу наведених результатів на рис. 4–6 і в таблиці видно, що НДС нового конструктивного варіанту ємності є більш рівномірним, ніж для базового варіанту. При цьому рівень напружень виявляється приблизно таким самим, як і в базовому варіанті, однак найбільші напруження спостерігаються не в небезпечній перехідній зоні (зона з'єднання верхньої та нижньої частин конструкції, по якій відбулося руйнування конструкції), а в нижній частині. Рівень деформацій є дещо більшим, ніж у базовому варіанті, однак абсолютні їх величини виявляються цілком прийнятними. Проте загальна жорсткість конструкції виявляється більш високою, ніж у первісному базовому варіанті. Довжина зварних швів залишилася практично без змін. Основною перевагою нового конструктивного варіанту є, окрім більш рівномірного розподілу НДС, зменшена приблизно в 1,6 разів маса споруди при такому ж самому її об'ємі.

Таким чином, запропонований до проектування сталевих силосних ємнісних конструкцій комплексний підхід із використанням панельної конструктивної схеми дозволяє покращити основні конструктивні показники таких споруд, підвищити рівень їх надійності та, відповідно, довговічності. При цьому матеріаломісткість споруди може бути зменшена за теоретичними підрахунками на величину до 1,5 разів при такому ж самому її об'ємі.

Література

- [1] Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна : ДБН В.2.2-8-98. – Офіц. видання. – К. : Держбуд України, 1998. – 41 с.
- [2] Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна : СНиП 2.10.05-85. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 24 с.
- [3] Сооружения промышленных предприятий : СНиП 2.09.03-85. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
- [4] Пособие по проектированию предприятий, зданий и сооружений по хранению и переработке зерна : пособие к СНиП 2.10.05-85 / ЦНИИпромзернопроект. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 145 с.
- [5] Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Стройиздат, 1970. – 488 с.
- [6] Справочник проектировщика инженерных сооружений / [Под ред. Д. А. Коршунова]. – К. : Будівельник, 1988. – 352 с.
- [7] Справочник проектировщика. Металлические конструкции : в 3 т. / [Под ред. В. В. Кузнецова]. – М. : АСВ, 1998. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – 1998. – 526 с.
- [8] Сахновский М. М. Надежность строительных сварных конструкций и некоторые уроки аварий / М. М. Сахновский // Вопросы строительных конструкций : труды Днепропетровского института инженеров транспорта. – Днепропетровск : ДИИТ, 1971. – Вып. 118. – С. 3–10.
- [9] Беляев Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б. И. Беляев, В. С. Корниенко. – М. : Изд-во лит-ры по строит-ву, 1968. – 208 с.
- [10] Банников Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 59–66.
- [11] Bannikov D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramidally-prismatic type) / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Theoretical Foundations of Civil Engineering : зб. наук. праць ПДАБА і ВТУ. – Warsaw : Warszawskiej Politechnik, 2002. – Vol. II. – С. 650–657.
- [12] Кузнецов И. М. Пространственная работа гибкого металлического силоса с наружным стержневым каркасом : автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / И. М. Кузнецов. – М., 2000. – 20 с.
- [13] Ращепкина С. А. Металлические спирально-навивные силосы / С. А. Ращепкина, С. В. Ращепкин. – Саратов, 2004. – 146 с.
- [14] Соболев Ю. В. Металлические силосы. Современное состояние и опыт строительства / Ю. В. Соболев, С. А. Ращепкина, А. П. Денисова. – Саратов, 1988. – 51 с.
- [15] Дослідження причин руйнації будівельного об'єкту – силосу для зберігання сухого зерна на 5500 тонн пункту приймання та відвантаження зерна філії «Золотоніська» : звіт про НДР / Укрндіпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського; кер. Голоднов О. І. ; вик. Козлов С. В. – К., 2009. – 55 с. – Інв. № 24789

- [16] Дослідження причин появи пошкоджень будівельного об'єкту – силосу для оперативного зберігання зерна на 442 тонни, який розташований на території елеватору в с. Піщане : звіт про НДР / Укрнідпроектсталь-конструкція ім. В.М. Шимановського; кер. Голоднов О. І ; вик. Козлов С. В., Варенко Ю. М. – К., 2009. – 34 с. – Інв. № 24923.
- [17] Банніков Д. О. Теорія формування вертикальних сталевих емнісних конструкцій для сипучих матеріалів : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – 332 с.
- [18] Банников Д. О. Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования / Д. О. Банников. – Днепропетровск : Монолит, 2009. – 186 с.
- [19] Декл. пат. 69817 А Україна, МПК⁷ Е 04 Н 7/30. Металева емність для сипучих матеріалів із окремих панелей / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявник і патентовласник Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. - № 200331211224; заявл. 09.12.03; опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
- [20] Декл. пат. 70576 А Україна, МПК⁷ Е 04 Н 7/30. Вузол з'єднання стінових панелей металевих емностей для сипучих матеріалів / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявник и патентовласник Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211267; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
- [21] Банніков Д. О. Сипучий матеріал в емнісній конструкції / Д. О. Банніков. – Дніпропетровськ : Моноліт, 2009. – 172 с.
- [22] Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / [В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др.]. – К. : ВВП Компас, 2000. – 332 с.
- [23] Банников Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Днепропетровск : Наука и образование, 2003. – 150 с.
- [24] Лихтарников Я. М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа при проектировании / Я. М. Лихтарников. – М. : Стройиздат, 1968. – 264 с.
- [25] Горохов Е. В. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов / [Е. В. Горохов, В. Ф. Мушанов, Р. И. Кинаш, А. В. Шимановский и др.]. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Макеевка : РИО ДонНАСА, 2008. – 404 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2011 р.