

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)**

---

УДК 621.873.3

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ АВАРІЙ БАШТОВИХ КРАНІВ ТА ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ЇХ ПОПЕРЕДЖЕННЯ**

Канд. техн. наук В. О. Стефанов, асп. І. В. Дзержинський

**SYSTEM ANALYSIS OF TOWER CRANE ACCIDENTS AND INNOVATIVE METHODS OF THEIR PREVENTION**

PhD (Tech.) V. Stefanov, postgraduate student I. Dzerzhynskiy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327113>



***Анотація.** У статті здійснено комплексне дослідження причин виникнення аварій баштових кранів, які є критично важливими елементами будівельної інфраструктури, особливо під час зведення висотних споруд. Проаналізовано технічні, фізичні та експлуатаційні аспекти, що впливають на стійкість кранів, включаючи фактори навантаження, специфіку конструкції та вплив людського фактора. Зазначено, що аварійність, пов'язана з перекиданням або структурними руйнуваннями, становить до 40 % загальної кількості інцидентів із вантажопідійомними кранами, що загрожує безпеці не лише робочого персоналу, але й навколишньої інфраструктури.*

*Стаття акцентує увагу на значенні прогнозування та систематичного управління ризиками. Особливий акцент зроблено на застосуванні передових технологій, зокрема систем штучного інтелекту і нейронних мереж, для розвитку автоматизованих систем контролю та забезпечення стійкості кранів під час змінних навантажень і обмеженого простору сучасних будівельних майданчиків. Результати дослідження мають прикладне значення для зменшення аварійності в будівництві та підвищення надійності експлуатації баштових кранів у складних умовах, що обумовлює актуальність теми для розвитку інженерних технологій і забезпечення безпеки праці на глобальному рівні.*

***Ключові слова:** баштовий кран, аварії, стійкість, зовнішні навантаження, система управління безпеки, прогнозування, штучний інтелект, нейронна мережа.*

***Abstract.** This article presents a comprehensive investigation into the causes of tower crane accidents, a critical concern considering their vital role in modern high-rise construction and the associated high risks. The analysis encompasses technical, organizational, and environmental factors that compromise crane stability. These include inherent design vulnerabilities (a high center of gravity coupled with a limited support base), dynamic external loads such as wind and seismic events, and the pervasive influence of human error across all stages of a crane's operational life.*

*The study reveals that accidents involving tower crane overturning or structural collapse, often precipitated by hard-to-detect fatigue cracks, represent up to 40% of all lifting crane incidents. Such failures pose substantial threats not only to on-site personnel but also to adjacent structures and the general public. The growing density of urban construction, coupled with challenges like fluctuating operational conditions and inadequate operator training, amplifies these inherent risks. A global increase in tower crane utilization is unfortunately accompanied by a corresponding rise in accident*

*frequency, highlighting deficiencies in current safety protocols, even on technologically advanced "smart" building sites.*

*The research underscores the imperative for proactive, holistic risk management and enhanced safety systems. It places particular emphasis on harnessing cutting-edge technologies, most notably artificial intelligence and neural networks, to create automated monitoring and control mechanisms. These systems are designed to bolster crane stability under unpredictable and dynamic loading, and facilitate the early detection of structural weaknesses. The proposed approach uses sensors and machine learning algorithms for real-time data analysis and predictive control, representing a significant advancement over conventional, often reactive, safety methodologies. The findings offer practical benefits for minimizing construction accidents, improving the operational reliability of tower cranes in demanding environments, and promoting higher global standards of construction safety.*

**Keywords:** *tower crane, accidents, stability, external loads, safety management system, forecasting, artificial intelligence, neural network.*

#### **Актуальність теми дослідження.**

Сучасне будівництво неможливе без використання різноманітного технологічного обладнання, зокрема вантажопідіймальних пристроїв. Баштові крани, які є основним елементом для зведення висотних споруд, забезпечують можливість переміщення важких вантажів на значні висоти і є невід'ємною складовою будівельних процесів. Однак експлуатація їх характеризується підвищеною аварійністю, що часто має трагічні наслідки. Це зумовлено специфікою конструкції баштових кранів – значна висота за обмеженої опорної бази спричиняє високий ризик нестійкості.

На тлі зростаючих вимог до будівельної техніки через збільшення щільності забудови та розширення спектру вантажів, які необхідно транспортувати, ефективність і безпечність баштових кранів стають дедалі актуальнішими. Часто будівельні майданчики межують з іншими спорудами чи лініями електропередач, що унеможливує перевищення встановлених меж руху вантажів. Зміни в умовах експлуатації, зовнішніх навантаженнях, стані опорної частини, а також низька кваліфікація навченого персоналу й керівників створюють додаткові загрози для стабільної роботи кранів.

**Вступ.** Підходи для будівництва висотних об'єктів значно відрізняються в

різних країнах світу. Наприклад, у США раніше будівництво здебільшого здійснювалося за допомогою мобільних кранів або робочих платформ, і лише на початку XXI століття почалося активне впровадження баштових кранів [1]. У більшості країн Європи та Азії використання баштових кранів під час зведення висотних будівель є традиційним і щороку зростає. Так, у Південній Кореї кількість баштових кранів зросла з 3408 у 2015 році до 4385 у 2020 році, тобто на 22 % [2]. Починаючи з 2016 року спостерігається щорічне зростання попиту на баштові крани і в Китаї, де до кінця 2020 року їхня кількість досягла близько 410 000 одиниць [3]. Сьогодні у світі експлуатують понад мільйон кранів різної конструкції та вантажопідйомності, зокрема в Україні їх близько 5 тисяч [4]. У перспективі, незважаючи на появу різних технологій будівництва, баштові крани залишаться основними вантажопідіймальними механізмами, а їхня кількість продовжуватиме зростати.

В останні роки спостерігається зростання аварійності баштових кранів на будівельних майданчиках (рис. 1), причому вони становлять до 40 % загальної кількості аварій стрілових вантажопідіймальних кранів [5]. Основна частка аварій спричинена втратою стійкості крана та його перекиданням, часто з попереднім

руйнуванням металоконструктивних елементів.

Ці інциденти завдають шкоди не лише будівельній інфраструктурі та здоров'ю

персоналу, що перебуває на майданчику, а й становлять небезпеку для інших споруд і людей поблизу, оскільки радіус падіння крана може бути досить значним.



Рис. 1. Аварії баштових кранів із руйнуванням: стріли (м. Львів, 24.10.2024) і башти (м. Рівне, 16.03.2016)

Аналіз аварій кранових систем, поданий у роботі [6], вказує на те, що руйнування конструкцій зазвичай ініціюється в найбільш навантажених вузлах несучих металоконструкцій. У таких вузлах, часто недоступних для візуального огляду, під час експлуатації виникають і розвиваються тріщини.

На ранніх стадіях розвитку тріщини розподіл напружень у вузлі та розкосах може незначно відрізнитися від розрахункового, оскільки зміна площі поперечного перерізу в зоні тріщини є незначною. Проте зі збільшенням довжини тріщини та кількості її гілок ефективна площа поперечного перерізу зменшується, що призводить до локального зростання напружень у металі. Ураховуючи загальну рівновагу фермової конструкції, після повного руйнування матеріалу в зоні тріщини на решту елементів конструкції діють додаткові навантаження, раніше сприймані зруйнованим елементом.

Ці тріщини (рис. 2) можуть розвиватися як повільно внаслідок втоми

матеріалу, так і катастрофічно швидко. Останній сценарій є найбільшою небезпекою, оскільки відбувається без помітних деформацій або видимих тріщин, що ускладнює їх діагностику.



Рис. 2. Розвиток втоми тріщини в отворі для кріплення з'єднувального елемента стріли

Основними етапами аналізу аварійності баштових кранів є збір і аналіз даних про аварії та їх систематизація.

Статистичні дані свідчать про стійку тенденцію до зростання кількості аварій баштових кранів як в Україні, так і світі. Наприклад, в Іспанії за період з 2012 по 2021 рік унаслідок аварій баштових кранів загинуло 62 працівники [7], а в Південній Кореї з 2015 по 2020 рік відбулося понад 40 аварій із тенденцією до зростання. У Китаї за період з 2016 по 2018 рік щорічно реєстрували понад 100 аварій [8], а вже у 2020 році, за даними Міністерства житлового будівництва та розвитку міських і сільських районів КНР [9], відбулося близько 125 аварій. Ці дані є особливо показовими на тлі зростання кількості інтелектуальних будівельних майданчиків у Китаї, оснащених системами візуалізації та іншими сучасними технологіями, що мали б сприяти зниженню аварійності.

Проте впровадження інтелектуальних систем управління не завжди призводить до бажаного результату. Надмірне навантаження на оператора крана, пов'язане з управлінням складним інтерфейсом, може призвести до зростання кількості помилок, таких як плутанина в режимах роботи і втрата ситуаційної обізнаності.

Отже, зростання кількості аварій баштових кранів обумовлене не лише збільшенням їхньої кількості, але й недостатньою увагою до проблем безпечної експлуатації. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно розширити концепцію «людина-машина-середовище», включивши до неї технічні та фізичні аспекти робочого середовища оператора.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведено аналіз наукових публікацій за період із 2018 по 2023 роки, присвячених дослідженню причин аварій баштових кранів і розробленню методів запобігання цьому.

Аналіз вітчизняних досліджень свідчить про те, що основну увагу приділено аналізу конкретних аварій і впливу окремих

факторів, таких як раптові пориви вітру чи коливання вантажу [10-12]. Тобто дослідження зосереджені на безпосередніх причинах аварій, не завжди враховуючи складну взаємодію різних факторів, що призводить до катастрофічних наслідків.

Для комплексного розуміння причин аварій необхідно виходити за межі аналізу окремих випадків і виявляти системні фактори, що сприяють виникненню аварійних ситуацій. Це дасть змогу простежити розвиток подій від першопричин до безпосередніх причин аварії та оцінити взаємодію системи «людина-машина-середовище».

Зарубіжні дослідження в галузі безпеки експлуатації баштових кранів охоплюють три основні напрями:

- аналіз причин аварій [13, 14];
- розроблення систем моніторингу та обладнання для виявлення небезпечних ситуацій у режимі реального часу [15, 16];
- оцінювання факторів безпеки з урахуванням структурно-механічних характеристик кранів [17-19].

На підставі проведених досліджень фахівці пропонують різні методи запобігання безпосереднім причинам аварій баштових кранів, таких як помилки оператора, руйнування конструкційних елементів і несприятливі умови експлуатації. Проте сучасна практика оцінювання ризиків має певні недоліки. Зокрема, недостатньо уваги приділено комплексному оцінюванню ризиків протягом усього життєвого циклу крана. Крім того, виявлено, що сучасні методи оцінювання ризиків часто базовані на неповних даних, обмеженому наборі параметрів і відсутності спеціалізованого програмного забезпечення.

Недосконалість систем управління безпекою є систематичною проблемою, яка призводить до багатьох аварій. Для підвищення рівня безпеки необхідно розробити комплексний підхід, який урахуватиме всі фактори, що впливають на надійність і безпеку кранів. Вивчаючи умови експлуатації та особливості

управління кранами, можна отримати цінну інформацію для вдосконалення конструкцій і систем управління нових машин.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою статті є проведення комплексного дослідження причин аварій, що трапляються під час експлуатації баштових кранів як в Україні, так і за кордоном. На основі отриманих результатів заплановано розробити пропозиції з підвищення рівня безпеки за використання цього виду підйомно-транспортного обладнання. Особливу увагу буде приділено аналізу можливостей використання цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту, для забезпечення стійкості баштових кранів за умов непередбачуваних зовнішніх впливів і діагностики стану їхніх несучих конструкцій.

**Основна частина дослідження.** В основі більшості аварій лежать людські помилки, тобто людський фактор. Помилку можна припуститися на всіх етапах життєвого циклу баштового крана (рис. 3). Основними причинами аварій баштових кранів є технічні фактори, які становлять понад 60 % усіх випадків. Значна частина аварій, понад 30 %, виникає через організаційні причини, зокрема порушення технологічної і трудової дисципліни протягом усього життєвого циклу крана. Щорічно у світі понад 10 % аварій баштових кранів відбувається внаслідок дії сукупності несприятливих зовнішніх факторів, серед яких переважають екстремальні умови: вітрові навантаження, вибухи, землетруси тощо. Часто ці причини взаємопов'язані.

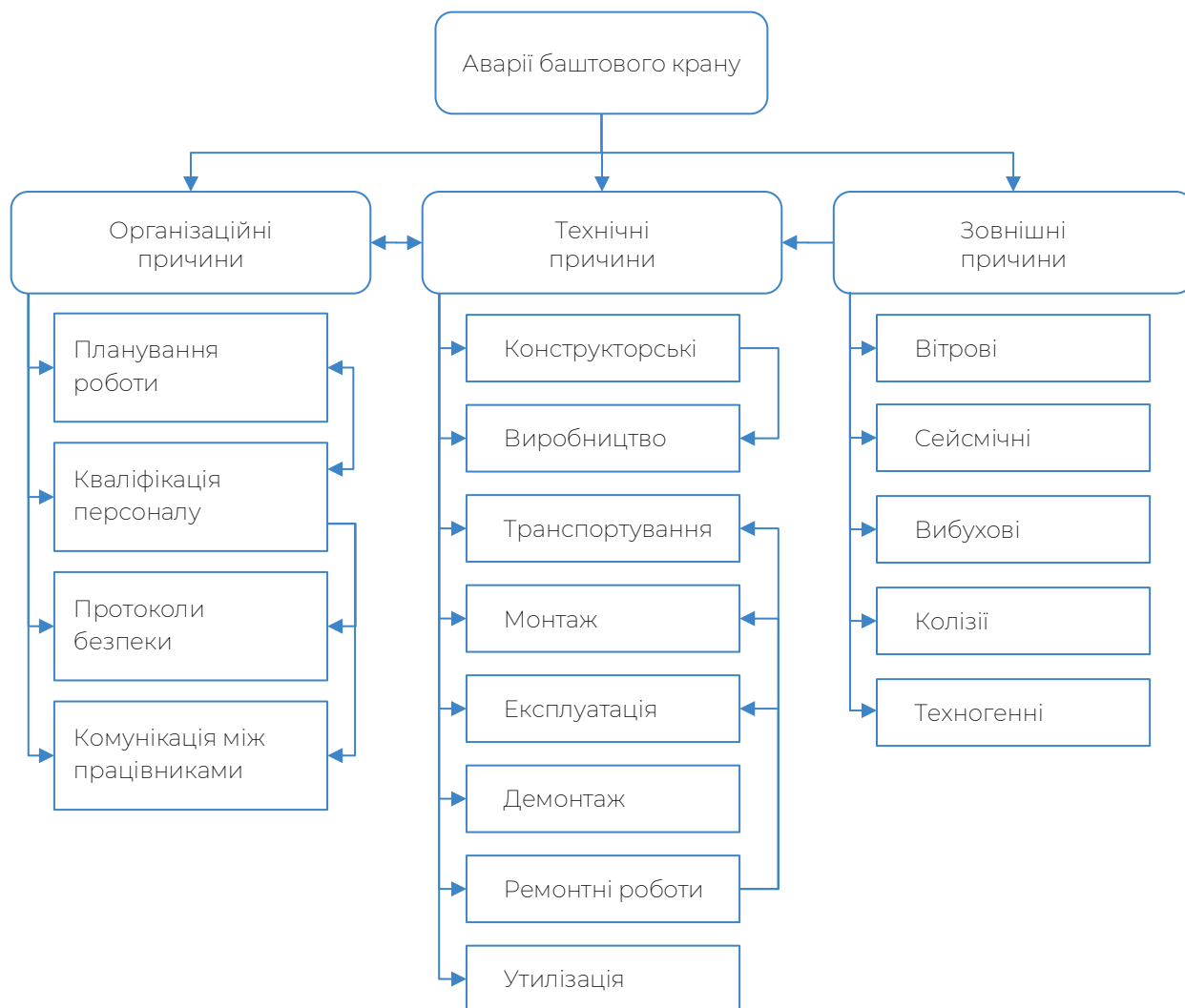


Рис. 3. Причини аварій баштових кранів

Незважаючи на значний практичний досвід конструювання кранів і досягнення в галузі їх розрахунків, з проектуванням залишається багато невирішених питань. Сучасні методи будівельної механіки та використання електронно-обчислювальних машин дають змогу створювати складні розрахункові моделі та розв'язувати задачі в динамічній постановці, що принципово точно дає змогу визначити зусилля в елементах баштових кранів і їх переміщення під дією заданих зовнішніх сил. Проте оцінювання виконання умов міцності, стійкості, довговічності та інших критеріїв здійснюється досить наближено, оскільки не враховує податливість металоконструкцій і наявність додаткових пікових навантажень. Конструктори та розробники нормативів визначають розрахункові комбінації навантажень і коефіцієнти, порівнюючи діючі зусилля і опори переважно на основі досвіду. Роль наукового аналізу переважно обмежена узагальненням досвіду проектування та експлуатації кранів. Наприклад, ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» [20] не може повністю замінити ГОСТ 1451-77 [21], оскільки не містить рекомендацій щодо розрахунку вітрового навантаження на кран у робочому стані та вітрового навантаження, що діє на вантаж [22], а РД 22-166-86 (введений замість ГОСТ 13994-81) [23] не дає рекомендацій щодо розрахунку стійкості в різних експлуатаційних станах: поворот башти крана, зміна вильоту або поєднання цих робочих операцій.

За вимогами цього нормативного документа, стійкість крана перевіряють за найнебезпечніших умов його роботи. Навантажувальну стійкість крана перевіряють як для максимального, так і мінімального вильоту:

$$M_{ум} = G_o b k, \quad (1)$$

$$M_o = Q^H b Q + M^H_{wp}, \quad (2)$$

де  $M_{ум}$  – утримуючий момент відносно ребра перекидання від сили тяжіння крана;

$G_o$  – нормативна складова маси крана;

$M_o, M^H_{wp}$  – перекидні моменти відносно ребра перекидання відповідно від маси вантажу, динамічних навантажень і вітрового навантаження робочого стану (рис. 4);

$Q^H$  – нормативна складова маси вантажу;

$bQ$  – відстань від точки підвісу вантажного поліспада до вертикальної площини, що проходить через ребро перекидання.

Власну стійкість кранів із маневровою зміною вильоту контролюють за положення стріли на максимальному вильоті:

$$M_o = M^H_{wp}. \quad (3)$$

За раптового зняття навантаження

$$M_o = M^H_{wp} + 0,3 Q^H b Q. \quad (4)$$

Критерієм виконання умови стійкості є співвідношення

$$k M_o \leq m_o M_{ум}, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт перевантаження (що враховує відхилення навантажень у несприятливий бік);

$m_o$  – коефіцієнт умов роботи.

Щоб оцінити відношення утримуючого моменту до перекидного, використовують коефіцієнт стійкості  $K$ :

$$K = M_{ум} / M_o. \quad (6)$$

Перекидний момент від маси вантажу, що підіймає стріловий кран, тим більший, чим більше маса вантажу і виліт гака від ребра перекидання. Під ребром перекидання розуміють грань опорного контуру, відносно якої сили прагнуть перекинути кран (рис. 4), для рейкових кранів ребро перекидання приймають за центрами

ходових візків. Для визначення стійкості крана використовують також такі величини:  $G$  – маса противаги;  $W_p$  – вітрове навантаження;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – реакції в опорах;  $Q$  – маса вантажу;  $m_{стр}$  – маса стріли;

$b$  – відстань від центра мас частин крана до вертикальної площини, що проходить через ребро перекидання. Проте не враховують, що фактично різні навантаження можуть діяти на кран одночасно.

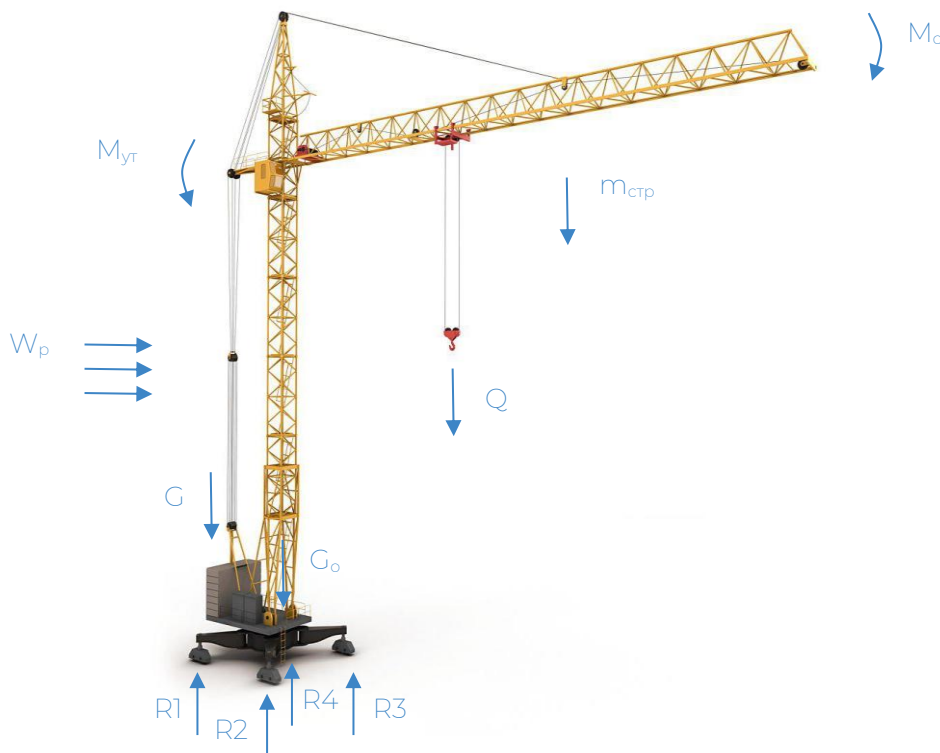


Рис. 4. Схема дії навантажень для визначення стійкості

Деякі з них можна вважати незалежними (наприклад вага вантажу і вітер) і ймовірність їх збігу визначати статистичними методами, інші (наприклад вага вантажу і динаміка піднімання) функціонально пов'язані. Ці фактори можуть призводити до різкої зміни навантажень на несучі металокопструкції, опори і рейкові шляхи баштового крана. Вплив зазначених факторів та інших експлуатаційних станів і комбінацій навантажень на міцність і стійкість залишається мало дослідженим, ряд дослідників пропонують їх отримувати, обчисливши зміну реакції в опорах баштового крана за різних експлуатаційних

станів [24-26]. Але руйнування в ряді випадків аварій відбувається не внаслідок перекидання всього крана, а в результаті втрати стійкості опору матеріалу несучих металокопструкцій башти або стріли. Автори цієї статті пропонують визначати і фіксувати зміну зусиль за допомогою датчиків у несучих металокопструкціях башти і стріли. Результати розрахунків слід порівнювати з результатами, отриманими нормативними методами розрахунку, а також результатами, отриманими на спроектованих об'ємних моделях крана і проведених експериментах.

До конструктивних особливостей крана слід віднести складність фермової

конструкції башти і стріли, їхню високу вітрову поверхню, складність розрахунку з'єднання башти з основою крана, циклічність навантаження, у тому числі з урахуванням екстремальних впливів вітрових, вибухових, сейсмічних та інших навантажень, що впливають на стійкість опору матеріалів і т. д. Через це норми часто виявляються малоефективними для створення сучасних конструкцій і використання нових матеріалів. Саме тоді гостро відчувається мала гнучкість і універсальність емпіричних норм, відсутність аналітичних методів для їх обґрунтування. Усе це свідчить про те, що теорія і загальні методи розрахунку кранів потребують подальшого розвитку. Застосовувані норми і методи розрахунку через перелічені принципові недоліки призводять зазвичай до необґрунтованого перевитрачання металу і подорожчання, уповільнюють вдосконалення і створення нових високоефективних і надійних кранів. Усунути ці недоліки можна, наприклад, із позицій імовірнісних теорій надійності механічних систем і навантажень.

В експлуатації баштових кранів основними причинами, що призводять до аварійних ситуацій, є:

- перевантаження, підіймання вантажу більшого за нормативну вантажопідйомність;
- наявність дрібних дефектів (що виникли з виготовленням, транспортуванням і монтажем), не виявлені з введенням крана в експлуатацію;
- зношення механізмів і агрегатів, використовуваних на робочому крані, вище допустимого;
- неякісні демонтажні та ремонтні роботи перед пуском крана в експлуатацію після монтажу;
- відсутність належного контролю під час експлуатації, у тому числі відхилення або роботи з несправними приладами безпеки;

- відсутність кваліфікованого персоналу, допущеного до експлуатації баштового крана;

- відхилення від технології виготовлення та неналежний контроль якості на виробництві.

Баштові крани мають тривалий термін служби, неодноразово подовжуваний. Виходячи з цього, суттєвою причиною аварійності є велика кількість обладнання, яке відпрацювало свій розрахунковий ресурс. Отже, сьогодні ще використовують багато кранів, не оснащених сучасними технологіями автоматизації та датчиками. Тому існує технологічна та економічна доцільність не тільки оснащення нових моделей кранів, але й модернізації експлуатованих баштових кранів пристроями безпечного управління. Ці пристрої сприятимуть експертно-діагностичному обстеженню баштових кранів, спрямованому на виявлення дефектів, а також запобіганню аварійним ситуаціям, що набуває особливої важливості та актуальності.

Аналіз статистичних даних свідчить, що для баштових кранів характерний підвищений рівень аварійності порівняно з іншими типами підйомно-транспортного обладнання. Одним з основних факторів, що обумовлюють таку тенденцію, є специфіка експлуатації баштових кранів, яка передбачає часту зміну місця роботи і відповідно проведення монтажних і демонтажних робіт. Віддаленість об'єктів будівництва від сервісних центрів ускладнює забезпечення належного технічного обслуговування та контролю якості виконання монтажних робіт.

Значним є людський фактор – 92,9 % всіх нещасних випадків із кранами мали той чи інший тип втручання людини [27]. Дія або бездіяльність людини – одна з найчастіших причин аварій баштових кранів. Виключити негативний вплив «людського фактора», наприклад за рахунок повної автоматизації вантажопідйомного процесу, дорого і складно. Тому способи часткового обмеження дій працівників у



робочому процесі є дуже актуальними для експлуатуючих організацій. На сьогодні ефективність робочого процесу пов'язана з механізацією виробничих робіт, введенням обмежувальних і попереджувальних приладів, пристроїв безпеки (рис. 5).

До таких приладів і пристроїв відносять:

- обмежувач вантажопідйомності, висоти підймання та переміщення вантажу;

- обмежувач повороту і висування вежі;  
 - обмежувач пересування крана;  
 - анемометр;  
 - автоматичне стопоріння вантажного візка з обривом візкового каната;  
 - захист від падіння вантажу і стріли з обривом будь-яких із трьох фаз;  
 - датчик зміни кута нахилу стріли;  
 - протиугінний пристрій тощо.

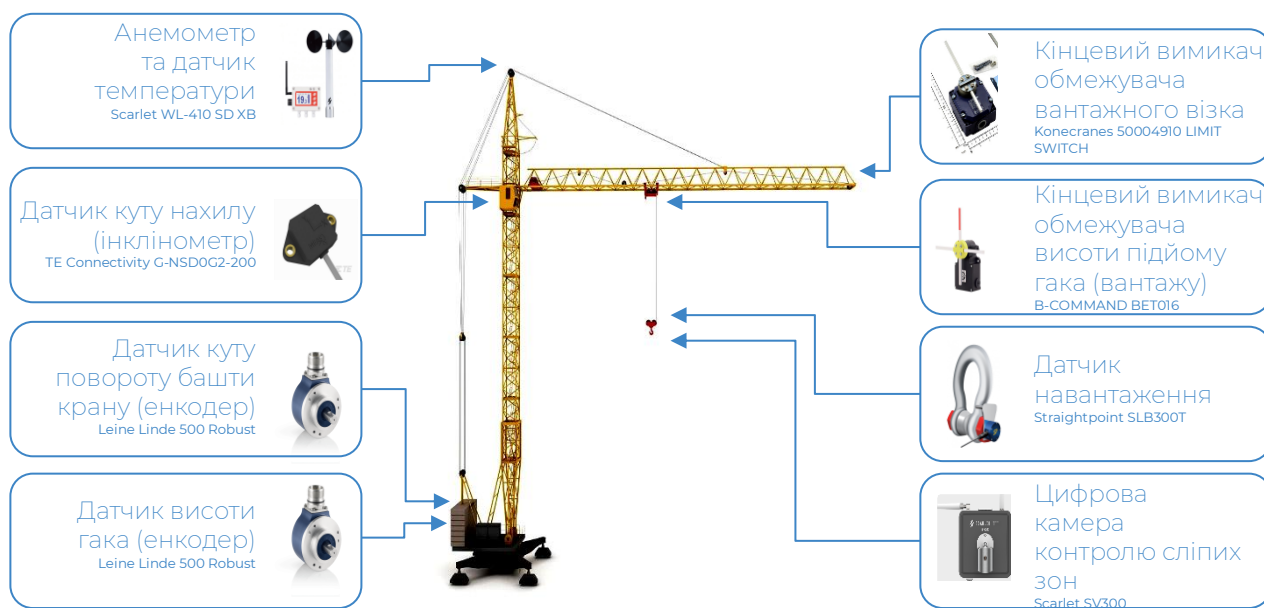


Рис. 5. Приклади приладів і пристроїв безпеки

Зазначені пристрої спрямовані на корегування людської діяльності задля забезпечення безпечних умов праці, однак не є абсолютним гарантом запобігання нещасним випадкам. Зокрема, обмежувачі вантажопідйомності баштових кранів автоматично відключають механізми підйомних кранів у разі перевищення допустимої маси вантажу, що запобігає аварійним ситуаціям. Проте зафіксовано випадки експлуатації кранів із вимкненими обмежувачами або пошкодженими пристроями безпеки. Крім того, на вітчизняних кранах досі переважно

використовують не електронні, а електричні пристрої безпеки. Отже, існує необхідність удосконалення системи забезпечення безпеки.

Системи дистанційного моніторингу дають змогу фіксувати вихід із ладу або вимкнення пристроїв безпеки. За допомогою бездротових сенсорних мереж інформацію збирають із датчиків, передають до центрального вузла та візуалізують у вигляді інтуїтивно зрозумілої для користувача схеми, а також активують сигналізацію у випадку порушення запрограмованих правил безпеки.

Застосування систем дистанційного моніторингу кранів суттєво підвищує безпеку робіт. Слід зазначити, що на сьогодні нема оптимальних методик, які давали б змогу на етапі експлуатації оцінити ймовірність виникнення ризикових ситуацій, зумовлених відмовою обладнання або дефектами металоконструкцій. У зв'язку з цим зростає актуальність контролю безпечної експлуатації баштових кранів на небезпечних виробничих об'єктах. Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод оцінювання, заснований на експертних оцінках і використанні сучасних інформаційних систем.

Розроблювана система забезпечення безпечної експлуатації має виконувати такі функції:

- контроль і зміна параметрів баштового крана з урахуванням змін зовнішніх навантажень;
- формування керуючих сигналів до приводних механізмів.

Завдання розроблення системи полягає в реалізації активного управління стійкістю баштового крана з випередженням у період дії різних пікових зовнішніх навантажень, таких як раптові пориви вітру тощо.

Переваги запропонованої системи:

- використано екстраполяцію зовнішніх навантажень на основі методів штучного інтелекту;
- систему розроблено для діагностування стану несучих металоконструкцій стаціонарних і пересувних баштових кранів.

Принцип роботи заснований:

- на фіксації навантаження на опорах башти і відхилення точок розташування відносно осі та опорної поверхні, порівнянні їх із розрахунковими даними та машинному аналізі можливого розвитку процесу;
- коректуванні положення поворотної частини баштового крана відносно напрямку навантаженої опори

башти і видавання випереджальних сигналів до механізмів для примусової зміни кутового положення поворотної частини.

Система безпеки базована на нейромережових і логічних алгоритмах. Нейромережовий алгоритм використовують для прогнозування напрямку та швидкості зміни навантаження, тоді як логічний алгоритм слугує для визначення критичних значень навантаження і швидкості (на основі прогнозованих значень) та управління приводами з метою своєчасного переведення баштового крана в безпечний стан.

Система безпеки баштових кранів складається з підсистеми збору інформації про параметри зовнішніх навантажень і параметри баштового крана, підсистеми нейромережового прогнозування та підсистеми управління приводами (рис. 6).

Підсистема збору інформації включає датчики, деякі з них уже є в сучасних обмежувачах вантажопідйомності (датчик швидкості вітру, положення стріли, висоти підймання гака, вильоту гака). Додатково баштовий кран необхідно обладнати датчиками рівня, наприклад TE Connectivity G-NSDOG2-200 (рис. 7, а) (один біля основи башти, інший на висоті кабіни), і навантаження, наприклад тензодатчика SAINTBOND LC7001B (рис. 7, б) (на кожній із чотирьох опор, біля основи башти).

Підсистема нейромережового прогнозування реалізована на основі плати розширення з нейромережовим алгоритмом. Підсистема управління приводами баштового крана базована на програмованому логічному контролері.

Умовою безпеки є генерація підсистемою нейромережового прогнозування сигналу управління та його обробка підсистемою управління для активації приводів до досягнення максимально допустимого навантаження на одну з опор башти або критичного перекидного моменту.

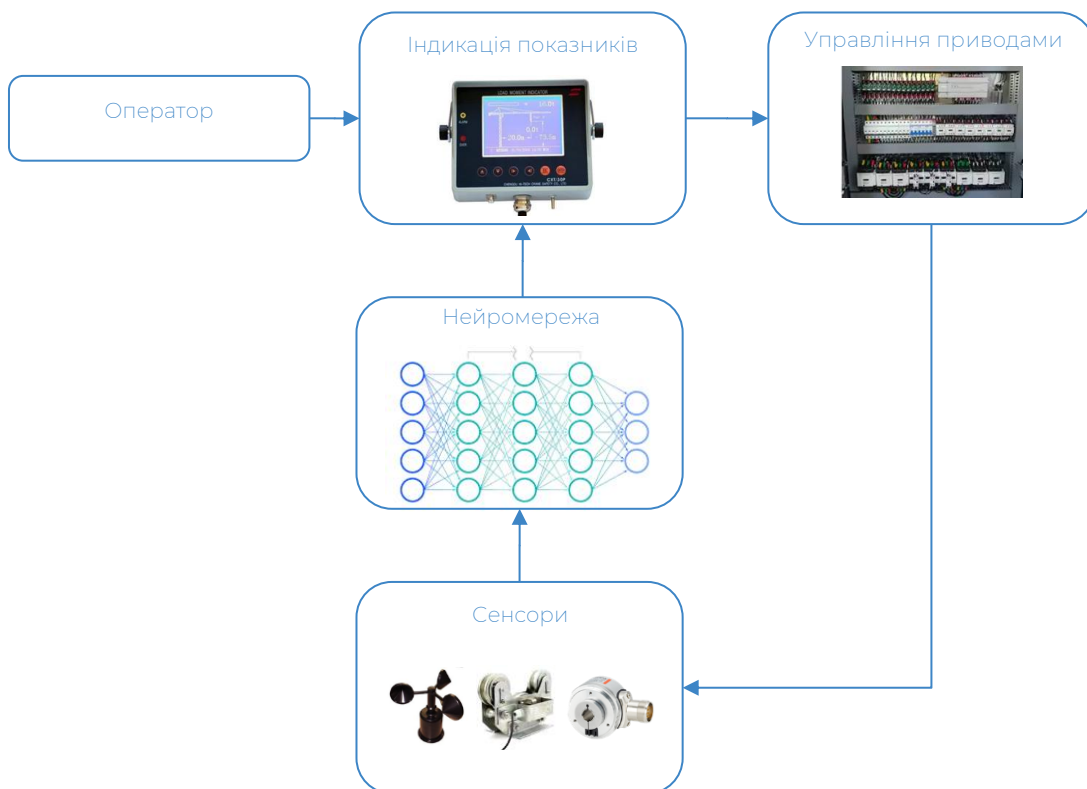


Рис. 6. Загальна схема роботи системи безпеки

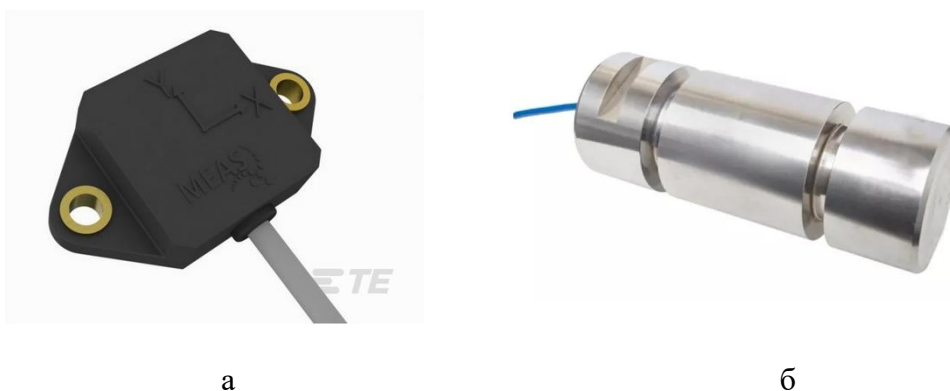


Рис. 7. Інклінометр TE Connectivity G-NSD0G2-200 (а), тензодатчик SAINTBOND LC7001B (б)

Система безпеки спочатку подає сигнал машиністу та пропонує дії з переведення крана в неробочий стан відповідно до інструкції з експлуатації. У разі ігнорування сигналу або досягнення небезпечного рівня навантаження, що

перевищує допустиме значення, система автоматично втручається в роботу машиніста.

Під час перевірок нейромережових алгоритмів у процесі експлуатації баштового крана можливе їх донавчання. Це

зумовлено тим, що під час роботи крана база даних параметрів зовнішніх навантажень постійно поповнюється, і обчислювальної потужності архітектури нейромережових алгоритмів, закладеної для їхнього навчання, може бути недостатньо.

Неперервний контроль з екстраполяцією параметрів на майбутній стан дасть змогу реалізувати проактивний захист, який забезпечить раннє виявлення небезпечних перевищень зовнішніх навантажень.

Наступним етапом дослідження є порівняння результатів роботи систем управління, побудованих на методах:

- нечіткої логіки;
- штучних нейронних мереж;
- нейро-нечіткої логіки.

Аби оцінити рівень безпеки виконання робіт баштовим краном на будівельному майданчику загалом, у керівника будівництва та машиніста має бути відповідна інформація, отримана безпосередньо на будівельному майданчику, щоб відображувати реальні умови роботи, і доступна на комп'ютерах, планшетах і смартфонах, використовуваних працівниками будівництва.

Цифрові електронні пристрої безпеки баштових кранів здатні передавати дані безпосередньо до бортової електронної системи управління краном, де їх автоматично обробляють, усуваючи в такий спосіб тривалі та повторювані перетворення на різних етапах передавання даних. Коли система має вихід в Інтернет, оброблені дані можуть отримувати керівники будівництва та персонал, що перебуває в офісі компанії, далеко від будівельного майданчика. Це дає змогу оператору баштового крана і керівнику будівництва бачити одні й ті самі дані.

Наступним кроком у вдосконаленні цих технологій є підключення систем до хмарних сервісів і зберігання бази даних у хмарі. У результаті системи безпеки завжди мають резервну копію бази даних у хмарі.

Ця інформація може бути надзвичайно важливою для процесів ухвалення рішень, але лише за умови її правильного використання. Великі масиви необробленої первинної інформації, яку збирають окремі прилади, мають обмежену користь. Однак, якщо ці дані буде збирати система через Інтернет, автоматично обробляти і подавати у зручному форматі, менеджери компаній, особливо ті, хто відповідають за безпеку, зможуть протягом кількох хвилин отримувати точну інформацію про роботу свого обладнання та ситуацію на багатьох будівельних об'єктах.

Пропоновані вдосконалення покликані підвищити безпеку кранів і їхню ефективність у вирішенні завдань сучасних будівельних проєктів із жорсткими графіками. Очікувана економічна вигода від покращення характеристик крана в безпечній експлуатації значно перевищує витрати на встановлення різних пристроїв.

**Висновки.** Проблематика забезпечення стійкості баштових кранів за умов комплексних зовнішніх впливів є актуальним завданням сучасного будівництва. Традиційні підходи для оцінювання навантажень і розрахунків міцності часто не враховують динамічний характер вітрових та інших зовнішніх навантажень, нелінійні деформації металоконструкцій та інші фактори, що впливають на стійкість кранів.

Проведене дослідження показало, що тісний взаємозв'язок між організаційними, технічними та зовнішніми факторами значно ускладнює забезпечення експлуатації баштових кранів. Для адекватного оцінювання ризиків необхідно враховувати не лише статичні навантаження, але й динамічні процеси, що виникають під час роботи крана. Зокрема, вітрове навантаження, один з основних факторів, що впливають на стійкість крана, має пульсуючий характер і залежить від багатьох параметрів, таких як швидкість вітру, його напрямок, форма і розміри конструкції крана.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено інноваційну систему забезпечення стійкості баштових кранів, базовану на методах штучного інтелекту. Система здійснює постійний моніторинг параметрів роботи крана та навколишнього середовища, прогнозує можливі ризики та видає рекомендації з корегування режимів роботи. Використання методів машинного

навчання дає змогу системі адаптуватися до змінних умов експлуатації та підвищувати точність прогнозування.

Перспективами подальшого розвитку теми є моделювання навантажень і розроблення автоматизованої системи контролю безпечної роботи кранів за умов комплексного впливу факторів зовнішнього середовища.

### Список використаних джерел

1. Shapira A., Lucko G., Schexnayder C. Cranes for building construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007. Vol. 133, No. 9. P. 690–700.
2. Kim J., Kim G. Importance Ranking of Accident Factors of Construction Tower Crane by AHP Technique. *Journal of Building Construction and Planning Research*. 2020. Vol. 8. P. 237–244. DOI: 10.4236/jbcpr.2020.84015.
3. Yang Y., Shao B., Jin L., Zheng X. Collaborative Governance of Tower Crane Safety in the Chinese Construction Industry: A Social Network Perspective. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 6. Article 836. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12060836>.
4. Кружилко О. Є., Майстренко В. В., Атаманюк О. О. Перспективи використання інформаційної системи обліку баштових кранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2015. № 29. С. 64–69. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop\\_2015\\_29\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2015_29_10).
5. Іваненко О. І., Щербак О. В., Любімов Ю. Ю. Комп'ютерне моделювання стійкості на моделі баштового крана на основі визначення опорних реакцій. *Наукові вісті Давіського університету*. 2020. № 18. ISSN 2222-3428. URL: <http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf>.
6. Колісник М. П., Заяць Г. В., Червоноштан А. Л., Калашник Д. В. Аналіз причин падіння баштового крана КБ-674а. *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры*. Днепр, 2016. Вып. 88. С. 185–193.
7. Herrera-Pérez V., Salguero-Caparrós F., Pardo-Ferreira M. del C., Rubio-Romero J. C. Key Factors in Crane-Related Occupational Accidents in the Spanish Construction Industry (2012–2021). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. № 22. P. 7080. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20227080>.
8. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146, No. 7. Article 4020071. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860).
9. Chen Y., Zeng Q., Zheng X., Shao B., Jin L. Safety supervision of tower crane operation on construction sites: An evolutionary game analysis. *Safety Science*. 2022. Vol. 152. Article 105578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105578>.
10. Горбатюк Є., Міщук Д., Булавка О., Воляннюк В. Аналіз досліджень стаціонарних баштових кранів при вітрових навантаженнях. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2023. № 102. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0201>.
11. Krupko I., Ivanenko O., Yermakova S. Substantive provisions of improvement of methods of calculation of loads on carrying and propelling devices of lifting and transport machines.

*Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. Vol. 1, № 57. P. 54–59. ISSN 3453-9875. DOI: <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-57-1-54-59>.

12. Горбатюк Є., Булавка О. Огляд і аналіз пошкоджень та існуючих систем захисту баштових кранів під впливом вибухової хвилі. *Автомобільний транспорт*. 2024. № 53. С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.02>.

13. Dhalmahapatra K., Shingade R., Mahajan H., Verma A., Maiti J. Decision support system for safety improvement: An approach using multiple correspondence analysis, t-SNE algorithm and K-means clustering. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 128. P. 277–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.044>.

14. Kim J. Y., Lee D. S., Kim J. D., Kim G. H. Priority of Accident Cause Based on Tower Crane Type for the Realization of Sustainable Management at Korean Construction Sites. *Sustainability*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010242>.

15. Khodabandelu A., Park J., Arteaga C. Crane operation planning in overlapping areas through dynamic supply selection. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 117. Article 103253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103253>.

16. Li X., Chi H., Wu P., Shen G.Q. Smart work packaging-enabled constraint-free path re-planning for tower crane in prefabricated products assembly process. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 43. Article 101008. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101008>.

17. Sadeghi S., Soltanmohammadlou N., Rahnamayiezekavat P. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. *Safety Science*. 2021. Vol. 133. Article 105002. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002>.

18. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146. No. 7. Article 4020071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860).

19. Zhou W., Zhao T., Liu W., Tang J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective. *Safety Science*. 2018. Vol. 109. P. 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.001>.

20. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. 77 с.

21. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения. Москва: Стандарт, 1977. 28 с.

22. Кльон А. М., Трет'як А. В. Визначення вітрового навантаження на баштовий кран за ГОСТ 1451-77 та ДБН В.1.2-2:2006. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 4 (70). С. 42-44. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.042>.

23. РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчета. СКТБ «Стройдормаш». Москва, 1987. 62 с.

24. Іваненко О. І., Крупко І. В., Єрмакова С. О. Теоретичні дослідження стійкості баштового крана з урахуванням розподілу навантажень на опори. *Підйомно-транспортна техніка*. 2020. 3(64). С. 81-95.

25. Іваненко О. І., Щербак О. В., Крупко І. В., Четверіков В. С. Дослідження розподілу опорних навантажень баштового крана за допомогою комп'ютерного моделювання. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 101, т. 1. С.118-125. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.118>.

26. Hric S., Tkac J., Matiskova D., Micko M., Mandulak D. Preliminary analysis of tower crane as a type of truss structure. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 299. Article 03003. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929903003>.

27. Jiang W., Ding L., Zhou C. Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. Article 104257. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104257>.

---

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Держинський Ігор Віталійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-7188-2948. Тел.: +38 (095) 433-00-19. E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

E-mail: vstef@ukr.net.

Dzerzhynskiy Ihor, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID. iD: 0009-0009-7188-2948.

E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Статтю прийнято 10.02.2025 р.