

СТВОРЕННЯ НАДІЙНИХ ТА ЖИВУЧИХ ЗЕРНОСХОВИЩ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА СВІТОВОЇ ПРОДОВОЛЬЧОЇ КРИЗИ

Махінко А.В., д.т.н., проф.

makhinko.anton@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0002-9147-7087

Махінко Н.О., д.т.н., проф.

nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0001-8120-6374

Національний авіаційний університет

Скляренко С.О., к.т.н., доц.

poltpro@gmail.com, ORCID 0000-0002-3929-4240

ПП Полтава-проект

Бірко О.О.

obirko@ukr.net, ORCID 0009-0004-8690-0663

ТОВ Монель

Анотація. В статті детально висвітлена повна інженерна методика перевірконого розрахунку конструкцій сталевих зерноскладів на основі загальноєвропейської системи нормування Eurocode з урахуванням настанов національного додатку. Для оцінки напружено-деформованого стану окремих конструктивних елементів силосу було залучено два методи: безпосередньо метод кінцево-елементного аналізу без врахування ефектів геометричної та фізичної нелінійності та теоретичний метод, заснований на мембранній теорії у лінійно-пружній постановці в припущенні лінійно-пружних характеристик матеріалу і лінійної теорії малих деформацій. Виконана перевірка практичної реалізації методики на прикладі реальних конструкцій сталевих силосних ємностей.

Ключові слова: сталевий силос, розрахункова схема, несуча здатність, напружено-деформований стан, гофрований лист, граничний стан.

Вступ. Агропромисловий комплекс традиційно є потужним драйвером економічного зростання України, що забезпечує не лише продовольчу безпеку країни, але й експортний потенціал. Наша країна є частиною глобального зернового ринку, «європейською житницею» для всього світу і до недавнього часу характеризувалася стабільно позитивною тенденцією щорічного зростання. Однак негативні наслідки пандемії COVID-19 та воєнне вторгнення в Україну порушили баланс функціонування світової агропродовольчої системи, викликавши масштабну продовольчу кризу. Викликом часу стало для українських аграріїв виростити, зберегти та забезпечити збут зернових і олійних культур в умовах воєнного стану та логістичної блокади країн-сусідів (рис. 1).

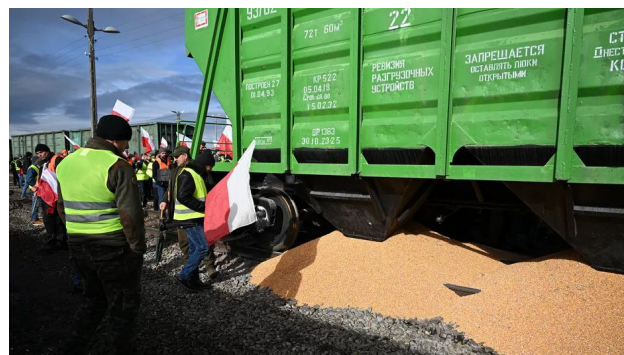


Рис. 1. Блокада пунктів пропуску на кордонах

«Воєнними цілями» країни-агресора стають зерносклади, продовольчі склади, транспортні термінали та інфраструктура (рис. 2).

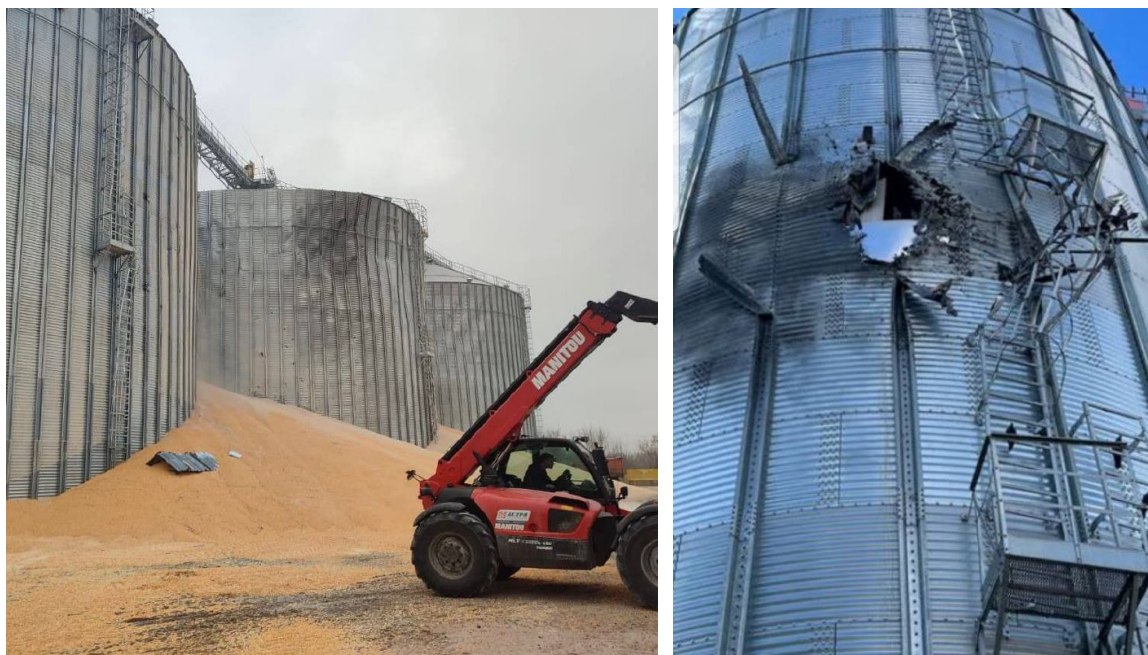


Рис. 2. Критичні пошкодження зернових ємностей внаслідок воєнних дій у 2023 році

Саме тому відповідно до постанови КМУ №1384 від 16.12.2023 до переліку об'єктів критичної інфраструктури долучено підприємства, сферою діяльності яких є виробництво та переробка сільськогосподарської продукції [1]. З огляду на це, особливо актуально постала проблема створення надійних та живучих споруд елеваторних підприємств, які забезпечують збереження зернової продукції в умовах її сезонного характеру виробництва та постійної високої споживчої необхідності. В першу чергу це стосується конструкцій систем сталевих оцинкованих силосів з гофрованою стінкою, які дозволяють довготривало зберігати продукцію та дають змогу здійснювати високотехнологічне переміщення зерна, його кондиціювання та переробку з мінімальним втручанням персоналу.

Наразі дефіцит ємностей зберігання гостро відчувається як у окремих аграріїв, так і для цілих сільськогосподарських холдингів, а попит на розрахунки силосних конструкцій у заводів-виробників тільки зростає.

Ще одним вагомим аргументом для даного дослідження стало введення нового нормативного документу ДБН В.2.6-221:2021 «Конструкції силосів сталевих з гофрованою стінкою для зерна» [2], який декларує правила проектування даних споруд в правовому полі європейських стандартів [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача проектування металевих силосів не втрачає своєї актуальності вже багато років. Відмітимо вагомні наукові доробки в цій області, в яких досліджуються питання конструювання сталевих ємностей для сипких матеріалів [5], оцінки надійності сталевих ємностей для зберігання зерна [6] та ряд питань щодо методів розрахунку в аналітичній [7-9] та скінчено-елементній постановці [10-12].

Постановка проблеми. Нові проєктні норми [2] враховують величезний світовий досвід із проєктування, зведення та експлуатації силосів та мають пряме й правочинне посилення на необхідні стандарти системи загальноєвропейського нормування Eurocode [3]. Проте в них відсутні механізми визначення рівня надійності, якому відповідає споруда. Це питання залишається відкритим для замовників, які не можуть обґрунтовано зважити всі ризики використання споруд даного класу, особливо в умовах діючого в нашій країні військового стану. Додатково актуальність дослідження зростає і для безпосередніх виробників конструкцій, які опиняються в пошуках нових конструктивних рішень, що будуть відповідати чинним вимогам та конкурентними в умовах дефіциту сталі та масового дорожчання виробництва.

Мета та завдання. Загальною метою дослідження є наукове обґрунтування, розробка та впровадження у сферу сільськогосподарського будівництва науково-технічних рішень із

проектування та зведення надійних та живучих зерносховищ, працюючих в проектних та особливих умовах воєнного часу. Зокрема акцент роботи здійснено на визначенні механізмів регулювання надійності конструкцій зерносховищ в рамках застосування напівімовірнісного розрахунку в формі методу граничних станів відповідно системи загальноєвропейського нормування Eurocode та розробці багатоетапної повної методики перевірконого розрахунку сталевих циліндричного зерносховища відповідно до положень ДБН В.2.6-221:2021 та ДСТУ-Н Б EN 1991-4 [3].

Загальні положення розрахунку та механізм регулювання надійності. Розрахунок сталевих силосів здійснюється на підставі розрахункової моделі, що в повній мірі враховує всі чинники, які мають істотний вплив на напружено-деформаційний стан конструкції. Всі розрахункові положення формулюються для граничних станів елементів силосу, які визначають межу між допустимими і недопустимими (позаграничними) станами конструкції. Перехід через граничний стан відповідає одному з видів відмови, а самі граничні стани при цьому вважаються допустимими. Граничні стани можуть бути віднесені або до конструкції загалом, або до окремих її елементів, з'єднань або поперечних перерізів. Безвідмовність конструкції силосів, відповідно норм, забезпечується розрахунком за напівімовірнісним методом часткових (незалежних) коефіцієнтів надійності відповідно ДСТУ-Н Б EN 1990 [4]

$$f(F_d, R_d, a_d, \Delta_{\text{lim}}, T_{ef}, \gamma_M, \gamma_F, \gamma_{sd}) \geq 0, \quad (1)$$

де $F_d = F_k \cdot \gamma_F$ - розрахункові значення навантажень, визначені відповідно до характеристичних значень F_k при встановленому коефіцієнті надійності γ_F ; γ_F - частковий коефіцієнт надійності за навантаженням, який враховує вірогідність несприятливих відхилень величини F_k ; $R_d = R_k / \gamma_M$ - розрахункові значення характеристик міцності сталі представлені через характеристичний опір R_k і коефіцієнт надійності за матеріалом γ_M ; a_d - розрахункове значення певної геометричної характеристики (площа поперечного перерізу, момент опору, момент інерції); Δ_{lim} - обмеження на параметр, що контролюється (наприклад гранично допустимий прогин конструкції); T_{ef} - нормативний термін експлуатації силосу; γ_{sd} - коефіцієнт, який враховує невизначеності розрахункової моделі.

Нерівність (1) описує принципову структуру перевірконої умови і повинна уточнюватися для конкретних умов з урахуванням того, що F_d , R_d та a_d - це, як правило, декілька величин, а кожна з умов може бути представлена у вигляді декількох нерівностей, наприклад F_d об'єднує цілий перелік одночасно діючих навантажень.

Класифікація силосу за рівнем відповідальності за [4] визначається залежно від наслідків руйнування або несправної роботи його конструктивних елементів. З урахуванням, що силос характеризується низькою імовірністю скупчення людей, приймається клас наслідків RC2 із коефіцієнтом надійності 1,0. Значення часткових коефіцієнтів надійності, які відповідають за мінливість інших параметрів розрахункової схеми, зведені в таблицю 1. Перша група коефіцієнтів відіграє роль регулятора надійності конструкцій безпосередньо у граничних нерівностях методу граничних станів. Друга група враховує мінливість окремих зовнішніх впливів, а третя група враховує малу ймовірність одночасної реалізації розрахункових значень цих впливів. Відмітимо, що вказані значення часткових коефіцієнтів надійності регулюються виключно нормативними вимогами і настановами національного додатку і не можуть бути скориговані технічним завданням на проектування.

Ще одною складовою регулювання надійності конструкцій силоса, яка задекларована у [3], є класифікація силоса щодо впливу на нього продукту зберігання. Клас впливів враховує ємність силосу й ексцентриситети його завантаження. Враховуючи, що силос має центральне завантаження, яке унеможливорює появу ексцентричних тисків на його корпус, клас впливів ідентифікується як ААС3.

Таблиця 1.

Значення часткових коефіцієнтів надійності

Назва коефіцієнта	Значення
Перша група коефіцієнтів надійності	
Коефіцієнт надійності при визначенні несучої здатності листів корпусу, воронки силосу та елементів опорної частини за міцністю	1,0
Коефіцієнт надійності при оцінці стійкості корпусу силосу	1,1
Коефіцієнт надійності при оцінці стійкості елементів покрівлі	1,0
Коефіцієнт надійності при визначенні несучої здатності елементів силоса, послаблених отворами під болти	1,25
Коефіцієнт надійності при визначенні несучої здатності листів корпусу за критерієм малоциклової втоми	1,0
Коефіцієнт надійності при визначенні несучої здатності болтових з'єднань	1,25
Коефіцієнт надійності при визначенні несучої здатності листів корпусу за критерієм багатоциклової втоми	1,1
Друга група коефіцієнтів надійності	
Коефіцієнт надійності несприятливої постійної дії	0,85
Коефіцієнт надійності для постійних навантажень	1,35
Коефіцієнт надійності для навантажень, які викликані дією сипкого продукту	1,35
Коефіцієнт надійності для снігового і вітрового навантаження	1,5
Коефіцієнт надійності для температурних впливів та навантажень від ваги термопідвісок	1,5
Третя група коефіцієнтів надійності (коефіцієнти сполучення навантажень)	
Навантаження від зміни температури навколишнього середовища	0,6
Снігове навантаження	0,6
Вітрове навантаження	0,6

Конструктивне рішення силосу та основні принципи побудови розрахункової моделі. З конструктивної точки зору сталевий силос являє собою ємність для зберігання сипкого матеріалу, яка складається з корпусу та покрівлі. Корпус вирішується у вигляді циліндричної оболонки обертання виконаної з гофрованих оцинкованих листів, які підкріплюються вертикальними ребрами жорсткості (рис. 3 а). З висотою як товщини листів корпусу, так і ребер змінюються.

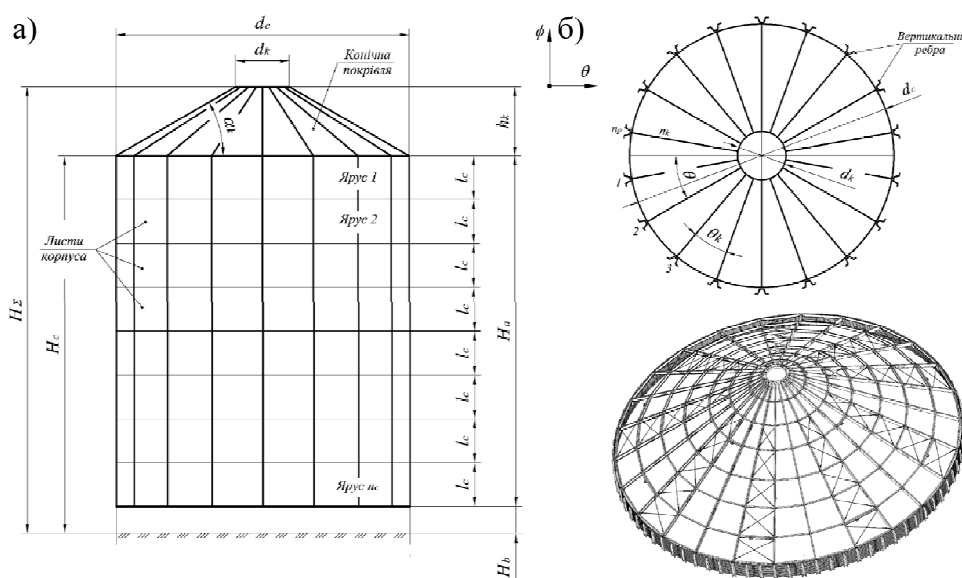


Рис. 3. Загальна схема силосу із основними геометричними параметрами:
а) корпус; б) покрівля

Покрівля силосу каркасна та має конічну форму (рис. 3 б). Вона утворена системою радіальних і кільцевих елементів та загалом може бути представлена циклічно симетрично просторовою системою, яка при повороті навколо центральної вісі на певний кут θ_k суміщається зі своїм первинним положенням. Сегмент покрівлі утворений головними радіальними балками та кільцевими ребрами жорсткості. Радіальні балки одним кінцем спираються на корпус силосу, а іншим – на центральне кільце покрівлі, кільцеві ребра прикріплюються в одному рівні до головних балок. Додатково на каркасі передбачена окрема система балок для кріплення термopідвісок. Просторова жорсткість покрівлі забезпечується системою хрестових в'язей. Всі монтажні з'єднання елементів виконані на болтах без контролюваного натягу.

Для створення розрахункової моделі застосовуються програмні комплекси кінцево-елементного аналізу будівельних конструкцій. В даному дослідженні застосовується сучасний вітчизняний продукт Scad Office 21.1 (ліцензія №16276), в основу обчислювальних алгоритмів якого покладений метод переміщень. Модель силосу формується у вигляді набору стрижнів та пластин з відповідними умовами примикання елементів до вузлів: постановка в'язей у вузлах для обмеження ступенів вільності, влаштування кінцевих шарнірів для визволення взаємних лінійних та кутових зміщень, введення жорстких вставок для відсунення пружних частин стрижнів від вузлів примикання.

Наприклад листи корпусу моделюються плоскими кінцевими елементами типу 44 «чотирикутний елемент оболонки», а лінійні конструкції – стрижневим елементом типу 10 – «універсальний просторовий стрижневий елемент». Враховуючи, що частина конструкцій силосу виконані із холодноформованих тонкостінних елементів, розрахункова модель може бути виконана у двох варіантах. Перший варіант використовується для визначення внутрішніх зусиль і наступної перевірки несучої здатності конструкцій за першою групою граничних станів, другий – для оцінки жорсткості силосу в цілому та деформативності окремих конструкцій, тобто для другої групи граничних станів. Відмінність двох варіантів полягає у значеннях навантажень для кожного граничного стану та характеристиках жорсткості стрижневих елементів: для першого варіанта застосовуються характеристики повного поперечного перерізу, для другого – ефективні.

Для спрощення моделювання криволінійної поверхні гофра корпусу ємності запропоновано застосовувати зубчастий профіль з еквівалентними характеристиками жорсткості на розтяг та згин (рис. 4) [6, 16]

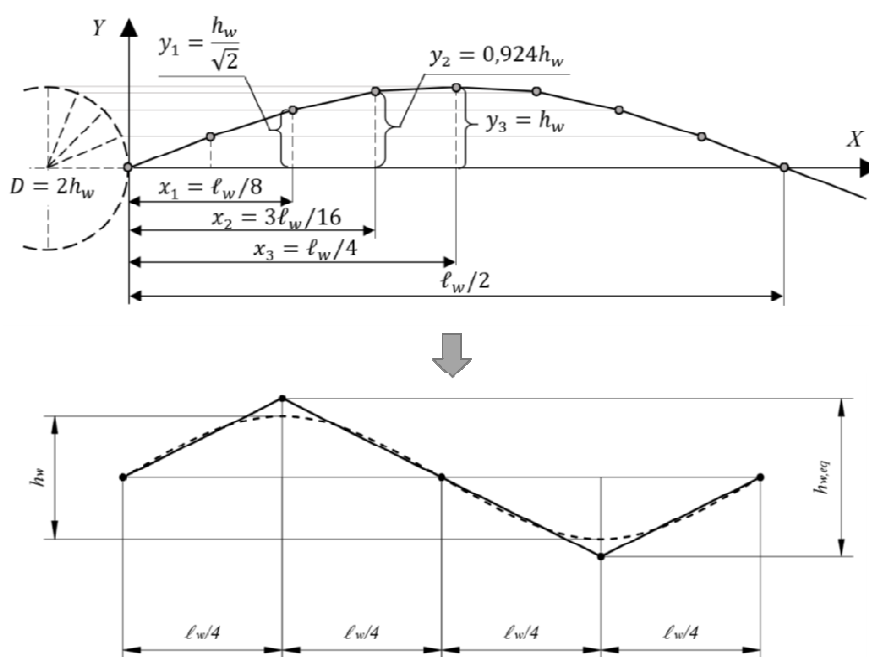


Рис. 4. Заміна синусоїдального профілю корпусу силосу зубчастим

Стрижневі елементи, які моделюють вертикальні ребра жорсткості, з'єднуються із елементами корпусу тільки у вершинах зубчастого профіля, тобто на відстанях ℓ_w . З одного боку, це дозволяє суттєво зменшити розмірність моделі, а з іншого – максимально точно врахувати конструктивні особливості вузла сполучення ребер із гофрованим корпусом силоса. Що стосується ексцентриситету кріплення ребер до корпусу, то він враховується в моделі шляхом постановки жорстких вставок. Всі інші стрижневі елементи моделі задаються без використання жорстких вставок. Загальний вигляд моделі наведений на рис. 5.

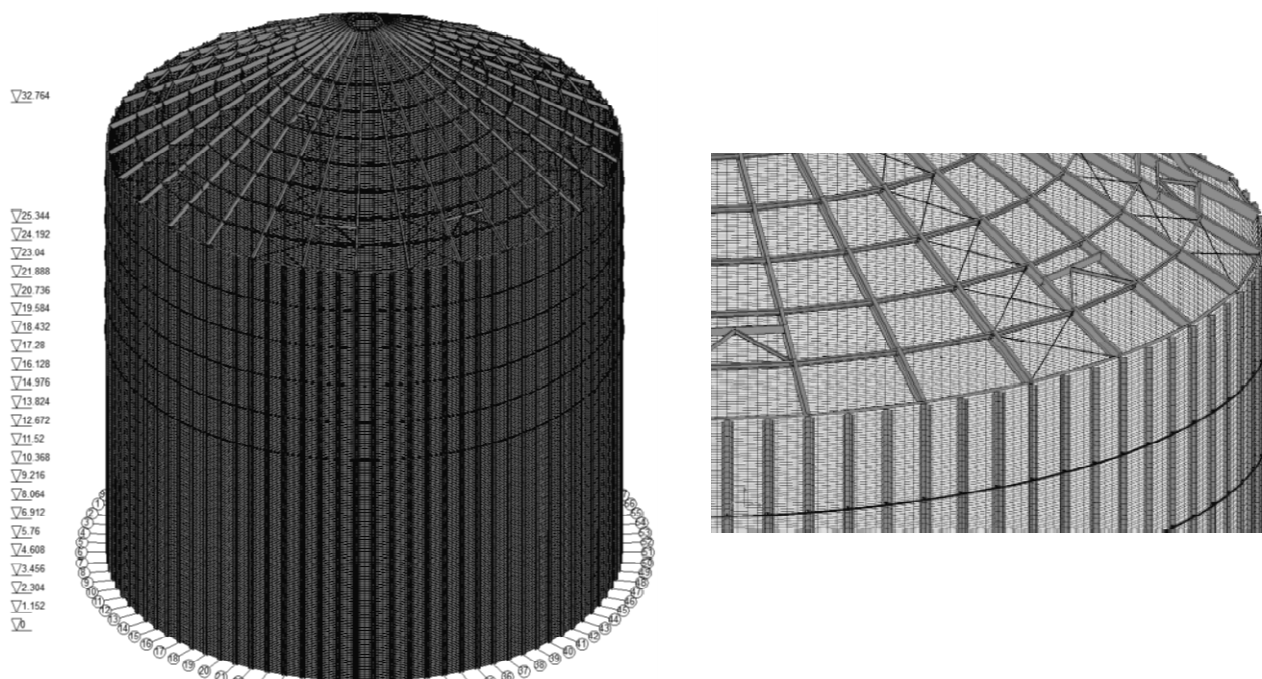


Рис. 5. Загальний вигляд кінцево-елементної моделі силосу

Навантаження і впливи на силосну ємність. В загальному випадку на силос діють навантаження від продукту зберігання, атмосферні, технологічні та сейсмічні навантаження.

Навантаження від продукту зберігання розраховуються на основі його фізико-механічних характеристик, які враховують можливу мінливість гранулометричного складу, методу виробництва, вміст вологи, температуру, старіння та наявність електричного заряду в процесі переміщення. Їх кількісна оцінка виконується відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1991-4 [3]. До основних характеристик сипкого матеріалу відноситься: питома вага матеріалу γ_g , кут природного укосу ϕ_r , кут внутрішнього тертя ϕ_i , коефіцієнт бокового тиску K і коефіцієнт тертя матеріалу об стінки силосу μ . При цьому для всіх характеристик, окрім ϕ_r , приймається два характеристичних значення (нижнє та верхнє), які враховують статистичний розкид його властивостей. Значення коефіцієнта тертя сипкого продукту об листи корпусу повинно враховувати тип поверхні, по якій відбувається ковзання продукту. Для гофрованих листів корпусу приймається категорія D4 [3].

Визначення навантажень на конструкції силосу від продукту зберігання за його характеристиками, повинно співвідноситися із висотою h_c вертикального стовбура матеріалу, яка вимірюється від основи силосу до рівня його еквівалентної поверхні $a-a$ (рис. 6)

$$h_c = h_a + h_0, \quad h_a = H_a - \Delta h_a, \quad (2)$$

де h_a - відстань від плоского днища силосу до нижньої точки насипного конуса (нижньої точки стінки силосу, яка не контактує із продуктом зберігання); h_0 - відстань між

еквівалентною поверхнею сипкого матеріалу і нижньою точкою насипного конусу; H_a - висота корпусу силосу; Δh_a - відстань від верхньої точки корпусу силосу до нижньої точки насипного конусу.

Тип силосу визначається за параметром його гнучкості

$$\Delta_c = h_c / d_c. \quad (3)$$

Переважає більшість силосів для зберігання агропродукції, відповідно геометричних характеристик, можна ідентифікувати як «силос проміжної гнучкості». При цьому найчастіше заповнення силосу сипким матеріалом та його вивантаження відбувається з малими ексцентриситетами через входні та вихідні отвори, які розташовані вздовж центральної вертикальної вісі силосу. При необхідності експлуатації силосу при великих ексцентриситетах наповнення чи вивантаження повинні встановлюватися спеціальні випадки завантаження, на які обов'язково виконується додатковий розрахунок. Також вважається, що здебільшого продукт зберігання не може знаходитися в силосній ємності у повністю або частково підвішеному стані внаслідок насичення повітрям, тому в розрахунках не враховується додатковий тиск від псевдорозрідження.

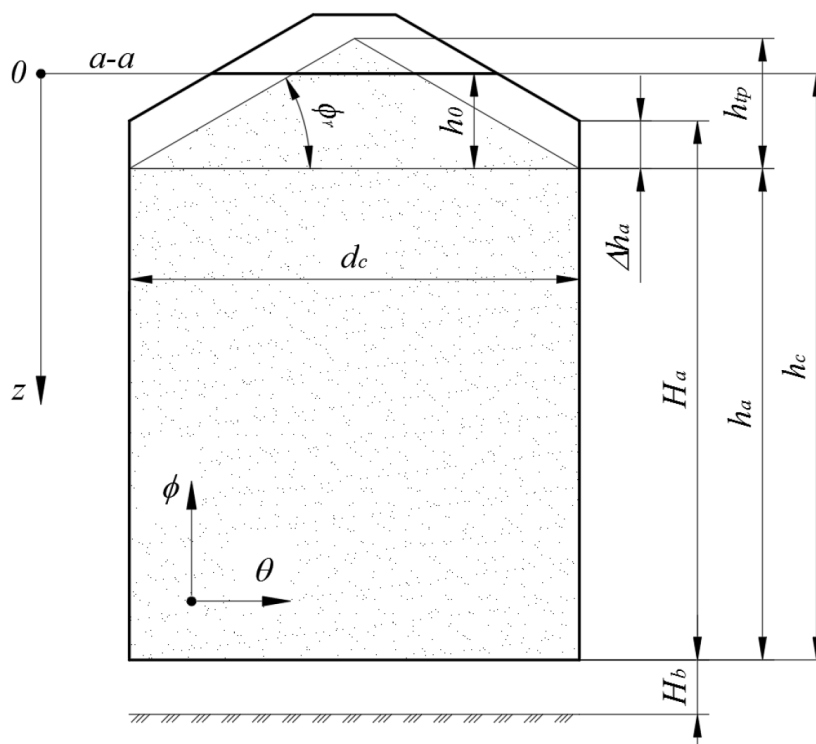


Рис. 6. Схема завантаження силосу в прийнятій системі координат

До атмосферних навантажень відносяться вага снігового покриву на покрівлю силосу, тиск вітру на його корпус та різниця температур між матеріалом і конструкціями силосу.

До технологічних навантажень можуть відноситися навантаження на покрівлю від ваги термопідвісок та конструкції надсилосної галереї, за допомогою якої відбувається завантаження силосу продуктом зберігання (рис. 7). Ці навантаження прикладаються статично, без урахування динамічних ефектів.

Розрахунок силосів на сейсмічні впливи регламентується нормами [13, 14]. Випадкова природа сейсмічних подій і вихідні дані при розрахунку їх наслідків піддаються визначенню тільки в імовірнісній постановці. Відповідно до цього заходи щодо забезпечення надійності окремого силосу при дії сейсмічних впливів повинні оцінюватись через критерій економічної доцільності. Більш детально ці питання були досліджені в роботі [15].

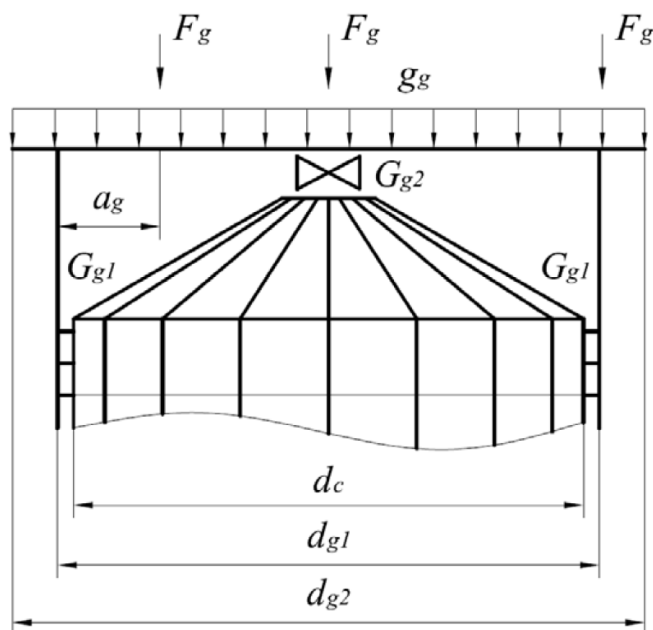


Рис. 7. Схема навантаження від надсилосної галереї

Напружено-деформований стан силоса. На основі кінцево-елементної моделі виконується розрахунок на сумісну дію (комбінацію) окремих навантажень. Правила комбінацій впливів задекларовані у [3, 4]. Кожна комбінація включає постійний і домінуючий вплив зі своїми повними розрахунковими значеннями, а значення супутніх впливів зменшується на комбінаційний коефіцієнт (коефіцієнт сполучення) для врахування зниженої ймовірності одночасної реалізації розрахункових значень. Розрахункові ситуації та комбінації впливів згідно норм для граничних станів за несучою здатністю та експлуатаційною придатністю відповідно

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \cdot \quad (4)$$

$$G_k + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \cdot \quad (5)$$

де G_k – характеристичне значення впливу від власної ваги конструкцій; $Q_{k,1}$ – характеристичне значення провідного впливу; $Q_{k,i}$ – характеристичні значення супутніх впливів; $\gamma_{Q,1}$, $\gamma_{Q,i}$ – часткові коефіцієнти надійності.

Величини G та Q формують окремі завантаження на силос в програмі кінцево-елементного розрахунку SCAD. Можна виділити 12 окремих завантажень для формування комбінацій впливів:

А – Власна вага конструкцій силосу (враховується в комплексі кінцево-елементного аналізу SCAD автоматично);

В – Горизонтальний тиск сипкого матеріалу (заповнення або вивантаження) на листи корпусу силоса;

С – Дотичний тиск сипкого матеріалу (заповнення або вивантаження) на листи корпусу силоса;

Д – Горизонтальний тиск на листи корпусу силоса внаслідок різниці температур;

Е – Додаткове технологічне навантаження на покрівлю силосу від ваги термопідвісок;

Ф – Додаткове навантаження на покрівлю та верхню частину конструкцій корпусу силоса (вертикальні ребра жорсткості) від надсилосної галереї;

Г – Снігове навантаження на покрівлі силосу (G_1 – рівномірна схема, $G_2 \dots G_5$ – до нерівномірні схеми);

Н – Вітровий тиск на корпус силоса.

Для прикладу сформовані комбінації для перевірки конструкцій за граничними станами несучої здатності та експлуатаційної придатності частково наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Комбінації впливів на силос за видами конструктивних елементів

Комбінація	Завантаження											
	A	B	C	D	E	F	G1	G2	G3	G4	G5	H
Комбінації для перевірки граничних станів за експлуатаційною придатністю												
E-W1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0
F-WST-1	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	1,0	0,6	-	-	-	-	1,0
...												
Комбінації для перевірки граничних станів за несучою здатністю (EQU)												
F-STW-1	1,35	1,35	1,35	1,8	0,9	1,35	1,5	-	-	-	-	0,9
F-TSW-1	1,35	1,35	1,35	1,5	1,5	1,35	0,9	-	-	-	-	0,9
....												

Наприклад комбінація впливів E-W1 відповідає дії вітрового тиску на порожню силосну ємність і використовується для перевірки жорсткості та загальній стійкості корпусу силоса. F-WST відповідає дії на повністю заповнений силос вітрового тиску, снігового навантаження (за рівномірною та нерівномірними схемами) та навантажень від ваги термopідвісок. При цьому вітровий тиск розглядається як провідна дія, а навантаження від ваги термopідвісок та снігу – як супутня. Комбінація впливів F-STW відповідає дії на повністю заповнений силос снігового навантаження (за рівномірною та нерівномірними схемами) та навантажень від ваги термopідвісок і вітрового тиску. При цьому снігове навантаження розглядається як провідна дія, а навантаження від ваги термopідвісок та вітру – як супутня. Комбінація впливів F-TSW відповідає дії на повністю заповнений силос навантажень від ваги термopідвісок, снігового навантаження (за рівномірною та нерівномірними схемами) та вітрового тиску. При цьому навантаження від ваги термopідвісок розглядається як провідна дія, а навантаження від снігу та вітру – як супутня.

За результатами розрахунку отримується інформація про напружено-деформований стан силоса та його окремих конструкцій при різних впливах та їх комбінаціях. Для прикладу частково наведені кількісні дані для сталевого силосу номінальним діаметром 27500 мм, що складається з 22 ярусів висотою 1152 мм та містить 90 вертикальних ребер жорсткості (табл. 3-4, рис. 8-9). Каркас покрівлі силосу утворений із 30 однакових сегментів. Номінальний кут нахилу конічної покрівлі становить 30°.

Таблиця 3.

Переміщення вузлів корпусу силосної ємності при дії комбінації впливів

Ярус	Комбінація				
	E-W1	WST-1	...	STW-1	...
Максимальні радіальні переміщення вузлів корпусу, мм					
1	0,9	14,5	...	14,1	...
2	1,0	14,7	...	14,3	...
...					
22	9,0	10,2	...	12,3	...
Максимальні вертикальні переміщення вузлів корпусу, мм					
1	0,2	2,5	...	2,5	...
2	0,3	3,9	...	3,8	...
...					
22	0,9	19,7	...	19,7	..

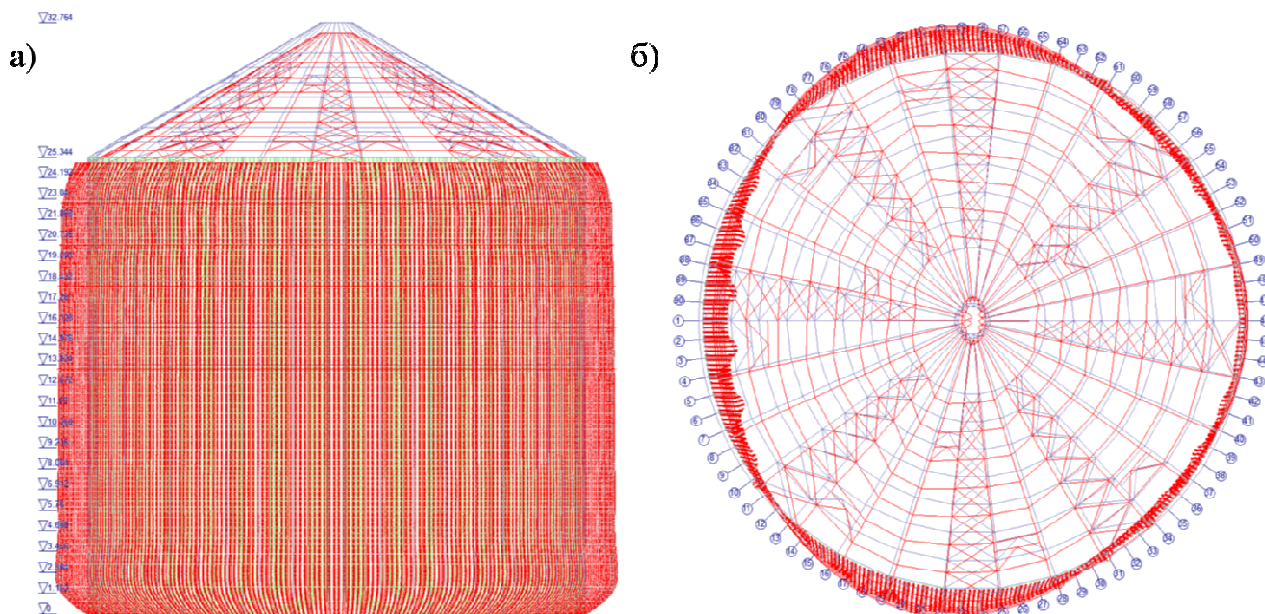


Рис. 8. Деформована схема силосу при завантаженні а) В - горизонтальний тиск сипкого матеріалу; б) Н - вітровий тиск на корпус порожнього силосу

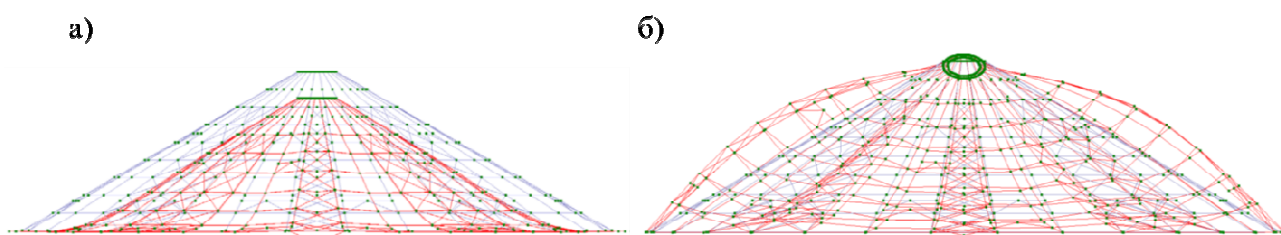


Рис. 9. Деформована схема покрівлі силосу при завантаженнях G: а) снігове навантаження за рівномірною схемою G1; б) за нерівномірною схемою G5

Таблиця 4.

Зусилля в елементах покрівлі при дії комбінації впливів

Комбінація	$-N_{\max}$, кН	$M_{\text{відп}}$, кНсм	$+N_{\max}$, кН	$M_{\text{відп}}$, кНсм	$N_{\text{відп}}$, кН	$M_{\max}$, кНсм
Зусилля в радіальній балці покрівлі при комбінаціях впливів						
E-W1	-52	0	29	292	-24	772
F-WST-1	-124	1114	11	0	-124	2216
...						
max	-143	2723	33	823	-137	3062
Зусилля в затяжці покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-59	14	100	14	43	14
Зусилля в кільцевому ребрі 1-го ярусу покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-16	7	63	263	41	468
Зусилля в кільцевому ребрі 2-го ярусу покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-63	324	1	6	-58	324
Зусилля в балці термopідвіски покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-8	534	5	535	-1	882
Зусилля в підкосах балки термopідвіски покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-9	2	8	2	1	2
Зусилля в хрестових в'язях покрівлі при комбінаціях впливів						
max	-29	4	63	5	-1	5

Зусилля в елементах покрівлі при різних комбінаціях навантажень, які наведені у табл. 4, сформовані для трьох груп зусиль: максимальне зусилля стиску $-N_{\max}$ і відповідний момент $M_{\text{відп}}$; максимальне зусилля розтягу $+N_{\max}$ і відповідний момент $M_{\text{відп}}$; максимальний згинальний момент $M_{\text{відп}}$ та відповідне зусилля стиску або розтягу (обирається максимальна за модулем величина).

Висновок. В правовому полі вказівок чинних нормативних документів, що регламентують розрахунок та оцінку напружено-деформованого стану, встановлюють вимоги до атмосферних навантажень, технологічних параметрів та інших впливів, визначають ступінь капітальності, рівень відповідальності споруди та ін. виявлено основні механізми регулювання надійності конструкцій сталевих зерноскосищ. Встановлено, що зміна рівня надійності конструкцій сталевих зерноскосищ в рамках методу граничних станів виконується через систему часткових коефіцієнтів, які враховують стохастичні властивості зовнішніх впливів, мінливість характеристик матеріалу, типи розрахунків, ступінь важливості конструктивних елементів в споруді та ступінь відповідальності силосу у складі підприємства. Вказані значення часткових коефіцієнтів надійності регулюються виключно нормативними вимогами і настановами національного додатку і не можуть бути скориговані технічним завданням на проєктування. Наведені значення коефіцієнтів обмежуються перевіркою граничних станів за несучою здатністю та експлуатаційною придатністю конструкцій при дії статичного навантаження, включно з випадками, де динамічний вплив оцінюється з використанням еквівалентних квазістатичних навантажень із відповідними коефіцієнтами підсилення.

Література

1. Постанова Кабінет Міністрів України від 16 грудня 2022 р. № 1384 Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2020 р. № 1109.
2. ДБН В.2.6-221:2021. Конструкції силосів з гофрованою стінкою для зерна. Основні положення. К.: Мінрегіон, 2022. 7 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT). К.: Мінрегіон, 2013. 129 с.
4. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проєктування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). К.: Мінрегіон, 2009. 105 с.
5. Качуренко В.В., Банніков Д.О. Конструктивні рішення сталевих ємностей для сипучих матеріалів. Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2016. 168 с.
6. Махінько А.В., Махінько Н.О. Сталеві ємності для зберігання зерна. К.: Сталь, 2021.
7. Matchett A.J. A linear, analytical solution to the principal stress cap, force balance equations for asymmetrical stresses in cylindrical silos. Chemical Engineering Research and Design, 2020. Vol. 153. P.107-119.
8. Gallego E., González-Montellano C., Ramírez A., Ayuga F. A simplified analytical procedure for assessing the worst patch load location on circular steel silos with corrugated walls. Engineering Structures, 2011. Vol. 33, Issue 6. P. 1940-1954.
9. Rabinovich E., Kalman H., Peterson P.F. Parametric study and design procedure for planar silos and hoppers. Powder Technology, 2012. Vol. 388. P. 333-342.
10. Juan A., Moran J.M., Guerra M.I., Couto A., Ayuga F., Aguado P.J. Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: Comparison with ENV 1993. Thin-Walled Structures, 2006. Vol. 44, Issue 11. P. 1192-1200.
11. Durmus A., Livaoglu R. A simplified 3 D.O.F. model of A FEM model for seismic analysis of a silo containing elastic material accounting for soil-structure interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015. Vol. 77. P. 1-14.

12. Mehrehtehran A.M., Maleki S. Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads: FE analyses versus Eurocode provisions. *Engineering Failure Analysis*, 2022. Vol.137. 106282

13. ДСТУ-Н Б EN 1998-1. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 1. Загальні правила, сейсмічні дії, правила щодо споруд (EN 1998-1:2004, IDT). К.: Мінрегіон, 2013. 315 с.

14. ДСТУ-Н Б EN 1998-4. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 4. Силосні башти, резервуари та трубопроводи (EN 1998-4:2006, IDT). К.: Мінрегіон, 2013. 142 с.

15. Makhinko A., Makhinko N. The features of determination of seismic loads on steel silos with a flat bottom according to DBN V.2.6-221:2021. *Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини : зб. наук. праць*. Одеса: ОДАБА, 2023. № 27. С. 19-27.

16. Махінько А.В., Махінько Н.О. Воронцов О.В. Моделювання синусоїдальної стінки силосів в задачах кінцево-елементного аналізу. *Building innovations – 2021: збірник наукових праць за матеріалами IV Міжнародної українсько-азербайджанської науково-практичної конференції*. Полтава, 2021. С 141-143.

References

- [1] Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 16 December 2022 No. 1384 On Amendments to the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 9 October 2020 No. 1109
- [2] DBN V.2.6-221:2021. Design of corrugated wall silos for grain. Kyiv: Minregion, 2022. 7 с.
- [3] DSTU-N B EN 1991-4:2010. Eurocode 1: Effects on structures. Part 4. Bunkers and tanks (EN 1991-4:2006, IDT). K.: Minregion, 2013. 129 p.
- [4] DSTU-N B EN 1990:2008. Eurocode. Fundamentals of structural design (EN 1990:2002, IDT). Kyiv: Minregion, 2009. 105 p.
- [5] Kachurenko V.V., Bannikov D.O. Constructive solutions of steel tanks for bulk materials. Dnipro: New Ideology, 2016. 168 p.
- [6] Makhinko A.V, Makhinko N. Steel tanks for grain storage. K.: Steel, 2021.
- [7] Matchett A.J. A linear, analytical solution to the principal stress cap, force balance equations for asymmetrical stresses in cylindrical silos. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020. Vol. 153. P.107-119.
- [8] Gallego E., González-Montellano C., Ramírez A., Ayuga F. A simplified analytical procedure for assessing the worst patch load location on circular steel silos with corrugated walls. *Engineering Structures*, 2011. Vol. 33, Issue 6. P. 1940-1954.
- [9] Rabinovich E., Kalman H., Peterson P.F. Parametric study and design procedure for planar silos and hoppers. *Powder Technology*, 2012. Vol. 388. P. 333-342.
- [10] Juan A., Moran J.M., Guerra M.I., Couto A., Ayuga F., Aguado P.J. Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: Comparison with ENV 1993. *Thin-Walled Structures*, 2006. Vol. 44, Issue 11. P. 1192-1200.
- [11] Durmus A., Livaoglu R. A simplified 3 D.O.F. model of A FEM model for seismic analysis of a silo containing elastic material accounting for soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015. Vol. 77. P. 1-14.
- [12] Mehrehtehran A.M., Maleki S. Axial buckling of imperfect cylindrical steel silos with isotropic walls under stored solids loads: FE analyses versus Eurocode provisions. *Engineering Failure Analysis*, 2022. Vol.137. 106282
- [13] DSTU-N B EN 1998-1. Eurocode 8. Design of earthquake resistant structures. Part 1: (EN 1998-1:2004, IDT). K.: Minregion, 2013. 315 p.
- [14] DSTU-N B EN 1998-4. Eurocode 8. Design of earthquake resistant structures. Part 4. Silos, tanks and pipelines (EN 1998-4:2006, IDT). Kyiv: Minregion, 2013. 142 p.

- [15] Makhinko A., Makhinko N. The features of determination of seismic loads on steel silos with a flat bottom according to DBN V.2.6-221:2021. Modern building structures of metal and wood: a collection of scientific works. Odesa: ODABA, 2023. № 27. P. 19-27.
- [16] Makhinko A., Makhinko N., Vorontsov O. Modelling of the sinusoidal wall of silos in the problems of finite element analysis. Building innovations - 2021: a collection of scientific papers based on the materials of the IV International Ukrainian-Azerbaijani Scientific and Practical Conference. Poltava, 2021. P. 141-143.

CREATING RELIABLE AND RESILIENT GRAIN STORAGE FACILITIES IN THE FACE OF WAR AND THE GLOBAL FOOD CRISIS

Makhinko A.V., ScD, Professor

makhinko.anton@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0002-9147-7087

Makhinko N.O., ScD, Professor

nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0001-8120-6374

National Aviation University

Skliarenko S.O., PhD., Associated Professor

poltpro@gmail.com, ORCID 0000-0002-3929-4240

PE Poltava-Project

Birko O.O.

obirko@ukr.net, ORCID 0009-0004-8690-0663

LLC Monel

Abstract. The article describes in detail the complete engineering methodology for the verification calculation of steel grain storage structures based on the pan-European Eurocode standardisation system in accordance with the provisions of DBN B.2.6-221:2021 and DSTU-N B EN 1991-4. The emphasis of the work is on determining the mechanisms for regulating the reliability of grain storage structures within the framework of the application of semi-probabilistic calculation in the form of the limit state method. To assess the stress-strain state of individual structural elements of the silo, two methods were used: the direct method of finite element analysis without taking into account the effects of geometric and physical nonlinearity and the theoretical method based on the membrane theory in a linear-elastic formulation assuming linear-elastic material characteristics and the linear theory of small deformations. The practical implementation of the methodology was tested on the example of real steel silo structures. It is established that the change in the level of reliability of steel grain storage structures within the framework of the limit state method is carried out through a system of partial coefficients that take into account the stochastic properties of external influences, variability of material characteristics, types of calculations, the degree of importance of structural elements in the structure and the degree of responsibility of the silo as part of the enterprise. The specified values of the partial reliability factors are governed exclusively by the regulatory requirements and guidelines of the national annex and cannot be adjusted by the design specification. The given values of the coefficients are limited to limit state checks on the bearing capacity and serviceability of structures under static load, including cases where the dynamic impact is assessed using equivalent quasi-static loads with appropriate amplification factors.

Keywords. Steel silo, design scheme, bearing capacity, stress-strain state, corrugated sheet, limit state.