

УДК 624.014.2

### **З ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКОНОМІЧНИХ МЕТАЛЕВИХ СПІРАЛЬНО-ФАЛЬЦЕВИХ СИЛОСІВ ДЛЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **FROM THE OPERATION EXPERIENCE OF ECONOMICAL METAL SPIRAL-FOLD SILOS FOR BULK MATERIALS**

**Пічугін С.Ф., д.т.н., професор, ORCID 0000-0001-8505-2130, Оксененко К.О., аспірант, ORCID 0000-0002-5171-3583 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)**

**Pichugin S.F., DSc, Professor, ORCID 0000-0001-8505-2130 Oksenenko K.O., graduate student, ORCID 0000-0002-5171-3583 (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic)**

**В статті наведено історичні аспекти розвитку силосних конструкцій. Розглянуто конструкцію сталевих спірально-фальцевих силосів та спосіб формування циліндричного корпусу. Проілюстрована загальна конструкція спірально-фальцевого силосу. Описаний досвід експлуатації спірально-фальцевих силосів.**

**The wide use of capacitive constructions in various industries is considered. The historical aspects of the development of silo structures are introduced. The history of occurrence of structures of spiral-fold silos is considered. The design of steel spiral-fold silos. The set of equipment for the construction of the housing of the spiral-fold silos is given. The step-by-step process of formation of the folding lock and features of process of installation of the body are described. The design of the spiral-fold silo has been shown. The advantages and disadvantages of spiral-fold silos are determined. The experience of operation of spiral-fold silos on the example of Botievsky elevator is described. Technical characteristics of spiral-fold silos located on the territory of Botievsky elevator are given. The diameter and height of silos, wall thickness are described. Silo ribs, features of their height and location are considered. The design features of the roof and fastening of the transport gallery to the silo walls are described. The stages of modernization of the silage unloading system are described. The peculiarities of each stage and the consequences they led to are considered. Photos of consequences after the accident with the unloading system are given. The main causes of accidents of silo structures are given. Examples of accidents due to improper operation of silos are described.**

**Ключові слова:**

металевий силос, спірально-фальцевий силос, фальцевий замок, аварія  
steelsilo, spiral-foldsilo, foldinglock, collapse

**Вступ.** Велика кількість галузей економіки пов'язана зі зберіганням та переробкою твердих матеріалів в насипному вигляді. Підприємства хімічної, металургійної промисловості, а також промисловості будівельних матеріалів не тільки добувають матеріали, зокрема, вугілля, руду, щебінь, пісок та інші, а й в процесі переробки первинної сировини виробляють велику кількість нових сипучих матеріалів, таких як кокс, цемент, шлак, концентрати та інші. Щорічно, агропромисловий комплекс України також обробляє мільйони тон сипучих матеріалів у вигляді різних зернових культур. Тимчасове або тривале зберігання матеріалу є невід'ємною частиною багатьох технологічних процесів. Для цих цілей використовуються спеціальні ємнісні конструкції – силоси та бункери. Переважно вони виготовляються з металу та залізобетону та відрізняються великою кількістю конструктивних рішень.

**Аналіз останніх досліджень.** Велика кількість науковців займається дослідженнями силосів для сипучих матеріалів [1-3]. Науковий інтерес викликає не тільки різноманіття конструктивних форм силосів та їх особливості, але й дослідження того, як ці конструкції поведуть себе в процесі експлуатації та аналіз можливих причин, які можуть спричинити пошкодження або аварію силосів [4-5].

**Постановка мети і задач досліджень.** Метою дослідження є аналіз досвіду багаторічної експлуатації сталевих спірально-фальцевих силосів. Розглянуті історичні аспекти розвитку силосних конструкцій. Виконаний огляд конструкцій спірально-фальцевих силосів, їх переваг та недоліків в порівнянні з іншими типами ємнісних споруд. Наведені результати технічного обстеження силосного парку після 35-річної експлуатації. Розглянуті ймовірні причини пошкоджень та аварій силосних конструкцій.

**Методика досліджень.** Аналіз існуючих наукових досліджень пов'язаних з силосними конструкціями. Натурний огляд спірально-фальцевих силосів на території України, які експлуатуються більше 35 років.

**Результати досліджень.** Побудова першого металевого силосу датована кінцем XIX ст. У 1893 році на Колумбійській виставці (м. Чикаго, США) був представлений зразок металевого силосу. У 30-х роках XX ст. розвиток металургійної галузі сприяє подальшим спробам спорудження металевих ємностей для зберігання зерна. Ці силоси являли собою цільнозварну конструкцію. Широкомасштабне будівництво збірних сталевих ємностей зберігання в Америці та ряді розвинених країн Європи починається з середини 70-х років. На початку 90-х років з'являються перші сталеві силосні ємності, в яких використовується гофрована стінка та болтові з'єднання [4].

У 1968 році німецький вчений КсаверЛіпп використовував спеціальне обладнання для обробки листового металу і застосував його для зведення

спірально-навивних силосів. У 1969 році в Німеччині був побудований перший такий силос. І з кінця 60-х років в Європі почали використовувати силоси з тонкими стінами. Протягом десяти років вивчення і дослідження на практиці ця технологія успішно зарекомендувала себе, і з початку 70-х років почалося великомасштабне виробництво оцинкованих сталевих силосів[6].

**Конструкція спірально-фальцевих силосів.** Конструкція спірально-фальцевого циліндричного силосу формується за допомогою спеціального обладнання, яке навиває металевий штрипс по спіралі з одночасним формуванням фальцевого ребра замкнутого типу. Фальцевий замок розташований ззовні стінки силосу під незначним кутом до горизонтальної площини і утворює кільцеві ребра. Крок кільцевих ребер 365мм.

Комплект обладнання для зведення спірального силосу, як правило, складається з: розмотчика рулонів, формуючого пристрою, вальцювального верстата і несучих рам. Основною функцією формуючого пристрою є профілізація і згинання сталевий стрічки шириною 495 мм по діаметру силосу.

Вальцювальний верстат призначений для вальцювання сталевий стрічки і одночасно створення міцного вальцюваного шва із зовнішнього боку силосу, кожен виток якого дає додаткове ребро жорсткості всієї конструкції.

Процес монтажу конструкції силосу простий, швидкий та ефективний. (рис. 1). Рулони сталі, машини і несучі рами доставляються на будівельний майданчик. Унікальна технологія дозволяє вести компактний монтаж високоміцних та герметичних силосів безпосередньо на будівельному майданчику, без використання болтів і зварних з'єднань.

Переваги таких силосів:

- висока точність, високий ступінь автоматизації та швидкість монтажу; зменшення часу на монтаж і необхідної кількості монтажників; мінімізація людського фактору при монтажі, весь процес монтажу силосу відбувається автоматично за допомогою спеціального агрегату, час монтажу - від 4 до 6 днів.
- під час використання силос не потребує будь-якого технічного обслуговування, може протистояти 7-бальному та більшому землетрусу, сильним вітрам; гарантія на силос більше 30 років;
- якісна герметизація, водонепроникність, повна відсутність болтових з'єднань і робіт, пов'язаних з гідроізоляцією; можливість зберігати стічні води, масло, нафтопродукти, цемент та інші матеріали; при використанні нержавіючої сталі можливість зберігання харчових продуктів, спирту, виноматеріалів, борошна, солоду, патоки, соняшникової олії і т.д;
- економія сталі, висока міцність;
- вага силосу менша, ніж в інших типів конструкцій силосів

Недоліком спірально-фальцевих силосів є те, що максимальний обсяг силосу не може перевищувати 10 тис. м<sup>3</sup>;

Можливість зберігання різного типу матеріалу, від рідин до мілко дисперсних матеріалів, робить цей тип ємностей універсальним та економічним. Основні показники, які впливають на ціноутворення – низькі витрати на робочу силу, швидкість монтажу та понижена вага конструкції. Це ті переваги, які роблять спірально-фальцеві силоси економічнішими в порівнянні з іншими типами конструкцій [7,8].

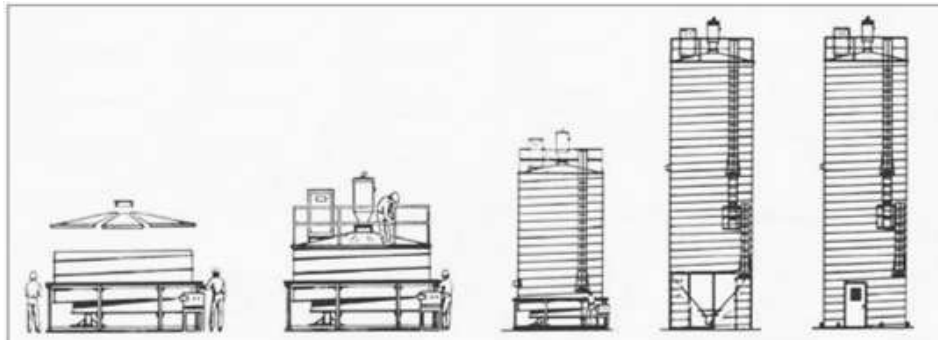


Рис. 1. Процес монтажу конструкції силосу

**Досвід експлуатації спірально-фальцевих силосів.** Одним з перших елеваторів в Україні зі спірально-фальцевими силосами є Ботієвський елеватор (рис. 2).



Рис. 2. Силосний комплекс для зберігання зерна ( Запорізька обл., 2021р.)

Ботієвський елеватор розміщений в с. Строганівка, Запорізької обл., на території розміщені металеві силоси спірально-фальцевого типу ємністю 24 тис. т. Елеватор має лінії авторозвантаження та автозавантаження, очищення та сушіння зерна. Завантаження на корабель на даний час не працює. Обстеження силосів було проведено в липні 2021р.

Спірально-фальцеві силоси (рис. 2) були побудовані в 1986 р фірмою «Полтаваелеваторбуд». Силоси проектувались та експлуатувались як кооперативні ємності, тобто за рік мали декілька циклів розвантаження-завантаження, кількість циклів окремих ємностей могла дорівнювати 5-6 разів на рік. Габарити силосів – діаметр 18 м, висота 19 м, загальна ємність 3 тис. т. Товщина корпусу по всій висоті однакова – 5 мм. Особливістю обстежених конструкцій є те, що всередині силосу розміщені вертикальні ребра (рис. 3) зі швеллерів, які приварені до корпусу за допомогою пластин.

Частина ребер розміщена на нижніх 4-х ярусах силосу, інші ребра доходять до середини висоти корпусу. Ребра різної висоти чередуються.

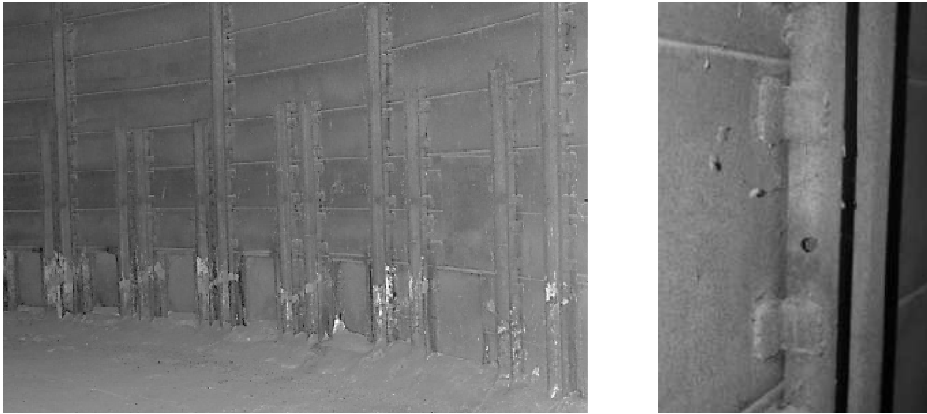


Рис. 3. Ребра жорсткості всередині силосу

Покрівля силосу (рис. 4, а,б) – конічна, металева, фальцева, без крокв'яної системи. Листи покрівлі приварені зверху до завантажувального кільця, знизу до корпусу силосу. Для підсилення листів та фальцевого з'єднання, всередині силосу встановлений бандаж з труби по листам покрівлі (рис. 4, а,б). Все навантаження від покрівлі передається на корпус силосу.

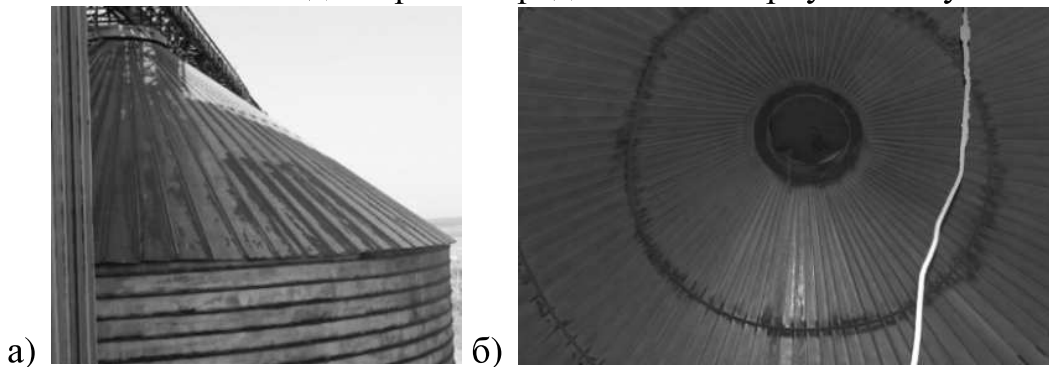


Рис. 4. Фальцева покрівля силосу: а) вигляд ззовні; б) вигляд зсередини

Завантаження силосів відбувається через верхнє, центральне кільце. Транспортна галерея опирається на опори, що прикріплені до корпусу силосу (рис. 5,а). По висоті корпусу силоса опори виконані з 2-хшвеллерів, які за допомогою кутиків прикріплені до корпусу. Кутики в міжфальцевій зоні приварені до корпусу, швеллери з кутиками з'єднані болтами (рис. 5,б).

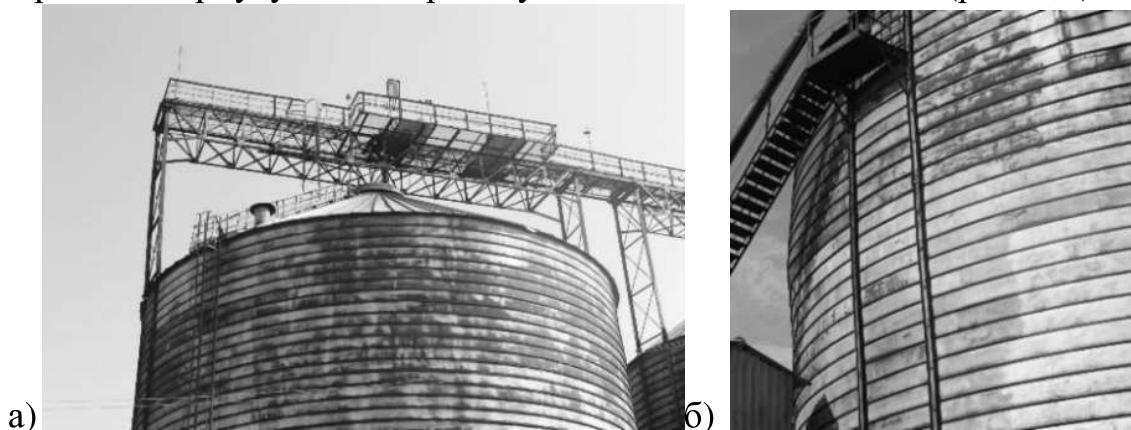


Рис. 5. Транспортна галерея: а) опори транспортної галереї б) кріплення опор до корпусу силосу

Розвантаження силосу було запроектоване центральним, самопливним. Для цього під силосами розміщена підземна галерея, у фундаменті виконані ємності, по центру розміщені отвори для розвантаження (рис. 6,б).

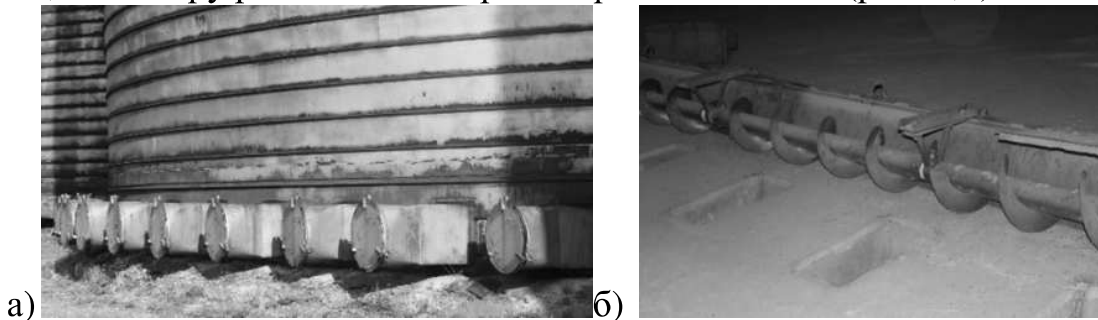


Рис. 6. Система розвантаження: а) аероканали для підключення вентиляторів; б) зачисний шнек та канали для розвантаження силосу.

За проектом розвантаження силосу повинно було відбуватись за наступною технологією: зерно самопливом витікало в підземну галерею, коли центр силосу розвантажувався, вмикались вентилятори СВМ-6 (рис. 6,а), що розміщені по бокам силосу, 14 вентиляторів з кожної сторони силосу. Потoki повітря повинні були здувати зерно з боків до центру. Технологія себе не виправдала при першому розвантаженні силосу.

В зв'язку з цим, було запроектовано сідлоподібне дно. До корпусу силосу були приварені металеві листи з двох сторін, листи підкріплювались опорами. Таке рішення дозволяло стікати зерну до центру, для повного розвантаження самопливом, але в той же час зменшувало об'єм зберігання.

При першому вивантаженні силосу, конструкція сідлоподібного дна не витримала, під тиском зерна одна половина дна обвалилась, що призвело до прикладення значних бічних сил на стінку силоса. Стінка ємності деформувалась у місці приварювання дна та у верхній частині, під покрівлею (рис. 7).

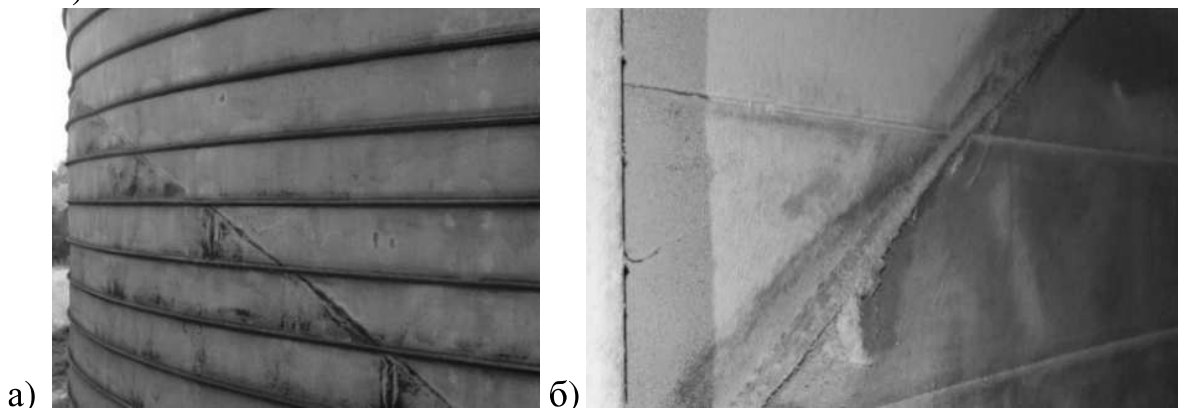


Рис. 7. Наслідки приварювання сідлоподібного дна до корпусу силосу: а) вигляд ззовні; б) вигляд зсередини

Деформування стінки, спричинені аварією, були незначні, силос залишився цілим та був в експлуатації й надалі на протязі 35 років. Після обвалу конструкції дна, було вирішено встановити зачисний шнек для повного розвантаження силосу (рис. 6,б).

Силосний парк Ботієвського елеватора – приклад надійності і довговічності конструкцій спірально-фальцевих силосів. Після 35 років експлуатації та пережитої аварії, конструкції силосів залишились у задовільному технічному стані. Поважний вік конструкцій видає корозія на поверхні силосів, зважаючи на те, що лакофарбове покриття не відновлювалось на протязі всіх років експлуатації. Ці дефекти є незначними, й ємності придатні для подальшого використання.

Аварії тонкостінних ємностей не є рідким явищем [4,5]. Помилки в проектуванні та експлуатації є одними з найвірогідніших причин аварій. Вивчаючи випадки руйнування сталевих силосів, можна заключити, що більшість зруйнованих конструкцій мають проблему недостатньої проектної міцності як фундаменту, так і самої ємності.

Правильна експлуатація також відіграє важливу роль. Будь-який технічний виріб має своєчасно обслуговуватись, особливо через певний час після здачі в експлуатацію. Один з найпоширеніших прикладів недбалості під час експлуатації силосів: вивантаження зерна не через центральну засувку, а через бокову. Якщо замість центральної або разом з центральною відкриваються бокові засувки, зусилля від тиску зерна збільшується на бокові стінки, і силос може деформуватися. Ще одним прикладом неправильної експлуатації є закриті вентиляційні канали покрівлі при вивантаженні сипучого матеріалу, як наслідок чого виникають деформації та руйнування стінки силосу. У такому випадку всередині силосу утвориться надмірний тиск, який призводить до всмоктування конструкції всередину (рис. 8).

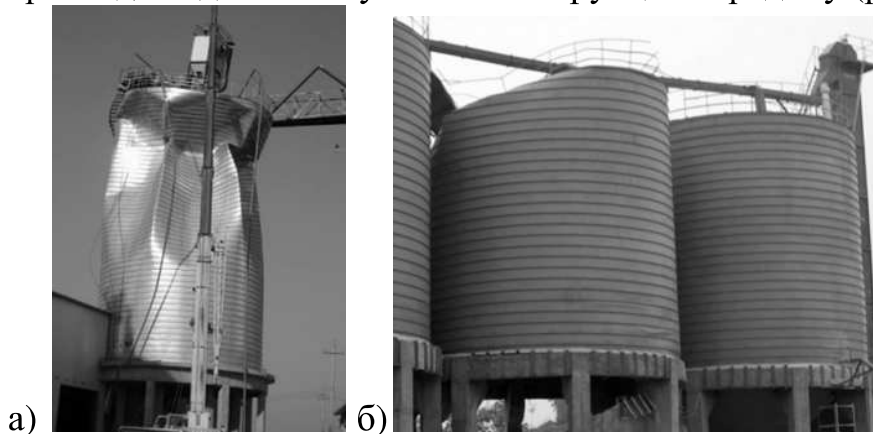


Рис. 8. Аварії при вивантаженні силосів

**Висновки.** Спірально-фальцеві силоси є універсальними та економічними ємнісними конструкціями, які є перспективними для України. Прикладом надійності та довговічності цих конструкцій є силосний парк Ботієвського елеватора (Запорізька обл.). З досвіду експлуатації очевидно, що системи розвантаження та завантаження силосу є важливими технологічними процесами, які впливають не тільки на продуктивність елеватора, але при неправильному проектуванні та експлуатації можуть призвести до аварій.

1. Pichugin S., Oksenenko K. (2019). Comparative analysis of design solutions of metal silos// Academic journal. Series: Industrial Machine Building, CivilEngineering, 2019. 53 (2). p.53. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1890>
2. Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour and Design [1st Edition by CJ Brown, J. Nielsen]. – London and New York: E & FN Spon, 2011.
3. Махінько Н. О. Методологія розрахунку надійності сталевих ємностей для зберігання зерна :дис. докт. техн. наук : 05.23.01 / Махінько Н. О. – Одеса, 2019. – 620 с.  
Makhinko NO Methodology for calculating the reliability of steel tanks for grain storage: dis. Dr. tech. Sciences: 05.23.01 / Makhinko NO - Odessa, 2019. - 620 p.
4. Silo Collapse under Granular Discharge, G. Gutiérrez, C. Colonnello, P. Boltenhagen, J. R. Darias, R. Peralta-Fabi, F. Brau, and E. ClémentPhys. Rev. Lett. 114, 018001 – Published 6 January 2015
5. Rotter J. Silos and tanks in research and practice: State of the art and current challenges / J. Rotter. // Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures. – 2009.
6. Xaver Lipp [Internet resource]. - Access mode - <https://xaver-lipp.com/>.
7. Пичугин С. Использование спирально-фальцевых силосов на территории Украины / С. Пичугин, К. Оксененко. // ArCivE 2021. – 2021. – С. 430 – 437.  
Pichugin S. Using of spiral-fold silos on the territory of Ukraine / S. Pichugin, K. Oksenenko. // ArCivE 2021. - 2021. - P. 430 - 437.
8. S. Pichugin, K Oksenenko, M. Hajiyev, M. Sulewska, Features of structures and calculation of steel spiral-fold silos. January 2021, E3S Web of Conferences 280(4):03006. DOI: 10.1051/e3sconf/202128003006