

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СПОРУДИ БАШТИ СИЛОСУ ТА ЇЇ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА НАСЛІДКАМИ РУЙНУВАННЯ

Бакулін Є. А., Яковенко І. А., Бакуліна В. М.

ВСТУП

У зв'язку з настанням страхового випадку щодо руйнування споруди башти силосу було проведено детальне інструментальне обстеження щодо визначення фактичного технічного стану споруди № 8.10 ТОВ «Дунайської Суднохідної-Стивидорової Компанії» (Україна, м. Миколаїв).

Обстеження споруди башти силосу та її будівельних конструкцій виконувались згідно нормативних документів з питань, обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації будівель і споруд атверджених та введених у дію спільними наказами Держбуду та Держнаглядохоронпраці України від 27 листопада 1997р., за № 32/288 та від 30 березня 1998р., за №62/48, а також Положенням про безпечну та надійну експлуатацію будівель та споруд із змінами та доповненнями згідно з Наказом Держбуду від 28.07.99р., № ПВ84/140¹.

Об'єктом дослідження є споруда башти силосу №8.10, яка входить в комплекс по перевалки зернових культур, розташованої на території причалів №1 і №2 ДП «Миколаївського морського товарного порту».

Предметом дослідження є фактичний технічний стан споруди башти силосу та її конструктивних елементів.

Мета та задачі роботи – візуальний огляд та інструментальне обстеження конструктивних елементів для визначення та оцінки фактичного технічного стану.

Методи досліджень – натурні (візуальні та інструментальні), аналітичні (аналіз співставлення результатів розрахунку із фактичними даними).

¹ Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд / Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України. Київ, 1997. 144 с.

Результати роботи – оцінка фактичного технічного стану споруди башти силосу та її складових конструктивних елементів. Експертний висновок щодо причин руйнування.

1. Передумови та узагальнені категорії визначення технічного стану

Аналізуючи плеяду нормативних документів, діючих протягом усього періоду незалежності України^{2,3}, та науково-методичні здобутки^{4,5} можна систематизувати наступні технічні стани будівель та споруд:

→ **справний** – при виконанні всіх вимог проекту і нормативних документів, діючих на момент класифікації об'єкта;

→ **працездатний** – при частковому відхиленні від вимог проекту і діючих норм, але без порушення вимог по граничним станам першої групи і при таких порушеннях вимог, по граничним станам другої групи, які в конкретних умовах об'єкта не обмежують можливість нормального функціонування або іншого застосування об'єкта по основному призначенню;

→ **обмежено працездатний** – у випадках, коли для забезпечення нормального функціонування або іншого застосування об'єкта необхідно використати обмеження та спеціальний контроль за станом конструкцій, за тривалістю їх експлуатації чи за параметричними показниками (наприклад, встановлення вимог очищення покрівлі від снігу, обмеження навантажень на перекриття, обмеження корисного навантаження, тощо);

→ **непрацездатний** – при виявленні вже сформованого порушення вимог по граничним станам першої групи чи неможливості запобігти такому порушенню протягом прогнозованого терміну експлуатації.

Але, потрібно чітко розуміти, що працездатний об'єкт може бути несправним, наприклад – не задовольняє естетичним вимогам, але здатний виконувати свої основні функції.

² Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд. Харків: ФОРТ, 2003. 48 с.

³ ДСТУ–Н Б В.1.2–18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2017. 47 с.

⁴ Бакулін Є.А. Критерії надійності та ризиків при оцінюванні технічного стану експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. №1. С. 2–4.

⁵ Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. №5. С. 2–5.

Переважна більшість конструкцій, які експлуатуються, знаходиться якраз у працездатному стані.

Непрацездатний стан не обов'язково є передаварійним (непридатним до подальшої нормальної експлуатації), оскільки він може бути визнаний таким по відношенню до прогнозованих змін умов застосування об'єкта.

Аналіз аварій будівель та споруд свідчить про те, що у багатьох випадках процес руйнування конструкцій носить лавиноподібний характер, коли відмова основних елементів і підсистем ініціюють виникнення інших більш серйозних відмов і руйнувань^{6,7}.

Проте є багато прикладів, де ізольовані відмови окремих елементів не приводять до аварії, це пов'язано з деякими резервними можливостями, притаманними особливостям об'ємно-просторової структури об'єкта. Властивість системи зберігати несучу спроможність при виході з ладу одного або декількох елементів називають **живучістю**.

При створенні систем, для яких відомості про надійність елементів відсутні, а також для систем, функціонування яких може бути пов'язане з реалізацією досить інтенсивних впливів аварійного характеру, стоїть задача – створити таку структурну систему, яка могла б функціонувати в умовах можливої відмови будь-якої частини системи.

Це є свідоме та цілеспрямоване використання поняття живучості. У випадку руйнування будь-якого окремого елемента весь об'єкт або його найбільш відповідальна частина повинна зберігати працездатність протягом певного терміну часу, достатнього для прийняття термінових заходів по підсиленню, евакуації людей та матеріальних цінностей.

Будь-яке руйнування пов'язано з переходом конструктивного елемента у граничний стан⁸. Перехід через деякі граничні стани є

⁶ Бакулін Є.А., Яковенко І.А. Наслідки руйнування та надання комплексної оцінки можливості подальшої експлуатації будівлі корівника у смт. Немішаєво. *Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн*: зб. тез доп. XXI міжн. онлайн-конф. наук.-пед. працівн., наук. спів. та асп. «» (Київ, 25–26 березня 2021 р.). К. : НУБіП України, 2021. С. 67–69. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_npp_0.pdf

⁷ Бакулін Є.А., Яковенко І.А., Дмитренко Є.А., Бакуліна В.М. Результати аналізу причин руйнування сталевих ферм покриття конверторного цеху. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті*: зб. тез доп. 9-ої міжн. наук.-техн. конф. (Харків, 17–19 листопада, 2021 р.). Харків, УкрДУЗТ, 2021. С. 87–88. URL: http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

⁸ Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. № 5. С. 2–5.

подією, пов'язаною із порушенням умов безпеки, із можливістю аварійного обвалу конструкцій^{9;10}.

Способи нормування безпеки пов'язані з кількісними та якісними вимогами.

Кількісні вимоги характеризуються рівнем допустимого ризику чи гранично допустимими нормами шкідливих впливів (по концентрації, часу дії та іншим показникам).

Якісні вимоги формуються у вигляді конструктивних, технологічних або експлуатаційних обмежень. Вимоги відносно конструктивних грубих помилок у результаті пропусків в інформації, непорозуміння, зневажливості, а в багатьох випадках і відносно позапроектних аварійних впливів не можуть бути виражені кількісними параметрами. Тому, крім звичайних стандартів, які стосуються проектних перевірок міцності, стійкості та деформативності, варто дотримуватись постійного ефективного контролю всіх проектних параметричних значень конструкцій на стадії експлуатації об'єкта¹¹.

Необхідно прийняти до уваги, що у стані експлуатації об'єкта до числа найбільш змінних параметрів належать навантаження. Навіть власна вага конструкцій за діючими нормами може змінюватися приблизно на $\pm 10...15\%$, а це – одне із найбільш стабільних навантажень. Інші навантаження змінюються в значно більш широкому діапазоні, як за інтенсивністю і напрямком дії, так і за розміщенням на конструкції^{12;13}.

⁹ Бакулін С.А., Яковенко І.А. Наслідки руйнування та надання комплексної оцінки можливості подальшої експлуатації будівлі корівника у смт. Немішаєво. *Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн*: зб. тез доп. XXI міжн. онлайн-конф. наук.-пед. працівн., наук. спів. та асп. «» (Київ, 25–26 березня 2021 р.). К. : НУБіП України, 2021. С. 67–69. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_npp_0.pdf

¹⁰ Бакулін С.А., Яковенко І.А., Дмитренко Є.А., Бакуліна В.М. Результати аналізу причин руйнування сталевих ферм покриття конверторного цеху. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті*: зб. тез доп. 9-ої міжн. наук.-техн. конф. (Харків, 17–19 листопада, 2021 р.). Харків, УкрДУЗТ, 2021. С. 87–88. URL: http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf

¹¹ Бакулін С.А. Критерії надійності та ризиків при оцінюванні технічного стану експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. №1. С. 2–4.

¹² Верюжский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. *Справочное пособие по строительной механике* : учебное пособие. М. : АСВ, 2014. Т.1. 640 с.

¹³ Верюжский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. *Справочное пособие по строительной механике* : учебное пособие. М. : АСВ, 2014. Т.ІІ. 432 с.

Таким чином, на стадії експлуатації необхідно враховувати особливість так званого «несприятливого завантаження»¹⁴, тобто знаходження такого поєднання різних компонентів зовнішніх та внутрішніх навантажень, при яких досягається екстремум деякої внутрішньої сили, напружень в перерізі, вузловому з'єднанні або викликає надмірне переміщення і т.п., все те, що може спричинити руйнування системи^{15:16}.

У достатньо великій мірі невизначеними можуть бути параметри жорсткості конструктивних елементів¹⁷. Вони можуть бути пов'язані із природнім розкиданням значень такого параметра, як модуль пружності бетону.

У багатьох випадках є достатньо серйозні підстави рахуватися із мінливістю параметрів жорсткості¹⁸. До таких випадків, зокрема, належить урахування пошкоджень, які накопичуються в конструкціях у процесі експлуатації. Ці пошкодження, в обов'язковому порядку, повинні враховуватись при визначенні та оцінюванні фактичного технічного стану конструктивних елементів об'єкта^{19:20}.

Найбільш характерними дефектами, які впливають на працездатність та експлуатаційну придатність металевих конструкцій:

→ тріщини, вирізки в основному металі, відхилення геометричних розмірів від проектних;

→ відсутність площинності профільованих елементів, відхилення від проектного положення елементів;

¹⁴ Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Барабаш М.С. Комп'ютерні технології проектування об'ємно-планувальних рішень будівель та споруд аеропортів: мет. рек. до виконання РГР. К.: НАУ, 2014. 72 с.

¹⁵ Вероужский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. Справочное пособие по строительной механике : учебное пособие. М.: АСВ, 2014. Т.1. 640 с.

¹⁶ Вероужский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. Справочное пособие по строительной механике : учебное пособие. М. : АСВ, 2014. Т.II. 432 с.

¹⁷ Горностаев И.С., Ключева Н.В., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 5(256). С. 60–66. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/52687>

¹⁸ Ключева Н.В., Горностаев И.С., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Методика расчета деформативности стержневых железобетонных составных конструкций с использованием программного комплекса «Мираж-2014». *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. №10. С. 21–26.

¹⁹ ДСТУ–Н Б В.1.2–18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2017. 47 с.

²⁰ Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. №5. С. 2–5.

→ неякісне виконання зварних з'єднань, тріщиноутворення у зварних з'єднаннях;

→ неякісне виконання антикорозійного захисту.

Характерні гранично допустимі значення дефектів²¹ та відповідних пошкоджень металевих конструкцій було відображено у звіті за результатами проведеного обстеження.

Номенклатура технічного стану конструкцій наведена у таблиці. 1.

Таблиця 1

№ п/п	Стан конструкції	Характеристика стану
I	Нормальний	Конструктивні елементи знаходяться в працездатному стані. Дефекти та пошкодження відсутні. Ознак фізичного зносу нема. Матеріал конструкцій та умови експлуатації відповідають умовам проектної документації.
II	Задовільний	Конструктивні елементи знаходяться в справному (працездатному) стані. Існуючі дефекти та пошкодження можуть знизити довговічність конструкції. Потрібні міри по забезпеченню довговічності конструкцій.
III	Незадовільний (непридатний до нормальної експлуатації)	Конструктивні елементи знаходяться в працездатному і обмежено працездатному стані. Окремі конструктивні елементи знаходяться в непрацездатному стані. Мають місце дефекти і пошкодження, які впливають на несучу здатність та довговічність. Потрібні міри по забезпеченню довговічності конструкцій.
IV	Аварійний	Працездатність конструкції втрачена, досягнуто гранично припустимого стану. *** Потрібні заходи щодо проведення реконструкції.

*** – Аварійний стан конструкцій – це стан, при якому в конструкції присутні ознаки руйнування за візуальними критеріями, при порушенні вимог розрахунку за граничними станами першої групи. Відповідно конструкція, що не має ознак руйнування, але не відповідає вимогам розрахунку за граничними станами першої групи, не є аварійною. Така конструкція перебуває у перед аварійному стані.

²¹ Бабич Є.М., Караван В.В., Бабич В.С. Діагностика, паспортизація та відновлення будівель і інженерних споруд : підручник. Рівне: «Волинські обереги», 2018. 176 с.

Найбільш характерними пошкодженнями металевих конструкцій, виникаючими та прогресуючими під час експлуатації, які впливають на працездатність та експлуатаційну придатність²²:

- руйнування антикорозійного захисту металевих конструкцій;
- руйнування від механізму корозії;
- розриви та тріщини в основному матеріалі;
- розриви та тріщини у зварних з'єднаннях;
- викривлення, місцеві прогини та вигини, короблення.

Тому є достатньо серйозні підстави рахуватися із мінливістю змін параметрів конструкцій. До таких випадків, зокрема, належить урахування пошкоджень, які накопичуються в конструкціях у процесі експлуатації²³.

2. Методика проведення технічного обстеження споруди башти та її конструктивних елементів

Технічний стан споруди башти силосу та її складових конструктивних елементів визначався візуальними оглядами, інструментальними вимірюваннями фактичних параметричних значень конструктивних елементів, обмірами та проведенням аналізу співставлення фактичних параметричних значень відносно регламентованих чинних норм.

Організація робіт та послідовність їхнього проведення виконувались відповідно до нормативних документів з питань обстеження, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації будівель і споруд (НДІ БВ – Київ, 2003)²⁴, а також «Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд»²⁵.

При технічному обстеженні були виконані візуальні огляди конструктивних елементів²⁶. Фактичний технічний стан фотографічно зафіксовано фотоапаратом «OLYMPUS-5060». Виявлені дефекти, пошкодження та відхилення від проектного

²² Барашиков А.Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівельних та інженерних споруд. Київ, Основа, 2008. 320 с.

²³ Клименко С.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: навчальний посібник. Київ, 2004. 304 с.

²⁴ Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд / Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України. Київ, 1997. 144 с.

²⁵ Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд. Харків: ФОРТ, 2003. 48 с.

²⁶ ДСТУ Б.В.2.6–210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ, Мінгеріонбуд України, 2016. 45 с.

положення прив'язувалися відповідно до місця їхнього знаходження. В звіті відображені та наведені відомості виявлених дефектів, пошкоджень та відхилень відповідно їх систематизації та класифікації по однотипним групам конструктивних елементів.

Лінійні виміри проводились лазерним далекоміром «LeicaDISTO A5» та компарированою мірною стрічкою L=12,5м (JOB Iprof).

Крени та прогини конструктивних елементів визначались електронним рівнем «Geo Fennel S-Digit 60 WL» (ЄС – відпов. до норм EN 61000-4-2/-3).

Міцність конструктивних елементів визначалась механічним методом неруйнівного контролю із застосуванням приладу ИПС-МГ 4.01.

Дія приладу базується на методі ударного імпульсу – пружного відскоку бійки після нанесеного удару по поверхні конструкції. Величина пружного відскоку є мірою міцності.

Так, як величина пружного відскоку не є прямим показником міцності на стиск, то фактичне значення міцності визначалось автоматично приладом за тарувальними залежностями, що мають кореляційний характер.

Усі вимірювання та статистична обробка виконані відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-220:2009²⁷ та ДСТУ Б В.2.7-224:2009²⁸, з використанням ПК «Programs» СКБ «Стройприбор» для Win. 2000 та включала в себе:

- виключення грубих похибок, що викликані нерівномірним складом матеріалу;
- попаданням виміру приладу в пори матеріалу;
- визначення проміжку, до якого належить найбільша кількість вимірів;
- визначення середньої міцності в цьому проміжку;
- зниження отриманих показників на 5% (точність виміру приладом).

На базі напрацьованих статистичних даних визначались опосередковані фактичні характеристики міцності будівельних

²⁷ ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Київ, Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с.

²⁸ ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Будівельні матеріали. Бетони правила контролю міцності. Київ, Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с.

конструкцій та проводився аналіз-співставлення їхньої відповідності чинним регламентованим нормам.

Деформативність визначалась за ступенем пошкодження відповідно ДСТУ Б. В.1.2–3:2006 «Прогини та переміщення»²⁹ та згідно класифікації деформацій будівель та споруд³⁰ за трьома категоріями:

I – деформації з швидкістю *37 мм/рік* не порушують нормальну експлуатацію;

II – деформації з швидкістю *62 мм/рік* порушують нормальну експлуатацію;

III – деформації з швидкістю до *179 мм/рік* аварійні.

За результатами отриманих даних, із урахуванням особливостей конструктивних елементів, проводилося аналіз-співставлення їхньої відповідності нормам проектування, будівництва та експлуатації за двома групами граничних станів: за граничними станами першої групи – на міцність; за граничними станами другої групи – на деформативність.

За результатами обстежень та вимірів, з урахуванням виявлених відхилень, пошкоджень і дефектів конструкцій, аналізу співставлення їхньої відповідності, а також визначеного стану, відповідно до чинних нормативних документів (ДСТУ Б В.1.2–3:2006, ДБН В В.1.2–2:2006³¹, ДБН В.1.2–14–2009³²), надана оцінка фактичному технічному стану конструктивних елементів та споруди башти силосу в цілому.

У результаті, за виявленими дефектами, пошкодженнями, відхиленнями від проекту та відповідним категоріям технічного стану конструктивних елементів, було надано експертний висновок щодо причин руйнування конструктивних елементів башти силосу.

²⁹ ДСТУ Б.В.1.2–3:2006. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ, Мінгеріонбуд України, 2009. 14 с.

³⁰ Барашиков А.Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівельних та інженерних споруд. Київ, Основа, 2008. 320 с.

³¹ ДБН В.1.2–2:2006. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев: МинстройУкраины, 2006. 78 с.

³² ДБН В.1.2–14–2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: Київ: Мінгеріонбуд України, 2009. 32 с.

Загальні відомості об'єкта досліджень

У відповідності до ДБН А.2.2-3-2012 «Склад та зміст проектної документації на будівництво», категорія складності об'єкта становить – III–IV.

Кліматичні умови (у відповідності до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія») розташування об'єкта дослідження:

→ другий кліматичний район;

→ клімат помірно-континентальний (середня температура повітря складає +10,1°C; середня температура найбільш холодного місяця січня становить –2,6°C; середня температура найбільш теплого місяця липня становить +30,0°C; абсолютний мінімум температури становить – 26,0°C; абсолютна максимальна температура становить + 39,0°C);

→ середня тривалість безморозного періоду 161 – 178 діб;

→ переважаючий напрямок вітру – північний (середня швидкість вітру 4,2 м/сек; середня вологість відносна вологість 73%);

→ середньорічна кількість атмосферних опадів становить 445 мм.

Навантаження, які діють на об'єкт дослідження прийняті із урахуванням вимог діючих ДБН В.1.2–2:2006³³ та особливостей його моделювання³⁴:

→ II сніговий район (снігове навантаження – 1000Па);

→ III вітровий район (вітрове навантаження – 500Па).

Вимоги надійності прийняті із урахуванням діючих ДБН В.1.2–14:2018³⁵:

→ клас відповідальності споруди – СС2;

→ клас відповідальності конструкцій – Б;

→ коефіцієнт надійності за призначенням від рівня відповідальності – $\gamma_n=1,05$.

Вимоги сейсмічності об'єкту дослідження прийняті у відповідності до ДБН В.1.1–12:2014³⁶ (карта ЗСР-2004, В;

³³ ДБН В.1.2–2:2006. Система забезпечення надійності и безпеки строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев: МинстройУкраины, 2006. 78 с.

³⁴ Бакулін С.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Визначення вітрових навантажень висотних будівель в умовах щільної міської забудови. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2016. Вип. 254. С. 330–338. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nv nau_tech_2016_254_34

³⁵ ДБН В.1.2–14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2018. 30 с.

³⁶ ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах. Київ, 2014. 110 с. URL: <https://mybud.com.ua/files/nd/dbn%20v.1.1-12%202014.pdf>

сейсмічність об'єкту – 6 балів шкали MSK-64) та необхідних вимог і рекомендацій³⁷.

Об'єктом дослідження є комплекс споруд башт силосів із перевалки зернових і масляних культур розташованих на території причалів №1 і №2 ДП «Миколаївського морського товарного порту», рис. 2.1.

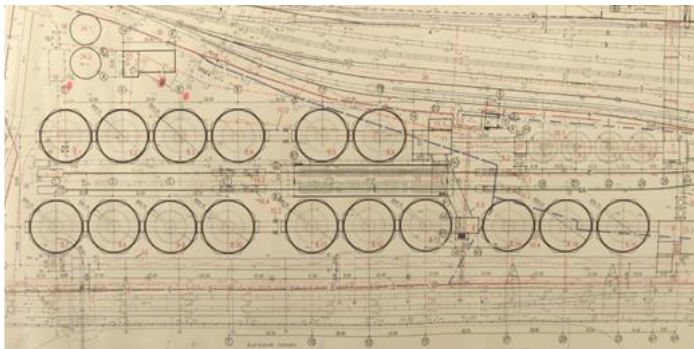


Рис. 2.1. Фрагмент генплану забудови комплексу споруд башт силосів



Рис. 2.2. Загальний зовнішній вигляд терміналу комплекс башт силосів

³⁷ Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Вертикальні в'язі каркасних будівель в сейсмічно активних зонах. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2017. Вип. 258. С. 117–131. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnu_tech_2017_258_12

До терміналу входить двадцять башт силосу (рис. 2.2), двох типів, різного об'єму. Потужність терміналу (за паспортними даними) становить від 2 до 2,5 млн. т зерна на рік.

Для спорудження терміналу використовувалось обладнання фірм: Ag Growth International (AGI); Neusero; Intersystems; Stela Laxhuber; Engineering GmbH & Co, а також комплектуючі деталі та вироби вітчизняного виробника: «Елеваторпромсервис»; «Зерновая столица» та інших. Термінал було введено в експлуатацію у квітні 2016 року.

Згідно заяви про настання страхової події, були проведені попередні огляди фактичного технічного стану конструктивних елементів башт терміналу. За результатами огляду були виявлені значні деформації несучих (відповідальних) конструктивних елементів покриттів башт силосів №№ 8.07 – 8.16.

Суцільне інструментальне обстеження технічного стану башти силосу № 8.10 було проведено при нормальних природно-кліматичних умовах. Схему розташування (по генплану забудови, рис. 2.1) та загальний вигляд башти силосу №8.10, рис. 2.3, рис. 2.4.

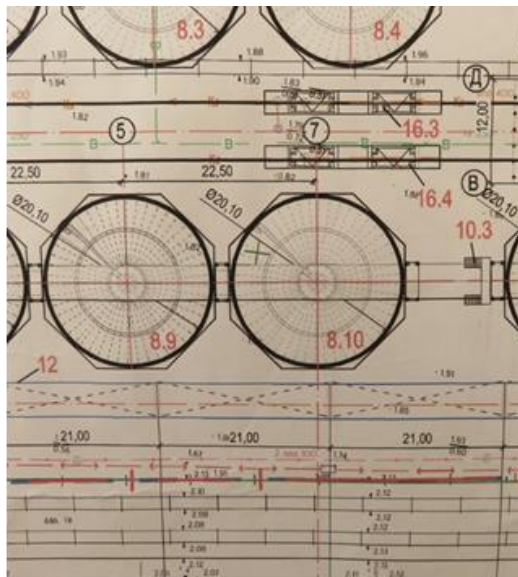


Рис. 2.3. Схема розташування башти силосу

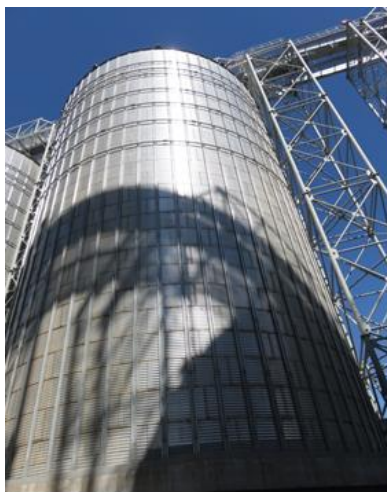


Рис. 2.4. Загальний вигляд башти сталевго силосу

Характеристика технічного стану об'єкту

Проведеним візуальним оглядом та інструментальними вимірюваннями виявлені систематизовані та класифіковані основні пошкодження, дефекти та проектні відхилення несучих (відповідальних) конструктивних елементів^{38;39;40;41;42;43}.

³⁸ ДСТУ Б.В.1.2–3:2006. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ, Мінгеріонбуд України, 2009. 14 с.

³⁹ ДБН В.1.2–2:2006. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев: МинстройУкраины, 2006. 78 с.

⁴⁰ ДБН В.1.2–14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. – 30 с.

⁴¹Гроздов В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Санкт-Петербург: ИздательскийДом KN+, 2001. 48 с.

⁴² Малишев О. М., Віроцький В. Д. , Нілов О. О. та ін. Технічне обстеження та нагляд за безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд / за ред. О. М. Малишева і Державного підприємства «Головний навчально-методичний центр» України. Київ: Відлуння, 2007. 708 с.

⁴³ Горохов Е. В., Муцанов В. Ф., Василев В. В., Ягмур А. А. Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений. Киев: УМК ВО, 1991. 151 с.

Покрівля башти силосу з оцинкованих профільованих листів має значні деформації (прогини, вигини, зміщення від проектного положення) майже по всьому периметру покриття у двох ярусах.

Нещільність лицювання становить від 10 до 150 мм, що майже у 15 разів перевищує гранично припустимі норми, рис. 2.5.



Рис. 2.5. Нещільність лицювання покриття башт силосу

Окремі несучі (відповідальні) балки покриття у повздовжньому та радіальному напрямках деформовані – мають значні прогини, відхилення від проектного положення та відшарування від площини покрівлі. За всіма ознаками такі деформації виникли внаслідок перенавантаження та недостатньої жорсткості балочної системи покриття силосу, рис. 2.6.

Ребра жорсткості покриття прогнуті, захисні кожухи балок покриття мають значні зміщення відносно проектного положення, рис. 2.7.

У місцях з'єднання коробів до балок покриття спостерігається руйнація вузлових з'єднань. За ознаками, характер руйнування спричинило надмірне навантаження, рис. 2.8.

Короба для завантаження зерна на вузлових з'єднаннях зруйновано. Таке руйнування спричиняє перенавантаження та динамічні навантаження, рис. 2.9.

Слід зауважити, що під час проведення комплексного обстеження, деформацій оболонки силосу, кренів та перекосів несучих конструкцій колон не було виявлено, рис. 2.11.

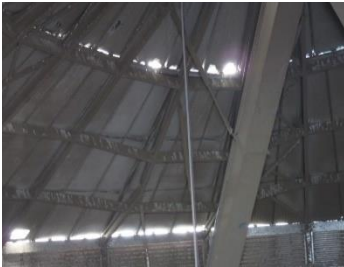


Рис. 2.6. Наявність значних прогинів системи покриття башти силосу



Рис. 2.7. Деформації та прогини ребер жорсткості покриття силосу



Рис. 2.8. Руйнація вузлових з'єднань коробів до балок покриття силосу

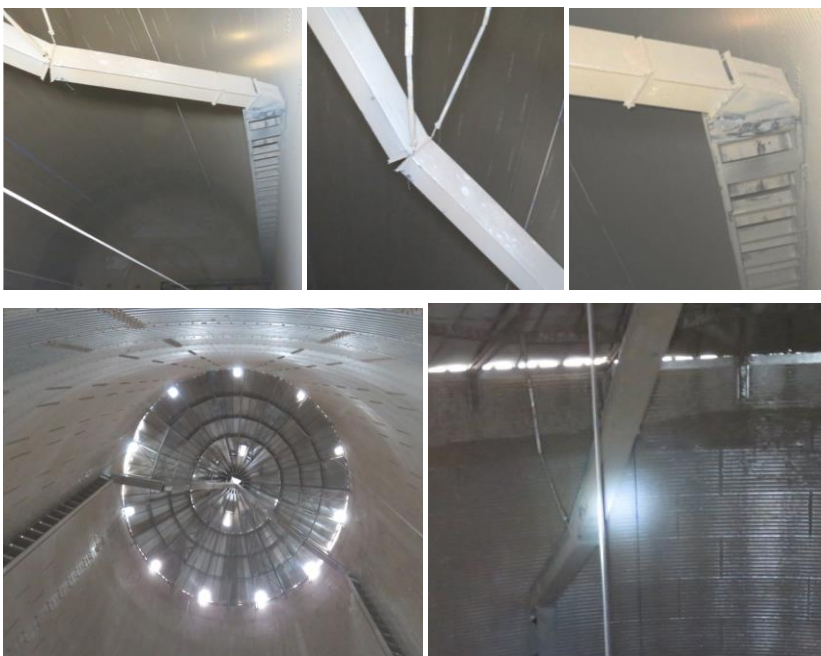


Рис. 2.9. Руйнування коробів завантаження зерна силосу

Болтові з'єднання конструктивних елементів деформовані внаслідок дії силових впливів, рис. 2.10.



Рис. 2.10. Значні деформації болтових з'єднань конструктивних елементів споруди башти силосу

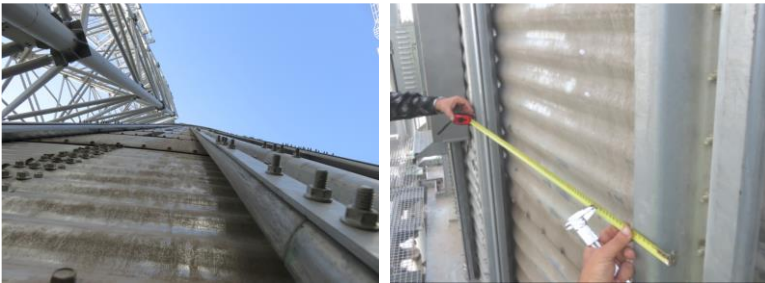


Рис. 2.11. Визначення деформацій оболонки силосу, кренів та перекосів колон

Вузлові з'єднання конструктивних елементів колон та оболонки силосу не порушені, болтові з'єднання не деформовані, рис. 2.12.



Рис. 2.12. Вузлові з'єднання конструктивних елементів колон та оболонки споруди башти силосу

Визначення деформацій несучих балок покриття

При проведенні вимірів кутів нахилу покриття башти силосу, електронним рівнем «Geo Fennel S-Digit 60 WL», різниця за прогинами між не деформованим і деформованим покриттям становить від $0,6^{\circ}$ до $2,3^{\circ}$, що майже у чотири рази перевищує допустимі норми⁴⁴, рис. 2.13.

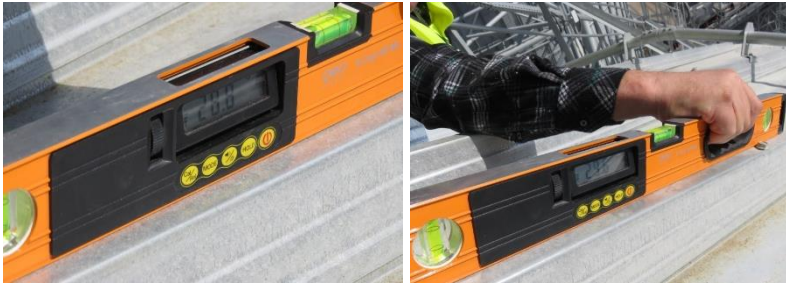


Рис 2.13. Вимірювання кутів нахилу покриття башти силосу

Завантажувальний оголовок башти силосу має крен який становить від $0,2^{\circ}$, на висоті 0,4 м, при довжині на 1 м, що майже у 2 рази перевищує гранично допустимі норми, рис. 2.14.



Рис. 2.14. Вимірювання крену завантажувального оголовку башти силосу

⁴⁴ ДСТУ Б.В.1.2–3:2006. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ, Мінгеріонбуд України, 2009. 14 с.

Визначення параметрів міцності конструктивних елементів

Проведено понад 40 замірів міцності бетону колон. На кожній із досліджених ділянок залізобетонних колон було проведено по 15 вимірів відповідно. Виконана кількість замірів, дозволяє з необхідною точністю визначити міцність колон та проектний клас бетону в цілому.

Контроль міцності проводився на гладкій, чистій бетонній поверхні колони, рис. 2.15. Згідно з результатами замірів складено таблицю вимірів міцності колон, табл. 2.1. Статистична обробка результатів вимірювання відображена у табл. 2.2. Гістограма розподілу значень представлена на рис. 2.16.

Таблиця 2.1

Результати отриманих параметрів міцності бетону колон

№	$f_{c,exp}$, МПа	Клас бетону	v , %	Конструкція	Напрямок удару	K_c
1	2	3	4	5	6	7
1	25.3	C16/20	13.5	З/Б колона	→	1.00
2	32.2	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
3	41.3	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
4	38.7	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
5	40.4	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
6	35.9	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
7	32.4	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
8	47.2	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
9	44.6	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
10	47.5	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
11	56	C32/40	13.5	З/Б колона	→	1.00
12	53.9	C32/40	13.5	З/Б колона	→	1.00
13	45.1	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
14	41	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
15	42.8	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
16	46	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
17	39.5	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
18	41.5	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
19	44.2	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
20	31.5	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
21	31	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
22	30	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
23	38.7	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
24	31	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
25	24.6	C16/20	13.5	З/Б колона	→	1.00
26	40.9	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7
27	47.1	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
28	47.1	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
29	40	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
30	46.3	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
31	39.5	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
32	48.8	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
33	24.3	C16/20	13.5	З/Б колона	→	1.00
34	32.8	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
35	38.7	C25/30	13.5	З/Б колона	→	1.00
36	32.1	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
37	31.4	C20/25	13.5	З/Б колона	→	1.00
38	44	C30/35	13.5	З/Б колона	→	1.00
39	51.4	C32/40	13.5	З/Б колона	→	1.00
40	64.8	C40/50	13.5	З/Б колона	→	1.00

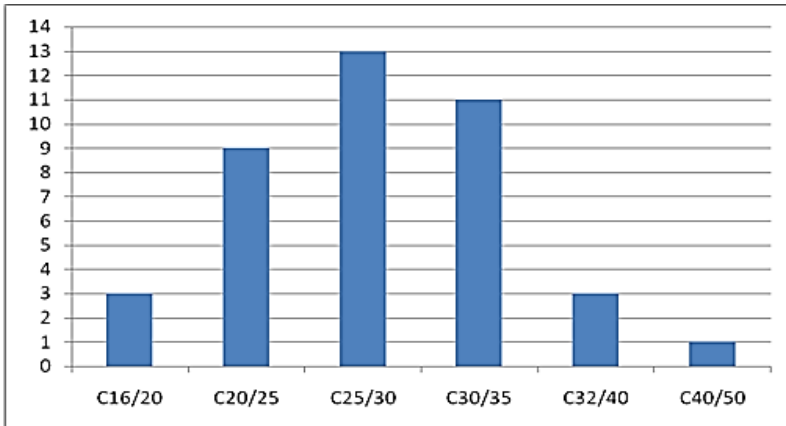


Рис. 2.15. Визначення параметрів міцності залізобетонних колон

Таблиця 2.2

Статистична обробка даних вимірів міцності бетону колон

Клас бетону	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C40/50
Кількість значень	3	9	13	11	3	1
Покази приладу	24.3	30	35.9	44	51.4	64.8
	25.3	32.8	42.8	48.8	56	64.8

**Рис. 2.16. Статистичний розподіл міцності залізобетонних колон**

За результатами проведених вимірів та обчислень було встановлено фактична міцність бетонна колон становить 39,9 МПа, що відповідає класу важкого бетону C25/30. Значення знаходиться в межах гранично допустимих значень⁴⁵.

3. Чисельне моделювання та визначення параметрів напружено-деформованого стану споруди башти та її конструктивних елементів

Проведення комплексних чисельних досліджень здійснювалося за допомогою інтегрованої система аналізу будівельних конструкцій будівель та інженерних споруд ПК «Ліра-САПР», яка орієнтована на

⁴⁵ ДСТУ Б.В.2.6–156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ: Мінгеріонбуд України, 2011. 118 с. URL: <http://www.mqn.com.ua/download.php?id=1>

вирішення широкого спектру та класу науково-практичних задач⁴⁶ та аналізу поведінки конструкцій при різноманітних навантаженнях, силових та деформаційних впливах^{47;48}.

Опис скінчено-елементної моделі споруди башти силосу

Найважливішим етапом рішення задачі є складання розрахункової схеми конструкції. Заміна вихідної конструкції сукупністю дискретних елементів має на меті рівність енергій конструкції та її дискретної моделі^{49;50;51}.

Башта силосу № 8.10, яка входить до комплексу перевалки зернових культур, розташованому на території причалів №1 і №2 ДП «Миколаївського морського товарного порту» – каркасного типу, діаметром 20,1 м; загальною висотою 36,6 м.

Фундамент споруди –пальовий; стіни, колони та перекриття – встановлені на ростверк польового фундаменту; оболонка башти силосу та покриття –сталеві конструкції. Несучі конструкції башти силосу № 8.10 виконані з оцинкованого «С»-подібного профілю

⁴⁶ Yakovenko I.A., Dmytrenko Y.A., Bakulina V.M. (2022) Construction of Analytical Coupling Model in Reinforced Concrete Structures in the Presence of Discrete Cracks. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_10

⁴⁷ Дмитренко Є.А., Гензерський Ю.В., Яковенко І.А., Бакулін Є.А. Особливості розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних конструкцій за методом Вуда в ПК «ЛПА САПР». *Український журнал будівництва та архітектури : науково-практичний журнал*. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА, 2021. № 5 (005). С. 41–49. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/15004>

⁴⁸ Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Методи розрахунку підпірних стін. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2017. Вип. 262. С. 72 – 87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2017_262_9

⁴⁹ Yakovenko I.A., Dmytrenko Y.A., Bakulina V.M. (2022) Construction of Analytical Coupling Model in Reinforced Concrete Structures in the Presence of Discrete Cracks. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_10

⁵⁰ Дмитренко Є.А., Гензерський Ю.В., Яковенко І.А., Бакулін Є.А. Особливості розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних конструкцій за методом Вуда в ПК «ЛПА САПР». *Український журнал будівництва та архітектури : науково-практичний журнал*. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА, 2021. № 5 (005). С. 41–49. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/15004>

⁵¹ Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Методи розрахунку підпірних стін. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2017. Вип. 262. С. 72 – 87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2017_262_9

250×75мм, товщиною 3мм. Силос виготовлений фірмою AGI і має типорозмір AGI BIN MODEL 66-28С (3 stiffeners).

Для проведення перевірочних розрахунків фірмою виробником надані монтажні креслення, посібник по монтажу та експлуатації башти силосу. Робоча документація, виконавча документація, сертифікати відповідності не були надані під час проведення комплексного обстеження.

Для виконання розрахунків за граничними станами першої та другої групи була розроблена модель МСЕ (методу скінчених елементів) сталевій покрівлі башти силосу та реалізована із застосуванням інтегрованого програмного комплексу ПК «Ліра-САПР» (ліцензійний № 94107710).

Розрахункова схема складається з шести верхніх ярусів корпусу силосу, разом з покрівлею та трубами уповільнювача швидкості зерна.

При побудові розрахункової схеми було прийнято, що всі конструктивні елементи сталевій покрівлі башти силосу складаються із ідеалізованого матеріалу, із збереженням головних фізико-механічних характеристик та властивостей.

На рис. 3.1 наведено 3D модель сталевій покрівлі башти силосу.

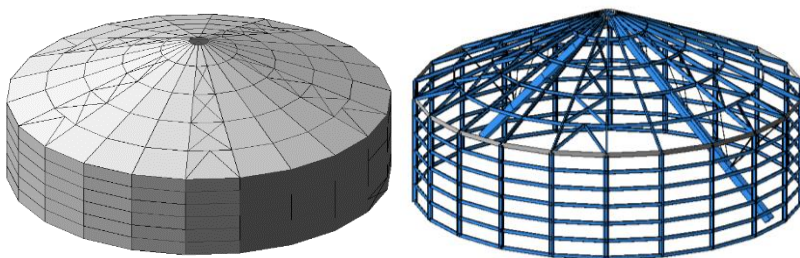


Рис. 3.1. 3D модель інженерної споруди – сталевій покрівлі башти силосу

На рис. 3.2 наведено загальний вид скінчено-елементної моделі сталевій покрівлі башти силосу із кольоровим відображенням типів жорсткості.

Загальна скінчено-елементна модель містить 293 вузли та 908 скінчених елементи.

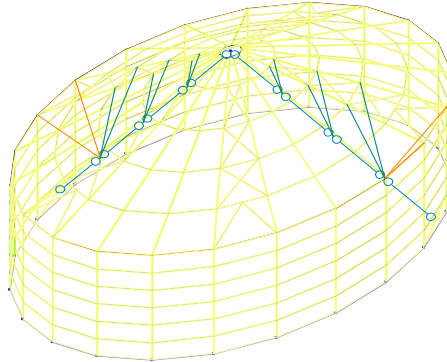


Рис. 3.2. Загальний вид скінчено-елементної моделі інженерної споруди – сталевій покрівлі башти силосу

Фізико-механічні характеристики та характеристики жорсткості та матеріалів конструкцій

Основним матеріалом сталевій покрівлі башти силосу є сталь. Несучі конструкції башти силосу та покриття виконані із оцинкованого с-образного профілю $250 \times 75 \text{ мм}$, товщиною 3 мм . Горизонтальний розпір від конструкцій покрівлі силосу сприймається кільцевою балкою, що встановлена по верху стін башти силосу, перетином $273 \times 3 \text{ мм}$. Уповільнювач швидкості зерна – металевий короб перерізом $400 \times 400 \text{ мм}$, товщиною $4,5 \text{ мм}$.

Похилі ділянки коробу розташовані під кутом 45° . Похила ділянка коробу уповільнювача швидкості зерна кріпиться до балок покриття сталевими тяжами. Кожна труба уповільнювача швидкості зерна складається з 5 частин, що закінчуються фланцями та з'єднаних 16 болтами $3/8 \times 1 \text{ Flance bolt}$.

Типи жорсткості елементів покрівлі та стін силосу наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Типи жорсткості несучих елементів стін та покрівлі силосу

Тип жорсткості	Назва	Параметри (переріз-(см); жорсткість-(т,м); розп.вага-(т,м))
1	брус 0.3×27.3 (опорне кільце)	Ro=7.85, E=2e+007, GF=0 B=0.3, H=27.3 EF=16380, EI _y =101.732 EI _z =0.0123, GI _k =0.0194
2	C-образний профіль 250×75×50×3 (C_проф250_75) несучі балки покрівлі	q=0.059878 EF=160295, EI _y =530 EI _z =22, GI _k =0.0292 Y1=0.266, Y2=0.586, Z1=2.64, Z2=2.64, RU_Y=0, RU_Z=0
3	C-образний профіль 200×60×50×3 (C_проф200_60) кільцеві балки покрівлі, зв'язки покрівлі	q=0.037149 EF=99449.2, EI _y =208 EI _z =9.81, GI _k =0.0235 Y1=0.243, Y2=0.509, Z1=2.09, Z2=2.09, RU_Y=0, RU_Z=0
4	пластина Н 0.3 (лист сталевий_стіна покрівля)	E=2e+007, V=0.3, H=0.3, Ro=7.85
5	профіль 400×4, труба уповільнювача швидкості зерна	q=0.0496096 EF=132806, EI _y =3.47e+003 EI _z =3.47e+003, GI _k =1.98e+003 Y1=13.1, Y2=13.1, Z1=13.1, Z2=13.1, RU_Y=0, RU_Z=0
6	труба 63.5×5 розпірка	q=0.00721055 EF=19302.9, EI _y =8.32 EI _z =8.32, GI _k =6.3 Y1=1.36, Y2=1.36, Z1=1.36, Z2=1.36, RU_Y=0, RU_Z=0
7	круг 12 сталеві тяги	q=0.000887452 EF=2375.74, EI _y =0.0214 EI _z =0.0214, GI _k =0.0162 Y1=0.15, Y2=0.15, Z1=0.15, Z2=0.15, RU_Y=0, RU_Z=0

Навантаження, впливи та їхні комбінації на інженерну споруду силосу

Нормативні та розрахункові навантаження на конструкції сталеві покрівлі силосу та труби уповільнювача швидкості зерна

визначались згідно норм розрахунку та проектування, а саме: ДБН В.2.2–8–98⁵² та ДБН В.1.2–2:2006⁵³. При цьому розрахунок проводився на власну вагу, вагу від технологічного обладнання, корисне навантаження на покрівлю, снігове, вітрове навантаження та комбінації цих навантажень.

Навантаження на розрахункову схему задаються у вигляді окремих завантажень та включають:

- постійні навантаження: власна вага конструкції покрівлі силосу;
- тимчасові довготривалі навантаження: навантаження від стаціонарного обладнання на покрівлі силосу, від ваги сипких матеріалів на конструкції уповільнювача швидкості зерна, з урахуванням динамічних впливів;
- короточасні навантаження: снігове та вітрове навантаження, навантаження від обслуговування та ремонту покрівлі силосу.

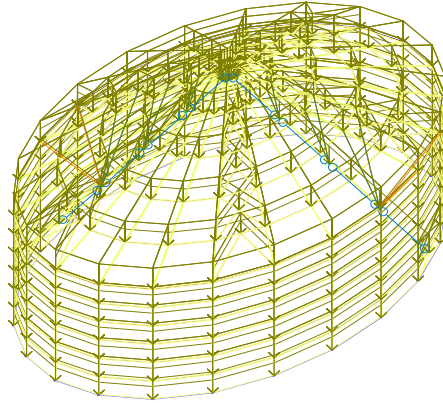
Завантаження 1 – описує постійне навантаження від власної ваги конструкцій покриття силосу, яке моделюється у вигляді місцевих розподілених сил, які діють по напрямку осі *Z* загальної системи координат. Власна вага елементів розрахункової схеми вираховується автоматично. Коефіцієнт надійності за навантаженням прийнятий рівним 1,05 у відповідності до вимог табл. 5.1¹⁵. На рис. 3.3 наведено постійні навантаження.

Завантаження 2 – описує тимчасове довготривале навантаження від ваги стаціонарного обладнання (навантаження від ваги термопідвісок 13 шт., в залежності від довжини – $1,2 \times 1,1 = 1,32$ тс; $1,3 \times 1,1 = 1,43$ тс), яке моделюється у вигляді місцевих зосереджених сил у вузлах кріплення обладнання до конструкцій покрівлі відповідно до технологічної схеми, які діють за напрямком осі *Z* загальної системи координат. Коефіцієнт надійності за навантаженням прийнятий рівним 1,1 у відповідності до вимог п. 4.2⁵⁴. На рис. 3.4 наведено довготривале навантаження на плиту перекриття.

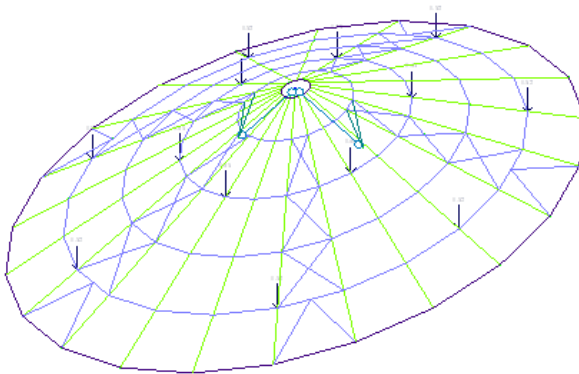
⁵² ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. Київ: Держбуд України, 1998. 41 с. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/05/DBN-V.2.2-8-98.pdf>

⁵³ ДБН В.1.2–2:2006. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев: МинстройУкраины, 2006. 78 с

⁵⁴ ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. Київ: Держбуд України, 1998. 41 с. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/05/DBN-V.2.2-8-98.pdf>



**Рис. 3.3. Постійне навантаження
(власна вага конструкцій покрівлі силосу)**



**Рис. 3.4. Довготривале навантаження
(вага стаціонарного обладнання)**

Завантаження 3 – описує тимчасове довготривале навантаження на конструкції уповільнювача швидкості зерна, від ваги зерна вище верхньої частини похилої ділянки уповільнювача та від сил тертя зерна по бічних поверхнях уповільнювача. Розрахункові значення навантаження на конструкцію уповільнювача приймалося відповідно до вимог²⁷. На рис. 3.5 наведено тимчасове довготривале навантаження на конструкцію уповільнювача швидкості зерна та прикладалося у вигляді зосереджених сил у місцях розташування тяжів та розпірок.

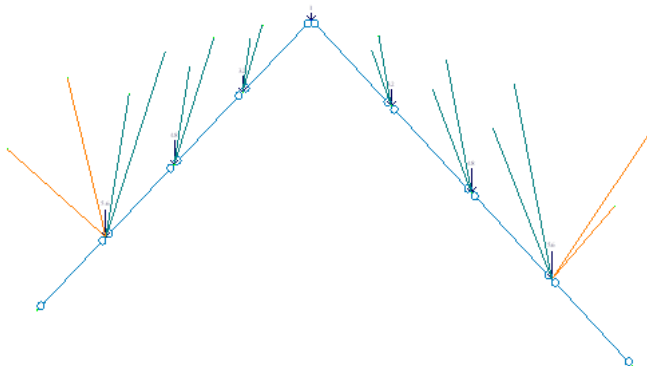


Рис. 3.5. Довготривале навантаження на конструкції уповільнювача

Завантаження 4 – описує навантаження від ваги зерна всередині уповільнювача швидкості. Коефіцієнт динамічності для даного навантаження прийнятий рівним 1,3 у відповідності до вимог²⁷ п. 4.2.

Завантаження 5, 6 – описують снігове навантаження на конструкції покрівлі силосу для м. Миколаїв, що знаходиться у II районі по характеристичним значенням ваги снігового покриву – п. 8.2¹⁵; схема 1, *варіант 1,2*, додаток Ж, ДБН¹⁵).

Завантаження 7 – описує змінні короточасні вітрові навантаження на стіни та покрівлю башти силосу.

Вітрове навантаження визначалося відповідно (схема 12б, додаток И ДБН¹⁵) для III вітрового району.

Аналіз напружено-деформованого стану та результати розрахунку

Розрахунок конструкції сталеві покрівлі башти силосу та уповільнювача швидкості зерна на статичні навантаження, з урахуванням коефіцієнту динамічності був виконаний в інтегрованому ПК «Ліра-САПР».

Для кожного скінченного елемента по кожному завантаженню та комбінації навантажень були визначені всі параметри напружено-деформованого стану. Враховуючи складність представлення великого об'єму інформації, результати розрахунку представлені у вигляді мозаїки деформацій та напружень, та проведений відбір найбільш навантажених елементів конструкції покрівлі.

Переміщення

Нижче наведені переміщення вузлів скінченної-елементної моделі, напруження в несучих елементах покрівлі башти силосу від

різноманітних можливих комбінацій навантажень. На рис. 3.6–3.10 представлені переміщення вузлів покрівлі по осям основної системи координат.

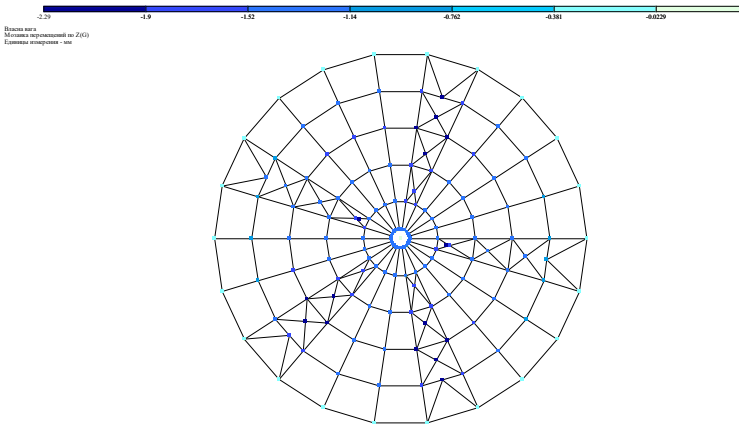


Рис. 3.6. Переміщення вузлів покрівлі (мм) вздовж осі Z основної системи координат від власної ваги (Завантаження 1)

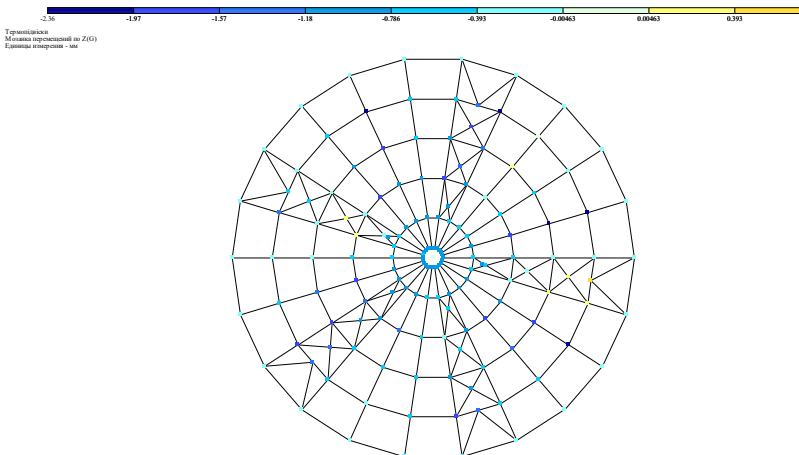


Рис. 3.7. Переміщення вузлів покрівлі (мм) вздовж осі Z основної системи координат від стаціонарного обладнання (Завантаження 2)

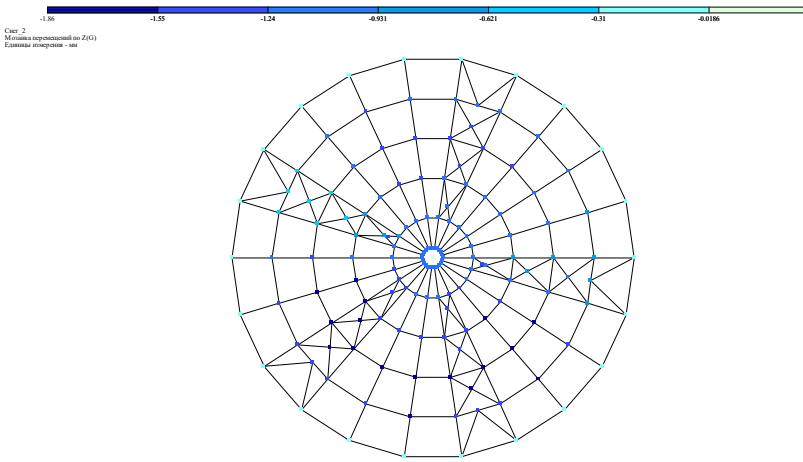


Рис. 3.8. Переміщення вузлів покрівлі (мм) вздовж осі Z основної системи координат від короткочасного снігового навантаження (Завантаження 6)

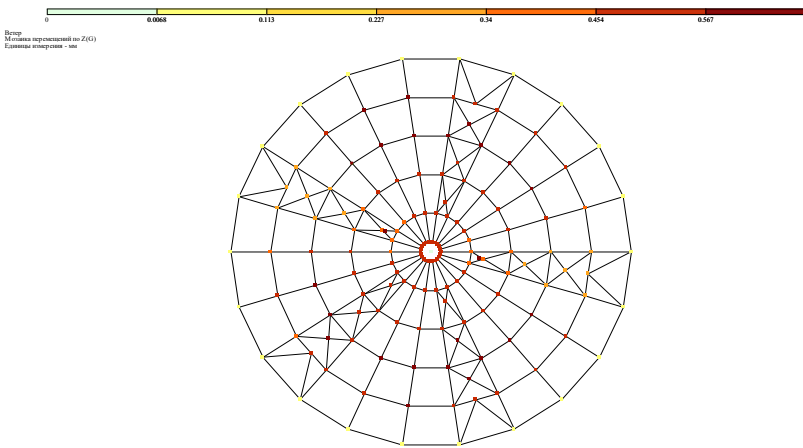


Рис. 3.9. Переміщення вузлів покрівлі (мм) вздовж осі Z основної системи координат від короткочасного вітрового навантаження (Завантаження 7)

На рис. 3.10 представлені переміщення вузлів покрівлі вздовж осей основної системи координат від першої основної комбінації навантажень.

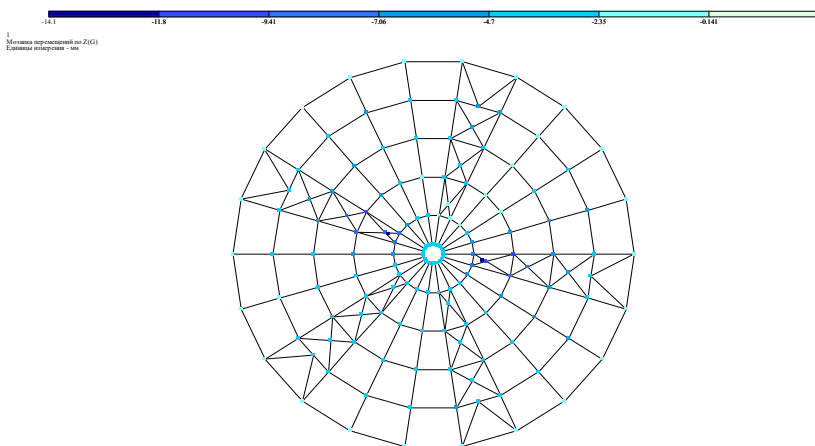


Рис. 3.10. Переміщення вузлів покрівлі (мм) вздовж осі Z основної системи координат від першої комбінації навантажень

На рис. 3.11–3.13 представлені переміщення вузлів уповільнювача швидкості зерна вздовж осей основної системи координат.

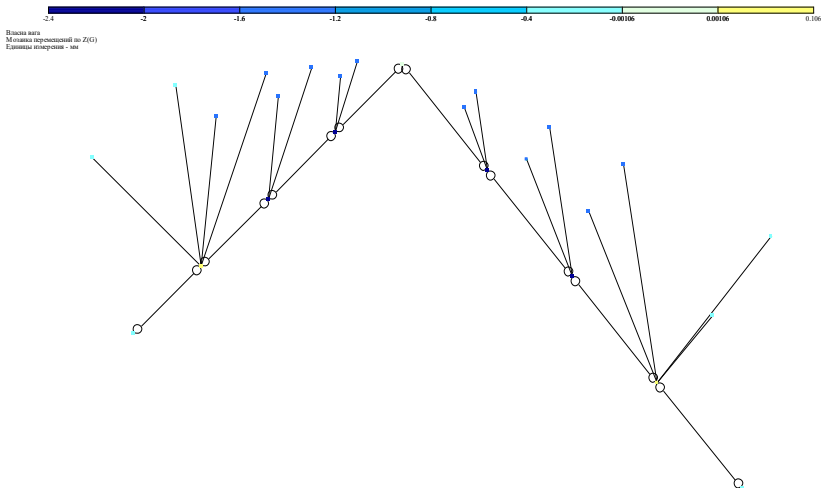


Рис. 3.11. Переміщення вузлів уповільнювача (мм) вздовж осі Z основної системи координат від власної ваги (Завантаження 1)

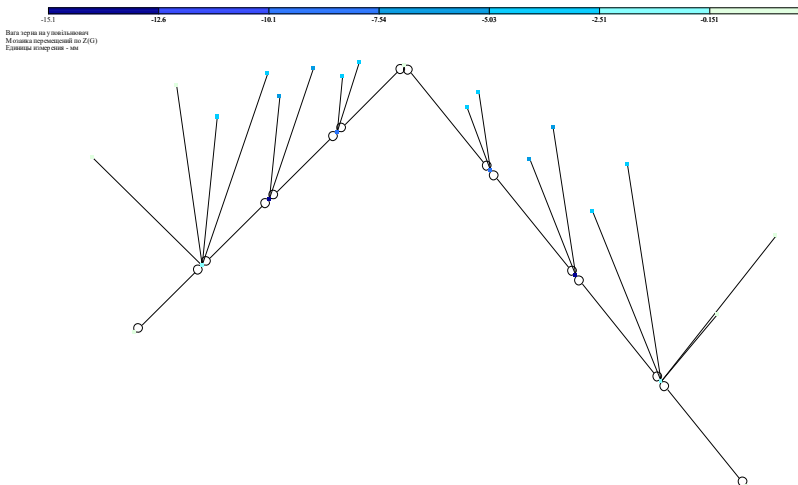


Рис. 3.12. Переміщення вузлів уповільнювача (мм) вздовж осі Z основної системи координат від ваги зерна, що знаходиться вище (Завантаження 3)

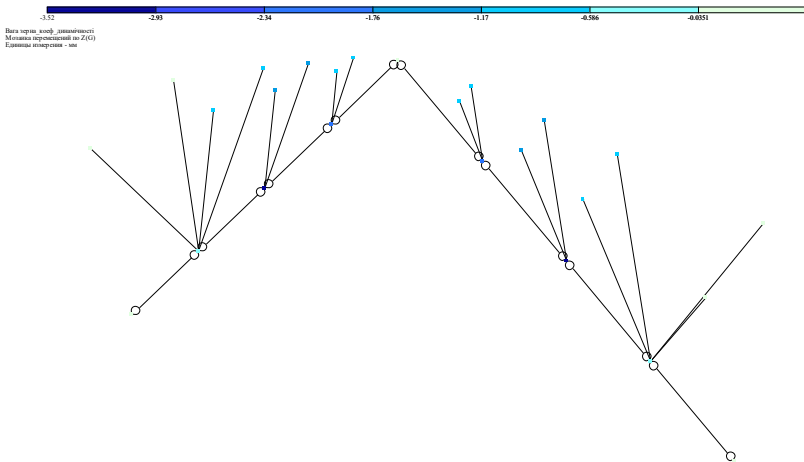


Рис. 3.13. Переміщення вузлів уповільнювача (мм) вздовж осі Z основної системи координат від навантаження зерна в середині (Завантаження 4)

На рис. 3.14 представлені переміщення вузлів уповільнювача вздовж осей основної системи координат від першої основної комбінації навантажень.

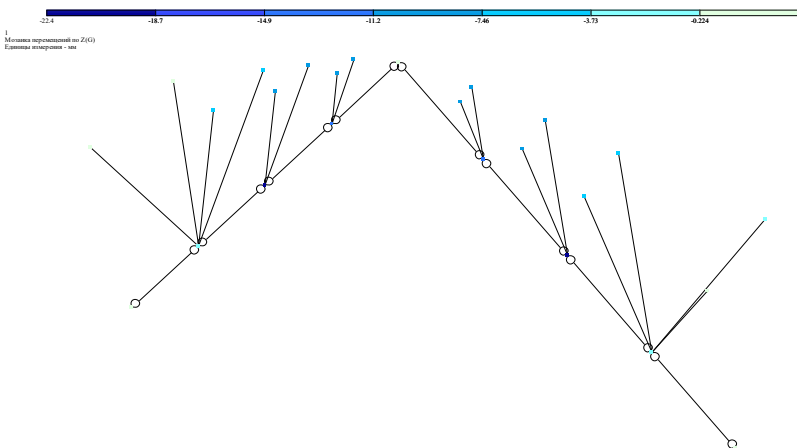


Рис. 3.14 Переміщення вузлів уповільнювача (мм) вздовж осі Z основної системи координат від першої комбінації навантажень

На рис. 3.15–3.18 наведені кольорові відображення мозаїки зусиль у скінченних елементах покрівлі башти силосу, що моделювалися стержневими СЕ від статичних навантажень.

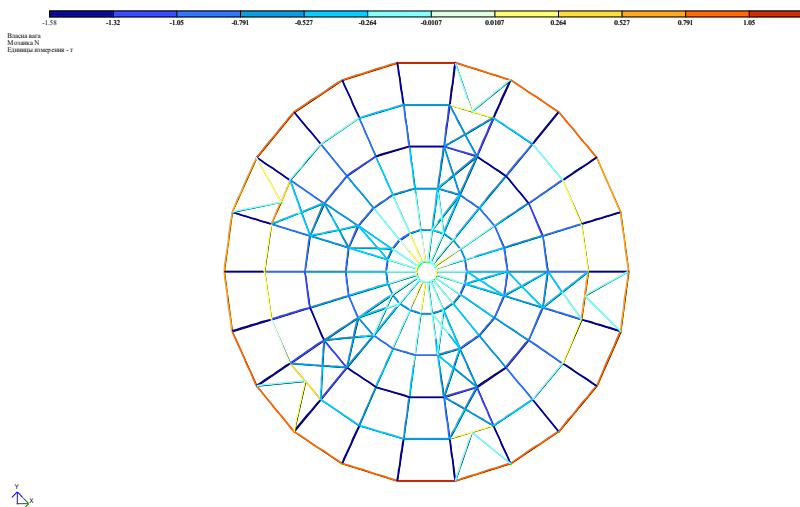


Рис. 3.15. Мозаїка N в стержневих СЕ покрівлі силосу від постійного навантаження

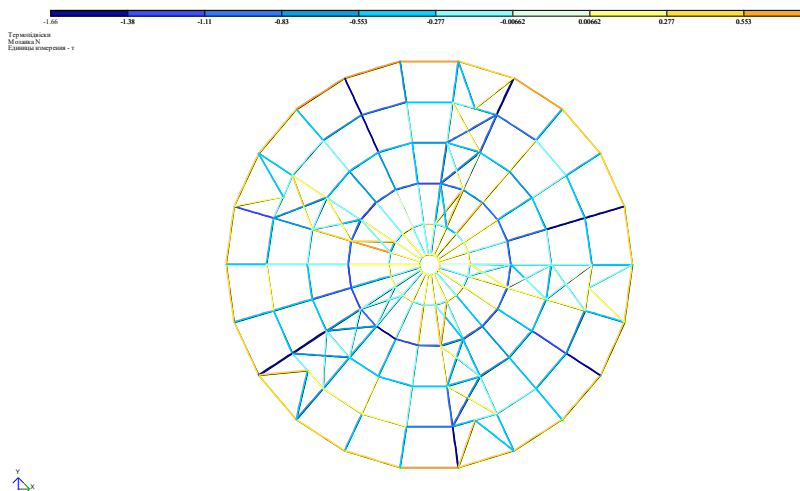


Рис. 3.16. Мозаїка N в стержневих СЕ покрівлі силосу від стаціонарного обладнання

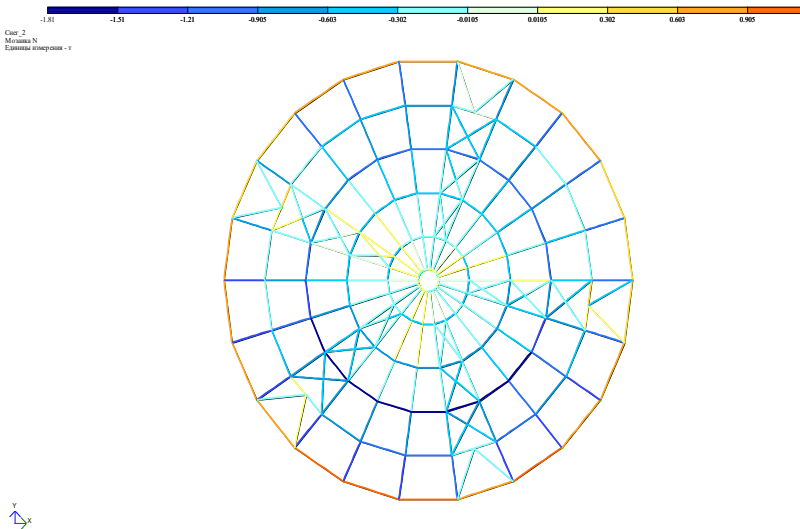


Рис. 3.17. Мозаїка N у в стержневих СЕ покрівлі силосу від снігового навантаження

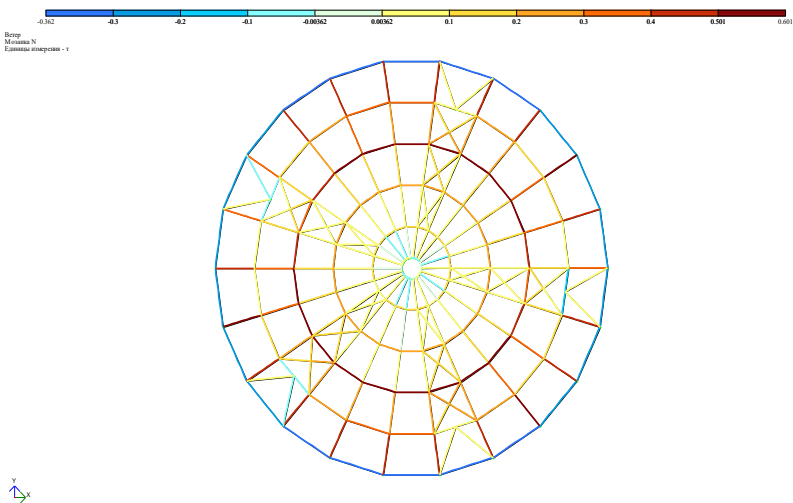


Рис. 3.18. Мозаїка N у в стержневих СЕ покрівлі силосу від вітрового навантаження

За результатами перевірного статичного розрахунку конструкцій покрівлі башти силосу та уповільнювача швидкості зерна у ПК «Ліра-САПР» визначені максимальні внутрішні зусилля

у конструктивних елементах. Наступним кроком моделювання є перевірка перерізів елементів покрівлі силосу за допомогою системи ЛІР-СТК.

Система ЛІР-СТК призначена для підбору та перевірки перерізів стержневих металевих елементів у відповідності зі СНиП II.23-81* та СНиП 2.01.07-85, ДБН В.2.6–198:2014, Eurocode 3.1.1 ENV 1993-1-1:1992, LRFD (AISC) 2nd edition.

У системі ЛІР-СТК для кожного типу жорсткості були призначені додаткові параметри та виконаний розрахунок на розрахунковий збіг зусиль. Нижче наведена мозаїка вичерпання несучої здатності елементів покрівлі башти силосу за перевіркою по першій, другій групах граничних станів та місцевій стійкості стиснутих елементів. Результат перевірки перерізів елементів покрівлі башти силосу за граничними станами першої групи (рис. 3.19):

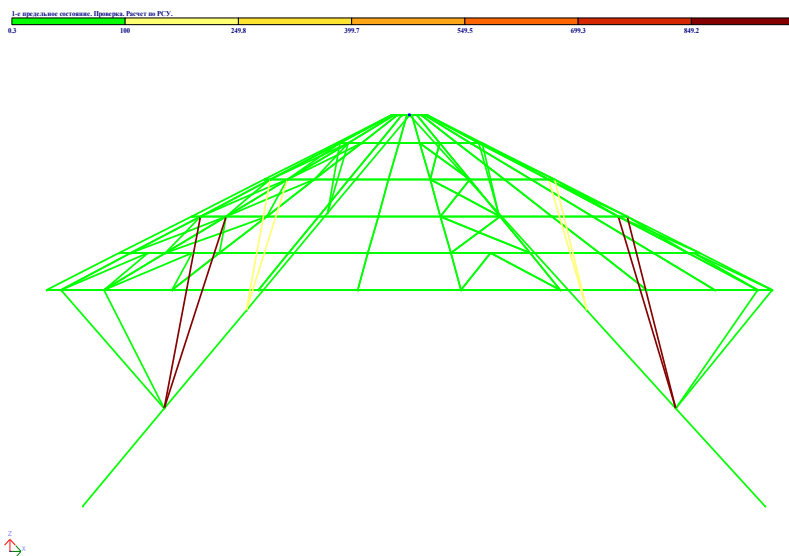


Рис. 3.19. Мозаїка відсотків використання перерізу за граничними станами першої групи

Результат перевірки перерізів сталевих елементів покрівлі башти силосу за граничними станами другої групи (рис. 3.20):

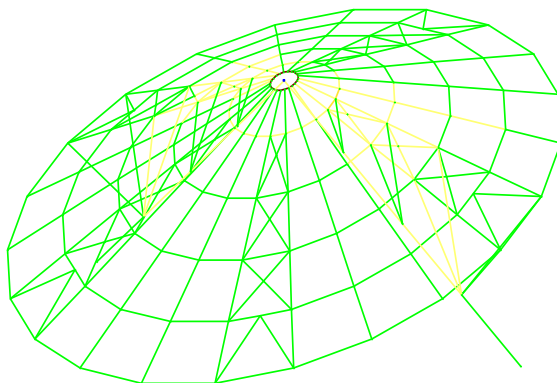


Рис. 3.20. Мозаїка відсотків використання перерізу за граничними станами другої групи

Результат перевірки перерізів елементів покрівлі башти силосу за втратою місцевої стійкості, представлені на рис. 3.21.

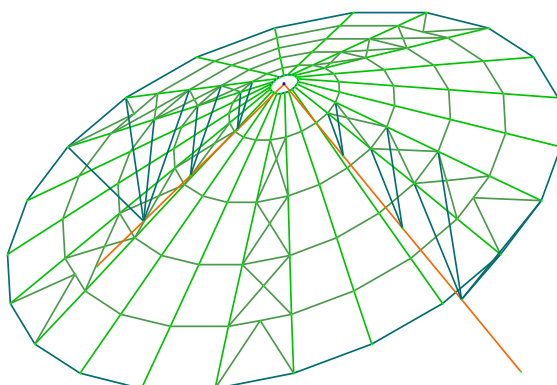


Рис. 3.21. Мозаїка відсотків використання перерізу за місцевою стійкістю

Висновки за результатами перевірочних розрахунків:

1). Максимальне переміщення вузлів елементів покрівлі башти силосу та уповільнювача швидкості руху зерна на відмітці +36,6 м, при найбільш несприятливому збігу навантажень становить:

$$f = 23,5 \text{ мм} > f_u = 1/400 = 35,3 \text{ мм},$$

що не перевищує гранично допустимий прогин згідно вимог табл.1 ДСТУ Б В.1.2-3:2006 «Прогини та переміщення»⁵⁵.

2). Необхідно відзначити, що окремі конструктивні вузлові з'єднання працюють на межі гранично припустимих значень і в разі виникнення екстремальних навантажень є висока ймовірність та ризик їхнього руйнування, див. рис. 3.11–3.14.

3). Перевірка призначених перерізів вузлів елементів покрівлі башти силосу та уповільнювача швидкості руху зерна в системі ЛІР-СТК за граничними станами першої та другої групи, показала, що деякі елементи нижнього поясу та решітки не відповідають вимогам п. 5.1, 5.3 та 6.15 СНиП II.23-81*, СНиП 2.01.07-85, ДБН В.2.6–198:2014, Eurocode 3.1.1 ENV 1993-1-1:1992, LRFD (AISC) 2nd edition за умовами міцності, стійкості та гнучкості.

4). Перенавантаженими елементами, що не пройшли перевірку за граничними станами першої та другої групи є: кільцеві та радіальні балки покриття, елементи зв'язків, в місцях підвішування до конструкцій покриття уповільнювача швидкості руху зерна; уповільнювач швидкості зерна та тяжі-підвіски.

ВИСНОВКИ

За результатами візуальних, інструментальних, вимірювальних, обмірних робіт, аналізу співставлення, проведених перевірочних розрахунків зроблено наступні висновки про фактичний технічний стан конструктивних елементів інженерної споруди сталеві башти силосу.

1. Причиною руйнування конструкцій покриття силосу є помилки проектування.

2. Порушення вимог СНиП II.23-81*, СНиП 2.01.07-85, ДБН В.2.6–198:2014, Eurocode 3.1.1 ENV 1993-1-1:1992, LRFD (AISC) 2nd edition за умовами міцності, стійкості та гнучкості.

⁵⁵ ДСТУ Б В.1.2–3:2006. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ, Мінгеріонбуд України, 2009. 14 с.

3. Неврахування мінливості зміни навантажень та сполучень несприятливих комбінацій навантажень згідно ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження та впливи».

4. Неврахування коефіцієнта динамічності у відповідності до вимог п. 4.2, ДБН В.2.2-8-98 «Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна».

5. Недооцінка необхідної несучої спроможності та конструкційної безпечності відповідальних (несучих) конструкцій та вузлових з'єднань згідно вимог ДСТУ Б. В.1.2-3:2006 «Прогини та переміщення»:

- кільцеві та радіальні балки покриття;
- зв'язкові елементи, в місцях підвішування до них уповільнювачів швидкості руху зерна;
- тяжі-підвіски уповільнювачів швидкості зерна;
- самі уповільнювачі швидкості зерна та конструктивні з'єднання.

6. За результатами проведеного технічного обстеження слід зазначити, що несучі (відповідальні) конструкції покриття башти силосу № 8.10 знаходяться у передаварійному стані. Подальша експлуатація небезпечна. Необхідно провести підсилення конструкцій покриття башти.

АНОТАЦІЯ

На підставі проведеного комплексного обстеження сталевий споруди башти силосу та її несучих конструктивних елементів визначено та проаналізовано фактичний технічний стан інженерної споруди.

Виявлені дефекти та недоліки основних конструктивних елементів покриття співставленні із гранично прийнятними значеннями відповідних параметрів за діючими будівельними нормами. Побудована чисельна скінчено-елементна модель об'єкту дослідження із детальним описом застосованих типів скінчених елементів, їхніх фізико-механічних характеристик, а також наведений опис постійних та тимчасових навантажень на споруду. Проведений аналіз напружено-деформованого стану споруди силосу під дією різноманітних комбінацій навантажень та силових впливів.

У результаті отримані параметри напружено-деформованого стану споруди башти та її конструктивних елементів за наслідками руйнування. Наданий відповідний експертний висновок щодо можливості подальшої експлуатації інженерної споруди.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд / Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України. Київ, 1997. 144 с.
2. Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель і споруд. Харків: ФОРТ, 2003. 48 с.
3. ДСТУ–Н Б В.1.2–18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2017. 47 с.
4. Бакулін Є.А. Критерії надійності та ризиків при оцінюванні технічного стану експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. № 1. С. 2–4.
5. Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель. *Будівництво України*. 2013. № 5. С. 2–5.
6. Бакулін Є.А., Яковенко І.А. Наслідки руйнування та надання комплексної оцінки можливості подальшої експлуатації будівлі корівника у смт. Немішаєво. *Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн: зб. тез доп. XXI міжн. онлайн-конф. наук.-пед. працівн., наук. спів. та асп. «»* (Київ, 25–26 березня 2021 р.). К. : НУБіП України, 2021. С. 67–69. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u232/zbirnik_npp_0.pdf
7. Бакулін Є.А., Яковенко І.А., Дмитренко Є.А., Бакуліна В.М. Результати аналізу причин руйнування сталевих ферм покриття конверторного цеху. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. тез доп. 9-ої міжн. наук.-техн. конф.* (Харків, 17–19 листопада, 2021 р.). Харків, УкрДУЗТ, 2021. С. 87–88. URL: http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf
8. Верюжский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. *Справочное пособие по строительной механике : учебное пособие*. М.: АСВ, 2014. Т.1. 640 с.
9. Верюжский Ю.В., Гольшев А. Б., Колчунов В.И. и др. *Справочное пособие по строительной механике : учебное пособие*. М. : АСВ, 2014. Т.ІІ. 432 с.
10. Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Барабаш М.С. Комп'ютерні технології проектування об'ємно-планувальних рішень будівель та споруд аеропортів: мет. рек. до виконання РГР. К.: НАУ, 2014. 72 с.

11. Горностаев И.С., Ключева Н.В., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 5(256). С. 60–66. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/52687>

12. Ключева Н.В., Горностаев И.С., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Методика расчета деформативности стержневых железобетонных составных конструкций с использованием программного комплекса «Мираж-2014». *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 10. С. 21–26.

13. ДСТУ Б.В.1.2–3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ, Мінгеріонбуд України, 2009. 14 с.

14. Барашиков А.Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівельних та інженерних споруд. Київ, Основа, 2008. 320 с.

15. ДБН В.1.2–2:2006. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Киев: МинстройУкраины, 2006. 78 с.

16. Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Визначення вітрових навантажень висотних будівель в умовах щільної міської забудови. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2016. Вип. 254. С. 330–338. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_254_34

17. ДБН В.1.2–14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. – 30 с.

18. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах. Київ, 2014. 110 с. URL: <https://mybud.com.ua/files/nd/dbn%20v.1.1-12%202014.pdf>

19. Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Вертикальні в'язі каркасних будівель в сейсмічно активних зонах. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2017. Вип. 258. С. 117–131. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2017_258_12.

20. Гроздов В.Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Санкт-Петербург: Издательский Дом KN+, 2001. 48 с.

21. Малишев О. М., Віроцький В. Д., Нілов О. О. та ін. Технічне обстеження та нагляд за безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд / за ред. О. М. Малишева і Державного

підприємства «Головний навчально-методичний центр» України. Київ: Відлуння, 2007. 708 с.

22. Горохов Е. В., Мушанов В. Ф., Василев В. В., Ягмур А. А. Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений. Киев: УМК ВО, 1991. 151 с.

23. ДСТУ Б.В.2.6–156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ: Мінгеріонбуд України, 2011. 118 с. URL: <http://www.mqn.com.ua/download.php?id=1>

24. Yakovenko I.A., Dmytrenko Y.A., Bakulina V.M. (2022) Construction of Analytical Coupling Model in Reinforced Concrete Structures in the Presence of Discrete Cracks. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_10

25. Дмитренко Є.А., Гензерський Ю.В., Яковенко І.А., Бакулін Є.А. Особливості розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних конструкцій за методом Вуда в ПК «ЛПА САПР». *Український журнал будівництва та архітектури : науково-практичний журнал*. Дніпро: ДВНЗ ПДАБА, 2021. № 5 (005). С. 41–49. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/issue/view/15004>

26. Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. Методи розрахунку підпирних стін. *Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика*. Київ, 2017. Вип. 262. С. 72 – 87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_tech_2017_262_9

27. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. Київ: Держбуд України, 1998. 41 с. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/05/DBN-V.2.2-8-98.pdf>

28. Яковенко І. А., Бакулін Є.А. Реконструкція будівель та споруд аеропортів: мет. реком. до виконання РГР. Київ: НАУ, 2013. 50 с.

29. Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Першаков В.М. Проблеми протидії пожежній небезпеці та вогнестійкість висотних будівель. *Будівництво України*. 2017. №2. С. 28-32.

30. Bakulin Ye.A., Yakovenko I.A., Bakulina V.M. Engineering protection and prepatation of territories : study guide; under the editorship of cand tech. science Ye.A. Bakulin. Kyiv : NULES of Ukraine, 2022. 205 p.

31. Yakovenko I.A., Bakulin Ye.A., Bakulina V.M. Classification methods of civil buildings reconstruction / Theoretical and scientific foundations of engineering : collective monograph / Apostolova R., Shembel E., Aurbach D., Markovsky B., – etc. International Science

Group. Boston: Primedia eLaunch, 2020. 180 p., pp. 70–96.
URL: <http://isg-konf.com>

32. Бабич Є.М., Караван В.В., Бабич В.Є. Діагностика, паспортизація та відновлення будівель і інженерних споруд : підручник. Рівне: «Волинські береги», 2018. 176 с.

33. Клименко Є.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: навчальний посібник. Київ, 2004. 304 с.

34. ДСТУ Б.В.2.6–210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ, Мінгеріонбуд України, 2016. 45 с.

35. ДСТУ Б В.2.7–220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Київ, Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с.

36. ДСТУ Б В.2.7–224:2009. Будівельні матеріали. Бетони правила контролю міцності. Київ, Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с.

37. ДБН В.1.2–14–2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: Київ: Мінгеріонбуд України, 2009. 32 с.

Information about the authors:

Bakulin Yevhenii Anatoliiovych,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Construction Department,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
12 B, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine

Yakovenko Ihor Anatoliiovych,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor at the Construction Department,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
12 B, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine

Bakulina Valentyna Mykhaylivna,

Senior Lecturer at the Construction Department,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
12 B, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine