

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

МАКАРОВ АНДРІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 624.042

**ДИНАМІЧНІ РОЗРАХУНКИ, ВИПРОБУВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВЕЛИКОПРОГОНОВИХ
МОСТОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Кулябко Володимир Васильович,
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури»,
професор кафедри металевих, дерев'яних
та пластмасових конструкцій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук **Редченко Василь Павлович**, Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна», завідувач Дніпропетровського комплексного відділу;

доктор технічних наук, професор **Банах Віктор Аркадійович**, Запорізька державна інженерна академія, завідувач кафедри міського будівництва і господарства.

Захист відбудеться «26» листопада 2015 р. о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-а.

Автореферат розісланий « 23» жовтня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., професор



С. О. Слободянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У гірничо-металургійному комплексі, хімічній і енергетичній галузях експлуатуються грейферні мостові перевантажувачі для навантаження і розвантаження різних сипучих матеріалів. Ці довгомірні крани-перевантажувачі (довжина моста крана - більше 140 м, маса досягає 700-1000 т) встановлені на відкритому повітрі та сприймають агресивні дії від різних технологічних процесів виробництва. У таких умовах виникають певні дефекти і пошкодження, які посилюються при пересуваннях (до 15 км/год) багатотонного візка (масою до 150 т) та викликають істотні коливання сталевих конструкцій. Ці вібраційні процеси призводять до різних ушкоджень несучих конструкцій крана, строк служби яких і визначає (за нормами) строк служби крана.

Рекомендації різних норм по періодичності обстежень і строку служби кранів сильно розрізняються (12 - 25 років). Купівля і монтаж нового перевантажувача займають до двох років та потребують інвестицій близько 6 млн. доларів США.

Існують також труднощі, пов'язані з проведенням обстежень - з тривалою зупинкою крана на цей час (один кран за годину перевантажує 300-600 т). У технічній літературі дуже рідко зустрічаються ефективні методики діагностики, розрахунки з використанням коректних моделей з великим числом динамічних ступенів вільності. Відсутні кількісні характеристики за власними, вільними і вимушеними коливаннями різних кранів з основним технологічним циклом: 1 - рух візка до вантажу по нерівножорсткій колії (з розгонами та гальмуваннями); 2 - робота грейфера (опускання, набір вантажу, підйом); 3 - рух візка з вантажем; 4 - висипання вантажу.

Таким чином, комплексні дослідження динаміки перевантажувачів, необхідність прискорення обстежень з теоретичним прогнозуванням місць можливих пошкоджень є актуальним завданням проектування та експлуатації кранів-перевантажувачів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в рамках науково-дослідної тематики кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (ДВНЗ «ПДАБтаА»): «Удосконалення методів розрахунку, конструювання та діагностики технічного стану металевих та дерев'яних конструкцій» (№ державної реєстрації 0106U002021) та «Удосконалення методів розрахунку, конструювання і діагностики технічного стану конструкцій будівель і споруд при статичних та динамічних навантаженнях» (№ державної реєстрації 0113U000128) у 2010-2014 рр., рівень участі дисертанта – виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є комплексний аналіз динамічних характеристик просторових несучих металоконструкцій мостових перевантажувачів з розвитком методик динамічних розрахунків кранів (виявлення зв'язку частот і форм власних коливань з можливими ушкодженнями) і динамічних натурних випробувань, із розробкою пропозицій щодо динамічної діагностики та паспортизації споруди.

Сформульована мета роботи зумовила необхідність вирішення таких задач:

- аналіз і класифікація відомих із літератури аварій і пошкоджень, а також методик розрахунків і випробувань кранів-перевантажувачів при основних технологічних режимах;

- проведення динамічних розрахунків просторової стержневої моделі кранів чисельними методами: спочатку при фіксованих положеннях візка провести аналіз декількох нижчих частот і форм власних коливань, потім - розрахунок в часовій області на рухоме навантаження з урахуванням статико-динамічної взаємодії моста крана і рухомого вантажного візка;

- отримання експериментальних даних щодо коливань несучих металокопструкцій моста крана в натурних умовах шляхом проведення випробувань при різних технологічних режимах його роботи;

- розробка рекомендацій щодо складання спрощених інженерних динамічних моделей перевантажувача: для розрахунків власних і вимушених коливань; для розрахунків на рухоме навантаження; для пошуку способів зниження амплітуд коливань (пропозиції щодо конструкцій гасника коливань) і тощо;

- застосування методу динамічної діагностики та паспортизації для інтегральної оцінки та моніторингу технічного стану конструкцій перевантажувачів, для порівняння результатів розрахунків і натурних випробувань, для теоретичного прогнозування місць можливих проявів пошкоджень.

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан (НДС) основних несучих металокопструкцій грейферного мостового крана-перевантажувача при динамічних навантаженнях.

Предмет дослідження – динамічні характеристики (частоти, форми і амплітуди коливань та ін.) несучих металокопструкцій при експлуатаційних динамічних навантаженнях грейферного мостового перевантажувача та їх використання для паспортизації та пошуку пошкоджень.

Методи дослідження. Для аналізу НДС та математичного моделювання динамічних характеристик конструкцій застосовувалися: метод скінчених елементів (МСЕ) (з використанням ліцензованого програмного комплексу «Selena»); метод Рунге - Кутта 4-го порядку (в системі комп'ютерної алгебри «Maple») для вирішення диференціальних рівнянь руху (в часовій області) при взаємодії інерційного рухомого навантаження і інерційного моста; методи динамічної діагностики та вібродинамічного обстеження будівельних конструкцій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- *вперше* на підставі комплексних (теоретичних і експериментальних) досліджень встановлено зв'язок параметрів (частот і форм) власних коливань просторової моделі несучих конструкцій перевантажувача з основними варіантами можливих пошкоджень; для ґратчастої схеми дана методика побудови та фрагменти «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми» шляхом умовного виключення певного елемента з роботи;

- удосконалено розроблення спрощених моделей перевантажувача, які призначені для інженерного оперативного аналізу статички і динаміки моста, опор крана, проведення прискорених розрахунків (*вперше* для перевантажувача), розрахунку і конструювання демпфіруючих пристроїв, у тому числі з нелінійними характеристиками (отримано патент на корисну модель з пристроєм перетворення руху для динамічного гасника першої форми власних коливань перевантажувача);

- проведено натурні випробування і теоретичні розрахунки перевантажувачів різних типів, які дозволили отримати *вперше* для таких кранів динамічні

характеристики при основних технологічних режимах роботи і підтвердити достовірність повних та спрощених розрахункових моделей;

- *вперше* для перевантажувача вирішена проблема моделювання в часовій області динамічної взаємодії інерційних конструкцій мосту з візком - як інерційним рухомим навантаженням (з вирішенням диференціальних рівнянь руху зі змінними коефіцієнтами);

- отримані комплексні дані на момент випробувань, зібрані в динамічні паспорти для конкретних просторових механічних систем перевантажувачів трубчасто-балочного типу з теоретичними та експериментальними даними про динамічні характеристики крана по основним формам (при різному розташуванні вантажного візка - отримали подальший розвиток).

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика динамічного обстеження конструкцій перевантажувачів із складанням їх динамічних паспортів не тільки систематизує інформацію про стан конструкцій, але і робить більш ефективним і швидким процес їх обстеження. Наприклад, по зміні частоти і форми власних коливань можна визначати можливе місце розташування зруйнованого елемента. Застосування інженерних динамічних моделей для вирішення задач про рухоме навантаження і прогасіння коливань за допомогою динамічного гасника коливань (ДГК) дозволить розрахувати динамічні характеристики та НДС за більш коректними схемами, що, в свою чергу, дозволяє знизити рівень динамічних напружень у конструкціях, а також забезпечити працездатність приладів та обладнання, заданий рівень комфорту для машиністів. Результати роботи і методики прийняті до впровадження в проектну практику ТОВ Проектний інститут «Дніпропроектстальконструкція» і в ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Е. Дзержинського» для зниження амплітуд коливань, запобігання аварій та паспортизації несучих металоконструкцій перевантажувачів. Також результати роботи впроваджено в навчальний процес ДВНЗ «ПДАБтаА».

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень, наведені в дисертаційній роботі, були отримані автором самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному:

- у проведенні динамічних розрахунків споруди з урахуванням впливу різного коефіцієнта непружного опору [1];
- у проведенні аналітичного огляду літератури [2];
- у моделюванні основних просторових форм перевантажувача і його розрахунку на вимушені коливання [3];
- у розрахунку на рухоме навантаження [4, 10];
- у проведенні експериментальних досліджень, обробці отриманих результатів [6];
- у застосуванні динамічного моніторингу для контролю динамічних характеристик перевантажувача [9, 11];
- у розробці ДГК для гасіння амплітуд коливань перевантажувача [12].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися, були обговорені і опубліковані на таких конференціях: XV Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2007 р.); II міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності людини, як умова сталого розвитку сучасного

суспільства» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» (м. Київ, 2007 р.); II Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми теорії споруд, проектування, будівництва та експлуатації мостів» (м. Київ, 2008 р.); наукова сесія «Нове в дослідженні та проектуванні просторових конструкцій» (м. Москва, 2008 р.); «Проблеми використання інформаційних технологій у сфері освіти, науки та промисловості» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.); X Міжнародний симпозіум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (м. Івано-Франківськ, 2014 р.); I Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерні системи та інформаційні технології в освіті, науці та управлінні» (м. Дніпропетровськ, 2014 р.).

У повному обсязі закінчена дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій ДВНЗ «ПДАБтаА» (січень 2015 р.).

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковано у 13 наукових працях, які відображають її основний зміст, в тому числі: 7 статей у наукових фахових виданнях України (з них 2 статті без співавторів), 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави, яка входить в міжнародну наукометричну базу Scopus, 1 стаття в спеціалізованому виданні, яке включене в міжнародну наукометричну базу РІНЦ (без співавторів), 2 статті - в іншому виданні, 1 публікація тез доповіді на міжнародній науково-технічній конференції, 1 патент на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 198 найменувань та двох додатків. Дисертація містить 16 таблиць і 69 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 174 сторінки, з яких: 134 сторінок основного тексту, 9 повних сторінки рисунків та таблиць, 22 сторінка списку використаних джерел і додатків на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано цілі та задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію і публікації.

У **першому розділі** проаналізована технічна література і методики розрахунків металоконструкцій мостових перевантажувачів (рис. 1), їх обстежень і випробувань.

Дослідження мостових перевантажувачів проводились у багатьох країнах. Зокрема, в країнах СНД - вони проводилися у ВНІДПТМАШі, в проектних інститутах ЦНДІ «Проектстальконструкція» і «Дніпропроектстальконструкція» та «ПромбудНДІпроект», в Московському державному технічному університеті імені М. Е. Баумана, у Санкт-Петербурзькому і Харківському політехнічних університетах, в Уральському державному технічному університеті та в інших науково-дослідних і навчальних закладах (наприклад, у ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, ДВНЗ «ПДАБтаА»). У більшості випадків ці дослідження проводилися в співдружності з працівниками промислових підприємств (Уральський завод важкого машинобудування, Сибірський завод важкого машинобудування,

Новокраматорський машинобудівний завод, завод підйомно-транспортного обладнання ім. С. М. Кірова та ін.).



Рис. 1. Грейферні мостові перевантажувачі (гратчастий і трубчасто-балковий)

Існує відносно небагато книг з динамічних розрахунків металоконструкцій вантажопідіймальних кранів. Серед авторів відзначимо таких: І. І. Абрамович, В. П. Балашов, Л. Я. Будик, П. Є. Богуславський, А. А. Вайнсон, М. М. Гохберг, О. І. Дукельський, С. А. Козак, А. А. Комаров, М. С. Комаров, М. О. Лобов, А. Б. Парніцкій, М. І. Стукаленко та ін. За кордоном динаміка мостових кранів описана в працях Gary J. Davis, D. M. Dawson, W. E. Dixon, Y. Fang, R. Ghazali, L. Marsh, N. Miyata, K. Radlov, A. Saedian, J. M. Wang, V. Gašić, A. Obradović та ін.

Нормативна база проектування металоконструкцій безпосередньо мостових перевантажувачів з'являється з 1962 р. - «Вказівки з проектування сталевих конструкцій кранів-перевантажувачів». Відзначимо також РТМ 24.090.62-81 і РД 24.090.120-07, Єврокод 3 (EN 1993), ДБН і ДСТУ - з будівельних конструкцій.

В останні роки крани-перевантажувачі виготовляли в Україні (м. Маріуполь, на ПАТ «Азовмаш», м. Одеса, м. Краматорськ), Російській Федерації, Німеччині («Bleichert», «Demag», «MAN»), Фінляндії («KONECRANES NORDIC CORPORATION» - перевантажувачі шпренгельно-балочної конструкції).

Після закінчення строку служби крана проводяться експертні обстеження з частотою раз на рік (РД 10-112-5-97), не рідше 2 років (ОМД 0120253.001-2005). Зауважимо, що актуальному питанню визначення залишкового ресурсу кранів присвячені роботи В. В. Болотіна, О. В. Григорова, А. О. Дубова, А. О. Немчука, В. М. Пустового, В. О. Ряхіна, та ін. Частково допомагають оцінити технічний стан методи неруйнівного контролю металевих конструкцій: акустичний, акустико-емісійна діагностика, магнітний (виділимо аналіз коерцитивних сил), вихрострумний, капілярний (виявлення втомних тріщин) і, звичайно, вібраційний. Також внесок у розвиток методики і теорії експерименту споруд внесли роботи М. М. Аістова, К. І. Давиденкова, С. А. Душечкина, А. М. Ємельянова, С. А. Ільясевича, Л. С. Максимова, І. М. Рабиновича, М. С. Стрілецького та ін.

Вивчення динамічних розрахунків конструкцій і споруд на динамічні дії проводили В. А. Банах, Л. А. Бородин, Б. Г. Коренев, Й. Л. Корчинський, А. І. Маневич, Л. М. Резніков та ін. Теорія лінійних і нелінійних коливань описана в працях І. М. Бабакова, В. Л. Бідермана, В. Л. Крупенина, Я. Г. Пановка, С. П. Тимошенка, А. П. Філіпова, J. P. Den Hartog та ін. Динамічна взаємодія рухомого навантаження з конструкціями прогонових будов мостів розглянута в

роботах А. Г. Барченкова, М. Г. Бондаря, С. А. Ільєсевича, М. І. Казакевича, В. П. Редченка та ін. А також у школі академіка В. А. Лазаряна (ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, ІТМ НАНУ). Наприклад, І. І. Давидов і В. В. Кулябко застосовували для розрахунків нелінійних коливань взаємодії споруди з рухомим навантаженням прямий динамічний метод у формі «методу прямих».

Але ще мало праць щодо: вимірювання динамічних навантажень при специфічних технологічних операціях перевантажувачів; уточнення динамічних розрахунків; створення спрощених інженерних моделей і теоретичного прогнозування стану конструкцій крана; пошуку ушкоджень та зниження амплітуд коливань. Вітчизняні програмні комплекси не дозволяють досліджувати динамічну взаємодію споруди з рухомим навантаженням при врахуванні інерційності мас моста та візка, а також нелінійну поведінку споруди у часовій області.

На підставі проведеного аналізу були сформульовані мета і задачі досліджень, які наведені у вступі.

У **другому розділі** наводиться аналіз і деяка класифікація дефектів, пошкоджень та аварій металоконструкцій мостових перевантажувачів, відомих з літератури та особистого досвіду автора (брав участь у проведенні натурних обстежень більше 20 мостових перевантажувачів).

Загальним для всіх кранів спостерігалися два види майже «стандартних» пошкоджень: перший - тріщини в їзових балках і вироблення металу під подошвою рейки, другий - через рух вантажного візка проявляється істотне односпрямоване зміщення опор крана з балансирів в поздовжньому напрямку. Для перевантажувача ґратчастого типу найбільш характерні: ослаблення заклепувального поля; корозія вузлових фасонки головних ферм і консолю кріплення їзової балки; тріщини по основному металу в опорному підкосі; вигини горизонтальних в'язей головних ферм; виникнення втомних тріщин в елементах верхнього пояса, аж до руйнування, вплив стану кріплення рейки та ін. Для крана трубчасто-балочного типу – поперечні тріщини в трубі прогонової будови в місці кріплення до ригеля опори; тріщини в діафрагмах прогонової будови з розвитком її на основний метал труби; руйнування елементів ригеля біля опор, викликане перекошим навантаженням від взаємного зміщення опор; тріщини в поперечних балках; відсутність співвісності (у плані) внутрішньої діафрагми з кріпленням зовнішньої поперечної балки. Для крана шпренгельного типу – вироблення металу у верхньому поясі коробчастих балок від тертя рейки; корозійні втрати перерізу балок через утворення внутрішнього конденсату і зовнішніх агресивних середовищ; корозійні пошкодження вузлів шпренгельної системи та ін.

У роботі окремо виявлені дефекти, котрі можуть призвести до пошкоджень металоконструкцій і додаткового динамічного впливу, що не враховано нормами: стан підвізкової рейки (виколи в голівках; відсутність кріплення стиків; ослаблення притискних планок; тріщини в шийках і дефекти, що викликають неоднорідність підвізкової колії); відмова приладів безпеки (відсутність скидання швидкості пересування візка під час під'їзду до буферів; непрацездатність приладів контролю забігання опор і пружинних (гідравлічних) буферів для гасіння удару візка в тупик); зменшення габариту візка і конструкцій (тертя по їзовим балкам, удари по

стійкам); різні висотні позначки естакад (додається ефект закручування моста) або підвізкової рейки (призводить до однобічного скочування візка).

Також не враховано нормами реальне існування великих пилових відкладень на металоконструкціях, неякісне проведення ремонту, корозійні руйнування, несвоєчасний ремонт і очищення шляхів пересування перевантажувачів та ін.

Відомо, що аварійні стани виникають через сукупність багатьох факторів. На рис. 2 показані два випадки аварій крана, що викликані динамічними навантаженнями. При падінні консолі ремонтного приміщення трубчасто-балочного крана (рис. 2, а) обвалення було викликано розвитком тріщини в верхній (розтягнутій) пришвовій зоні сполучення труби моста з ригелем опори. Причина - сукупність поганої експлуатації та динамічних навантажень (виїзд візка на консоль, підйом і опускання грейфера, поштовхи від руху по рейковому шляху та ін.). Друга аварія - перевантажувача ґратчастого типу (повний розрив обох поясів головних ферм крана, рис. 2, б) була викликана розвитком втомної тріщини в місці ослаблення основного металу заклепувальним полем - у вузлі кріплення верхнього пояса головних ферм (по перерізу установки заклепок).



а



б

Рис. 2. Аварії мостових перевантажувачів

У нормах динаміка і витривалість конструкцій крана при навантаженнях мінімум від чотирьох гальмувань і розгонів в кожному циклі, та й самого руху візка, майже не враховується (крім квазістатичного «коефіцієнта динаміки», «призначеного» ще в минулому столітті і не підтвердженого сучасними дослідженнями).

Розрахунки за нормами трубчасто-балочного крана на власну вагу і умовне «квазістатичне динамічне навантаження» від руху візка показали, що найбільш навантаженими є елементи в місцях сполучення труби прогонової будови і опори. Автор у своїх дослідженнях цього крана за такою методикою отримав величини амплітуд циклічних напружень близько 18 МПа, причому цим коливанням відповідає амплітуда горизонтально-поздовжніх переміщення моста крана 15 мм на частоті близько 0,65 Гц. (Зазначимо, що прискорення при цьому досягають рівня $0,25 \text{ м/с}^2$, майже дискомфортного для тривалого перебування машиніста - за віброекологічними показниками).

Надалі, найбільшу увагу при аналізі розрахункових схем кранів (рис. 3) було звернено (не тільки на вертикальні коливання, які вивчалися багато років) на усі просторові низькочастотні форми, зокрема, з початку на поздовжньо-горизонтальну форму власних коливань (рис. 4, а). Ця форма коливань, як показали розрахунки та обстеження, викликається в кранах частіше за інші динамічні навантаження типу гальмування і розгін візка, що збігається з даними, отриманими і теоретичним шляхом, і фактом наявності відповідних пошкоджених ділянок конструкцій, виявлених при натурних обстеженнях.

У **третьому розділі** представлені дослідження розрахункових динамічних характеристик перевантажувачів різних типів з використанням програмного комплексу «Selena» (скінченно-елементні моделі, рис. 3). Дослідження велися на плоских і просторових статичних та динамічних моделях. Статичним розрахунком перевантажувача на різні робочі поєднання квазістатичних навантажень визначалися і досліджувалися максимальні напруження в різних групах металоконструкцій перевантажувача (з традиційними розрахунками впливу динамічних навантажень на НДС - з використанням умовних коефіцієнтів).

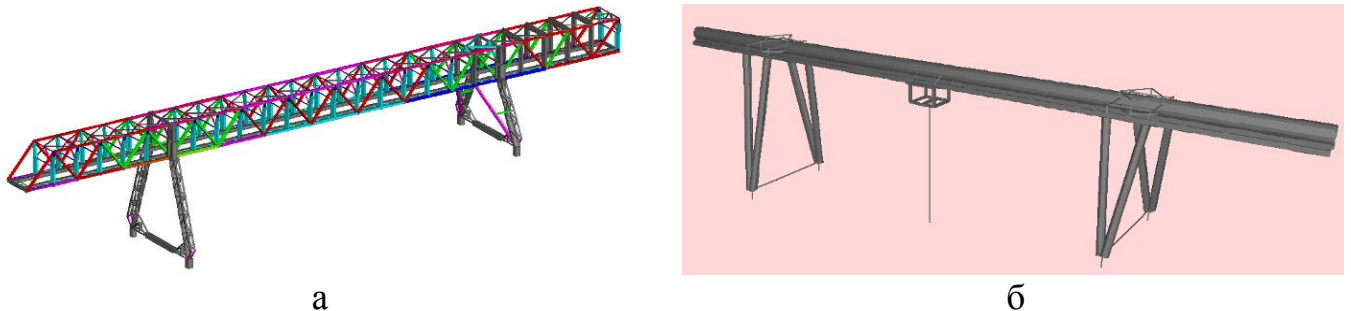


Рис. 3. Просторові розрахункові моделі перевантажувачів:
а) гратчастого типу; б) трубчасто-балочного типу

Для виявлення особливостей частот і форм власних коливань кранів розглядалися по 4 - 6 нижчих форм. На рис. 4 представлена вибірка чотирьох форм власних коливань двох досліджуваних кранів при розташуванні візка в середині прольоту. Виявилось, що конструкція цих двох кранів і положення грейферного візка майже не впливає на нижчу поздовжньо-горизонтальну форму з частотою близько 0,6 Гц. Друга і третя форми є поперечно-горизонтальними із закручуванням моста (частоти їх у гратчастого крана вище на 10 % і 35 % відповідно). Лише четверта є вертикальною формою власних коливань (в гратчастій вище частота на 22 %). Частота власних коливань горизонтальної і вертикальної форм істотно залежить від місця розташування грейферного візка на мосту крана (при установці візка над опорою вона збільшується приблизно на 20 %).

Розрахунок на гармонічні резонансні вертикальні коливання (силові в середньому перерізі моста) показав, що істотне збільшення тертя в опорах (у 10 разів вище, ніж тертя в прогоновій будові) знижує амплітуди вертикальних коливань в 7-8 разів. Така ж «зворотня операція» із зростанням тертя моста знижує амплітуди більш істотно, приблизно в 30 разів.

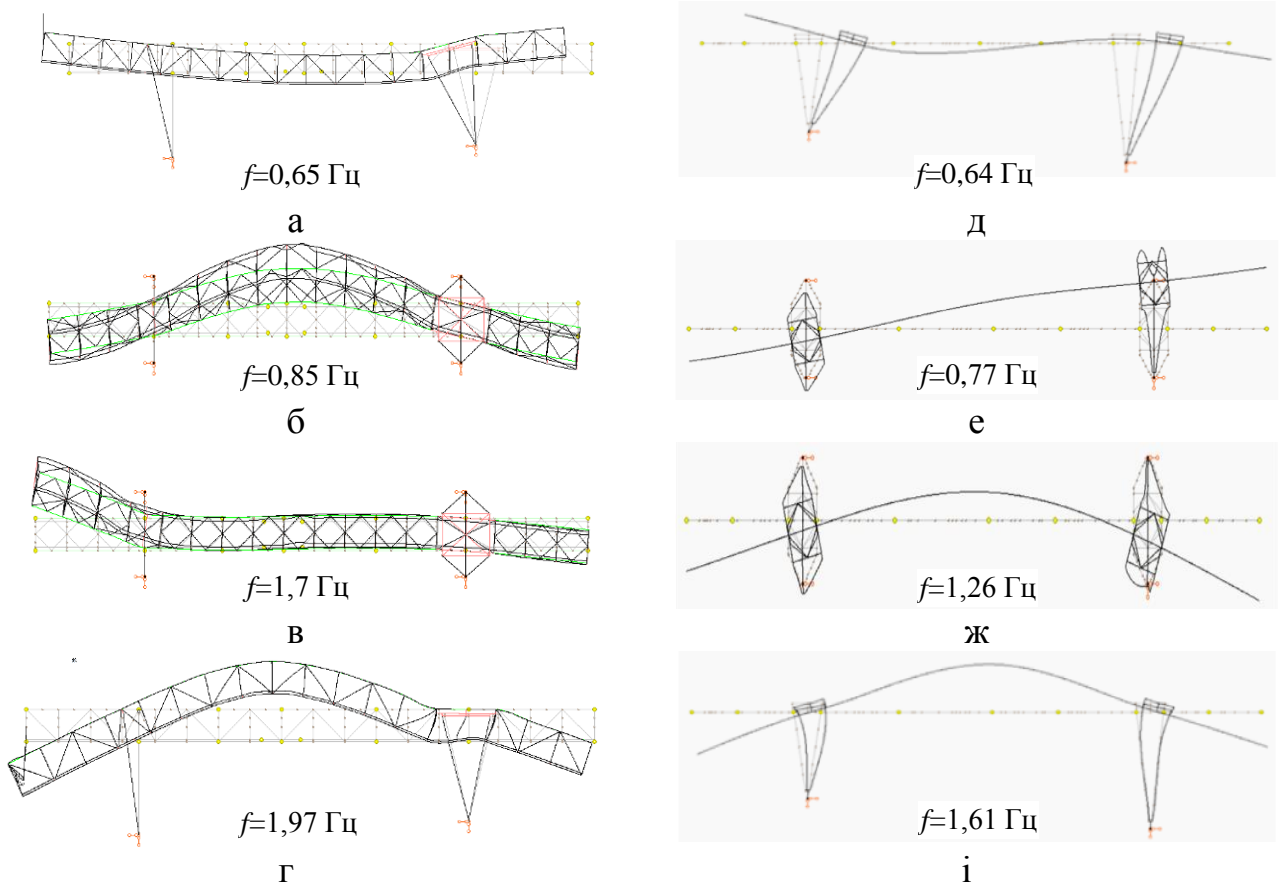


Рис. 4. Нижчі частоти і форми власних коливань гратчастого (ліворуч) і трубчасто-балочного (праворуч) перевантажувачів: а, д - поздовжньо-горизонтальні коливання у вертикальній площині перевантажувача; б, ж - поперечно-горизонтальні згинальні коливання з площини перевантажувача; в, е - горизонтальні коливання консолей для гратчастого і верхніх перетинів опор для трубчасто-балочного; г, і - вертикальні згинальні коливання крана у вертикальній площині

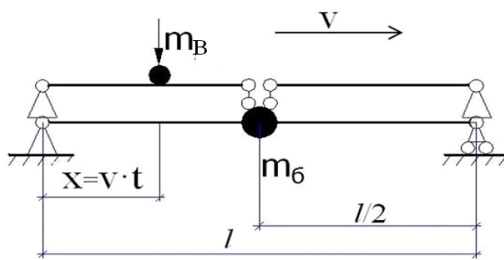
Підручники з будівельної механіки досі під терміном «розрахунок на рухоме навантаження» розуміють не динамічну взаємодію споруди та рухомого засобу, а статичне застосування так званих ліній впливу. У дослідженні динаміки мостових перевантажувачів застосуємо найбільш коректний четвертий тип моделей взаємодії за Я. Г. Пановко. Доцільно застосовувати, наприклад, такий шлях: скласти індивідуальну статико-динамічну модель, записувати диференціальні рівняння руху і вирішувати їх в часовій області за допомогою однієї із систем комп'ютерної алгебри, наприклад «Maple».

Проілюструємо методику врахування динамічної взаємодії на прикладі. Для розрахунку умовного крана без консолей ($l=60$ м) була прийнята спрощена модель вертикальних коливань по основному тону моста з одним ступенем вільності (по типу форм рис. 4 г, і), де маса балки m_b береться у вигляді зведеної до середнього перерізу половинної маси моста, а маса вантажного візка з вантажем m_v переміщається зі швидкістю v по балці (рис. 5 а, б, г). Амплітуда коливань мосту A_y залежить від його жорсткості r і коефіцієнта тертя β (підкреслимо, що шлях тут прийнятий ідеально гладким, а швидкість руху - постійною!). У рішенні диференціального рівняння (1) присутня змінна сумарна маса, яка змінюється за час

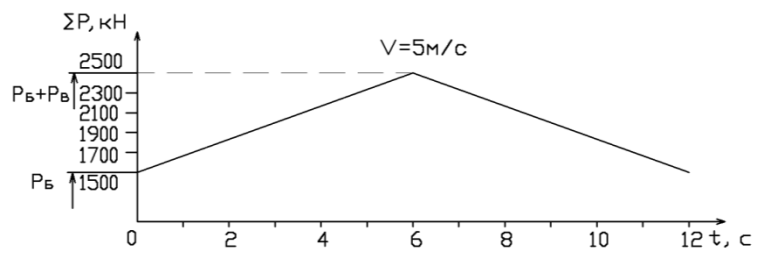
проходження вантажного візка (за принципом двох важелів – умовних балок верхнього ярусу, див. «принцип вузлової передачі навантаження на фермах»), а також їхні сили тяжіння ($P_6 = m_6 g$ та $P_6 = m_6 g$):

$$(m_6 + m_6) \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) + \beta \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) + r y(t) = P_6 + P_6. \quad (1)$$

При необхідності ці методики поширюються на багатомасові плоскі і просторові моделі кранів з консолями з урахуванням гальмування, розгонів, ударів об упори, нерівностей і нерівножорсткості колії та ін. (змінюються лише типи рівнянь і їх кількість, ускладнюються перехідні процеси).



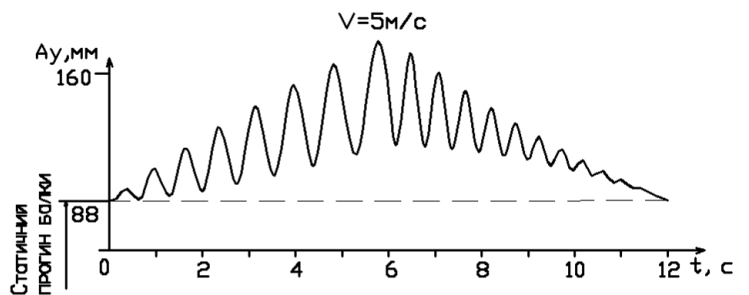
а



б



в



г

Рис. 5. Динамічні розрахунки (а, б, г) і випробування (в) мостового перевантажувача: а - умовна динамічна модель; б – тест-графік зміни сумарної сили тяжіння основної змінної маси в залежності від положення візка; в - динамічні випробування крана трубчасто-балочного типу; г - результат динамічного розрахунку амплітуди переміщення середнього перерізу

Таким чином, після проведення моделювання повного технологічного циклу в натурних умовах і статистичного усереднення часу з вимірюванням швидкостей, часу розгонів і гальмувань для конкретного нового крана створюється база даних про технологічні процеси циклу та навантаженість, що містить і контрольні віброграми мосту (по типу отриманих автором і наведених у наступному розділі).

У **четвертому розділі** наведені результати експериментальних натурних досліджень динамічних характеристик перевантажувача і візка за основними режимами руху. Для цього записувалися амплітуди швидкостей вільних і вимушених коливань перевантажувача трубчасто-балочного типу (використовувались сейсмометри СМ-3) мосту в горизонтальному і вертикальному напрямках (рис. 5, в).

Коливання моста викликалися рухом грейфера, вантажного візка, а також переміщеннями всього перевантажувача. Проводилися дослідження форм рис. 4 д, ж, і моста та вертикальної форми коливань грейферного візка. На рис. 6 представлений, як приклад, набір даних при натурних випробуваннях з метою виявлення однієї з форм власних коливань перевантажувача - поздовжньо-горизонтальної у вертикальній площині крана.

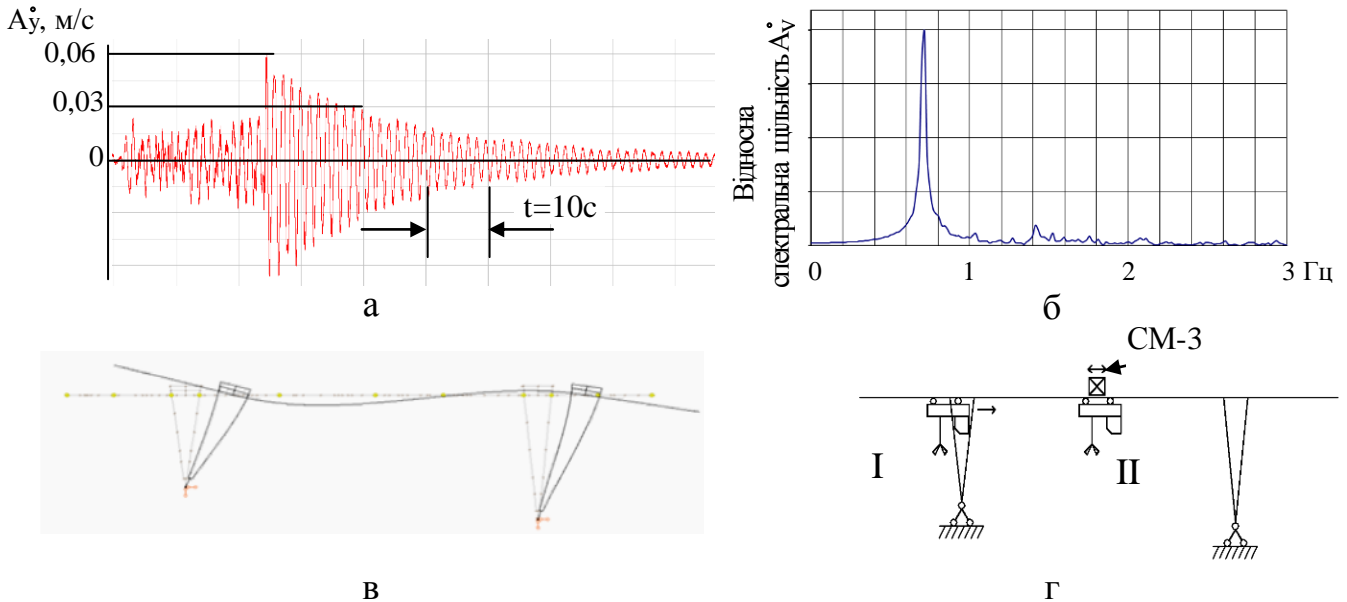


Рис. 6. Поздовжньо-горизонтальні коливання моста крана у вертикальній площині, викликані переміщенням вантажного візка від опори до середини прольоту з наступною зупинкою: а - віброграма швидкостей цих коливань до і після зупинки; б - відносна спектральна щільність вільних коливань; в - вид досліджуваної форми коливань; г - схема розташування датчиків СМ-3 і пункти І і ІІ руху грейферного візка

Для згаданих трьох форм в результаті обробки віброграм були визначені: частота, період і логарифмічний декремент коливань (табл. 1).

Важливо підкреслити факт: експеримент показав, що логарифмічний декремент коливань прогонової будови відрізняється для кожної форми власних коливань і лежить в межах 0,043-0,068 (візка - 0,19). Це істотно відрізняється від рекомендованої величини 0,15 для сталевих конструкцій в колишньому СНИП «Нагрузки и воздействия» і не дозволяє застосовувати без застережень гіпотезу «пропорційного тертя» в розрахунках на змушені коливання.

Найбільший час загасання вільних коливань із зменшенням амплітуди в 20 разів (такий параметр контролю дисипації крана пропонується за деякими рекомендаціями) виявився рівним 62 с - в поздовжньо-горизонтальній формі вільних коливань, і 46 с - у вертикальній, якщо візок розташовано в середині прольоту. Зауважимо, що отримання цих даних для систем близьким к лінійним можливе в експерименті шляхом вимірювання декременту та періоду вільних коливань (T). Час загасання коливань, коли амплітуди A зменшаться в 20 разів, дорівнює приблизно:

$$t = \frac{T}{\delta} \ln \frac{A}{0,05A} \cong \frac{3T}{\delta}. \quad (2)$$

Теоретичні та експериментальні дані за формами власних коливань
перевантажувача при різних положеннях візка

		Форма власних коливань				
		мост перевантажувача				візок
		поздовжньо- горизонтальна	поперечно- горизонтальна	вертикальна		
Розрахунок	частота, Гц	0,64	1,26	1,61	2,17	-
Експеримент	частота, Гц	0,72	1,5	1,52	2,16	3,34
	амплітуда швидкості, м/с	0,06	-	-	-	-
	логарифмічний декремент коливань	0,068	0,063	0,043		0,19
	час зменшення амплітуди у 20 разів, с	62	32	46	32	5
Розрахункове місце візка		прогін	опора	прогін	опора	опора

Дані показники для мостових перевантажувачів не регламентуються в нормативній базі, хоча вони корисні та зручні інженеру для оцінки впливу віброекологічного дискомфорту на організм людини і для аналізу витривалості металоконструкцій.

Проведені експерименти дозволяють уточнити динамічну модель, жорсткість і дисипативні властивості всієї системи. Ці бази даних необхідні як для вихідних параметрів динамічних розрахунків на комп'ютері, так і для контролю стану конструкцій шляхом періодичної паспортизації та моніторингу (розділ 6).

У **п'ятому розділі** запропоновані рекомендації щодо складання деяких спрощених (для спеціальної наукової або інженерної мети) розрахункових моделей. Вони дозволяють уточнювати навантаженість конструкцій, враховувати їхні нелінійні властивості, розробляти заходи, спрямовані на зниження амплітуд коливань перевантажувачів та ін.

Складну просторову конструкцію крана можна моделювати, наприклад, «повною» умовно-стержневою схемою, що складається з прогонової будови (головні ферми для гратчастої конструкції і балка для трубчасто-балкової конструкції), опор, в'язей, їзових балок, по яких переміщається візок з грейфером, а також з інших конструкцій і технологічного обладнання. Але для полегшення процесів інженерних динамічних розрахунків сформовані відповідні спрощені динамічні моделі. Це стосується, наприклад, тієї частини динамічних розрахунків, які не можна реалізувати в сучасних обчислювальних комплексах («ЛІРА», «SCAD», «Selena» та ін.) при врахуванні різноманітних нелінійних характеристик, або навіть у лінійних задачах іноді необхідно виокремити та дослідити основні конструкції, що найбільше впливають на певну форму коливань. Це дозволяє конструктору додати в систему реальне нелінійне зовнішнє тертя (див. нижче систему ДГК з фрикційним елементом). У роботі створено декілька спрощених

інженерних моделей для аналізу, а особливо, для пошуку шляхів створення нових схем, спрямованих на зниження коливань по кількох небезпечних резонансних формах (при невеликому обсязі обчислень).

Для отримання таких моделей просторову динамічну модель (з десятками і сотнями стержнів, жорсткостей і мас елементів, динамічних ступенів свободи) спрощуємо (залежно від конкретної досліджуваної низькочастотної форми власних коливань крана, рис. 4) до моделі з одного або трьох стержнів із наближено певними масами і умовними зв'язками. У роботі створено декілька спрощених інженерних моделей. Багатомасова просторова динамічна модель спрощується до плоских з декількома динамічними ступенями свободи (рис. 7): узагальнені координати y_i означають динамічні і статичні переміщення, а їх похідні за часом \dot{y}_i , \ddot{y}_i - швидкості та прискорення.

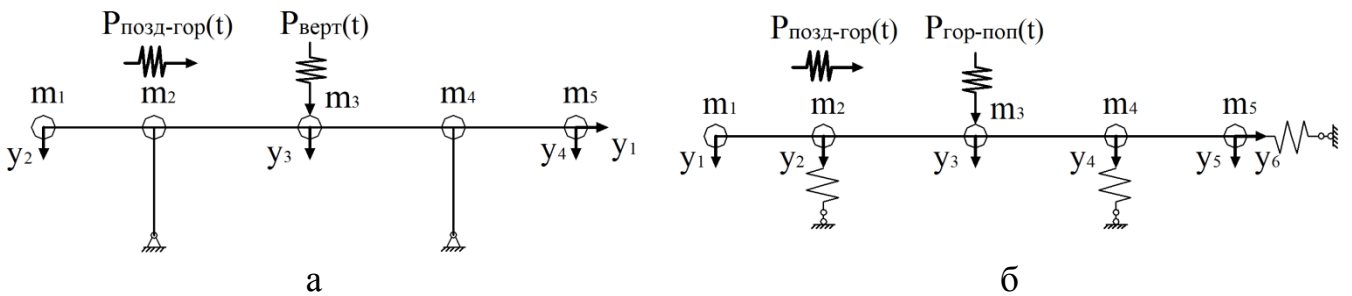


Рис. 7. Спрощені інженерні моделі для дослідження коливань крана за різними формами: а - для аналізу поздовжньо-горизонтальних і вертикальних коливань крана (у його площині); б - для аналізу поздовжньо-горизонтальних (в площині крана) і поперечно-горизонтальних коливань моста (з площини крана)

Наприклад, для моделювання, розрахунку та гасіння коливань першої (поздовжньо-горизонтальної) і четвертої (вертикальної) форм обох видів кранів за рис. 4 а, г, д, і замінимо міст і опори крана трьома стержнями і п'ятьма масами, що коливаються у вертикальній площині крана з еквівалентними згинальними жорсткостями цих стержнів (рис. 7, а). (Зауважимо, що модель на рис. 7, а має чотири ступенів свободи, але найбільше цікавить в даних завданнях дві згадані вище форми. Модель на рис. 7, б має шість ступенів свободи і дозволяє досліджувати як поздовжньо-горизонтальну форму, так і декілька поперечно-горизонтальних).

Причому, для аналізу першої форми (рис. 4 а, д), в принципі, достатньо моделі одномасового (сумарного $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5$) осцилятора з жорсткістю r_1 і дисипації β_1 обох опор «уздовж моста» і диференціального рівняння руху при вимушених (3) і вільних (права частина рівняння прирівнюється до нуля) коливаннях:

$$m_{\Sigma} \cdot \ddot{y}_1 + \beta_1 \cdot \dot{y}_1 + r_1 \cdot y_1 = P_{\text{позд-гор}}(t). \quad (3)$$

Для зниження амплітуди коливань всього крана за цією формою треба встановити, наприклад, ДГК з масою $m_{\text{ДГК}}$ (через пружний зв'язок з жорсткістю $r_{\text{ДГК}}$

і демпфер з силою сухого тертя $H_{ДГК}$ та в'язкого $\beta_{ДГК}$), тоді система рівнянь спільних коливань крана і ДГК стає нелінійною:

$$\begin{cases} m_{ДГК} \ddot{y}_{ДГК} + \beta_{ДГК} (\dot{y}_{ДГК} - \dot{y}_1) + H_{ДГК} \text{sign}(\dot{y}_{ДГК} - \dot{y}_1) + r_{ДГК} (y_{ДГК} - y_1) = 0, \\ m_{\Sigma} \ddot{y}_1 - \beta_{ДГК} (\dot{y}_{ДГК} - \dot{y}_1) - H_{ДГК} \text{sign}(\dot{y}_{ДГК} - \dot{y}_1) - r_{ДГК} (y_{ДГК} - y_1) + \beta_1 \dot{y}_1 + r_1 y_1 = P_{\text{позд-гор}}(t). \end{cases} \quad (4)$$

Моделювання другої і третьої (рис. 4 б, в, е, ж) просторових форм цих кранів (з інженерною точністю) можливе одним стержнем мосту, який коливається в горизонтальній площині в залежності від жорсткостей пружних опор-пружин (рис. 7, б). У таких моделях згинальні та крутильні жорсткості еквівалентних стержнів визначаються для відповідних площин. Еквівалентні жорсткості пружних опор визначаються за допомогою МСЕ з просторової моделі через податливість при одиничних силах, які прикладаються по чергово у верхньому перетині кожної опори у напрямку координат y_i . Маси в моделях, як правило, умовно припускаються точкові. Але за потребою врахування моментів інерції мас слід додавати, наприклад, додаткові маси з базою масивної великогабаритної конструкції вантажного візка для передачі істотних інерційно-обертальних переміщень тощо (всі подібні рішення за моделями повинні тестуватися за даними цілеспрямованого експерименту).

У цих прикладах прийняті: або одна - схема осцилятора, яка відповідає рівнянню руху (3), не відображена, або чотири (рис. 7, а), або шість (рис. 7, б) ступенів свободи. Складні навантаження технологічного циклу на цих моделях показані умовно у вигляді деяких силових впливів: гармонійних, імпульсних або випадкових функцій $P_i(t)$, пов'язаних з рухом візка ($P_{\text{позд-гор}}$, $P_{\text{позд-гор}}$), з роботою механізмів підйому грейфера ($P_{\text{верт}}$) тощо. При необхідності уточнення цих навантажень для кожного виду кранів слід проводити цілеспрямовані натурні випробування по визначенню динамічних навантажень. Варіантами вирішення задачі взаємодії крана з рухомими навантаженнями також є наступні: використання дослідних віброграм; пошук аналітичних збурювальних функцій, що описують всі нюанси роботи механізмів, ударів на нерівностях колій, перехідних процесів, швидкостей тощо; у розділі 3 показаний варіант вирішення «класичної» взаємодії, він також може доповнюватися описаними силовими впливами.

За допомогою спрощеної динамічної моделі зручно не тільки враховувати всі види нелінійностей (конструктивні, фізичні, геометричні, генетичні), але і провести підбір і налаштування динамічних гасників коливань тощо. Як приклад таких заходів були розроблені і запатентовані (патент № 99209 на корисну модель) конструкції для гасіння коливань за першою формою (рис. 4 а, д).

Історично однією з величин, яка характеризувала і динамічні навантаження на споруду, і динамічні властивості самої споруди, був осцилятор і його динамічний коефіцієнт. У різних завданнях і галузях техніки визначення та обґрунтування цього коефіцієнта приймалося різним. В класичній теорії коливань під коефіцієнтом динамічності μ мається на увазі, у скільки разів амплітуда сталих вимушених (наприклад, гармонічних) коливань (наприклад, переміщень $A_{\text{дин}}$) при кутовій

частоті θ і збурювальній силі $P(t)=P_0\sin\theta t$ більше переміщення ($A_{стат}$), що викликається статично прикладеною силою P_0 : $\mu = A_{дин}/A_{стат}$.

Деякі автори іноді помилково поширюють таку методику «єдиного динамічного коефіцієнта» на систему з декількома ступенями вільності. Якщо в осциляторі такий коефіцієнт справедливий для переміщень, швидкостей, прискорень, динамічних напружень тощо, то в моделях з великим числом ступенів вільності є кілька піків на амплітудно-частотній характеристиці, яка, в свою чергу, різна для різних перерізів.

У протяжній плоскій або просторовій конструкції мостового перевантажувача є елементи з більшою і меншою жорсткостями або масами, з різними парціальними частотами. Тому вони можуть на різних частотах по-різному відгукуватися на одне і те ж збурення. Отже, в різних перетинах конструкції будуть різні динамічні коефіцієнти, що зручно зображати у вигляді епюр цього коефіцієнта. Розглянемо приклад використання епюр динамічних коефіцієнтів переміщень плоскої моделі перевантажувача трубчастого типу. На рис. 8 показані результати досліджень для двох основних форм коливань. Перша - поздовжньо-горизонтальна форма коливань у вертикальній площині перевантажувача, рис. 4, д. Інша форма коливань - вертикальна (згинальна), рис. 4, і. До моделі перевантажувача прикладалося спочатку до мосту по його поздовжній осі у вертикальній площині горизонтальне гармонічне навантаження $P_0\sin\theta t$ на резонансній частоті 0,64 Гц. Потім прикладалося до тієї ж точки статичне навантаження P_0 . Результати наведені у вигляді епюр динамічних коефіцієнтів для кожного перерізу окремо, рис. 8, а. Аналогічно досліджувалася і вертикальна форма коливань (рис. 8, б). Епюри динамічних коефіцієнтів наочно ніби представляють навантаженість і динамічну поведінку, відгук усіх елементів системи.

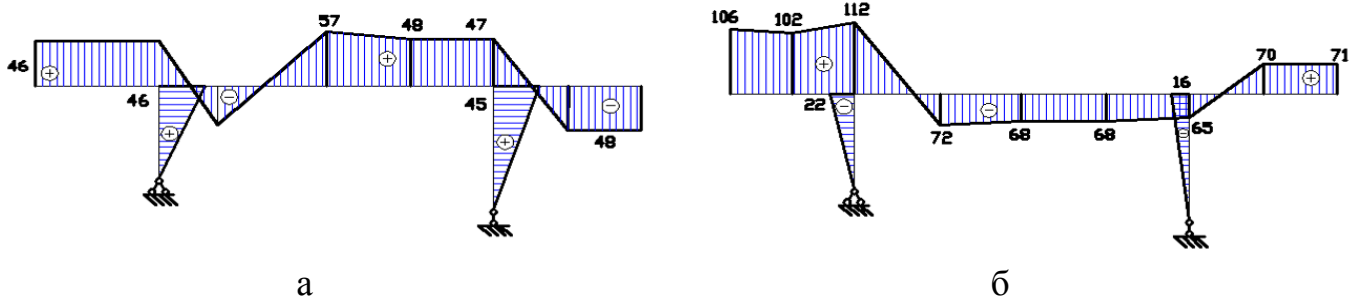


Рис. 8. Епюри динамічних коефіцієнтів по переміщенням для двох форм коливань (рис. 4 а, г)

У шостому розділі розглядаються рекомендації щодо застосування динамічних характеристик при технічній діагностиці металоконструкцій перевантажувачів (для паспортизації та пошуку місць можливих ушкоджень). На підставі теоретичних розрахунків і динамічних випробувань металоконструкцій перевантажувача був складений, як приклад, динамічний паспорт перевантажувача трубчато-балочного типу (рис. 9). Заштриховані ділянки відповідають формам власних коливань при різних положеннях візка. (Звернемо увагу на те, що, на відміну від результатів рис. 4, в цьому розрахунку одна з опор закріплювалася від зсуву уздовж кранової колії, даючи можливість вільній другій опорі крана для її забігання).

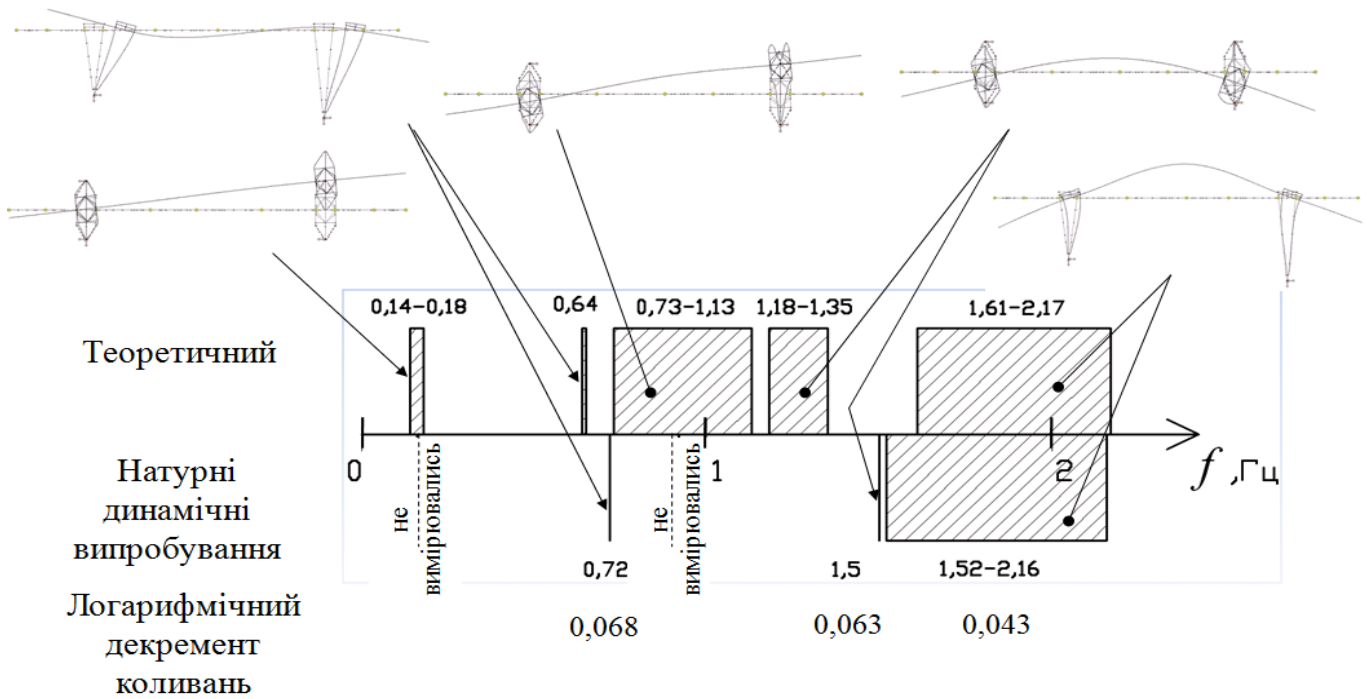


Рис. 9. Динамічний паспорт перевантажувача трубчато-балочного типу

Експериментальна частина паспорта практично є результатом динамічного моніторингу перевантажувача (треба фіксувати декремент, частоту та амплітуду «входу» та «виходу»). Теоретична частина паспорта дозволяє зрозуміти, які власні форми коливань очікувати при експлуатації та випробуваннях крана. Також, в теоретичну частину паспорта можна додати базу впливів різних варіантів ушкоджень або аварійних станів на працездатність металоконструкцій перевантажувачів. Для цього теоретичним шляхом по черзі вимикалися з роботи, наприклад, просторової моделі ґратчастого крана, деякі характерні стержневі несучі елементи. Досліджувалися частоти та форми «зіпсованого» крана. У підсумку складалася теоретична частина документа - фрагмент «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми». Такий Атлас при динамічному обстеженні дозволяє прискорити пошук місць пошкодження. На рис. 10 представлений випадок несиметричного руйнування елемента верхнього пояса біля гнучкої опори перевантажувача. Відсутність зруйнованого елемента призвела до нових несиметричних поперечно-горизонтальних переміщень моста в нижчій формі власних коливань крана, також у цій формі з'явилося і нове закручування середнього перерізу основного прольоту моста.

При такому дефекті знизилася частота третьої форми з 0,83 Гц до 0,72 Гц (горизонтальні коливання консолі) і п'ятої - у вертикальній площині: з 1,72 Гц до 1,43 Гц (з різким додаванням місцевого вигину в горизонтальній площині в зоні нанесення дефекту).

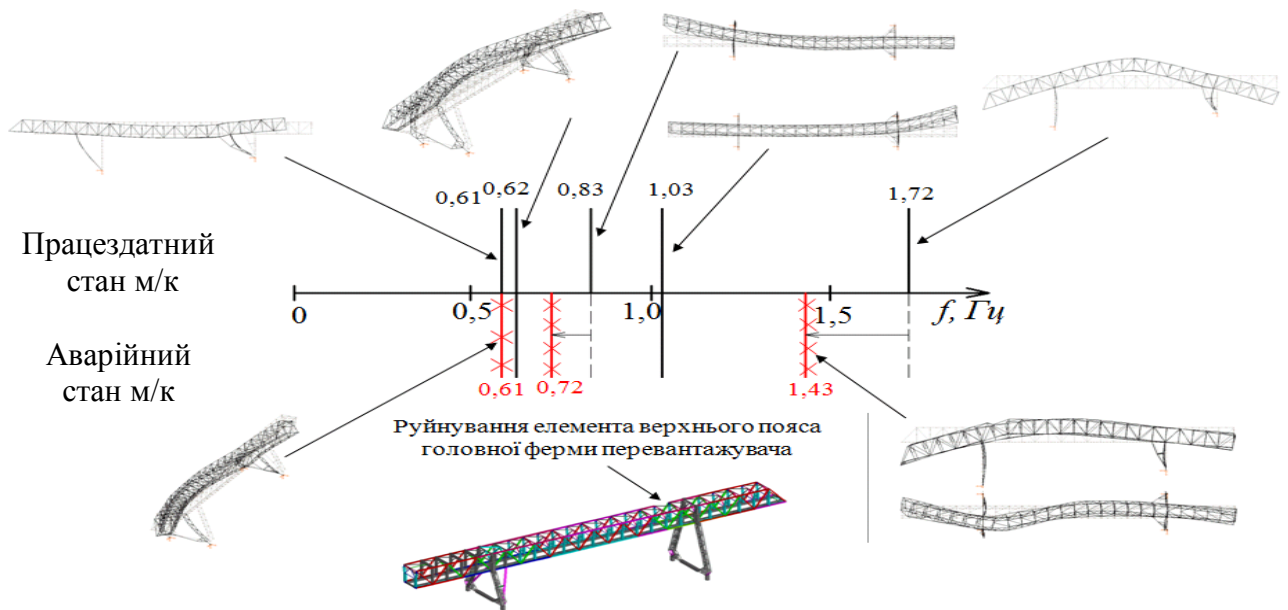


Рис. 10. Приклад теоретичної частини динамічного паспорту ґратчастого крана для аналізу впливу штучно створеного ушкодження на власні форми і частоти коливань (фрагмент «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми»)

На підставі практичної статистики дефектів і пошкоджень доцільно створити набір всіляких умовних аварійних ситуацій для кожного типу перевантажувача. Після проведення масових теоретичних розрахунків таких ситуацій можна скласти «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми». Це дозволить проводити швидкий аналіз при виявленні в експерименті зміни частот і форм власних коливань з наступним (прискореним) визначенням місць і можливої причини пошкоджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі проведеного комплексного аналізу динамічних характеристик просторових несучих металоконструкцій мостових перевантажувачів отримані нові вирішення важливої народногосподарської та науково-практичної задачі проектування та експлуатації таких кранів, які засновані на розвитку методик динамічних розрахунків кранів і натурних випробувань, динамічної діагностики та паспортизації споруди.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Складені класифікації перевантажувачів, їх навантажень і дефектів. Ураховані особливості експлуатації, а також надано аналіз причин деяких аварій, методик розрахунків, обстежень і випробувань. Виділено важливість динамічних (у тому числі рухомих) навантажень експлуатаційного технологічного циклу, що чинять істотний вплив на технічний стан сталевих несучих конструкцій. Аналіз власних і вимушених коливань просторової моделі крана відкрив нові можливості прогнозування ушкоджень, що було підтверджено фактом наявності відповідних пошкоджених ділянок конструкцій, виявлених при натурних обстеженнях.

2. Динамічні розрахунки складних просторових стержневих моделей досліджуваних кранів показали, що конструкція кранів і положення ґрейферного візка не впливають на тип подовжньо-горизонтальної форми власних коливань з

частотою близько 0,6 Гц. У другій формі проявляються поперечно-горизонтальні коливання з площини крана: для гратчастого типу при цьому переважає вигин моста (0,85 Гц), для трубчасто-балочного - вигин опори (0,77 Гц). У третій формі спостерігаються поперечно-горизонтальні коливання з площини крана: для гратчастого крана - коливання консолей (1,7 Гц), трубчасто-балочного - вигин моста (1,26 Гц). Лише четверте місце зайняв вигин моста у вертикальній площині крана на частоті 1,97 Гц для гратчастого і 1,61 Гц для трубчасто-балочного (багато дослідників часто обмежувались саме цією формою). Частота власних коливань 2, 3 і 4 форм істотно залежить від місця розташування грейферного візка на мосту крана (при установці його над опорою частота збільшується приблизно на 20 %). Для наочності розподілу динамічних параметрів крана був застосований метод побудови епюр динамічних коефіцієнтів (по переміщенням).

3. У розрахунку на рухоме навантаження запропонованої умовної моделі моста крана в часовій області було розроблено методику розрахунку статико-динамічної взаємодії інерційних конструкцій і моста перевантажувача, і візка. Вирішення диференціальних рівнянь спільних коливань моста і візка дозволили дослідити переміщення, прискорення, напруження при робочих швидкостях візка до 15 км/год.

4. Експериментальні натурні дослідження показали, що різниця теоретично визначених частот власних коливань крана по чотирьом нижчим формам і відповідних результатів експерименту з вільними коливаннями не перевищує 10 %. Логарифмічний декремент коливань мосту виявився різним для кожної форми власних коливань і знаходиться для цих форм у межах 0,043-0,068 (що зазвичай при розрахунках за допомогою ПК не враховується). Виявлена підвищена тривалість процесу вільних коливань сталевого крана: амплітуди зменшуються в 20 разів при горизонтально-поздовжній формі за 62 с, а при вертикальних коливаннях – за 46 с.

5. Запропоновано методику складання інженерних (спрощених) динамічних моделей перевантажувача для експрес-розрахунків (для переходу від просторової багатомасової моделі перевантажувача до систем, які мають від 1 до 6 динамічних ступенів вільності). Це дозволяє конструктору, наприклад, додавати в підсистеми фрикційні елементи та враховувати реальне (з експериментів) зовнішнє нелінійне тертя, різне в кожній підсистемі. Такі моделі зручні при розробці демпфіруючих пристроїв. Була розроблена схема демпфірування цих коливань і отримано патент № 99209 на корисну модель з пристроєм перетворення руху.

6. За допомогою методу динамічної діагностики суттєво поліпшено ефективність натурального обстеження перевантажувачів для попередження аварійного стану. Розроблено форму динамічного паспорта крана, який містить результати натурних випробувань і розрахунків. Його експериментальна частина допомагає вести динамічний моніторинг технічного стану, а теоретична - оцінити, які власні форми коливань очікувати в експлуатованому крані. Запропоновано скласти «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми» шляхом умовного виключення певного елемента з роботи, що дозволяє проводити пошук місця пошкоджень і прискорює проведення обстеження.

7. Наукові та практичні положення викладені в дисертації, можуть бути використані проектними організаціями, службами експлуатації мостових перевантажувачів, а також при розробці нормативно-технічної документації.

Результати досліджень прийняті в проектну практику ТОВ «Проектний інститут «Дніпропроектстальконструкція», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Е. Дзержинського», а також впроваджені в навчальний процес ДВНЗ «ПДАБтаА».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Макаров А. Влияние различных диссипативных свойств в подсистемах сложно-составных сооружений на амплитуды вынужденных колебаний / В. Кулябко, А. Масловский, А. Макаров // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – Warsaw: Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions, 2007. - №15. - P. 341-348.
2. Макаров А. В. «Безопасность по проекту» сооружений с обеспечением комфорта людей – динамическая и виброэкологическая паспортизация и мониторинг / В. В. Кулябко, А. В. Масловский, А. В. Макаров // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування : Наук. – техн. збірник. - К. – Дніпр. : Основа, 2007. – Вип. 42. - С. 166-172.
3. Макаров А. В. Проблемы и перспективы теории и практики исследования динамики конструкций сооружений с подвижными нагрузками / В. В. Кулябко, А. В. Масловский, А. В. Макаров // Дороги і мости: Зб. наук. праць. – К. : ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7, т. 1. - С. 344-348.
4. Макаров А. В. О расчете мостов и дорог на любые подвижные нагрузки с учетом инерционности, подрессоривания, торможения, разрыва связей, переменных скоростей и интервалов движения / В. В. Кулябко, А. В. Макаров // Дороги і мости : Зб. наук. праць. – К. : ДерждорНДІ, 2008. - Вип. 9. - С. 129-140.
5. Макаров А. В. Сопоставление компьютерных технологий решения дифференциальных уравнений линейных колебаний статико-динамических моделей сооружений / А. В. Макаров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2008.– №10. – С. 34-39.
6. Макаров А. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований собственных колебаний трубчатого мостового крана-перегрузателя / В. Кулябко, А. Макаров, Д. Тихонов // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – Warsaw : Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions, 2009. - №17. - P. 179-184
7. Макаров А. В. Использование динамических расчетов на ЭВМ при обследовании и испытаниях большепролетного мостового перегружателя / А. В. Макаров // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. трудов. – Д. : ГВУЗ «ПГАСА», 2014. Вип. 78. – С. 185-189.
8. Макаров А. В. Динамическая диагностика несущих конструкций грейферного мостового перегружателя – путь к предупреждению аварий / А. В. Макаров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2015.– №1(202). – С. 51-59. (РІНЦ).
9. Macarow Andrey. Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear damping / Vladimir Kulyabko, Andrey Macarow, Oleksandr Nechytailo //

Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies. - Harvard University Press, 2015. - №1(7). – P. 520-530. (Scopus).

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати

10. Макаров А. В. Новые перспективные направления в исследованиях нелинейной динамики сооружений (и пути учета их в проектировании и эксплуатации) / В. В. Кулябко, А. В. Масловский, А. В. Макаров // Новое в исследовании и проектировании пространственных конструкций: научная сессия, 15 апреля 2008 г. : тезисы док. – М. : НИИЖБ, ЦНИИСК, ЦНИИПСК, НИИОСП, 2008. - С. 25-26.

11. Макаров А. В. Перспективы использования информационных технологий при решении проблем динамики конструкций и сооружений / В.В. Кулябко, А. В. Макаров, А. В. Масловский // Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности. – Днепропетровск : НГУ, 2013. - №1. – С. 10-19.

12. Макаров А. В. Нелинейные динамические модели и расчеты сооружений с демпфирующими устройствами различных конструкций / В. В. Кулябко, А. В. Макаров, Д. С. Ярошенко // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів : Каменяр, 2014. – Вип. 10. - С. 352-359.

13. Пат. 99209. Україна, МПК F 16 F 7/10. Динамічний гасник коливань крана-перевантажувача / Макаров А. В., Ярошенко Д. С. - винахідники і власники ; заявл. 01.12.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

АНОТАЦІЯ

Макаров А. В. Динамічні розрахунки, випробування та діагностика сталевих конструкцій великопрогонових мостових перевантажувачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України. Дніпропетровськ, 2015.

У дисертаційній роботі проведено комплексний аналіз роботи просторових несучих металоконструкцій мостових перевантажувачів. На підставі масових обстежень показані і класифіковані основні дефекти і пошкодження (обстежено стан більше ніж 20 кранів). Проведено динамічні випробування (створено базу даних віброграм при робочому циклі крану) та складено динамічні паспорти різних типів кранів. Виконані динамічні розрахунки за запропонованими методиками (досліджено взаємодію інерційних мас рухомого візка і моста крана). Показано алгоритм пошуку ушкоджень за допомогою методики створення «Атласу впливу пошкоджень на власні частоти і форми».

Ключові слова: натурне обстеження, мостовий перевантажувач, динамічні випробування, динамічний паспорт, теоретичне прогнозування, прогнозування можливих пошкоджень, рухоме навантаження.

АННОТАЦИЯ

Макаров А. В. Динамические расчеты, испытания и диагностика стальных конструкций большепролетных мостовых перегружателей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Украины. Днепропетровск, 2015.

На многих предприятиях различных отраслей промышленности в технологический цикл работ по перегрузке, например, сыпучих материалов, включены большепролетные (длина крана до 150 м) мостовые грейферные краны-перегружатели. Остановка или поломка такого крана, как правило, приводят к существенным экономическим ущербам для предприятий, длительным и дорогостоящим ремонтам (приобретение нового крана может стоить предприятию несколько млн. дол.).

Безопасность работы перегружателей в весьма тяжелых условиях предприятия должна обеспечиваться регулярными натурными обследованиями (по нормам не реже одного раза за 1-2 года). Естественно, что полное обследование также потребует длительную остановку перегружателя. В связи с этим возникает актуальная необходимость проведения поисковых научных исследований по сокращению времени простоев крана.

Для этого в диссертационной работе не только рассматривались условия эксплуатации, нагружения и цикличности технологических процессов, но и теоретическим путем изучались динамические характеристики и напряженно-деформированное состояние (НДС) несущих металлоконструкций.

Натурные обследования перегружателей (автор лично обследовал более 20 кранов) позволили дать классификацию кранов, дефектов, повреждений, условий нагружения и цикличности технологических процессов, предложено использовать динамические характеристики для диагностики металлоконструкций крана.

При помощи ПК Selena был дан полный анализ НДС пространственной стержневой расчетной модели двух типов кранов-перегружателей (решётчатый и трубчато-балочный). Особое внимание уделялось информативному модальному анализу системы с большим числом степеней свободы.

В диссертации исследовались низшие частоты и формы собственных колебаний для каждого типа крана (при условии как запрета забегания одной из опор крана относительно другой, так и возможности такого аварийного состояния). При этом расчеты разветвлённой динамической модели обоих кранов выявили близость частот соответствующих форм. Была особо выделена одна из низкочастотных форм – горизонтально-продольных колебаний моста в его вертикальной плоскости (частота около 0,65 Гц). Как показали расчеты и вибродинамическое обследование, именно эта форма возникает в кранах чаще других при динамической нагрузке, связанной с движением, торможением и разгоном тележки. Последнее подтверждается фактом наличия соответствующих поврежденных участков конструкций, обнаруженных при натурных обследованиях.

Результаты расчетов трубчато-балочного перегружателя на статическую нагрузку от собственного веса трубчато-балочного перегружателя и на динамическую нагрузку (при движении тележки показали), что наиболее нагружены элементы в местах сопряжения трубы пролетного строения и опор, эквивалентные циклические напряжения достигают амплитуд 18 МПа. Этим колебаниям соответствует амплитуда горизонтального перемещения 15 мм на частоте 0,65 Гц (ускорения при этом достигают уровня $0,25 \text{ м/с}^2$ - дискомфортного для длительного пребывания машиниста). В работе даны предложения по снижению указанных колебаний (приведены варианты конструкций динамических гасителей колебаний, один из которых запатентован).

Для рассматриваемых крупных сооружений решена была также проблема расчетов на подвижные нагрузки. Альтернативой квазистатическим методам учета влияния подвижной нагрузки на конструкции мостов (например, с использованием линии влияния) можно считать разработанную в диссертации методику анализа динамического взаимодействия инерционной конструкции моста с инерционной грузовой тележкой («4-й тип задач» по Я. Г. Пановко). Использовались составление и решение систем дифференциальных уравнений движения во временной области при помощи системы компьютерной алгебры «Maple».

Оказалось, что при помощи комплексной динамической диагностики, как варианта неразрушающего метода контроля, можно существенно улучшать эффективность натурального обследования с выявлением состояний, близких к аварийным.

В работе показаны результаты и виброграммы, полученные в ходе многих динамических испытаний кранов в натуральных условиях. Даются рекомендации как по проведению таких испытаний (в безостановочном технологическом режиме с применением грузовой тележки - как средства создания динамических нагрузок), так и по оформлению результатов в форме текущего комплексного динамического паспорта.

В работе предлагается и практически проводится идея создания для каждой конструкции крана «Атлас влияния повреждений на собственные частоты и формы», получаемого (либо заранее, в составе проекта, либо в ходе эксплуатации крана) теоретическим путем в виде прогноза частоты, формы, логарифмического декремента колебаний, динамически напряжений и др. после теоретического условного разрушения одного из элементов. Такая методика значительно облегчает поиск повреждений и ускоряет натурное обследование.

Результаты работы и методики приняты к внедрению в проектную практику ООО Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция» и в ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» для снижения амплитуд колебаний и паспортизации основных несущих металлоконструкций перегружателей. Также результаты работы внедрены в учебный процесс ГВУЗ «ПГАСА».

Ключевые слова: натурное обследование, мостовой перегружатель, динамические испытания, динамический паспорт, теоретическое прогнозирование возможных повреждений, подвижная нагрузка.

SUMMARY

Makarov A. V. Dynamic analysis, testing and diagnostics of steel structures of large-span bridge loading cranes. - The manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – constructions, buildings and structures. – State Higher Educational Institution "Prydniprovs`ka State Academy of Civil Engineering and Architecture " Ministry of Education and Science of Ukraine. Dnepropetrovsk, 2015.

In the dissertation work was conducted a comprehensive of spatial bearing metalware of bridge loading cranes. On the basis of mass surveys was shown and classified the main defects and damage to (state examined more than 20 cranes). A dynamic test (a database vibrorecord with crane working cycle) was carried out and dynamic passports of different types of cranes were made. Dynamic calculations were made by offered methods (interaction of inertial movable trolley and bridge crane was researched). Search algorithm damage was demonstrated by the method of creating the "Atlas of impact damage on the natural frequencies and forms."

Keywords: full scale survey, bridge loading cranes, dynamic tests, dynamic passport, theoretical prediction, prediction of possible damage, traffic load.

Здано на складання 22.10.2015. Підписано до друку 22.10.2015. Формат 210x148. Папір офсетний. Друк ризографічний. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 9,75. Обл.-вид. арк. 8,4. Тираж 100 прим. Зам. № 10187

Видавництво «*Літограф*»
Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 2267
Адреса видавництва та друкарні:
49000, Дніпропетровськ, вул. Паторжинського, 29/б
тел. : (066) 369-21-55, (056)713-57-25
E-mail: Litograf.dp@gmail.com