

І.В. Дзержинський, В.О. Стефанов

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ БАШТОВИХ КРАНІВ ТА МЕТОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В статті проаналізовано проблему забезпечення стійкості баштових кранів різних типів (з поворотною/неповоротною вежею) при дії робочих та зовнішніх навантажень. Розглянуто методи підвищення безпеки: комп'ютерне моделювання, адаптивне управління, компенсація навантажень. Запропоновано використання штучного інтелекту для керування стійкістю.

Ключові слова: баштовий кран, будівельна механіка, конструкції, розрахунок, стійкість, зовнішні навантаження.

Постановка проблеми

Баштові крани відіграють важливу роль у багатьох галузях промисловості, особливо будівельної, полегшуючи підйом та переміщення важких матеріалів та обладнання. Сьогодні в світі експлуатується сотні тисяч баштових кранів, з них в Україні понад 5 тисяч [1]. Баштовим називається такий стріловий кран, стріла якого встановлюється у верхній частині вертикально розташованої колони, часто званої вежею або щоглою [2]. Дана несуча конструкція, має Г-подібну форму, яка являє собою систему двох взаємопов'язаних стрижнів, що знаходяться під дією згинальних і стискаючих навантажень. Вона забезпечує найкраще охоплення прямокутних споруд і дозволяє розмістити кран в безпосередній близькості від будівлі, що будується. Корисний виліт баштового крана становить при цьому близько 80% повного вильоту, в той час як у стрілового крана з низько розташованою стрілою він не перевищує 50% і до того ж різко зменшується зі збільшенням висоти споруди. Однією з вимог, яку необхідно враховувати проєктанту при створенні та виконанні перевірочних розрахунків несучих металоконструкцій та робочих механізмів баштового крана, є обрана робоча схема конструкції машини, наприклад, з точки зору розташування механізму обертання стріли в горизонтальній площині. Широкого поширення набули два типи кранів: з поворотною та неповоротною вежею. Якщо опорно-поворотний пристрій (ОПП) розміщено внизу, безпосередньо на порталі або на ходовій частині крана, то в цьому випадку поворотна частина об'єднує стрілу, башту з оголовком та розпіркою, поворотну платформу, на якій розміщуються вантажна та стрілова лебідки, механізм повороту та вантажі противаги. Баштовий кран із подібною схемою розташування механізму повороту називають краном із поворотною вежею (рис. 1).



Рис. 1. Баштовий кран з поворотною баштою (типу KB-403)

Оскільки основні механізми та поворотна частина розміщуються біля основи крана, центр ваги знаходиться низько, внаслідок цього крани з поворотною вежею мають хорошу стійкість. Самі башти кранів закріплюються у вертикальному положенні підкосами, пов'язаними з верхньою частиною двопогій стійки. Завдяки високо піднятій точці кріплення підкосів до вежі в ній знижуються навантаження від вітрових та інерційних сил. Башти розвантажені від вигину і, як наслідок, від підвищених динамічних навантажень, що виникають при дії вертикальних навантажень на гаку. До недоліків слід віднести нестійкість при додаткових зовнішніх навантаженнях, що виходять за межі допустимих вантажних навантажень і можливе перекидання назад у бік противаги крана, при раптовому знятті навантаження з гака. Стійкість даних машин забезпечується власною вагою крана, тому навантаження, прикладені за межами опорного контуру, створюють перекидальний момент,

зміщуючи центр ваги крана всередині його опорного контуру. Забезпечення стійкості досягається виконання співвідношення відновлювального і перекидаючого моментів, з урахуванням запроєктованих допустимих вантажних навантажень і противаги, але часто не враховуються можливості спільної і раптової дії робочих і зовнішніх сторонніх навантажень (наприклад, відхилення від максимально допустимого радіусу вантажу, що транспортується, має велику парусність внаслідок раптового пориву вітру, з урахуванням великої висоти підйому). У зв'язку з обертанням вежі крана відсутня можливість кріплення до будівлі та подальшого нарощування в процесі збільшення висоти споруд, що зводяться. При цьому зі зростанням вантажопідйомності, збільшенням висоти підйому вантажу подовженням стріл зростає навантаження на ОПП, а виробництво масивних опор кранів з поворотною вежею є економічно невиправданим.

У кранах з неповоротною вежею іноді званих верхньоповоротними, поворот стріли над будівельним майданчиком проводиться ОПП, розміщеним на вершині вежі, у місці встановлення kabini (рис. 2). Поворотна частина крана при цій схемі обертання - це kabina управління, ОПП з механізмом повороту, стріла з оголовком або без нього, а також противагова консоль із закріпленими на ній лебідками та противагою, яка потрібна для рівноваження крана при експлуатації.



Рис.2. Баштовий кран з неповотною вежею.

Достоїнствами цього виду баштових кранів є висока вантажопідйомність та можливість роботи з вантажами на великій висоті. Більш того, кран з неповотною вежею легко може перетворюватися на приставний шляхом кріплення до будівлі, що дозволяє нарощувати висоту вежі разом із зростанням об'єкта, що будується. Башта приставного крана фіксується у вертикальному положенні або за допомогою жорстких тяг,

закріплених на перекриттях споруди, що зводиться, і на вежі крана.

Башта верхньоповотної машини відчуває більш потужні зусилля, що деформують, ніж ті, що діють на поворотну вежу. Для міцності конструкції, а також для зменшення розгойдування вантажу при виконанні кранових робіт вежу доводиться додатково посилювати, що збільшує масу та навітряну (тіньову) площу вежі. При цьому, залежно від напрямку вітру (шквальних поривів) відсутня можливість регулювання за рахунок зменшення площі вежі порівняно з поворотною вежею. Внаслідок цього площа може зростати майже вдвічі. Регулюється лише поворотна стріла. Стійкість найчастіше досягається за рахунок пристібання до будівлі.

Крани з неповотною вежею універсальні, вони можуть виступати як самопідйомні, так і пересувні. Якщо роботи ведуться на невеликій висоті, ці крани виступають у ролі пересувних, а при виконанні будівельних завдань на значній висоті вони можуть застосовуватися як приставні стаціонарні. До нестачі кранів даної конструкції можна віднести необхідність використання при монтажі мобільного крана. Висота вежі крана збільшується шляхом додавання додаткових секцій у верхній частині вежі крана. При монтажі крана з поворотною баштою залучати інші крани не потрібно.

Об'єктами дослідження, покладеними в основу цієї статті, є баштові крани:

- з поворотною щоглою: КБ-401, КБ-403 та КБ-405;
- з неповотною вежею та балочною стрілою: Potain MCi 85, Liebherr 150 EC-B 8, QTZ125 Haishan HS5023 та КБ-473-02.

Тип крана, його загальне компонування, основні розміри та робочі швидкості є базовими даними для перевірного розрахунку всіх інших елементів машини з точки зору безпеки роботи. Розрахунок полягає у визначенні діючих навантажень та їх можливих найбільш невідгідних комбінацій для обраної конструктивної схеми, а також перевірки допустимості цих навантажень на безпечну роботу крана. Високі робочі швидкості основних механізмів та інтенсивність роботи кранів є причиною втомних руйнувань при навантаженнях [3]. В цілому конструктивні розрахунки включають перевірку:

- стійкості крана або його окремих елементів проти перекидання;
- стійкості стислих елементів проти витріщання;
- міцності всіх навантажених елементів;
- довговічності елементів, які перебувають під тривалим впливом змінних навантажень та інших.

Слід зазначити, що, як і вітчизняному кранобудуванню, і там методики і норми розрахунку баштових кранів постійно допрацьовуються. Недосконалість загальних норм конструктивного розрахунку робить необхідним докладніший їх розгляд, особливо з урахуванням впливу компоновальних схем баштових кранів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження вітчизняних та зарубіжних учених, пов'язаних з розробкою теоретичних та розрахункових положень, а також практичних рекомендацій щодо розрахунку міцності несучих металлоконструкцій та елементів робочих механізмів, оцінки та забезпечення стійкості стрілових кранів мають різний напрямок. Дослідженням у галузі нормування методик розрахунку міцності та стійкості кранів, з урахуванням впливу зовнішнього навантаження, в тому числі динамічного, вітрового, сейсмічного та інших, присвячені роботи М.П. Александрова, А.А. Вайнсона, В.Ф. Гайдамака, М.М. Гохберга, О.В. Григорова, А.А. Зарецького, Ф.К. Іванченко, В.С. Ловейкіна, С.О. Козак та ін. Багато їхніх напрацювань лягли в основу вітчизняних нормативних документів з розрахунку баштових кранів, розроблених наприкінці 20 століття.

У цій статті в основному розглядалися опубліковані роботи щодо аналізу впливу зовнішнього навантаження на баштові крани різних типів конструкцій та пропозицій щодо їх зменшення за період з 2019 по 2024 роки. Необхідно відзначити, що останні роки дослідження баштових кранів швидко розвивалися, і велика кількість учених по всьому світу провели поглиблене дослідження баштових кранів.

Проведений аналіз джерел свідчить, що публікації з цієї тематики зосереджені на дослідженні впливу зовнішнього навантаження, у тому числі динамічного, вітрового, техногенного та інших та пошуку найбільш навантажених елементів металлоконструкції та механізмів баштових кранів.

На підставі цих досліджень розроблено інженерні рішення щодо зниження напруг, що виникають у конструкціях, та запропоновано адаптивні системи управління баштовими кранами для зниження зовнішніх навантажень. Наприклад, автори [4] на основі рівняння Лагранжа та теорії балок Ейлера-Бернуллі вивели динамічне рівняння баштового крана. За допомогою цього рівняння було проаналізовано вплив динамічних параметрів, таких як швидкість та прискорення візка, довжина каната тощо, на вібрацію стріли та хитання корисного навантаження. Для зниження динамічних навантажень і підвищення міцності металлоконструкції баштового крана [5] була запропонована конструкція баштового крана з

компенсацією навантаження за допомогою рухомого противаги. З використанням методів математичного моделювання було розроблено алгоритм управління рухомим візком залежно від режиму роботи крана, маси вантажу та вильоту вантажної каретки. На думку авторів, подальший розвиток такого підходу полягає у вдосконаленні методів математичного моделювання динаміки крана, обґрунтуванні вибору контрольованих параметрів та, на їх основі, системи управління рухомою противагою.

Баштові крани через постійне перебезування працюють у різних умовах рельєфу і тому необхідно враховувати різні вітрові режими.

Крім того, у зв'язку з швидкою зміною кліматичних умов збільшується ризик виникнення небезпечних динамічних вітрових навантажень, що підтверджується багаторічними спостереженнями [6,7]. Незважаючи на великий обсяг наукових праць з даної тематики, вітер, як і раніше, є другою за частотою причиною нещасних випадків із баштовими кранами. Існує багато норм та методик розрахунку вітрових навантажень, порівнянню яких присвячено ряд робіт [8, 9]. Ряд дослідників [10] розглянули реакцію баштових кранів на вплив вітрових навантажень та їх перемінну складову за швидкістю та напрямом потоку.

Ще одним видом ненормованого навантаження баштових кранів є коливання вантажу на канатному підвісі. У роботах [11-12] зазначається, про вплив вітрового навантаження на вантаж, що переміщається краном. Несприятливі комбінації робочих рухів посилюють ці навантаження, роблячи їх нестабільними та змінними. Розгойдування вантажу на канатному підвісі може призвести до додаткових навантажень на баштовий кран, не врахованих на етапі проектування. Для зменшення коливань вантажу, викликаного вітром, автор [13] пропонує впровадити розроблений спеціальний пружинно-амортизуючий пристрій. Також виявлено, що вітер може збільшувати перекидальний момент, що призводить до нестійкості баштового крана [14]. Важливим чинником становиться стійкість кранів при різних умовах роботи та зовнішніх (у тому числі вітрових) навантажень. У цьому випадку на перший план виходить правильний вибір опорного контуру, для чого дуже важливим є визначення навантажень на несучі та опорні елементи [15-16]. Для дослідження закономірностей розподілу навантажень на опорні елементи баштового крана в робочих режимах автори [17] використовують обчислювальні методи, засновані на комп'ютерному моделюванні.

У роботі [18] проаналізовано розроблені пристрої безпеки, які стабілізують положення стріли крану щодо вітрового потоку в робочому

та неробочому станах, а також розглянуто систему коригування та підтримання краном заданого положення щодо вітрового напору для забезпечення стійкості в умовах дії поривів вітру. Вивчено обґрунтування застосування запобіжного примусового впливу на баштовий кран для забезпечення його стійкості при зміні динаміки вітрових потоків. При цьому для керування стрілою можуть застосовуватися додаткові механізми – гідродинамічні муфти та допоміжний привод. Вони забезпечують стійкість роботи машини, шляхом введення в кінематичну схему повороту вежі додаткової жорсткості та запобіжним примусовим поворотом стріли крана допоміжним приводом. Новим напрямом досліджень є аналіз впливу ударної хвилі [19], яка спричиняє появу повітряного тиска, коливання та інше. Для забезпечення надійності та безаварійної експлуатації баштових кранів критично важливим є врахування динамічних навантажень, які можуть багаторазово перевищувати статичні, при розрахунку несучих конструкцій та компонентів робочого обладнання. Забезпечення стійкості стаціонарних баштових кранів, особливо в умовах воєнного стану, є одним із важливих теоретичних і практичних завдань. Найважливішим аспектом вирішення цього завдання є забезпечення стійкості за умов ударних хвиль, що зумовлюють дію динамічних навантажень на металоконструкції крану.

Конструкція баштових кранів та умови експлуатації дуже чутливі до динамічних збуджень, таких як миттєве навантаження, викликане впливом землетрусу. Дослідниками [20] були вивчені сейсмічні характеристики баштових кранів з різними конфігураціями. Програма з використанням методу скінченних елементів була написана в MATLAB, та здатна створювати сітки, модальний аналіз та аналіз перехідних процесів.

Корпус башти баштового крана є основним несучим елементом, що сприймає як вертикальні навантаження від власної ваги та ваги вантажу, і перекидаючий момент. Зазвичай башта не є цільною, а складається з кількох стандартних секцій. Місце з'єднання секцій фактично є однією з основних причин обвалення баштового крана. Дослідники в роботі [21] довели, що несуча здатність конструкції башти крана, де секції з'єднані за допомогою затискної втулки дозволяють знизити концентрацію напруги в найбільш небезпечній ділянці сполучного механізму. Максимальна еквівалентна пластична деформація знижується понад 50%, а тенденція розподілу кривизни стає рівномірною. У цьому дослідженні різні типи рам були спроектовані з урахуванням найчастіше використовуваної конфігурації зв'язків. При цьому модальний і

перехідний аналіз були розроблені для двох різних вхідних даних про рух при землетрусі.

Результати аналізу наукових праць показали, що останніми роками провідним напрямком стає системний підхід до аналізу міцності та стійкості баштових кранів, заснований на використанні метод скінченних елементів. Сучасний рівень інформаційних технологій та можливостей програм для розрахунку інженерних конструкцій, таких як SolidWorks та ANSYS, дозволяє розробляти розрахунково-динамічні моделі баштових кранів, що включають моделі болтових, зварних та інших з'єднань. Необхідно відзначити, що при порівнянні значень напруження, отриманих методами будівельної механіки та метод скінченних елементів, розбіжність становить до 5,1%, при статичному навантаженні крана. Водночас у місцях кріплення вежі до основи крана розбіжність значень перевищує 53,8% [22]. Така розбіжність значень напруження пояснюється складністю приведення навантажень до місця кріплення вежі до порталу або основи при використанні методів будівельної механіки.

Більшість авторів розглянутих робіт вказують на недосконалість методів проектування кранів, що не дозволяють врахувати, наприклад наявність додаткових (часто, раптових) навантажень, податливість елементів металоконструкції крана та ін.

Формулювання мети статті

Метою статті є вивчення механіки баштових кранів різних типів та створення відповідних 3D-моделей, що дозволяють проаналізувати вплив зовнішніх факторів на навантаження несучих металоконструкцій. Провести аналіз отриманих даних після математичного моделювання та експерименту на лабораторній установці та розглянути технічні рішення, спрямовані на підвищення безпечної експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Створення нового баштового крана починають із аналізу параметрів існуючих прототипів та їх аналогів. Використання існуючих залежностей між геометричними та масовими характеристиками дозволяє оптимізувати процес проектування та знайти раціональний типорозмір нової машини найкоротшим шляхом. Проектування баштових кранів передбачає визначення розрахункових навантажень та перевірки відповідності крана вимогам щодо міцності, стійкості (включаючи пружну стійкість і стійкість від перекидання) та довговічності (включаючи втомну довговічність). Виконання розрахунків регламентується Технічним регламентом безпеки машин (ТРБМ) затверджений

Постановою КМУ № 62 від 30.01.2013 зі змінами та НПАОП 0.00-1.80-18. Наказом Міністерство економічного розвитку і торгівлі України (МЕРТ України) № 1463 від 10.12.2013 зі змінами. Для реалізації вимог ТРБМ затверджений перелік національних стандартів, які з 2013 р. ідентичні європейським стандартам і відповідність яким надає презумпцію відповідності машин. Прийняті стандарти EN серії 13001 містять основи проектування кранів та їх обладнання. Також подовжують свою дію вітчизняні нормативні документи щодо розрахунку: «РД 22-166-86. Крани баштові будівельні. Норми розрахунку», нормами «ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження та впливи. Норми проектування» та ін. У даних документах викладено методи розрахунку за допустимими напруженнями та граничними станами, методи визначення навантажень та способи перевірки міцності вузлів металоконструкцій. Розрахунки баштових кранів мають загальну теоретичну основу. Однак на практиці використання існуючих методик для розрахунку баштових кранів пов'язано з низкою проблем, у тому числі через те, що кожна конструкція має свої особливості та реакцію на вплив додаткових зовнішніх пікових навантажень. Проектанти тільки в міру досвіду машин, що експлуатуються, призначають розрахункові поєднання навантажень і коефіцієнти при зіставленні діючих зусиль і опорів. Відповідно і роль наукового аналізу значною мірою обмежують узагальненням досвіду проектування та експлуатації кранів.

Через це норми часто виявляються малоефективними, особливо при створенні нетрадиційних конструкцій, призначених для застосування в незвичайних умовах, та використання нових матеріалів. Це підтверджується систематичними змінами існуючих і постійної розробкою нових, особливо з урахуванням розвитку цифрових технологій.

Розглянемо відмінності при побудові розрахункових схем кранів із поворотною та неповотною вежею (рис.3). Геометричні параметри для розрахунків визначають щодо прийнятих координатних осей, де вісь Х розташовують на рівні головок рейкового шляху, а вісь Y розташовують на осі обертання крана.

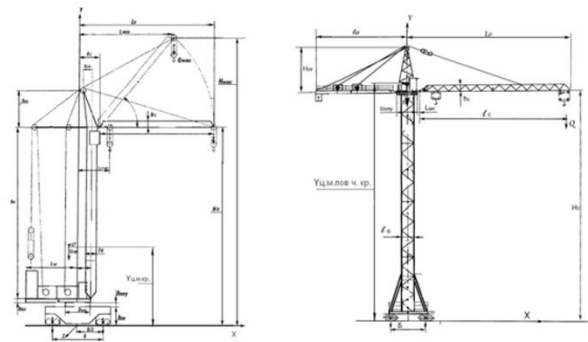


Рис.3. Розрахункові схеми кранів з поворотною та неповотною вежею

Конструктивна відмінність між баштовими кранами з поворотною та неповотною вежею полягає в розташуванні осі обертання. У неповотному варіанті вісь обертання збігається з віссю вежі. У поворотному – вісь обертання зміщена від осі вежі на величину, приблизно рівну радіусу ОПП, змонтованого на порталі. Вежа, як вертикальний несучий елемент, сприймає значні осеві навантаження і схильна до поздовжнього згину (витріщання), ризик якого зростає при динамічних зовнішніх впливах. Як зазначено в [23], навантаження на вежу баштового крана визначаються не лише власною вагою, але й зусиллями, що передаються від приєднаних до неї елементів. У випадку кранів з неповотною вежею це: вага всієї поворотної частини (включаючи опорно-поворотний пристрій, оголовок і встановлене обладнання), натяг канатів, а також складові зусиль у шарнірних з'єднаннях стріли та противагової консолі з лебідкою. Для кранів з поворотною вежею навантаження на вежу створюють: вага стріли, розпірки, консолі, а також натяг канатів стрілової та вантажної лебідок, які розташовані на поворотній платформі і огинають оголовок вежі. Ключова відмінність полягає в тому, що на вежу крана з поворотною вежею не впливає вага противаги та ОПП з механізмом повороту.

Розуміння механіки баштових кранів має вирішальне значення через складність та важливість цих машин. Управління навантаженням має першорядне значення у роботі крана для забезпечення безпеки та ефективності. Воно включає розрахунок меж навантаження на основі таких факторів, як вага, розміри та центр тяжіння. Ці розрахунки допомагають визначити максимальний вантаж, який кран може безпечно підняти та маневрувати. Крім того, стабільне керування навантаженням гарантує, що вантаж залишається збалансованим під час процесу підйому та переміщення. Неправильне керування навантаженням може призвести до нещасних випадків, пошкодження обладнання (рис.4) та

заподіяння шкоди персоналу і випадковим перехожим, внаслідок великих габаритів крана, що виходять за межі будмайданчика.



Рис. 4. Втрата стійкості та обвалення поворотної вежі крана КБ-403, у бік протизаги

Зроблений аналіз показав, що координати центру тяжіння поворотної частини крана ($ЦТ_{п.ч.кр.}$), по вертикальній осі $Y_{ц.м.п.ч.кр.}$, що впливають на стійкість та інерційні навантаження, що виникають у період пуску, гальмування та зміни швидкостей механізму пересування крана мають серйозні відмінності:

- для крана з поворотною вежею $Y_{ц.м.п.ч.кр.} \leq 0,3 \cdot H_0$;
- для крана з неповоротною вежею $Y_{ц.м.п.ч.кр.} \geq H_0$,

H_0 - висота установки стріли, м.

Опрокидальний момент від маси підійманого баштовим краном вантажу тим більший, чим більша маса вантажу і виліт гака від ребра опрокидання. При визначенні стійкості крана в розрахунок беруться також такі величини: G – маса протизаги (для крана з неповоротною баштою додатково маса баласту); W_p – вітрове навантаження; Q – маса вантажу; $m_{стр}$ – маса стріли; $Y_{ц.м.ч.кр.}$ – відстань від центра мас частин крана до вертикальної площини, що проходить через ребро опрокидання.

Навантаження, що діють на баштовий кран, поділяються на незалежні (наприклад, вага вантажу та вітрове навантаження, ймовірність одночасної дії яких оцінюється статистично) та функціонально пов'язані (наприклад, вага і габарити вантажу, що впливають на динаміку повороту крана). Взаємодія цих факторів може призводити до раптових змін навантажень на несучі конструкції крана, зокрема,

на вежу. Важливо зазначити, що аварії не завжди пов'язані з повним перекиданням крана; часто вони відбуваються через втрату стійкості окремих елементів вежі під дією надмірних навантажень. До конструктивних особливостей крана слід віднести складність ферменної конструкції башти, її високу вітрову поверхню, складність розрахунку з'єднання башти з основою крана, циклічність навантаження, в тому числі з урахуванням екстремальних впливів вітрових, вибухових, сейсмічних, і т. д. навантажень, що впливають на стійкість опору матеріалам і т. д. Вплив зазначених факторів та інших експлуатаційних станів і комбінацій навантажень на міцність і стійкість потребують проведення великого обсягу чисельних розрахунків. Застосовувані норми і методи розрахунку через принципові недоліки призводять зазвичай до необґрунтованого перевитрачання металу і подорожчання крану загалом, уповільнюють вдосконалення і створення нових високоефективних і надійних кранів. Усунути цих недоліки можна, наприклад із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки з програмним забезпеченням для автоматизованих розрахунків, які дозволяють застосовувати математичне моделювання, що значно підвищує якість розрахунків та прискорює темпи проектування. У роботі для дослідження розглядалася 3D-моделі конструкцій різних типів баштових кранів. Оскільки баштовий кран є модульною конструкцією, для підготовки моделі необхідно окремо створити стрижневі моделі основних елементів конструкції крана: портал, оголовка, секцій башти та стріли. Отримані таким чином моделі є вихідними для створення баштового крана даного типу і дозволяють в короткий термін підготувати повну модель баштового крана для розрахунку міцності.

Через складність аналізу таких конструкцій, як опорні рами баштових кранів (особливо біля ОПП) методами будівельної механіки, для їх розрахунку було використано програмне забезпечення (SolidWorks, ANSYS тощо), що реалізує метод скінченних елементів. Цей метод дозволяє розбити конструкцію на елементи, задати властивості матеріалу та граничні умови для кожного з них. Для цього були розроблені розрахунково-динамічні моделі різних типів баштових кранів:

- баштовий кран, з поворотною вежею, на прикладі КБ401 та КБ403 (рис.5)
- баштовий кран, з неповоротною вежею, на прикладі Potain MCi 85 (рис.6)

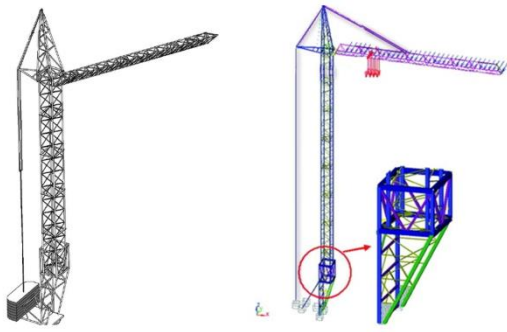


Рис. 5. Розрахунково-динамічна модель баштового крана, з поворотною баштою, на прикладі КБ-403.

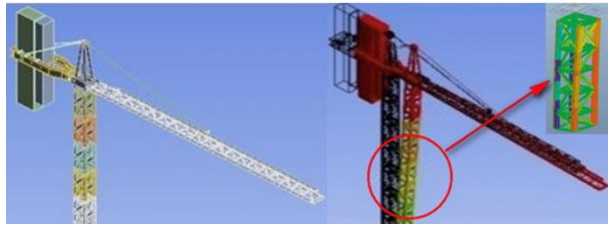


Рис. 6. Розрахунково-динамічна модель баштового крана, з неповоротною баштою, на прикладі Potain MCi 85.

Розрахунки проводилися для найнебезпечніших навантажених станів, з огляду на те, що з роботи на баштовий кран діють різні зовнішні навантаження.

Насамперед це навантаження від ваги вантажу, що піднімається. Чисельне значення кожної моделі вибиралися за графіком вантажопідйомності залежно від вильоту стріли. При повороті стріли від дії сил інерції вантажу виникає бічна складова навантаження, яка враховується завданням можливого максимального кута відхилення вантажного каната від вертикалі. Динамічне навантаження, викликане прискоренням при відриванні вантажу землі, враховувалася запровадженням коефіцієнта динамічності. Визначення динамічних навантажень несучих конструкцій здійснювалося на базі програми ANSYS за допомогою використання методу скінченних елементів. При цьому враховувався досвід проведення досліджень для баштових кранів з поворотною вежею в роботах [17,24]. Сумарне навантаження від ваги вантажу, що піднімається, прикладалося у вигляді зосереджених сил у точках контакту коліс візка з нижнім поясом стріли.

Бічне навантаження від вітру (вітрове навантаження) задавалася як рівномірно розподілена по нижньому поясу стріли і стоякам вежі, що мають найбільший поперечний і поздовжній переріз. Розкоси були виконані з круглої труби меншого перерізу і мали нижчий аеродинамічний опір.

Для врахування власної ваги (визначення координат центрів ваги основних вузлів та

конструкції машини) обов'язковими для введення вихідними даними є параметри матеріалу та перерізу елементів.

При навантаженні вважалося, що вітрове навантаження та інерційне навантаження, яке виникає при повороті вежі, діють одночасно в одному напрямку, що відповідає найбільш несприятливому сценарію.

Для оцінки інерційних навантажень від вітру на баштові крани прийнято фіксовану миттєву швидкість вітру з періодом близько декількох секунд. Зазначимо, що з оцінки резонансних явищ необхідно реєструвати миттєву швидкість з певним кроком. А система управління динамічною стійкістю має бути адаптована на обробку миттєвих швидкостей та середніх значень, що отримуються на їх основі. Вибір періоду реєстрації миттєвої швидкості вітру обумовлений інерцією об'єкта, на який впливає вітрове навантаження, вирішуваним завданням і можливостями вимірювальною апаратурою.

Після проведення комплексу підготовчо-розрахункових заходів дані було узагальнено та зроблено аналіз отриманих результатів.

Система ANSYS має широкий спектр можливостей щодо виведення результатів. Кольорові карти розподілу напружень і деформацій, внутрішніх зусиль і коефіцієнтів запасу плинності дозволяють дуже точно і швидко визначати в конструкції небезпечні місця. Крім того, програма дозволяє розглянути перетин елементів, побачити розподіл навантаження і внутрішні зусилля, що виникають.

Було проведено аналіз комп'ютерних моделей різних типів баштових кранів (з поворотною та неповотною вежею) за однакових вхідних навантажень. Зокрема, досліджувалися перехідні процеси під час повороту стріли з вантажем. Результати показали, що максимальний кут відхилення вантажу, зафіксований на крані з поворотною вежею, перевищує аналогічний показник для крана з неповотною вежею на 30-35%. Це свідчить про більшу схильність кранів з поворотною вежею до розгойдування вантажу при повороті стріли. Необхідно відзначити, що при підвищенні кута відхилення понад 2° за показаннями на приладі безпеки (сигналізує граничний кут відхилення вантажу) машиніст повинен робити дії з уповільнення повороту без різкого гальмування протиразу повороту після чого відбувається різке згасання коливань вантажу.

Для перевірки адекватності отриманих теоретичним шляхом наукових результатів були виконанні експериментальні дослідження. Однак, на сьогоднішній день проведення експериментальних досліджень на реальних кранах є досить

суттєвою проблемою. Це пов'язано складністю монтажу відповідного реєструючого обладнання, впливу на працездатність крана та економічні втрати від простою, а також з вимогами погодження процесів та дотримання техніки безпеки. Тому на даному етапі досліджень для вирішення цієї проблеми були використані чисельні та лабораторні (на зменшених моделях) експерименти.

Керування рухами механізмів лабораторної установки на базі баштового крана КБ-403 (рис.7) у масштабі 1:20, проводилося за допомогою розробленої комп'ютерної програми [25]. Отримані в ході експериментів дані оброблені за допомогою методів математичної статистики. На основі проведених досліджень обґрунтовано будову системи автоматичного керування механізмами баштового крана та запропоновано правила її функціонування.

Для підвищення стійкості та міцності металоконструкцій баштового крана була розроблена і запропонована конструкція баштового крана з компенсацією навантажень за допомогою кронштейна з протигаю.

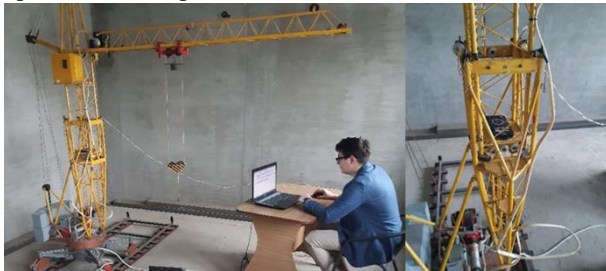


Рис. 7. Лабораторна експериментальна модель баштового крана, з поворотною вежею КБ-403А (у масштабі 1:20) та встановлення датчика рівня, біля основи вежі

З використанням методів математичного моделювання було розроблено алгоритм управління протигаю залежно від режиму роботи крана, маси вантажу, вильоту вантажної каретки, вітрового навантаження та ін. Подальший розвиток конструкції крана включає в себе: вдосконалення методів математичного моделювання його динаміки; обґрунтування вибору та збір контрольованих параметрів (швидкість вітру за допомогою анемометра, кути нахилу основи та оголовка вежі за допомогою гіроскопів, навантаження на кожну стійку вежі); та використання цих даних для розробки більш досконалої системи керування рухомою протигаю.

На основі даних, отриманих на лабораторному стенді, планується проведення натурних експериментальних досліджень. Їх метою є формування бази даних, яка, у свою чергу, буде використана для ретельної обробки експериментальних значень та побудови відповідних

спектрів даних, що характеризують поведінку системи.

Висновки

1. З аналізу стану питання виявлено, що забезпечення стійкості баштових кранів від комплексного впливу зовнішніх чинників є пріоритетним завданням наукових досліджень.

2. Застосування МКЕ з використанням можливостей комп'ютерної техніки та програмного забезпечення (наприклад, SolidWorks та ін.) спрощує розрахунок, дає можливість аналізувати різноманітні конструктивні виконання та варіанти навантаження, що дозволяє здійснювати якісну оцінку несучої здатності вежі вже на етапі проектування. Завдяки отриманим результатам встановлено, що використання метод скінченних елементів дає більш точні значення напруги, що виникають в металоконструкції баштового крана.

3. В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено можливість моделювання напруженого стану металоконструкції баштового крана, в режимі реального часу, за допомогою нейронної мережі та машинного навчання на підставі інформації, отриманої датчиками рівня та зусиль, встановлених на елементах вежі. Необхідно відзначити, що запропонована методика вимагає значних обчислювальних витрат на етапі адаптації до певної моделі баштового крана. Це пояснюється необхідністю визначення напруги методом скінченних елементів для великої кількості розрахункових випадків.

4. Експериментально підтверджено можливість використання тензометричних вимірювань для отримання інформації про напружено-деформований стан конструкції. Тривалий етап навчання нейронної мережі для обробки тензометричних даних компенсується високою швидкістю подальшого розрахунку напруження у контрольних точках.

5. Запропоновано пристрій для стабілізації стійкості баштового крана, за рахунок застосування рухомого (хитного) протигаю, яка дозволяє утримуючий вантажний момент регулювати в діапазоні $\pm 10\%$, що забезпечує стійкість баштового крана при додаткових зовнішніх навантаженнях (пориви вітру і та інше).

Література

1. Пахольок О. А., Чапюк О. С. *Забезпеченість українського ринку будівельної техніки вантажопідйомним обладнанням та його сервісним обслуговуванням. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць.* Луцьк: Луцький НТУ, 2020. Вип. 13. С. 71–85. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3\(13\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-09).

2. Будівельні та колійні машини. Ч. 2. Будівельна техніка : навч. посіб. / А. М. Кравець, А. В. Євтушенко, А. В. Погребняк та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2016. 274 с. ISBN 978-617-654-058-8.
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Голдун В. А., Крушельницький В. В. Динаміка та оптимальне керування рухом мостових кранів. Монографія. Київ, 2019. 460 с.
4. Feng R., Zhang E., Dong M. Jib vibration and payload swing of tower cranes in the case of trolley motion. *Arabian Journal of Science and Engineering*. 2021. Vol. 46, no. 12. P. 12179–12191. DOI: <https://doi.org/10.1007/S13369-021-05804-3>.
5. Rubio-Avila J. J., Alcantara-Ramirez R., Jaimes-Ponce J., Siller-Alcala I. I. Design, construction, and control of a novel tower crane. *International journal of mathematics and computers in simulation*. 2007. Vol. 1, iss. 2.
6. Augustyn M., Barski M., Chwał M., Stawiarski A. Experimental and Numerical Estimation of the Aerodynamic Forces Induced by the Wind Acting on a Fast-Erecting Crane. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 19. P. 10826. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131910826>.
7. Jin L., Liu H., Zheng X., Chen S. Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. DOI: 10.1155/2020/2807438.
8. Кльон А. М., Третьяк 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. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.042.
9. Пічугін С. Ф. Тенденції розвитку норм вітрового навантаження на будівельні конструкції. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць. Луцьк : Луц. НТУ, 2022. Вип. 18. С. 98–116. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12.
10. Chen W., Qin X. R., Yang Z., Zhan P. Wind-induced tower crane vibration and safety evaluation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration & Active Control*. 2020. Vol. 39. P. 297–312. DOI: <https://doi.org/10.1177/1461348419847306>.
11. Monteiro F. A., Moreira R. M. A CFD Analysis of Wind Effects on Lifted Loads. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2019. Vol. 6, no. 11. P. 1336. URL: <https://journal-repository.com/index.php/ijaers/article/view/1336> (дата звернення: 29.05.2024).
12. Jin L., Liu H., Zheng X., Chen S. Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. 2807438.
13. Nguyen T. K. Combination of feedback control and spring-dumper to reduce the vibration of crane payload. *Archives of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 68. P. 165–181.
14. Augustyn M., Barski M. Numerical and Analytical Estimation of the Wind Speed Causing Overturning of the Fast-Erecting Crane—Part II. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 11. P. 4694. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114694>.
15. Іваненко О. І., Щербак О. В., Любімов Ю. Ю. Комп'ютерне моделювання стійкості на моделі баштового крану на основі визначення опорних реакцій. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2020. № 18. URL: <http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf> (дата звернення: 29.05.2024).
16. Hric S., Tkac J., Matiskova D., Micko M. Preliminary analysis of tower crane as a type of truss structure. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 299. 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929903003>.
17. 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. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.118.
18. 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.
19. 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>.
20. Kenan H., Azeloglu O. Seismic performance analysis of tower crane mast types with different bracing configurations. *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 286–302. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.07.052.
21. Zeng G., Chen K., Wang Y. et al. Stress and strain analysis and parameter optimization of pipe truss tower connection of super-large tower crane based on FEM. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 3670. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54351-y>.
22. Gerdemeli I., Kurt S., Deliktas O. Finite Element Analysis of the Tower Crane. 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology Proceedings". 2010. TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September 2010. P. 561-564.
23. Pristýák A. Analysis of dynamic loads of the lattice type mast structure of a tower crane using simulation method. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 1997. Vol. 25, no. 1-2. P. 103–113.
24. Чисельний експеримент з динаміки роботи баштового крану / В. О. Коваленко, О. О. Коваленко, В. В. Стрижак, О. М. Вудвуд, А. Ю. Васильєв, М. Г. Стрижак. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобілебудування: зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2023. № 1. С. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.02>.*
25. Стефанов В. О., Дзержинський І. В. Керування стійкістю баштового крана за допомогою використання штучного інтелекту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. № 210. С. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320673>.

References

1. Pakholiuk, O. A., & Chapiuk, O. S. (2020). Supply of the Ukrainian market of construction equipment with lifting equipment and its service. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 13, 71–85. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3\(13\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-09)
2. Kravets, A. M., Yevtushenko, A. V., Pohrebniak, A. V., et al. (2016). Construction and track machines. Part 2. Construction equipment. UkrDUZT. ISBN 978-617-654-058-8
3. Loveykin, V. S., Romasevych, Y. O., Holdun, V. A., & Krushelnitskyi, V. V. (2019). Dynamics and optimal control of overhead crane motion. Monograph. Kyiv. 460 p.
4. Feng, R., Zhang, E., & Dong, M. (2021). Jib vibration and payload swing of tower cranes in the case of trolley motion. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 46(12), 12179–12191. <https://doi.org/10.1007/S13369-021-05804-3>
5. Rubio-Avila, J. J., Alcantara-Ramirez, R., Jaimes-Ponce, J., & Siller-Alcala, I. I. (2007). Design, construction,

- and control of a novel tower crane. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 1(2).
6. Augustyn, M., Barski, M., Chwał, M., & Stawiarski, A. (2023). Experimental and Numerical Estimation of the Aerodynamic Forces Induced by the Wind Acting on a Fast-Erecting Crane. *Applied Sciences*, 13(19), 10826. <https://doi.org/10.3390/app131910826>
 7. Jin, L., Liu, H., Zheng, X., & Chen, S. (2020). Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/2807438>
 8. Klon, A. M., & Tretiak, A. V. (2022). Determination of wind load on a tower crane according to GOST 1451-77 and DBN V.1.2-2:2006. *Control, Navigation and Communication Systems*, 4(70), 42–44. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.042>
 9. Pichuhin, S. F. (2022). Trends in the development of wind load standards for building structures. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 18, 98–116. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12)
 10. Chen, W., Qin, X. R., Yang, Z., & Zhan, P. (2020). Wind-induced tower crane vibration and safety evaluation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration & Active Control*, 39, 297–312. <https://doi.org/10.1177/1461348419847306>
 11. Monteiro, F. A., & Moreira, R. M. (2019). A CFD Analysis of Wind Effects on Lifted Loads. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6(11). <https://journal-repository.com/index.php/ijaers/article/view/1336>
 12. Jin, L., Liu, H., Zheng, X., & Chen, S. (2020). Exploring the Impact of Wind Loads on Tower Crane Operation. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2807438.
 13. Nguyen, T. K. (2021). Combination of feedback control and spring-dumper to reduce the vibration of crane payload. *Archives of Mechanical Engineering*, 68, 165–181.
 14. Augustyn, M., & Barski, M. (2024). Numerical and Analytical Estimation of the Wind Speed Causing Overturning of the Fast-Erecting Crane—Part II. *Applied Sciences*, 14(11), 4694. <https://doi.org/10.3390/app14114694>
 15. Ivanenko, O. I., Shcherbak, O. V., & Liubimov, Yu. Yu. (2020). Computer modeling of stability on a tower crane model based on the determination of support reactions. *Scientific Bulletin of Dahl University*, (18). <http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf>
 16. Hric, S., Tkac, J., Matiskova, D., & Micko, M. (2019). Preliminary analysis of tower crane as a type of truss structure. *MATEC Web of Conferences*, 299, 03003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929903003>
 17. Ivanenko, O. I., Shcherbak, O. V., Krupko, I. V., & Chetverikov, V. S. (2023). Investigation of the distribution of support loads of a tower crane using computer simulation. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 101(1), 118–125. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.118>
 18. Ivanenko, O. I., Krupko, I. V., & Yermakova, S. O. (2020). Theoretical studies of tower crane stability taking into account the distribution of loads on supports. *Lifting and transport equipment*, 3(64), 81–95.
 19. Horbatiuk, Ye., & Bulavka, O. (2024). Review and analysis of damages and existing protection systems of tower cranes under the influence of a blast wave. *Automobile transport*, (53), 13–22. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.02>
 20. Kenan, H., & Azeloglu, O. (2021). Seismic performance analysis of tower crane mast types with different bracing configurations. *Structures*, 34, 286–302. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.052>
 21. Zeng, G., Chen, K., Wang, Y., et al. (2024). Stress and strain analysis and parameter optimization of pipe truss tower connection of super-large tower crane based on FEM. *Scientific Reports*, 14, 3670. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54351-y>
 22. Gerdemeli, I., Kurt, S., & Deliktas, O. (2010). Finite Element Analysis of the Tower Crane. *14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology Proceedings"*, 561-564.
 23. Pristýák, A. (1997). Analysis of dynamic loads of the lattice type mast structure of a tower crane using simulation method. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 25(1-2), 103–113.
 24. Kovalenko, V. O., Kovalenko, O. O., Stryzhak, V. V., Vudvud, O. M., Vasyliiev, A. Yu., & Stryzhak, M. H. (2023). Numerical experiment on the dynamics of tower crane operation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automotive engineering*, (1), 12–26. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.02>
 25. Stefanov, V. O., & Dzerzhynskiy, I. V. (2024). Tower crane stability management using artificial intelligence. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (210), 7–18. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320673>

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.В. Воронін, Український державний університет залізничного транспорту, Україна.

Автор: ДЗЕРЖИНСЬКИЙ Ігор Віталійович
аспірант кафедри машинобудування та технічного
сервісу машин Українського державного
університету залізничного транспорту.
E-mail - dzerzhynskiy@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7188-2948>

Автор: СТЕФАНОВ Володимир Олександрович,
Кандидат технічних наук, доцент кафедри
машинобудування та технічного сервісу машин
Українського державного університету
залізничного транспорту
E-mail - vstef@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7947-2718>

EXPLORING THE STABILITY OF TOWER CRANES AND METHODS FOR IMPROVING THEIR OPERATIONAL SAFETY

I. Dzerzhynskiy, V. Stefanov

Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, Ukraine

This article delves into the critical issue of stability in different types of tower cranes, specifically comparing those with rotating (slewing) towers and those with non-rotating (top-slewing) towers. It explores various methods

to enhance the operational safety of these essential construction machines. Tower cranes, while indispensable in modern construction and heavy industries, are inherently susceptible to stability-related accidents due to their height, slenderness, and the dynamic nature of the loads they handle. This study comprehensively analyzes the influence of structural characteristics, operational loads, and a range of external forces on crane stability. The research explores factors such as wind loading, dynamic forces generated during operation (e.g., load swing, sudden stops), and even more extreme events like impact waves.

The research methodology combines a thorough review of existing literature, standards, and regulations with advanced computational analysis and experimental validation. The literature review encompasses relevant standards, such as the EN 13001 series, Ukrainian national regulations, and research publications focusing on crane stability, dynamic load analysis, and safety improvement methods. This review identifies gaps in traditional calculation methods, particularly their limitations in accurately representing complex load combinations and the behavior of non-standard or modified crane configurations.

To overcome these limitations, the study leverages 3D modeling and finite element analysis using industry-standard software. Detailed models of both rotating and non-rotating tower cranes are developed, allowing for a precise simulation of stress distributions, deformation patterns, and potential failure points under various loading scenarios. These models incorporate the specific geometric parameters, material properties, and connection details of the cranes. The finite element analysis approach allows for a significantly more accurate assessment of stress concentrations, particularly in critical areas such as the tower-to-base connection, compared to traditional methods of structural mechanics.

The comparative analysis highlights key differences in the stability characteristics of the two crane types. The location of the center of gravity, the response to dynamic loads (especially during slewing operations), and the impact of wind forces are meticulously examined. The findings indicate that cranes with rotating towers exhibit a larger degree of load sway and potentially greater vulnerability to certain types of dynamic instability.

To validate the theoretical and computational findings, experimental studies are conducted using a scaled-down (1:20) laboratory model of a KB-403 tower crane. A custom-designed computer program controls the model's movements, allowing for the precise simulation of various operational scenarios and the collection of empirical data on crane behavior.

Based on the combined theoretical, computational, and experimental results, the research proposes a novel design concept: a tower crane with a load-compensating mechanism using a movable counterweight. The study outlines an algorithm for controlling the position of this counterweight, dynamically adjusting it based on real-time sensor data (load weight, jib extension, wind speed and direction, tower inclination, and stress levels in critical components). Furthermore, the article explores the potential integration of artificial intelligence and machine learning techniques to create an adaptive control system for enhanced stability. This system would utilize data from a network of sensors to predict and mitigate potential instability issues in real-time. The importance of ongoing data collection and continuous refinement of the artificial intelligence models is emphasized to ensure long-term reliability and effectiveness.

Keywords: tower crane, building mechanics, constructions, safety, stability, external loads.