



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-7>

УДК 624.014, 66.02



ПОПОВ В.О.

Канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, Україна, e-mail: v.a.popov.vntu@gmail.com, тел.: +38 (093) 757-22-69, ORCID: 0000-0003-2379-7764



БАЙДА Д.М.

Канд. техн. наук, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна, e-mail: denisbayda@gmail.com, тел.: +38 (097) 041-38-12, ORCID: 0009-0004-0004-377X



ПОПОВА А.В.

Магістрант. Факультет хімії, біології та біотехнологій Донецького національного університету імені Василя Стуса, м. Вінниця, Україна, e-mail:alina.popova260702@gmail.com, тел.: +38 (063) 181-39-10, ORCID 0000-0003-3576-5823

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРОСТОРОВОЇ ГАЛЕРЕЇ ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА, ЩО ЗАЗНАЛА КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ, ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПІДСИЛЕННЯ

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто вирішення важливої науково-практичної задачі із моделювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій промислової металеві галереї, яка входить у загальну технологічну лінію виробництва та перевантаження мінеральних добрив. Будівельні конструкції об'єкта дослідження – транспортної галереї – збудовані на території АТ «ОПЗ» у м. Южне Одеської області. Металоконструкції галереї підтримують конструкції стрічкових конвеєрів (транспортів) та конструкції захисної обшивки. Транспортні розташовані всередині галереї та призначені для перевантаження навалом, або у мішках карбаміду. У статті виконано докладний технічний опис конструкції галереї, яка являє собою просторову стрижневу металоконструкцію, що складається з чотирьох плоских ферм (даху, стінок та днища), обшиті в рівні днища листом із ромбічним рифлен-

ням, з інших трьох боків – профнастилом, яка спирається на систему шарнірно рухомих та нерухомих опор. Наведено типові дефекти і пошкодження споруди, виявлені при обстеженні, а також підкреслено їх системний характер. На основі інструментальних досліджень визначено технічний стан, локалізацію дефектів та ступінь зносу основних будівельних конструкцій галереї. При обстеженні виявлено, що внаслідок руйнівної дії вологого морського повітря (разом зі зваженими у ньому мікрочастинками мінеральних добрив) окремі конструкції галереї зазнали значних втрат від корозії та знаходяться у аварійному чи непридатному до нормальної експлуатації стані. На основі виконаних обмірів та результатів обстеження розроблено деталізовані скінченно-елементні моделі напружено-деформованого стану галереї під дією комплексу статичних та динамічних кліматичних і технологічних впливів.



Науковий аналіз результатів моделювання засвідчив, що галерея, в цілому, та окремі найбільш зношені елементи не можуть сприймати проектних впливів на споруду з урахуванням нормативних коефіцієнтів надійності. Підкреслено, що через відсутність альтернативних способів перевантаження карбаміду галерея не може бути повністю виведена з експлуатації на час підсилення. Під час вирішення задачі були застосовані такі методи: візуальне обстеження, обміри конструкцій, визначення корозійного зносу конструкцій ультразвуковим способом, скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану із застосуванням інструментарію САПР – SCAD Soft, перевірочні розрахунки компонентів металокаркасу галереї.

На підставі результатів обстеження, моделювання та виконаних міцнісних розрахунків запропоновано раціональний спосіб підсилення металокаркасу галереї, який полягає у тимчасовому зменшенні навантажень на транспортну систему (до 50 % від проектного), розвантаженні основних дефектних з'єднань поясів, безпечному встановленні та включенні в роботу додаткових конструкцій підсилення без демонтажу існуючих, пошкоджених корозією. Зазначені результати, через їх високу конструктивну та технологічну універсальність, можна розповсюдити на більшість аналогічних великопрогнозових металевих технологічних споруд галерейного типу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Просторова металева галерея, корозійний знос, технічний стан, напружено-деформований стан, високоміцні болти, ферми, розкісна система, підсилення.

SIMULATION OF THE STRESS STRAIN STATE OF THE SPATIAL GALLERY OF THE CHEMICAL PRODUCTION WHICH HAS THE CORROSION DAMAGE FOR RATIONAL REINFORCEMENT

ABSTRACT

The article deals with the solution of an important scientific and practical problem of modeling the stress-strain state of building structures of an industrial metal gallery, which is part of the general technological line of production and overloading of mineral fertilizers. The building structures of the research object – the transport gallery – were built on the territory of JSC "OPP" in the Yuzhne town, Odesa region. Metal constructions of the gallery support the constructions of belt conveyors (transporters) and constructions of protective cladding. Conveyors are located inside the gallery and are designed for overloading in bulk or in urea bags.

The article contains a detailed technical description of the construction of the gallery, which is a spatial rod metal structure consisting of four flat frames (roof, walls and bottom) which rests on a system of hinged movable and fixed supports. The bottom

level sheathed by shell with rhombic corrugation, the cladding of the metal frame on the other three sides is decided in the form of a corrugated board. The article has given the typical defects and damage to the building, discovered during the inspection. Their systemic nature has been emphasized. The article determines the localization of defects and the degree of wear and tear of the main building structures of the galleries on the basis of instrumental studies, the technical condition. During the examination it has been found that, as a result of the destructive effect of moist sea air with microparticles of mineral fertilizers suspended in it, individual structures of the gallery have suffered significant losses from corrosion and are in a state of emergency or unsuitable for normal operation. Detailed finite-element models of the stress-strain state of the gallery under the action of a complex of static and dynamic climatic and technological influences were developed on the basis of the measurements and survey results.

The scientific analysis of the modeling results proved that the gallery, as a whole, and individual, most worn elements cannot perceive the design effects on the structure, taking into account the normative reliability coefficients. It has been emphasized that due to the lack of alternative methods of overloading of urea, the gallery cannot be completely decommissioned during the reinforcement period. When solving the problem, the following methods have been used: visual inspection, measurements of structures, determination of corrosion wear of structures by ultrasonic method, finite-element modeling of the stress-strain state using the CAD toolkit - SCAD Soft, verification calculations of the metal frame components of the gallery.

The rational method of strengthening the metal structures of the gallery has been offered, based on the results of the survey, modeling and strength designs, which consists in temporarily reducing the loads on the conveyor system (up to 50% of the design), unloading the main defective joints of the belts, safe installation and inclusion in the work of additional reinforcement structures without dismantling the existing ones damaged by corrosion. The specified results can be extended to most similar long-span metal technological gallery type structures due to their structural and technological versatility.

KEYWORDS: Spatial metal gallery, corrosion wear, technical condition, stress-strain state, high-strength bolts, frames, spanning system, reinforcement.

ВСТУП

Сучасну логістичну структуру будь-якого хімічного підприємства, орієнтовану на виробництво сипучих мінеральних добрив, важко уявити без ефективних автоматизованих механізмів перевантаження. Найбільш часто у сучасній світовій практиці для цих потреб застосовують-



ся стрічкові конвеєри (транспортери), які значно підвищують ефективність транспортування та зменшують трудомісткість навантажувально-розвантажувальних операцій. Такі конвеєри є проміжною ланкою при транспортуванні продукту від місця синтезу до ділянок постійного і тимчасового зберігання, або до транспортних машин – важковагозовів, потягів чи суден, для подальшого відвантаження замовнику [1 ÷ 4]. Особливо це стосується експортно орієнтованих підприємств, збудованих поблизу портів. Наша держава до початку воєнного стану була визнаним лідером з виробництва мінеральних та органічних добрив. На світових ринках особливо цінним є карбамід, який не засолює ґрунт і добре засвоюється рослинами. Саме для синтезу та відвантаження карбаміду у кінці ХХ століття поблизу м. Южне Одеської області було збудовано Одеський припортовий завод. Перевантажувальна та портова частина виробництва цього підприємства була укомплектована величезними високотехнологічними автоматизованими транспортними спорудами, в тому числі закордонного виробництва [2]. Оскільки мінеральні добрива є водорозчинними сполуками, при транспортуванні їх необхідно захистити накриттям. Тому, для підтримування механічних систем транспортерів та для захисту сипучих продуктів хімічного виробництва у проміжках між будівлями технологічного циклу прийнято створювати несучі транспортні лінійні системи – галереї. На АТ «ОПЗ» було побудовано низку таких галерей різної висоти, перерізу, величезної загальної протяжності, яка сягає близько десяти кілометрів.

У переважній більшості випадків галереї являють собою великопрогонові системи, тому будуються, в основному, з металу. Метал, як відомо, є надійним та міцним будівельним матеріалом за умови ефективного корозійного захисту. Однак, за відсутності належного догляду, антикорозійний захист металу втрачає свої захисні властивості і, як наслідок, металеві конструкції може вразити корозія. Оскільки споруди галерей часто зводять на великій висоті над поверхнею землі, їх металеві конструкції важкодоступні для огляду і догляду. Як наслідок, протягом тривалого терміну технічний стан галерей може не контролюватися, а лакофарбове покриття не поновлюватися. Як показує інженерний досвід, саме внаслідок цих обставин металеві транспортні галереї хімічних підприємств часто зазнають значних, іноді критичних, корозійних уражень, що призводить до зменшення їх жорсткості, збільшення шумності роботи обладнання, погіршення експлуатаційних характеристик та, у кінцевому випадку, – до аварійних ситуацій. Аналогічна ситуація спостерігається на транспортних галереях харчової промисловості, які здійснюють перевантаження зернових

продуктів [3, 4]. Тому дослідження, спрямовані на визначення технічного стану транспортних галерей, є доцільними та актуальними.

В цій науковій роботі на прикладі реальної будівельної споруди – транспортної галереї цеху перевантаження карбаміду Одеського припортового заводу в осях «15-18» [5] – розроблено методику деталізованого моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням дефектів і пошкоджень, набутих спорудою протягом тривалої експлуатації, для подальшої розробки раціональних проектних рішень з підсилення.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні в Україні науково-технічними спеціалістами у галузі металевих конструкцій ведеться активна робота з оптимізації конструктивних рішень та методів розрахунку великопрогонових плоских і просторових ферм для мостобудування та промисловості [1 ÷ 4]. Базуючись на методиці граничних станів та принципах раціонального проектування, а також активно залучаючи світовий інженерний досвід, поступово здійснюється удосконалення нормативної бази за вказаним напрямком. Вченими зазначається, що створення адекватної цифрової моделі споруди відкриває принципово нові можливості з уточнення напружено-деформованого стану конструкцій та максимально-можливої автоматизації і роботизації для потреб виготовлення та ремонту конструкцій [6].

Проектування нових ефективних та надійних металевих будівельних конструкцій взагалі та будівельних виробничих споруд, в тому числі і транспортних перехідних галерей, зокрема, а також обирання раціональних підходів при підсиленні існуючих споруд, яке здійснюється в рамках капітального ремонту чи реконструкції споруд, є вимогою сучасної нормативної бази [7 ÷ 10]. Зазначений підхід реалізується обґрунтованим зменшенням матеріаломісткості. Зрозуміло, що зниження металомісткості, з одного боку, має бути здійснене без зменшення надійності цієї конструкції. З іншого боку, зниження власної ваги металу будівельних конструкцій великопрогонових споруд, якими, безперечно, є і транспортні галереї, доцільне для зменшення загальної гравітаційного впливу на споруду.

Досягти економії металу на стадії розробки робочих креслень з капітального ремонту транспортних галерей, у порівнянні з класичними методами підсилення, цілком можливо. Однак, обґрунтувати нові економічні рішення підсилення реально тільки за умови моделювання напружено-деформованого стану зазначених споруд з використанням сучасних систем автоматизованого проектування та BIM-технологій [6, 11 ÷ 13].

При цьому рекомендується створювати деталізовані скінченно-елементні моделі,



які найбільш точно описують напружено-деформованих стан реальних будівельних конструкцій [6, 11÷13]. В Україні для моделювання споруд використовується різний програмний інструментарій. Сьогодні домінуючу роль займають стандартні програмні комплекси для розрахунку та проектування будівельних конструкцій, будівель та споруд – SCAD Soft, Liga-САПР, ANSYS, Cosmos Works та ін. [14]. Засобами зазначених програмних продуктів можна створити не тільки ідеалізовану модель існуючої споруди, а і відтворити реальні жорсткісні властивості конструкцій з урахуванням викривлень, деформацій та інших дефектів і пошкоджень, встановлених за результатами візуальних та інструментальних обстежень [13]. Зрозуміло, що при цьому ступінь деталізації моделі має бути достатньою, а методи моделювання містить відтворення реальних конструктивних профілів стрижневими, пластинчастими чи об'ємними скінченними елементами [13]. У численних наукових роботах вченими неодноразово зазначалося, що розвиток програмних комплексів з розрахунку металевих конструкцій дозволив підняти на новий рівень також розуміння роботи елементів та вузлів їх сполучення металевих конструкцій [6].

Зрозуміло, що адекватну модель напружено-деформованого стану існуючої споруди, особливо в умовах виробництва з різноманітними впливами від рухомих машин і механізмів, слід розглядати не тільки з огляду на точну відповідність її геометричних параметрів реальному об'єкту. Важливе значення має правильне моделювання навантажень і впливів згідно з нормативними вимогами [15] у комплексі з динамічними навантаженнями від зазначених технологічних агрегатів [2÷4, 6, 14, 16÷18]. При прогнозуванні поведінки споруд з металу, що існують, не слід забувати і про фактори агресивного впливу середовища, у якому ця споруда експлуатується. Особливо це стосується підприємств хімічного та харчового виробництва, портової інфраструктури. Дослідження вчених доводять, що нехтування зазначеними факторами часто призводить до значних пошкоджень металевих конструкцій, виникнення аварійних ситуацій та повних відмов [19].

ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВІЗУАЛЬНОГО ОБСТЕЖЕННЯ

У цій науковій роботі розглядається напружено-деформований стан металеві споруди, яка знаходиться на території хімічного підприємства, збудованого в умовах вологого морського клімату у м. Южне. Об'єктом, що обстежується та досліджується, є транспортна галерея в осях «15-18», яка є складовою частиною комплексу будівельних конструкцій, що підтримують багатокілометрову систему стрічкових транспортерів перевалочного пункту карбаміду. Конструктивно галерея являє

собою просторову металеву призматичну ферму, з усіх видимих боків обшиту зашивкою (верхня та бічні грані – профільованою, днище – листовою). Зашивка захищає металоконструкції самої галереї, конструкції транспортеру та сипучого карбаміду від атмосферних опадів (рис. 1, 2). Основний просвіт галереї має розміри 3,14 x 2,5 м в осях. Загальна довжина фрагмента галереї, що розглядається, – 20,55 м [3].

Споруда транспортної галереї складається з наступних конструктивних елементів:

- металевий каркасу у вигляді чотирьох плоских ферм (двох дзеркально симетричних ферм бічних стінок, ферми днища та ферми покриття), об'єднаних у просторову призматичну ферму;
- конструкції покриття даху у вигляді оцинкованого профільованого листа по металевих прогонах, приєднаних до поперечних балок;
- металеві рифлені листові зашивки днища різної товщини;
- конструкції стрічкових транспортерів, встановлених на металевих опорах, приєднаних до плоскої ферми днища металокаркасу;
- металеві обшивки бічних стінок у вигляді оцинкованого профільованого листа з віконними прорізами для природнього освітлення внутрішнього простору галереї.

Ферми галереї приєднані одна до одної в рівнях верхнього та нижнього поясів та опираються на несучі башти та проміжну опору. Стик поясів ферм галерей – жорсткий, приєднання галереї до опорних башт – шарнірно рухоме, приєднання галереї до проміжної опори – шарнірно нерухоме.

Настил днища галереї встановлений на рівні +15,7 м над рівнем асфальтобетонного вимощення.

Загальна просторова жорсткість галереї забезпечується геометрично незмінюваною розкісною та хрестово-ромбічною системою грат металевих ферм галереї, жорсткими геометрично незмінюваними діафрагмами (поперечними рамами), жорстким приєднанням поясів галереї до іншої галереї, шарнірним приєднанням конструкцій галереї до опор.

З метою визначення фактичних значень втрат перерізів основних будівельних металоконструкцій каркасу галереї від корозії за допомогою ультразвукового товщиноміра УТ-98 СКАТ.МХ-3 було проведено вибірковий контроль товщини металу основних несучих елементів днища [3]. Зведені результати досліджень втрат перерізу елементів неруйнівним методом наведено у табл. 1.

В результаті інструментального обстеження виявлений шаруватий та виразковий корозійний знос нижньої полицки повздовжніх головних балок ферми днища із втратами перерізу в межах 30 ÷ 56 % (рис. 3).

Виявлено масові критичні втрати від корозії



Рисунок 1 – Загальний вигляд галереї ззовні, зі східного боку



Рисунок 2 – Загальний вигляд галереї зсередини

нижньої полицки двотаврової балки настилу (місцями до 70 ÷ 90 %, рис. 4), значний ступінь корозійного зносу її стінок із втратами до 50 %; корозію елементів настилу із втратами перерізу до 26 %.

На одній з другорядних балок ферми днища виявлений значний корозійний знос нижньої полицки із втратами перерізу полицки до 35 %. Корозійний знос більшості елементів перерізу інших поперечних другорядних балок ферми днища складає 8 ÷ 20 %.

До найбільш небезпечних дефектів конструкції галереї належать дефекти стиків поясів просторової ферми по довжині, що виконані на високоміцних болтах.



Рисунок 3 – Стан фрагменту головної повздожньої балки днища. Виразкова корозія зовнішнього краю нижньої полицки двотавра

Таблиця 1 – Зведені результати товщинометрії конструкцій галереї

№	Елемент металоконструкції	Проектна товщина, мм	Фактично виміряно, мм	Висновок про корозійний знос
1.	Повздожні головні балки ферми днища (h x b)	IPE 120 (120 x 64)	IPE 120 (122,4 x 66)	до 5% до 28 % 30 ... 56%
	1.1. Верхня полицка	6,3	6,0 ... 6,2	
	1.2. Стінка	4,4	3,2 ... 4,2	
	1.3. Нижня полицка	6,3	2,8 ... 4,4	
2.	Монтажний стик повздожніх головних балок ферми днища (a x b)	(170 x 270)	(170 x 260)	10 ... 15% 13 ... 50%
	2.1. Накладки	8	6,8 ... 7,2	
	2.2. Нарощування полицок	6	3,0 ... 5,2	
3.	Поперечні другорядні балки ферми днища (h x b)	IPE 140 (140 x 73)	IPE 140 (144 x 75)	до 8% до 24% 18 ... 35%
	3.1. Верхня полицка	6,9	6,4 ... 6,6	
	3.2. Стінка	4,7	3,6 ... 4,5	
	3.3. Нижня полицка	6,9	4,5 ... 5,7	
4.	Балки настилу (h x b)	IPE 80 (80 x 46)	IPE 80 (83 x 42)	до 15% с до 50% 16 ... 90%
	4.1. Верхня полицка	5,2	4,4 ... 5,0	
	4.2. Стінка	3,8	1,92 ... 2,2	
	4.3. Нижня полицка	5,2	1 ... 4,4	
5.	Настил	Лист 4 мм	2,95 ... 4	до 26%



Через агресивний вплив зважених у повітрі краплинок морської води, атмосферних опадів та часток мінеральних добрив (які у стані розчину доволі агресивні щодо металу) всі стики поясів зазнали критичних втрат перерізу у вигляді шаруватої корозії елементів (рис. 5).

Зафіксовано корозійний знос конструкцій нарощування полицок монтажного стику повздожніх головних балок ферми днища із втратами перерізу в межах $13 \div 50 \%$; втрати перерізу інших елементів монтажного стику – $10 \div 15 \%$. Крім зазначених суттєвих корозійних пошкоджень при обстеженні виявлені менш значущі дефекти, які, однак, також впливають на загальний технічний стан споруди, а саме: на окремих розкосах бічних ферм – місцеві вигини полиць кутика стрілою до 10 мм; масово на розкосах, розпірках, фасонках та поясах бічних ферм – ділянки, вражені поверхневою корозією; масове пошкодження захисного покриття металоконструкцій.

МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ГАЛЕРЕЇ З УРАХУВАННЯМ КОРОЗІЙНОГО ЗНОСУ

Для оцінки несучої здатності металоконструкцій галереї в осях «15-18» під впливом проєктних навантажень з урахуванням сейсмічних впливів та нормативних коефіцієнтів надійності запропоновано методику, яка охоплює комплекс робіт з моделювання споруди методом скінчених елементів, а саме:

1. Розроблення ідеалізованої стрижнево-пластинчастої моделі споруди методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу «SCAD Office».
2. Уточнення перерізів елементів з урахуванням корозійного зносу. Заміна стрижневих елементів, які зазнали нерівномірних втрат від корозії, пластинчастими аналогами, які дозволяють більш точно описати фактичну геометрію перерізу.
3. Уточнення геометрії споруди шляхом врахування дефектів, викривлень та інших пошкоджень, набутих спорудою протягом тривалої експлуатації. Заміна стрижневих елементів, форма яких зазнала суттєвих змін, пластинчастими аналогами.
4. Збір основних (постійних і тимчасових) навантажень на металокаркас згідно з вимогами [15].
5. Моделювання динамічного впливу від стрічкових транспортерів (основне сполучення). Моделювання аварійних впливів з



Рисунок 4 – Типовий технічний стан балок настилу. Шарувата, місцями наскрізна корозія нижньої полицки, поверхнева корозія стінки та верхньої полицки



Рисунок 5 – Стан дефектного монтажного стику нижньої балки (поясу) просторової ферми. Шарувата корозія поширення нижньої полиці та нижніх і бічних накладок. Корозійне ураження метизів

урахуванням сейсмічних впливів згідно з вимогами [9].

6. Складання ймовірних комбінацій впливів.
7. Аналіз загальної та місцевої стійкості металоконструкції галереї з урахуванням зниження загальної жорсткості.
8. Аналіз внутрішніх зусиль, напружень та деформацій, визначення коефіцієнтів використання елементів каркасу галереї з урахуванням корозійного зносу.
9. Розробка раціональних пропозицій з підсилення, враховуючи реальні технологічні можливості підприємства та логістичні особливості.

Як було зазначено вище, вказані роботи з моделювання виконані засобами програмного комплексу «SCAD Office». Теоретичною основою використаної програми є метод скінчених елементів. Реалізований варіант методу скінчених елементів використовує принцип можливих переміщень.

Ідеалізована модель каркасу споруди



складається з чотирьох плоских ферм (двох дзеркально симетричних ферм бічних стінок, ферми днища та ферми покриття), змодельованих стрижнями. Металева обшивка бічних стінок, покриття даху та днища, загалом, не підвищують загальну жорсткість конструкції споруди через численні корозійні ураження в зоні кріплень до металокаркасу, тому прикладались до моделі у вигляді розподіленого навантаження (рис. 6).

Ідеалізована модель була уточнена заміною окремих стрижнів пластинчастими елементами, які більш точно моделюють поведінку зношених та пошкоджених металевих профілів. При моделюванні враховано фактичні втрати перерізу металлоконструкцій від корозії (які, в тому числі, призвели до зменшення загальної жорсткості споруди), встановлені за результатами товщинометрії (див. табл. 1).

Здійснено збір основних навантажень на металокаркас згідно з вимогами [15], а також змодельовано динамічний технологічний вплив від стрічкових транспортерів (основне сполучення). Навантаження від транспортерів моделювалося згідно з результатами динамічних вібраційних досліджень, проведених на стадії технічного обстеження споруди силами лабораторії АТ «ОПЗ». Проведений аналіз варіантів одночасної дії навантажень і визначено найбільш несприятливі їх сполучення. Виконано моделювання сейсмічних впливів та розглянуто аварійні сполучення навантажень.

Перевірка несучої здатності і стійкості конструкцій виконана відповідно до діючого нормативного документа [7]. Корисне навантаження

на просторову систему прийнято у відповідності до проектних впливів та технічного завдання. Матеріали основних елементів прийняті у відповідності до наданих замовником проектних рішень галереї.

Оскільки територія, де розташований об'єкт моделювання, знаходиться у сейсмонезбезпечній зоні, розглянуто особливі комбінації навантажень, що включають сейсмічні впливи на споруду згідно з методикою, наведеною у [9].

При розрахунку по 1-й групі граничних станів використовувались розрахункові навантаження, по 2-й групі граничних станів – експлуатаційні. При визначенні несучої здатності елементів металокаркасу у відповідності з чинними нормативними вимогами для класу наслідків СС-1 враховано коефіцієнт надійності $\gamma_n = 1,0$.

Аналіз результатів розрахунку комп'ютерної моделі показав, що у комбінаціях навантажень без вітрового впливу, включаючи вплив сейсміки, коефіцієнт запасу стійкості системи перевищує 3, що більше нормативного – 2,5, у комбінаціях навантажень при дії вітрового впливу коефіцієнт запасу стійкості системи $1,45 \div 2,95$, що менше нормативного – 2,5. Стійкість металокаркасу транспортної галереї, як просторової системи в цілому, при дії вітрового навантаження внаслідок значних втрат перерізу повздовжніх балок та послаблення монтажних стиків повздовжніх поясів не забезпечена.

Розрахунок внутрішніх зусиль та міцності елементів металокаркасу при різних комбінаціях навантажень з урахуванням корозійного зносу елементів, встановлених при інструментальних дослідженнях, засвідчив, що міцність і стійкість балок настилу, а також конструкцій вузлів сполучення нижніх поясів просторової ферми через значні корозійні втрати не забезпечена. Міцність інших основних несучих елементів транспортної галереї, які зазнали суттєво менших втрат, забезпечена.

Максимальні горизонтальні переміщення вузлів моделі металокаркасу транспортної галереї від дії основної комбінації навантажень (експлуатаційні значення) вздовж розрахункової осі X (зміщення шарнірно-рухомої опори) на позначці 15.1 м складають близько 18 мм, максимальні горизонтальні переміщення вузлів моделі металокаркасу від дії основної комбінації навантажень вздовж розрахункової осі Y складають близько 37 мм, що менше ніж 1/250 висоти, максимальні вертикальні прогини вузлів моделі від дії основної комбінації навантажень вздовж розрахункової осі Z не перевищують 24 мм (рис. 7), що менше ніж 1/350 прольоту у відповідності з [8].

Отже, загальна жорсткість металокар-

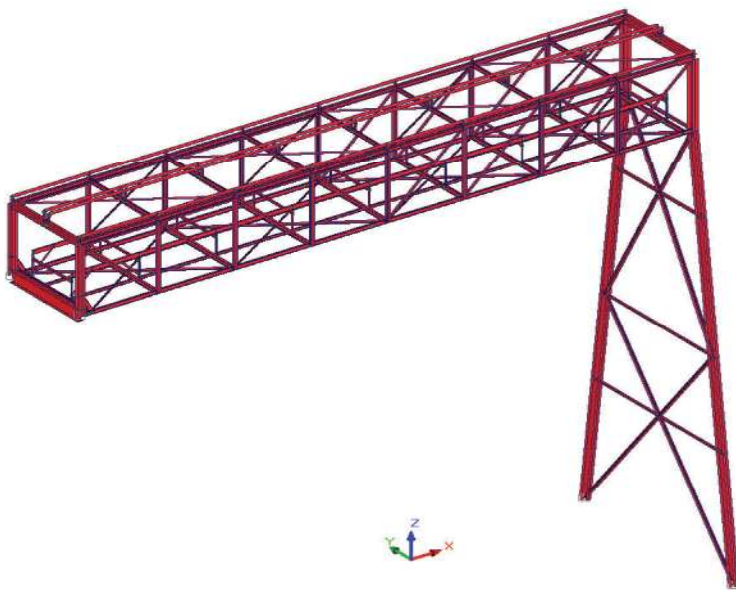


Рисунок 6 – Фрагмент ідеалізованої тривимірної моделі металокаркасу Галереї в осях «15-18» (модель суміжної ділянки в осях «12-15» умовно не показана)



касу галереї від дії основного сполучення навантажень забезпечена.

РЕКОМЕНДАЦІЇ З РАЦІОНАЛЬНОГО ПІДСИЛЕННЯ СПОРУДИ

Визначені розрахунком перевантажені елементи металокаркасу доцільно замінити на профілі аналогічної або більшої жорсткості, або підсилити нарощуванням перерізу в рамках виконання робіт з капітального ремонту. Перед цим слід розвантажити конструкцію, наприклад, встановленням тимчасових підпірок. Цей класичний метод розвантаження споруди рекомендується чинними ремонтними методиками. Однак, суттєвою проблемою підприємства при плануванні робіт з капітального ремонту є відсутність альтернативних економічно вигідних шляхів перевантаження карбаміду. Отже, повна зупинка роботи дефектної транспортної галереї повністю протягом значного проміжку часу призведе до великих фінансових втрат. Крім того, проїзд під галереєю має важливе логістичне та технологічне значення для забезпечення безперешкодного доступу до сусідніх будівель.

Тому виникає потреба у відновленні проектних параметрів транспортної галереї та підвищенні її загальної жорсткості без повного виведення споруди з експлуатації та, водночас, з виконанням часткового розвантаження. Крім того, замовником проектно-відновлювальних робіт була поставлена задача зі збереження загальної розбірності конструкції галереї.

Також, доцільно здійснювати ремонтні роботи без улаштування високих страховальних підпірок, які перекривали б проїзд під галереєю. Це стимулювало проектувальника до пошуку нових нестандартних конструктивних та технологічних рішень з підсилення.

Проведені дослідження дозволили розробити рекомендації з відновлення пошкоджених конструкцій транспортної галереї без тривалого виведення її з експлуатації. Для збільшення загальної жорсткості та міцності галереї пошкоджені двотаврові пояси підсилюються сталевими смугами, які приварюються фланговими швами до нижньої полицки поясів із відводом надлишкового тепла. Найбільш проблемними з технологічної точки зору є роботи з підсилення дефектних монтажних стиків нижніх поясів на високоміцних болтах через критичне корозійне ушкодження більшості

компонентів цього вузла. Для рішення цього проблемного питання запроєктовано тимчасові рами Р-1 посилення із фланцевими кріпленнями (рис. 8). Фланці рам Р-1 приварюють до нижніх полиць двотаврових поясів у проміжках між смугами підсилення поясів фланговими швами (рис. 9) із відводом надлишкового тепла.

Такий спосіб приєднання не призводить до

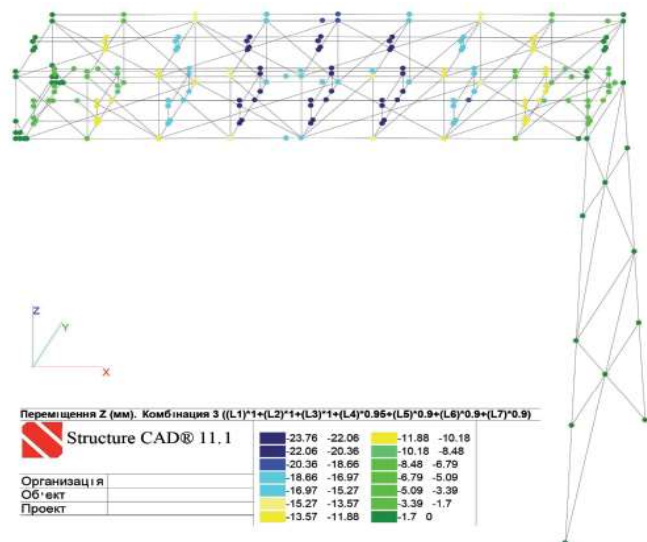


Рисунок 7 – Переміщення вузлів металокаркасу Галереї вздовж осі Z від дії основного сполучення навантажень

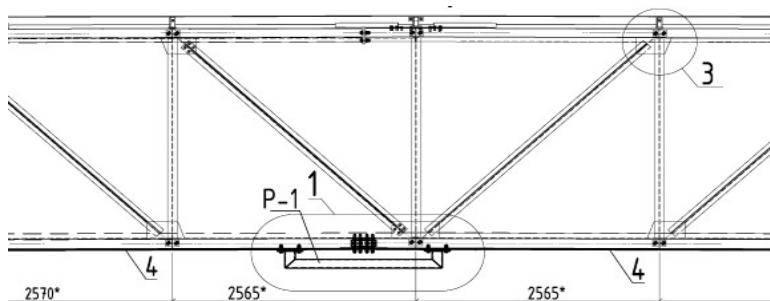


Рисунок 8 – Принципове конструктивне рішення тимчасового підсилення стикового вузлу нижніх поясів по довжині розвантажувальними рамами (фрагмент креслення)

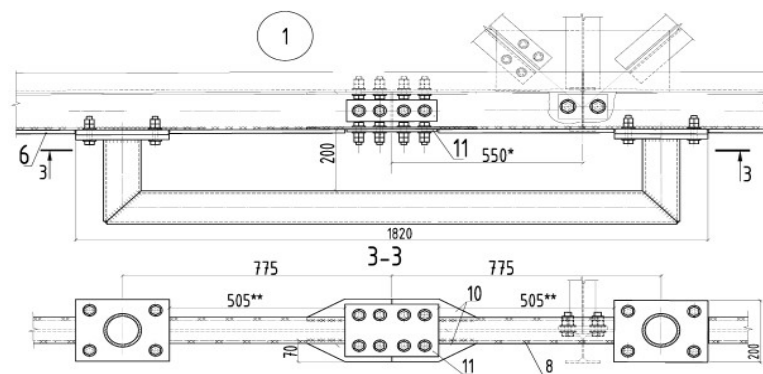


Рисунок 9 – Конструктивне рішення розвантажувальної рами Р-1 у монтажному положенні (фрагмент креслення)



суттєвого збільшення внутрішніх напружень в метали поясів. Зазначені рами повністю перебирають на себе зусилля в стику поясів від постійних навантажень. Це дозволяє безпечно виконати роботи з заміни і підсилення компонентів поясів і стикових вузлів з дотриманням зазначених вище технологічних обмежень.

Вказані роботи слід виконувати при непрацюючому стрічковому транспортері. У момент, коли потрібно перевантажувати добрива, ремонтні роботи призупиняють та здійснюють відвантаження із обмеженням вантажопідйомності транспортера до 50 %.

ВИСНОВКИ

При виконанні цієї науково-практичної роботи була розроблена методика моделювання напружено-деформованого стану просторових ферм транспортних лінійних виробничих систем на прикладі фрагмента галереї перевантаження мінеральних добрив в осях «15-18» цеху перевантаження карбаміду АТ «ОПЗ», м. Южне Одеської області з урахуванням особливості динамічних навантажень на галерею з боку стрічкового транспортеру, кліматичних та сейсмічних впливів, зносу та викривлень конструктивних елементів, недосконалості геометрії самої галереї, яка була набута протягом тривалої експлуатації.

В результаті реалізації запропонованої методики шляхом деталізованого скінченно-елементного моделювання фрагмента зазначеної споруди, що зазнала корозійних пошкоджень внаслідок агресивного впливу вологого морського повітря та хімічних речовин (мінеральних добрив) з урахуванням основних і особливих (аварійних) сполучень навантажень, було локалізовано найбільш напружені ділянки споруди, виконано перевірку несучої здатності за методикою граничних станів та уточнено їх технічний стан. На основі виконаного наукового аналізу можна зробити такі висновки:

1. Загальна стійкість металокаркасу галереї, як просторової системи в цілому, внаслідок значних втрат перерізу повздовжніх головних балок ферми днища не забезпечена.
2. Міцність і стійкість балок настилу та стикових вузлів нижніх поясів через значні корозійні втрати не забезпечена.
3. З огляду на незадовільний технічний стан галереї слід тимчасово обмежити вантажопідйомність стрічкового транспортера. Розрахунками встановлено, що безпечний ступінь завантаженості транспортера складає 50 % від проектного. Таких обмежень слід дотримуватись аж до виконання усього комплексу ремонтно-відновлювальних робіт, перелічених у п. 4 висновків.

4. Для подальшої безпечної експлуатації споруди необхідно виконати комплекс першочергових ремонтно-відновлювальних робіт, а саме:

- терміново підсилити пояси нижньої ферми днища та непридатний до експлуатації монтажний стик повздовжніх головних балок ферми днища. Підсилення рекомендується виконувати з улаштуванням тимчасових розвантажувальних рам Р-1 та шляхом заміни всіх дефектних компонентів вузла кріплення, включаючи високоміцні болти (рис. 8, 9);
- терміново підсилити нижні полицки непридатних до експлуатації повздовжніх головних балок (поясів) ферми днища шляхом наварювання смуг металу фланговими швами;
- терміново підсилити аварійні балки настилу ферми днища. Підсилення рекомендується виконувати шляхом встановлення додаткових балок настилу більшого перерізу (наявні – ІРЕ 80, встановлені – ІРЕ 100), після чого замінити самі балки настилу профілями більшого перерізу, наприклад, ІРЕ 100. Збільшення перерізу забезпечить вищу корозійну стійкість та жорсткість конструкції днища;
- підсилити нижню полицку дефектної другорядної поперечної балки днища нарощуванням перерізу;
- очистити від зруйнованого оздоблення, продуктів корозії всі головні повздовжні та поперечні другорядні балки днища;
- замінити всі метизи монтажних болтових з'єднань повздовжніх головних балок ферми днища, уражені корозією, на високоміцні болти класу 10.9 з захисним цинковим покриттям та захистом від саморозкручування;
- замінити всі метизи болтових з'єднань другорядних поперечних та повздовжніх головних балок ферми днища, а також бічних ферм, що уражені корозією, на болти класу міцності не нижче 8.8 з захисним цинковим покриттям та захистом від саморозкручування;
- замінити всі метизи болтових з'єднань балок настилу до другорядних поперечних балок ферми днища на болти класу міцності не нижче 8.8 з захисним цинковим покриттям та захистом від саморозкручування;
- очистити конструкції днища та металоконструкції ферм від пилу карбаміду та інших мінеральних добрив, які при розчиненні у дощовій воді агресивні до металу та негативно впливають на стан



металоконструкцій;

- очистити металоконструкції галереї від зруйнованого оздоблення та продуктів корозії;
 - влаштувати додатковий антикорозійний захист металоконструкцій ферми днища за технологією холодного цинкування, а також улаштувати фінішне захисне епоксидне покриття;
 - відновити надійне кріплення зашивки бічних стінок та покриття днища до металоконструкцій каркасу галереї.
6. При подальшій експлуатації споруди не допускати засмічення внутрішнього простору та металоконструкцій галереї карбамідом чи іншими сипкими мінеральними добривами. Регулярно (не рідше 2 разів на рік) здійснювати очищення днища та металоконструкцій транспортної галереї сухим способом (продувкою струменем стисненого повітря).
7. Несучу здатність конструкцій галереї при плановій зупинці після виконання ремонтно-відновлювальних робіт перевірити статичними випробуваннями.

Зазначені у статті принципові проектні рішення з підсилення, запропоновані авторами, були конкретизовані при розробці проекту капітального ремонту галереї. Проект у повному обсязі був реалізований на практиці.

Розроблену методику моделювання через її високу конструктивну та технологічну універсальність можна розповсюдити на більшість аналогічних великопрогонових металевих технологічних споруд галерейного типу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Мікульонюк І. О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв: підруч. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. 233 с.
2. Попов В.О., Курдибаха В.М. Інженерний досвід візуального та інструментального обстеження суднонавантажувачів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 12 – 18.
3. Купченко Ю.В., Сінгаївський П.В., Константінов П.В. Особливості проектування конвеєрної галереї зернового перевантажувального комплексу. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2019. № 23. С. 51 – 58.
4. Кущенко В.М., Губарев М.В. Аналіз впливу динамічного характеру технологічного навантаження на напружено-деформований стан прольотної будови ґратчастої конвеєрної галереї. Науковий журнал

«Металеві конструкції». 2013. №19 (4). С. 225–234.

5. Звіт №О.15-06-16 «Обстеження технічного стану металоконструкцій галереї в осях «15-18» перевалочного пункту для карбаміду АТ «ОПЗ». Звіт за результатами обстеження. ТОВ «Гервін Проект», 2016. 74 с.
6. Білик С.І., Білик А.С. Головні напрямки сучасного розвитку металевих конструкцій будівель і споруд. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2021. № 25. С. 5 – 12.
7. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 202 с.
8. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Введ. з 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. Київ: Мінбуд України, 2006. 10 с.
9. ДБН В.1.1.12:2014. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. Введ. з 1.10.2014 р. на заміну ДБН В.1.1.12:2006. Київ: Мінрегіон України, 2014. 110 с.
10. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд. Київ: Держкомітет України з будівництва і архітектури, 2003. 82 с.
11. Gorodetsky A. S, Pikul A.V. Pysarevskiy V. Y. Modelling of soil behavior in dynamic load. International Journal for computational Civil and Structural Engineering. 2017. № 13(3). С. 34-41.
12. Bilyk S.I., Bilyk A.S., Nilova T.O., Shpynda V.Z., Tsyupyn E.I. Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height. Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. 2018. № 100. P. 140-154.
13. Барабаш М.С., Козлов С.В., Медведенко Д.В. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій: Навчальний посібник. Київ: НАУ, 2012. 572 с.
14. Моргун А.С., Андрухов В.М., Сорока М.М., Меть І.М. Системи автоматизованого проектування у будівництві. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2015. 129 с.
15. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України, 2007. 71 с.
16. Марочка В. В., Верьовка А.П. Особливості просторової роботи металевих ферм від вітрового навантаження. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту



імені академіка В. Лазаряна. 2007. № 17. С. 204-208. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2007_17_46

17. Perelmuter A.V. Strength analysis in regulatory design documents and computational software. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. 2020. № 104. P. 89-102. URL: http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-104/02-104_perelmuter_new.pdf
18. Lan T. *Space Frame Structures*. Chinese Academy of Building Research. China: CRC Press, 2005. 50 p.
19. Гібаленко А.Н. Моніторинг остаточного ресурсу металоконструкцій в корозійних середовищах. *Галузеве машинобудування: Зб. наук. пр. Полтава: ПолтНТУ*, 2015. № 3 (45). С. 110– 116.

REFERENCES

1. Mikulonok I. O. (2022). *Production of chemical production equipment*. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky.
2. Popov, V. O., & Kurdybakha, V. M. (2018). Engineering experience of visual and instrumental inspection of ship loaders. *Modern Technologies, Materials and Constructions in Construction: Scientific and Technical Collection*, 2018(2), 12-18.
3. Kupchenko, Y. V., Singaivskiyi, P. M., & Konstantinov, P. V. (2019). Peculiarities of the design of the conveyor gallery of the grain transshipment complex. *Modern Constructions of Metal and Wood*, (23), 51-58.
4. Kushchenko, V. M., & Gubarev, M. V. (2013). Analysis of the influence of the dynamic nature of the technological load on the stress-strain state of the span structure of the lattice conveyor gallery. *Metal Constructions*, 19 (4), 225-234.
5. Gervin Project LLC. (2016). Report No. O.15-06-16: Inspection of the technical condition of the metal structures of the gallery in the axes "15-18" of the transfer point for urea JSC "OPZ". Report on the results of the survey.
6. Bilyk, S. I., & Bilyk, A. S. (2021). The main directions of modern development of metal structures of buildings and structures. *Modern Constructions of Metal and Wood*, (25), 5-12.
7. DBN V.2.6-163:2010. (2011). *The constructions of buildings and structures. Steel constructions. Design standards*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
8. DSTU B V.1.2-3:2006. (2007). *Deflections and movements. Design requirements*. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine, 2006. – 10 p.
9. DBN V.1.1.12:2014. (2014). *Protection from dangerous geological processes, harmful*

operational influences, from fire. *Construction in seismic areas of Ukraine*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.

10. DBN B.3.1-1-2002. (2003). *Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of industrial buildings and structures*. Kyiv: State Committee of Ukraine on Construction and Architecture.
11. Gorodetsky, A. S., Pikul, A. V., & Pysarevskiy, B. Y. (2017). Modelling of soil behavior in dynamic load. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 13(3), 34-41.
12. Bilyk, S. I., Bilyk, A. S., Nilova, T. O., Shpynda, V. Z., & Tsyupyn, E. I. (2018). Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-Technical Collected Articles*, (100), 140-154.
13. Barabash, M. S., Kozlov, S. V., & Medvedenko, D. V. (2012). *Computer technologies for designing metal structures: Training manual*. Kyiv: NAU.
14. Morgun, A. S., Andrukhov, V. M., Soroka, M. M., & Aim, I. M. (2015). *Automated design systems in construction: Education manual*. Vinnytsia: VNTU.
15. DBN V.1.2-2:2006. (2006). *Loads and influences. Design standards*. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine.
16. Marochka, V. V., & Veryevka, A. P. (2007). Peculiarities of the spatial operation of metal trusses from wind load. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, (17), 204-208.
17. Perelmuter, A. V. (2020). Strength analysis in regulatory design documents and computational software. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, (104), 89-102. Retrieved from http://opir.knuba.edu.ua/files/zbirnyk-104/02-104_perelmuter_new.pdf
18. Lan, T. (2005). *Space Frame Structures*. Chinese Academy of Building Research. China: CRC Press.
19. Hybalenko, A. N. (2015). Monitoring of the final resource of metal structures in corrosive environments. *Collection of Science Proceedings. Series: Industrial Engineering, Construction*, 3 (45), 110–116.

Стаття надійшла до редакції 1.05.2024