

Министерство образования и науки Украины

Государственное высшее учебное заведение

«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Макаров Андрей Витальевич

УДК 624.042

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ, ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ
МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Кулябко Владимир Васильевич,

доктор технических наук,

профессор

Днепропетровск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ, МЕТОДИК ИХ РАСЧЕТОВ, ОБСЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ.....	13
1.1. История создания и применения мостовых кранов-перегрузателей.....	13
1.2. Проектные нормативные материалы.....	17
1.3. Научные исследования нагруженности мостовых кранов-перегрузателей.....	23
1.4. Обзор методик проведения экспериментальных натуральных исследований.....	31
1.5. Выводы по разделу 1.....	33
РАЗДЕЛ 2. АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ, ПОВРЕЖДЕНИЙ И АВАРИЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ (ИЗ ОПЫТА НАТУРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ).....	35
2.1. Классификация грузов.....	35
2.2. Основные виды повреждений металлоконструкций и аварий мостовых кранов-перегрузателей	39
2.3. Оценка НДС конструкций крана при действии «условного статического» торможения тележки.....	47
2.4. Рекомендации по обследованию.....	50
2.5. Выводы по разделу 2.....	52
РАЗДЕЛ 3. ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ПО РАЗВЕТВЛЁННЫМ МОДЕЛЯМ НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ПОДВИЖНУЮ НАГРУЗКУ.....	54
3.1. Создание динамических разветвлённых моделей перегружателей и поверочные статические расчёты.....	54
3.2. Исследования собственных колебаний мостового крана-перегрузателя решетчатой конструкции.....	60

3.2.1. Перегрузатель с подвижно-шарнирным соединением моста и опоры.....	60
3.2.2. Перегрузатель с жесткой конструкцией соединения опоры и моста.....	66
3.3. Особенности собственных колебаний мостового крана-перегрузателя трубчато-балочной конструкции.....	68
3.4. Влияние различий коэффициента неупругого сопротивления в подсистемах на вынужденные колебания системы с несколькими степенями свободы.....	72
3.5. Анализ влияния вариантов усиления пролетного строения перегружателя трубчато-балочной конструкции на его частоты и формы его собственных колебаний.....	79
3.6. Теоретические исследования статико-динамического взаимодействия подвижной нагрузки тележки и конструкции моста крана во временной области (с применением дифференциальных уравнений).....	81
3.6.1. Макет-аналог для упрощённых исследований основного тона вертикальных колебаний моста	83
3.6.2. Система с двумя степенями свободы (мост с тележкой)..	86
3.6.3. Моделирование динамического взаимодействия инерционного моста с инерционной движущейся тележкой ...	89
3.7. Выводы по разделу 3	93
РАЗДЕЛ 4. ИСЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРАНА И ТЕЛЕЖКИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	95
4.1. Методика проведения экспериментов.....	95
4.2. Натурные динамические испытания крана-перегрузателя трубчато-балочной конструкции	98
4.3. Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований.....	104

4.3. Выводы по разделу 4	107
РАЗДЕЛ 5. СОЗДАНИЕ УПРОЩЕННЫХ (ИНЖЕНЕРНЫХ) ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ.....	109
5.1. Рекомендации по составлению упрощённых моделей перегружателей.....	109
5.2. Рекомендации по устройству дополнительных мероприятий, направленных на снижение амплитуд колебаний кранов-перегружателей.....	116
Выводы по разделу 5.....	127
РАЗДЕЛ 6. ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КРАНОВ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УСКОРЕННОГО ПОИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ, ПАСПОРТИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА.....	128
6.1. Рекомендации по проведению паспортизации сооружения.....	128
6.2. Методика составления «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы».....	132
6.3. Выводы по разделу 6	139
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справки о внедрении	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патент на полезную модель.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика диссертационной работы складывается из следующих положений.

Актуальность темы. В горно-металлургическом комплексе, химической и энергетической отраслях эксплуатируются грейферные мостовые перегружатели для погрузки и выгрузки различных сыпучих материалов. Эти длинномерные краны-перегружатели (длина моста крана - более 140 м, масса достигает 700-1000 т) установлены на открытом воздухе и воспринимают агрессивные воздействия от различных технологий производства (градирен, тушильных башен коксохимического завода, извести, пыли, паров влажного воздуха от вспучивания шлака и др.). В таких условиях быстрые передвижения (до 15 км/ч) многотонной тележки (массой до 150 т) неизбежно вызывают вынужденные и свободные колебания стальных конструкций, узлов и соединений. Эти вибрационные процессы, происходящие на фоне статических нагрузок, в свою очередь, приводят к различным повреждениям несущих конструкций крана, срок службы которых и определяет (по нормам) срок службы крана.

Рекомендации различных нормативных материалов по периодичности обследований и возможности дальнейшей эксплуатации основных несущих конструкций таких кранов сильно различаются. Например, в ГОСТ 27584-88 срок службы составляет 15 лет, в организационном методическом документе ОМД 0120253.001-2005 - 12 лет, а в ДБН В.1.2-2:2006 - он увеличен до 25 лет [1 - 3]. Заметим, что покупка нового перегружателя, его изготовление и монтаж (занимают до двух лет) и могут потребовать инвестиций порядка 6 млн. долларов. Известно, что в некоторых случаях (после проведения капитальных ремонтов и тщательных обследований, не реже одного раза за 2 года), когда перегружатели эксплуатируются после более трех нормативных сроков службы.

Подобные несоответствие нормативов, относительно малые сроки службы сооружения и затруднения, связанные с безопасностью проведения обследований и ремонтов с длительной остановкой крана на это время (один кран в час перегружает 300-600 т руды, угля), вызывают необходимость поиска научных эффективных методик диагностики предупреждения аварий и контроля технического состояния металлоконструкций перегружателей. В связи с важностью и актуальностью таких задач могут предлагаться самые различные подходы и альтернативные пути интегральной оценки работоспособности сооружения.

В технической литературе очень редко встречаются динамические модели, расчеты и анализ работы перегружателя как сложной пространственной механической системы с большим числом степеней свободы. Отсутствуют количественные характеристики по собственным, свободным и вынужденным колебаниям перегружателей различных конструкций. Нет связи переменных параметров колебаний (частоты, формы, логарифмического декремента колебаний) несущих металлоконструкций крана с основным технологическим циклом: 1 - движение тележки к грузу (с многократными разгонами и торможениями); 2 – работа грейфера (опускание, набор груза, подъём); 3 – движение тележки с грузом; 4 – высыпание груза. Встречаются данные электротензометрии (для сравнения напряжений, полученных опытным путём и расчетным, получения простейшего динамического коэффициента для вертикальных колебаний), но мало виброграмм перемещений, скоростей и ускорений.

Таким образом, исследование натурной динамики перегружателей и её применение для ускорения обследований с теоретическим прогнозированием мест возможных повреждений являются актуальной задачей проектирования и эксплуатации кранов-перегружателей.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательских тематик кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций

Государственного высшего учебного заведения «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» («ПГАСиА»): «Удосконалення методів розрахунку, конструювання та діагностики технічного стану металевих та дерев'яних конструкцій» (№ государственной регистрации 0106U002021) и «Удосконалення методів розрахунку, конструювання і діагностики технічного стану конструкцій будівель і споруд при статичних та динамічних навантаженнях» (№ государственной регистрации 0113U000128) в 2010-2014 гг., уровень участия диссертанта – исполнитель.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является комплексный анализ динамических характеристик пространственных несущих металлоконструкций мостовых перегружателей с развитием методик динамических расчетов кранов (выявление связи частот и форм собственных колебаний с возможными повреждениями) и динамических натурных испытаний, с разработкой предложений по динамической диагностике и паспортизации сооружения.

Сформулированная цель работы привела к необходимости решения следующих задач:

- анализ и классификация известных из литературы аварий и повреждений, а также методик расчетов и испытаний кранов-перегружателей при основных технологических режимах;

- проведение динамических расчетов пространственной стержневой модели кранов численными методами: вначале при фиксированных положениях тележки провести анализ нескольких низших частот и форм собственных колебаний, затем - расчет во временной области на подвижную нагрузку с учетом статико-динамического взаимодействия моста крана и движущейся грузовой тележки;

- получение экспериментальных данных о колебании несущих металлоконструкций моста крана в натурных условиях путем проведения испытаний при различных технологических режимах его работы;

- разработка рекомендаций по составлению упрощенных инженерных динамических моделей перегружателя: для расчетов собственных и вынужденных колебаний; для расчетов на подвижную нагрузку; для поиска способов снижения амплитуд колебаний (предложения по конструкциям гасителей колебаний) и т.п.;

- применение метода динамической диагностики и паспортизации для интегральной оценки и мониторинга технического состояния конструкций перегружателей, для сравнения результатов расчетов и натурных испытаний, для теоретического прогнозирования мест возможных появлений повреждений.

Объект исследований – напряженно-деформированное состояние (НДС) основных несущих металлоконструкций грейферного мостового крана-перегружателя при динамических нагрузках.

Предмет исследований – динамические характеристики (частоты, формы и амплитуды колебаний и др.) несущих металлоконструкций при эксплуатационных динамических нагрузках грейферного мостового перегружателя и их использование для паспортизации и нахождения повреждений.

Методы исследований. Для анализа НДС и математического моделирования динамических характеристик конструкций применялись: метод конечных элементов (МКЭ) (с использованием лицензированного программного комплекса «Selena»); метод Рунге-Кутты 4-го порядка (в системе компьютерной алгебры «Maple») для решения дифференциальных уравнений движения (во временной области) при взаимодействии инерционной подвижной нагрузки и инерционного моста; методы динамической диагностики и вибродинамического обследования строительных конструкций.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

- *впервые* на основании комплексных (теоретических и экспериментальных) исследований установлена связь параметров (частот и форм) собственных колебаний пространственной модели несущих конструкций перегружателя с основными вариантами возможных повреждений; для решётчатой схемы дана методика построения и фрагменты «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» путём условного выключения определенного элемента из работы;

- усовершенствование разработку упрощённых моделей перегружателя, которые предназначены для инженерного оперативного анализа статики и динамики моста, опор крана, проведения ускоренных расчетов (*впервые* для перегружателя), расчета и конструирования демпфирующих устройств, в том числе с нелинейными характеристиками (получен патент на полезную модель с устройством преобразования движения для динамического гасителя первой формы собственных колебаний перегружателя);

- проведены натурные испытания и теоретические расчеты перегружателей разных типов, которые позволили получить *впервые* для таких кранов динамические характеристики при основных технологических режимах работы и подтвердить достоверность полных и упрощенных расчетных моделей;

- *впервые* для перегружателя решена проблема моделирования во временной области динамического взаимодействия инерционных конструкций моста с тележкой - как инерционной подвижной нагрузкой (с решением дифференциальных уравнений движения с переменными коэффициентами [4]);

- полученные комплексные данные на момент испытаний, собраны в динамические паспорта для конкретных пространственных механических систем перегружателей трубчато-балочного типа с теоретическими и экспериментальными данными о динамических характеристиках крана по основным формам (при различном расположении грузовой тележки – получили *дальнейшее развитие*).

Практическое значение полученных результатов. Разработанная методика динамического обследования конструкций перегружателей с составлением их динамических паспортов не только систематизирует информацию о состоянии конструкций, но и делает более эффективным и быстрым процесс их обследования. Например, по изменению частоты и формы собственных колебаний можно определять возможное место расположения разрушенного элемента. Применение инженерных динамических моделей для решения задач о подвижной нагрузке и о гашении колебаний при помощи динамического гасителя колебаний (ДГК) позволит рассчитать динамические характеристики и НДС по более корректным схемам, что, в свою очередь, позволит снизить уровень динамических напряжений в конструкций, а также обеспечить работоспособность приборов и оборудования, заданный уровень комфорта для машинистов. 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, предотвращения аварий и паспортизации несущих металлоконструкций перегружателей. Также результаты работы внедрены в учебный процесс ГВУЗ «ПГАСиА» (приложение А).

Личный вклад соискателя. Основные результаты исследований, приведённые в диссертационной работе, были получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем:

- в проведении динамических расчетов сооружения с учетом влияния различного коэффициента неупругого сопротивления [5];
- в проведении аналитического обзора литературы [6];
- в моделировании основных пространственных форм перегружателя и его расчете на вынужденные колебания [7];
- в расчете на подвижную нагрузку [8, 9];

- в проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов [10];
- в применении динамического мониторинга для контроля динамических характеристик перегружателя [11, 12];
- в разработке ДГК для гашения амплитуд колебаний перегружателя [13].

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались, были обсуждены и опубликованы на таких конференциях: XV Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии, наука, техника, технология, образование, здоровье» (г. Харьков, 2007 г.); II Міжнародна наукова-практична конференція «Безпека життєдіяльності людини, як умова сталого розвитку сучасного суспільства» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), I 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.); научная сессия «Новое в исследовании и проектировании пространственных конструкций» (г. Москва, 2008 г.); «Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности» (г. Днепропетровск, 2013 г.); X Міжнародний симпозіум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (м. Івано-Франківськ, 2014 р.), I Международная научно-техническая конференция «Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении» (г. Днепропетровск, 2014 г.).

В полном объёме законченная диссертационная работа докладывалась на расширенном заседании кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций ГВУЗ «ПГАСиА» (январь 2015 г.).

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертационной работе опубликовано в 13 научных трудах, которые отображают ее основное

содержание, в том числе: 7 статей в научных специализированных изданиях Украины (из них 2 статьи без соавторов), 1 статья в научном периодическом издании другого государства, которая входит в международную наукометрическую базу Scopus, 1 статья в специализированном издании включенное в международную наукометрическую базу РИНЦ (без соавторов), 2 статьи - в другом издании, 1 публикация тезисов доклада на международной научно-технической конференции, 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка использованной литературы из 198 названий и двух приложений. Диссертация содержит 16 таблиц и 69 рисунков. Общий объём диссертации - 174 страницы, в том числе: 134 страницы основного текста, 9 полных страниц рисунков и таблиц, 22 страницы списка использованных источников и приложений на 9 страницах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВИДОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ, МЕТОДИК ИХ РАСЧЕТОВ, ОБСЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

В первом разделе рассмотрено создание и применение металлоконструкций мостовых перегружателей. Проанализирована научно-техническая литература и методики по расчетам металлоконструкций кранов, по проведению обследований и динамических испытаний.

1.1. История создания и применения мостовых кранов-перегружателей

До 30-х годов угольные и рудные мостовые перегружатели для предприятий Советского Союза, в основном, поставлялись зарубежными фирмами "PATTERSON", "DEMAG", "MAN", "LANDSWERK" и др.

Мостовые перегружатели по своему конструктивному построению можно отнести к козловому типу [14-15], но они отличаются высокой производительностью и движением грейферных тележек. Перегружатели представляют собой двухконсольный мост с основным пролетом (расстояние между осями крановых рельсов) 76 м и реже 60 м, с вылетом консоли до 35 м и высотой до 35 м. Основными характеристиками мостовых перегружателей являются грузоподъемность и производительность.

Масса мостовых перегружателей (однотележечных) достигает 1200 т и более, поэтому для его передвижения используется несколько рельсовых путей (до четырех), с применением до 32 ходовых колес.

Мостовые перегружатели и козловые краны состоят из пролетного строения (мост с консолями), опор, опирающихся на ходовые тележки крана (балансиры) [16]. По конструктивному исполнению эти краны не имеют

существенного различия. Различаются они между собой следующими характеристиками: назначением, пролетом, грузозахватным приспособлением, рабочими скоростями и группами режимов работы. У козловых кранов механизм передвижения крана и тележки (с поднятым грузом) могут работать совместно. У мостовых перегружателей скорость механизма передвижения крана является установочной, а скорость механизма подъема груза и передвижение тележки – рабочей.

В Советском Союзе **конструкции** первых перегружателей начали проектироваться в начале тридцатых годов под руководством П. Е. Богуславского и Н. С. Стрелецкого.

В 50-х годах была проведена унификация металлоконструкций перегружателей, в основе которой легла схема с подвижно-шарнирным соединением моста с опорам (рис. 1.1). Мост крана на жесткой опоре имел возможность скользить по текстолитовым плитам, а на шарнирной – поворачиваться на сферическом шарнире. Масса стальных конструкций перегружателей шарнирной системы пролетом 76,2 м достигала 1200 т.



Рис. 1.1. Мостовой кран-перегрузатель решетчатой конструкции с шарнирной и жесткой опорами

Основными недостатками такой системы являлись: большая масса металлоконструкций; трудоёмкость изготовления (составные сечения) и длительный процесс монтажа (т.к. применялись заклёпочные монтажные соединения). Преимуществом была большая величина забегания опор до 6 м.

В 60-х годах ЦНИИПСК разработал перегружатель жесткой системы (рис. 1.2). Мост имеет гибкую и жесткую опоры, единые с мостом, отсутствуют шарниры. Монтажные соединения предусмотрены на фрикционных высокопрочных болтах или заклепках.

Применение перегружателей жесткой системы пролетом 76,2 м с использованием высокопрочной стали позволило снизить вес стальных конструкций с 615 т (шарнирная система) до 501 т [17]. Снижился допускаемый перекося до 600 мм [18].



Рис. 1.2. Мостовой кран-перегружатель решетчатой конструкции с гибкой и жесткой опорами

В 70-х годах изготовление (металлоконструкции и механическая часть) перегружателей переносится на Сибирский завод тяжелого машиностроения «СИБТЯЖМАШ». Разрабатывается новая конструкция моста и опор (совместно с ЦНИИпропестальконструкцией).

Новый перегружатель трубчато-балочной конструкции с обеими жесткими опорами (рис. 1.3) состоит из крупных монтажных блоков. При их изготовлении применялась автоматическая сварка с минимальным количеством монтажных швов [19]. Основная конструкция перегружателя состоит из 28 блоков массой от 10 до 55 т. В новой конструкции допускаемый также максимальный перекося 600 мм [20].



Рис. 1.3. Мостовой кран-перегрузатель трубчато-балочной конструкции с опорами равной жесткости

Научные **исследования** и дальнейшее совершенствование конструкций мостовых перегружателей велись во многих странах. В частности, в странах СНГ – они проводились во ВНИИПТМАШе, в проектных институтах ЦНИИ «Проектстальконструкция», «Днепрпроектстальконструкция» и «ПромстройНИИпроект», в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана, в Санкт-Петербургском и Харьковском политехнических университетах, в Уральском государственном техническом университете; в других научно-исследовательских и учебных заведениях (например, в Днепропетровский национальном университете железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, ПГАСиА).

В большинстве случаев эти исследования проводились совместно с сотрудниками предприятий Уральского завода тяжёлого машиностроения, «СИБТЯЖМАШ», Новокраматорского машиностроительного завода, завода подъемно-транспортного оборудования им. С. М. Кирова и др.

Также **изготовление** стальных конструкций перегружателей решётчатого типа проводилось на заводах металлоконструкций в городах Днепропетровске (ПАО «Днепропетровский завод металлоконструкций им. И. В. Бабушкина»), Новокузнецке, Орске, Челябинске и др.

Описания конструкций и особенностей расчета мостовых перегружателей даны в работах [21 - 24].

В последние годы краны-перегрузатели изготавливали в Украине (Мариуполь, на ПАО «Азовмаш», Одесса, Краматорск); в Российской Федерации (ЗАО «Сибтяжмаш», Магнитогорск, Красноярск); в Германии - немецкие компании «Bleichert» (рис. 1.4), «Demag», «MAN»; в Финляндии –



Рис. 1.4. Мостовой кран-перегрузатель шпренгельно-балочной конструкции с шарнирной и жесткой опорами

компания «KONECRANES NORDIC CORPORATION» (перегрузатель шпренгельно-балочной конструкции) и др.

1.2. Проектные нормативные материалы

С 1928 года в Советском Союзе начались применяться технические условия, в которых краны делятся по режимам работы на три группы. В 1943 г. выходят «Основные данные по проектированию и расчету кранов» [25], а в 1957 г. - «Технические условия на проектирование мостовых электрических кранов», которые основаны на методике допускаемых напряжений.

Нормативная база проектирования металлоконструкций для мостовых перегружателей появилась в 1962 г. с введением «Указаний по проектированию стальных конструкций кранов-перегрузателей» [26]. В новой методике расчета впервые был принят метод предельных состояний.

Расчет несущих стальных конструкций перегружателей производится по двум предельным состояниям: первое – по прочности, устойчивости и выносливости; второе – расчет от чрезмерных деформаций и колебаний. По сравнению со старыми нормами здесь появился расчёт на рабочие и не рабочие состояния крана металлоконструкций с учётом явлений усталости и перекосных нагрузок.

Первое рабочее состояние «подъем груза и движение» - перегружатель находится в неподвижном состоянии, а грейферная тележка перемещается по мосту крана с подъемом груза (рис. 1.5, а).

Второе рабочее состояние «передвижение крана» - перегружатель передвигается, а грейферная тележка без груза стоит на одной из опор, согласно инструкции по эксплуатации (рис. 1.5, б).

Третье нерабочее состояние - перегружатель не работает и застопорен, а грейферная тележка без груза стоит на одной из опор, согласно инструкции по эксплуатации (рис. 1.5, в).

При расчете конструкций принят «условный динамический коэффициент»:

- для стальных конструкций моста и опор крана - равный 1,2;
- для стальных конструкций ездовых балок и элементов их крепления к мосту крана - равный 1,5.

Вводится учет особых динамических нагрузок: удар крана или тележки о буфер, горизонтальная поперечная нагрузка при внезапной остановке крана. Здесь также применяется «условный динамический коэффициент».

При переходе на методику предельных состояний было учтено соответствующими коэффициентами, что перегружатели на многих предприятиях являются единственным грузоподъемным и транспортным средством, обеспечивающим регулярную и непрерывную подачу материала в условиях весьма тяжелого режима работы.

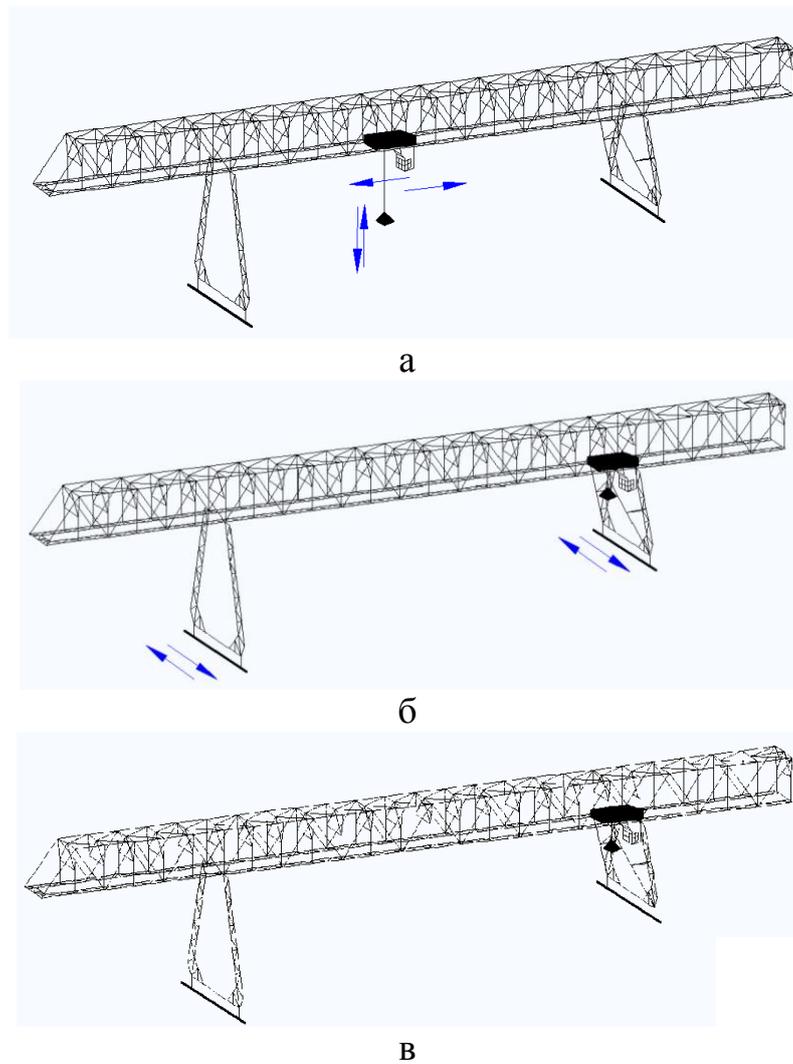


Рис. 1.5. Расчетные случаи металлоконструкций мостового перегружателя:
 а - рабочее состояние «подъем груза и движение»; б - рабочее состояние «передвижение крана»; в - нерабочее состояние

В 1971 г. ЦНИИПСК в составе норм и технических условий (ТУ) выпустил главу «Металлические конструкции кранов-перегрузателей и козловых кранов большой грузоподъемности» [27].

Позже ЦНИИПСК разработал руководящие технические материалы (РТМ) «Нормы расчета и проектирования стальных конструкций мостовых перегружателей и козловых кранов большой грузоподъемности» [28]. Они предусматривают специфические требования, относящиеся к стальным конструкциям. Указано, что расчет стальных конструкций крана должен проводиться для проверки безопасности и работоспособности крана в

рабочем и нерабочем состояниях. Также дополнительно к проектированию кранов были созданы крановые нормы [1, 29 - 36].

С 1984 года вводится отраслевой стандарт (ОСТ) [37] на расчет стальных конструкций мостовых и козловых кранов грузоподъемностью от 1 до 50 т. В этом стандарте расчет металлоконструкций разделяют уже на три предельных состояния: первое – расчет по прочности, устойчивости; второе – проверка выносливости; третье – расчет допустимых деформаций конструкций.

В 1993 году вступает в силу стандарт [38], в состав которого включены «Временные указания по расчету стальных конструкций мостовых и козловых кранов».

Отметим также справочное руководство российских норм РД 24.090.120-07 [39]. В руководстве появились приложение для определения динамических нагрузок, возникающих при проходе колес крана по стыкам рельсового пути, а также указания по расчёту взаимодействия крана (тележки) с буфером. Норматив по проектированию металлоконструкций мостовых кранов РД 22-322-02 [40] предназначен для подготовки ремонтного производства, ремонта изделий, а также контроля качества проведенного ремонта.

Зарубежные нормы проектирования мостовых кранов разрабатывали: Европейская федерация по грузовым операциям (Federation Europeenne de la Manutention); Международная организация по стандартизации (Draft international standard) ISO/FDIS 20332-1 Cranes — Proof of competence of steel structures; в США CMAA (Crane manufactures association of America) и AISE (Association of Iron and Steel Engineers) и др. [41- 44].

Кроме того, проектировщик перегружателей должен выполнять требования и всей нормативной базы по проектированию стальных конструкций сооружений [45, 46], в том числе Еврокода 3 (EN 1993).

В зависимости от интенсивности работы крана его металлические конструкции рассчитываются либо на статическую прочность по

наибольшим нагрузкам или на усталостную прочность по эквивалентным нагрузкам [47].

Основными нагрузками при расчетах металлоконструкций на прочность и устойчивость являются: вес поднимаемого груза, собственный вес конструкций и расположенных на ней механизмов; ветер рабочего состояния; силы инерции, действующие при нормальных условиях работы крана.

Нормативные весовые постоянные нагрузки состоят из веса стальных конструкций, веса перегрузочных устройств (расположенных на консолях, в пролете или встроены на опорах), веса механического и электрического оборудования.

Для грейферной тележки характерно, что давление колеса всегда близко к максимальному значению, так как общая масса грейферной тележки составляет до 140 т. (металлоконструкции, механическая часть, технологическое оборудование и пустой грейфер) и обычно в 5-9 раз больше поднимаемого грейфером груза (15-16 т.).

Режим работы перегружателя в целом определяется условиями работы грейферной тележки, передвигающиеся вдоль моста по ездовым балкам со скоростью до 15 км/ч и обеспечивающей производительность 400-600 т/ч. Технологический цикл работы грейферной тележки длится 90-120 секунд, состоит из следующих операций:

- 1 - захват грейфером материала из штабеля;
- 2 - подъем грейфера с грузом;
- 3 – торможение грейфера в верхнем положении;
- 4 – передвижение грейферной тележки (разгон и торможение);
- 5 – спуск грейфера с грузом;
- 6 – торможение грейфера;

7 – освобождение грейфера от материала, затем происходит повторение операций 1-7, но уже с пустым грейфером.

Зачастую производят совмещение операций подъема грейфера с перемещением грейферной тележкой, перемещение грейферной тележкой и освобождение грейфера от материала.

Согласно ГОСТ 25546 – 82, цикл работы крана состоит из перемещения грузозахватного органа к грузу, подъем и перемещение груза, освобождения грузозахватного органа, возвращения его в исходное положение. Для весьма тяжелого режима работы перегружателя в этом документе установлено, что общее число таких циклов (назовем их «технологическими», в отличие от динамических «вибрационных») работы крана за срок его службы не должно превышать 4 млн. циклов [48].

Из рассмотренных справок о характере работ перегружателей следует, что обычно величина перемещения груза за сутки одного крана составляет в пределах от 7000 до 12550 т. Поэтому кран может набрать 143,3 – 272,3 тыс. технологических циклов за год в зависимости от количества часов работы за одни сутки и рабочих дней в году. Исходя из выносливости несущих элементов крана, срок его службы равен 15 - 28 лет.

Но, если считать мост как конструкцию с вибродинамическими нагрузками, то от влияния движения грейферной тележки происходят, например, продольно-горизонтальные колебания крана в вертикальной плоскости и др. Кран испытывает многократно увеличенные технологические знакопеременные продольно-горизонтальные и другие нагрузки.

Следует заметить, что новых нормативных документов по проектированию стальных конструкций кранов-перегружателей в Украине последнее время не выпускалось. Поэтому основные указания при проектировании таких конструкций рекомендуется выбирать из различных документов упомянутых выше.

В заключение обзора нагрузок и норм проектирования подчеркнём, что для конкретных расчётов крана на природные (ветер, сейсмика) и антропогенные нагрузки следует более подробно исследовать динамические

характеристики, нагрузки и совершенствовать методики таких расчётов. В связи с этим в данной работе рассматриваются, прежде всего, частоты и формы собственных колебаний, натурные виброграммы колебаний крана при технологических динамических нагрузок.

1.3. Научные исследования нагруженности мостовых кранов-перегрузателей

Расчеты по грузоподъемным кранам изложены в трудах И. И. Абрамовича, П. Е. Богуславского, А. А. Вайнсона, М. М. Гохберга, А. И. Дукельского, А. А. Комарова, А. Б. Парницкого и др. [47, 49 – 56].

Существует относительно немного книг по динамическим расчетам металлоконструкций грузоподъемных кранов. Этим вопросом занимались И. И. Абрамович, В. П. Балашов, Л. Я. Будиков, П. Е. Богуславский, А. А. Вайнсон, М. М. Гохберг, А. И. Дукельский, С. А. Казак, А. А. Комаров, М. С. Комаров, Н. А. Лобов, А. Б. Парницкий, М. И. Стукаленко и др. [49, 51, 53, 54, 57-60].

За рубежом исследованиям о динамике мостовых перегружателей посвящены работы учёных M. Adely, Gary J. Davis, D. M. Dawson, W. E. Dixon, Y. Fang, R. Ghazali, H. C. Huang, D. Kim, L. Marsh, N. Miyata, Z. Mohammed, I. Murata, Y. Okubo, K. Radlov, A. Saedian, W. Singhose, J. M. Wang, V. Gašić, A. Obradović и др. [61-66].

Существенные нагружения металлических конструкции кранов обусловлены динамическими нагрузками, определению которых в мостовых кранах с гибким подвесом груза посвящены работы В. П. Балашова, Н. А. Лобова, С. А. Казака и др. [58, 59].

Влиянием случайных неровностей подкрановых путей в горизонтальной плоскости на боковые силы, действующие на ходовые колеса мостовых кранов посвящена работа [67]. Анализ замеров неровностей подкрановых путей мостовых кранов в промышленном здании показал [68], что частотный

интервал существенных значений спектральных плотностей находится в пределах от 0,002 до 1,6 Гц, причем в большинстве случаев максимальная энергия спектра отклонений содержится на низких частотах. Частота основного тона колебаний мостовых кранов общего назначения с гибким подвесом груза изменяется в интервале значений 2,4 – 4,0 Гц [69]. Но в мостовых кранах-перегрузателях основные частоты существенно ниже 0,6 – 2,0 Гц, так как они имеют пролеты от 60 до 100 м. При движении по подкрановым путям могут возникать случайные вертикальные колебания и соответственно им напряжения в металлоконструкциях пролетного строения.

С. А. Казак рассматривал динамику подъема в мостовых перегрузателях [59], применял эквивалентную четырехмассовую схему с тремя упругими связями и определил коэффициенты динамики в упругих связях перегрузателя. Наиболее сильно перегружаются канаты грейфера - почти в 7 раз, а степень перегрузки моста составляет до 35%. Также исследованиями динамических коэффициентов и собственных частот мостовых кранов занимались М. М. Гохберг, А. Б. Парницкий и др.

В работе Н. А. Лобова [58] рассмотрены некоторые вопросы динамики подъема груза, где основное внимание уделяется методике расчета максимальных нагрузок кранов в режиме подъема груза с основания. Указано, что уменьшение вертикальных колебаний моста при работе с грузом обеспечивается путем встраивания в конструкцию моста или механизма подъема гасителя колебаний.

В учебном пособии [70] представлены решения задач, связанные с передвижением крана по рельсовому пути: методика разработки расчетных динамических схем кранов, работающих в режимах нестационарного и стационарного движения; методы расчета динамических нагрузок кранов в режиме пуска и торможения моста; ударные нагрузки:

- «мягкий» удар (при наезде крана на концевые упоры);
- «жесткий» удар (при проходе ходовыми колесами рельсовых стыков).

Л. Я. Будиков описал метод расчета оптимальных (рациональных) тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов, базирующийся на многопараметрическом анализе переходных процессов динамической модели мостового крана (четырёхмассовой и трёхмассовой) [71].

М. И. Стукаленко обнаружил, что известные трёхмассовые динамические модели с двумя упругими связями не учитывают кинематической связи груза с металлоконструкцией при подъеме и опускании груза мостовыми кранами. По этой причине данные модели не точно соответствуют моделям реальных систем подъема и опускания груза. Для новых трёхмассовых динамических моделей с тремя упругими связями предлагается использовать полиспастный подвес в виде двух упругих связей «груз-привод» и «груз-металлоконструкция» [72]. В статье [73] рассмотрено влияние длины полиспастного подвеса на динамику подъема мостового крана при нормальной работе и обрыве каната, математическая модель подъема груза рассмотрена в статье [74].

В статье [75] исследовались продольные колебания канатов в реальном грузотранспортирующем канатном устройстве и даны решения определения усилий в канатах при больших скоростях подъёма.

Заметим, что актуальному вопросу определения остаточного ресурса металлоконструкций кранов посвящены работы В. В. Болотина, О. В. Григорова, А. А. Дубова, А. О. Немчука, В. Н. Пустового, С. Л. Рягина и др.

Множество работ посвящено учету старения несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов и оценки их долговечности. Например, в работе [76] авторы статьи концентрируют внимание на основных факторах эксплуатации кранов (помимо расчета на циклы):

- действие переменных напряжений;
- действие постоянных напряжений;
- температура эксплуатации;

- влияние химических веществ из окружающей среды;
- влияние агрессивных и коррозионных сред;
- радиационное облучение;
- действие магнитных полей.

Также поднимаются вопросы об уточнении методов расчета на долговечность металлоконструкций грузоподъемных кранов и о разработке новых критериев диагностирования их остаточного ресурса в процессе эксплуатации.

В статье [77] предложена методика продления остаточного ресурса решетчатых металлоконструкций рудного перегружателя за счет восстановления заклепочных соединений. Это позволило разработать методику ремонта головок заклепок постановкой дополнительных шайб на электросварке.

А. О. Немчук предлагает методику оценки остаточного ресурса кранов мостового и козлового типа по критерию многоциклового усталости.

В. В. Болотин [78,79] рассматривал проблемы прогнозирования ресурса и срока службы на основании информации о материалах, узлах, деталей, а также о нагрузках и воздействиях. Рассмотрены методы прогнозирования показателей долговечности на стадии проектирования, а также индивидуального остаточного ресурса.

В. А. Слободяник и Л. М. Козарь предложили применять метод квалиметрии (определения технического уровня любой грузоподъемной машины), который позволит обосновывать эффективность проведения модернизации, связанной в первую очередь с усилением металлоконструкции моста крана [80].

А. А. Дубов в статье [81] рассматривает проблемы при оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, обусловленные недостаточной эффективностью традиционных методов неразрушающего контроля и несовершенством поверочных расчетов на прочность. Существенные недостатки традиционных методов и средств

неразрушающего контроля (ультразвуковой, магнитопорошковая дефектоскопия, радиографический контроль и др.) основываются на: трудностях использования методов неразрушающего контроля в зонах образований пластических деформаций; малой зоне контроля; требованиях к подготовке поверхности проверяемого образца и др.

В. Н. Иванов в работе [82] представил обзор методов диагностирования подъемно-транспортных машин и предложил методологию определения остаточного ресурса грузоподъемных кранов.

Основные методы и средства неразрушающего контроля, применяемые для металлических конструкций [83-85], связаны с учёными, занимающимися этими вопросами:

- акустический метод (ультразвуком определяется расположение и размеры дефектов и повреждений: трещины, поры, несплошность в металле и др.) - А. Х. Вовилкин, А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов, М. В. Королев, Ю. В. Ланге, В. Г. Шевалдыкин, В. Г. Бадалян и др.;

- акустико-эмиссионная диагностика (определение дефектов по степени опасности и прочности объектов, а именно: резервуаров, трубопроводов, сосудов, котлов) - В. И. Иванов, В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот, А. С. Трипалин, В. М. Белов, В. М. Баранов и др.;

- магнитный (информативные параметры: коэрцитивная сила, намагниченность, индукция, магнитная проницаемость, напряженность, эффект Барргаузена) - А. П. Дегтярев, В. В. Клюев, В. Е. Щербинин, В. Ф. Мужичский, Э. С. Горкунов и др.;

- вихретоковый (безконтактность преобразователя и объекта, высокие скорости движения объекта; выявление усталостных трещин металла на ранних стадиях развития) - В. Г. Герасимов, В. В. Клюев, В. В. Сухоруков, Ю. К. Феодосенко;

- оптический - А. А. Кеткович, В. Н. Филинов и др.;

- капиллярный (определение несплошности) - А. С. Боровиков, В. В. Клюев, М. В. Филинов и др.;

- вибрационный - В. И. Петрович, В. Г. Рыгалин и др.

В настоящее время применяются методические указания по использованию магнитного паспорта крана для определения остаточного ресурса магнитным (коэрцитиметрическим) методом неразрушающего контроля [86]. В этом методе производится измерение коэрцитивной силы по двум направлениям в зонах действия максимальных напряжений. Магнитный контроль позволяет установить, в каких зонах металлоконструкциях напряжения в металле достигли предела текучести и началась местная пластическая деформация. Этот метод предпочтителен для новых смонтированных кранов с составлением магнитного паспорта в разгруженном состоянии, для возможного дальнейшего анализа остаточного ресурса металлоконструкций крана.

В статье [87] описано преимущество контроля напряженного и усталостного состояния сварных соединений на базе оценки коэрцитивной силы. При наблюдении нагруженности конструкций коэрцитивная сила позволит произвести поиск дефектов и предвидеть их возможное возникновение развития в будущем. Заметим, что в статье описано [88] практическое применение магнитной структуроскопии и говорится о необходимости качественной подготовки специалиста (технического эксперта) по магнитному контролю.

Пустовой В. Н. [89] изложил концепцию безопасного повреждения металлоконструкций грузоподъемных машин с усталостными трещинами и коррозионным поражением. Он описал методы расчета остаточной прочности и остаточного ресурса, а также методы диагностирования металлоконструкций с применением термовидения.

Статья [90] описывает актуальную задачу создания методики модернизации грузоподъемного оборудования с целью продления сроков безопасной службы.

В динамической модели крана-перегрузателя шпренгельного типа в работе [91] представлена зависимость собственных форм и частот колебаний крана от толщин стенок различных несущих элементов.

В диссертации [92] исследуются только ездые балки кранов-перегрузателей, развитие усталостных трещин и НДС. Была разработана программа «Остаточный ресурс» по оценке остаточного ресурса ездых балок. Диссертация [93] обосновывает применение козловых кранов больших пролётов, применение различных типов опор и сопряжений опорного узла.

Расчёт несущих стальных конструкций мостовых перегружателей проводится в теоретической части диссертации [94], а в экспериментальной – измерение амплитуд, частотных характеристик ездых балок. Исследовалось поведение роста усталостной трещины ездой балки в натуре.

Ремонту металлоконструкций кранов посвящены труды Л. М. Козар, Е. М. Концегого, Б. М. Розеншейна, В. А. Слободяника, Л. И. Соколова, Р. Н. Яхнина и др. [95-97]. В Украине действуют нормы на капитальный ремонт конструкций грузоподъемных кранов ТУ У 29.2-21674530-001-2003 [98]. Норматив на изготовление грузоподъемных кранов СОУ МПП 53.020-158:2006 [99].

В Российской Федерации ВНИИПТМАШ разработал руководящий документ по изготовлению, ремонту и реконструкции металлоконструкций грузоподъемных кранов - РД 24.090.97-98 [100]. Госгортехнадзор Российской Федерации выпустил справочник по техническому обслуживанию, ремонту и диагностированию грузоподъемных машин [101].

Расчет конструкций и сооружений на динамические воздействия проводили В. А. Банах, Л. А. Бородин, А. В. Дукарт, Б. Г. Коренев, И. Л. Корчинский, В. А. Котляревский, А. А. Петров, Е. С. Сорокин, В. И. Сысоев, Л. М. Резников, А. П. Филипов, П. М. Френкель и др. [102-110].

В 1988 году ЦНИИСК издал рекомендации [111] по виброзащите производственных зданий. Классификация методов и средств защиты от вибрации дана в ГОСТ 26568-85 [112]. Общие требования вибрационной безопасности приведены в ГОСТ 12.1.012-2004 [113]. Защита от вибрации рассматривается в [114-116].

Б.Г. Коренев и Л.М. Резников занимались динамическими гасителями колебаний применительно к зданиям и сооружениям [117]. А. Л. Загора и М. И. Казакевич изучали гашение колебаний мостовых конструкций [118].

В статье [119] Бондаренко Л.Н. рассмотрел гасители колебаний трения качения (по темпу затухания), доказана их простота в эксплуатации и конструкции по сравнению с традиционными гидравлическими гасителями.

Проблемам повышения сейсмостойкости зданий и сооружений посвящены труды многих ученых: Я. М. Айзенберг, И. Л. Корчинский, А. И. Мартемянов, Ю. И. Немчинов, Н. А. Николаенко, Т. О. Ормонбеков, С. В. Поляков, В. С. Поляков, J. F. Borges, M. Newmark, A. Ravara, E. Rosenblueth и др. [120-125].

Большой вклад в развитие методики и теории эксперимента сооружений внесли работы Н. Н. Аистова, Р. И. Аронов, С. А. Ильяевича, И. М. Рабиновича и Н. С. Стрелецкого. Разработкой измерительных приборов (тензометры, прогибомеры, индикаторы, клинометры, вибрографы и др.) занимались К. И. Давиденков, С. А. Душечкин, А. М. Емельянов, Л. С. Максимов и многие другие авторы.

Изучение динамики кранов является задачей, связанной с основами и теории колебаний, и строительной механики сооружений.

Теории линейных и нелинейных колебаний описаны в трудах И. В. Ананьев, И. М. Бабакова, В. Л. Бидермана, К. С. Колесникова, В. Л. Крупенина, Л. М. Литвина, Д. Р. Меркин, В. В. Мигулин, А. Ф. Смирнов, С. П. Стрелков, Я. Г. Пановко, Э. Л. Позняка, С. П. Тимошенко, А. П. Филипова, J. P. Den Hartog и др. [126-137].

Динамическое взаимодействие подвижной нагрузки с конструкциями пролетных строений мостов рассмотрено в работах А. Г. Барченкова, Н. Г. Бондаря, Е. Е. Гибшмана, С. А. Ильяевича, И. И. Казея, В. П. Редченко и др. [138-141]. В школе академика В. А. Лазаряна (ДНУЖТ им. В. Лазаряна, ИТМ НАНУ) такие исследования проводили С. И. Конашенко, В. П. Орленко [142], В. Д. Данович и др. Отметим, что И. И. Давыдов и В. В. Кулябко применяли для расчетов нелинейных колебаний взаимодействия сооружения с подвижной нагрузкой прямой динамический метод в форме «метода прямых» [143, 144].

1.4. Обзор методик проведения экспериментальных натуральных исследований

После окончания срока службы (выше был отмечен большой разброс требований норм) для определения технического состояния крана проводятся экспертные обследования с частотой раз в год по РД 10-112-5-97 [145] и не реже 2 лет в ОМД 0120253.001-2005 [2].

Основным нормативным документом по оценке технического состояния крана является НПАОП 0.00-1.01-07 [146]. Существует ряд действующих сегодня методик экспертного обследованию грузоподъемных машин [2]. В них регламентируется порядок и оценка состояния основных несущих металлоконструкций крана, проведения статических и динамических испытаний.

Для оценки технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений применяется ДБН 362-92 [147], см. также работы [148-153].

В Российской Федерации применяются методические указания по обследованию специальных металлургических кранов РД 10-112-6-03 [154], методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы (часть 1 - общие положения РД 10-112-96 [155],

часть 5 - краны мостовые и козловые РД 10-112-5-97 [156]). Также выпущен справочник по техническому обслуживанию, ремонту и диагностированию грузоподъемных машин [101]. Действует ГОСТ Р 53006-2008 по «Оценке ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов», который распространяется на объекты, выработавшие установленный проектом ресурс.

Большой вклад в развитие методики и теории эксперимента внесли работы выполненные под руководством Н. Н. Аистова, С. А. Ильясевича, И. М. Рабиновича и Н. С. Стрелецкого. Созданием измерительных приборов (тензометры, прогибомеры, индикаторы, клинометры, вибрографы и др.) занимались ученые Н. Н. Аистов, К. И. Давиденков, С. А. Душечкин, А. М. Емельянов, Н. Н. Максимов и др.

Экспериментальные методы определения демпфирования колебаний механических систем описывали, например, А. П. Яковлев и В. В. Матвеев. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений описаны в трудах [157-163]. Методы испытаний козловых кранов описаны в ГОСТ 25251-82 [164].

В работах [165, 166] В. П. Редченко предлагает представляет проведение мониторинга технического состояния мостов методами пассивной диагностики, описывает особенности спектрального анализа при исследовании и обработке виброграмм колебаний конструкций.

Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролетное строения автодорожных мостов и нормирования динамических коэффициентов описана в диссертации [167].

Технологии вибрационного мониторинга зданий и сооружений описаны в [168]. Представлены различные типы автоматических датчиков мониторинга вибрации. Описана возможность проведения дистанционного мониторинга сооружения с контролем вибрации и шума.

В [169, 170] представлены результаты статических и динамических испытаний металлоконструкций мостового перегружателя трубчато-

балочной конструкцией: средние значения динамических коэффициентов при эксплуатационных режимах и обрыве груза; частота собственных колебаний (1,52-1,55 Гц); логарифмический декремент колебаний для пролетных (0,0339-0,0437) и опорных конструкций (0,0154-0,0172); время затухания колебаний крана (53 с). Обращается внимание на различные динамические коэффициенты для разных конструкций.

Инженеры В. М. Альперин и О. И. Ганиза в работе [171] поднимали вопрос для кранов-перегрузателей больших пролетов о необходимости установить нормированное время затухания собственных колебаний конструкции. И. И. Абрамович в работе [49] рассматривал время колебаний моста козлового крана в продольном направлении (рекомендовано ограничивать 15 с).

Описана методика [172] диагностирования состояния металлических конструкций перегружателя шпренгельно-балочного типа. Методика состоит из проведения внешнего осмотра, измерения толщины стенки (для оценки коррозионного износа), определения НДС в натуре (использование тензорезисторов) и контроль металлоконструкций крана методом акустической эмиссии. Был определен источник снижения несущей способности элементов - многоцикловое динамическое воздействие с ослаблением сечения элементов.

В статье [173] рассмотрены методы исключения погрешностей определения динамических характеристик большегрузных объектов, получаемых экспериментальным путем.

1.5. Выводы по разделу 1

1. Из обзора литературы и нормативно-технических источников по расчетам и эксплуатации перегружателей следует, что практически не развиваются такие научные направления исследований:

- измерение динамических нагрузок и реакций конструкций при специфических технологических операциях;

- уточнение динамических расчетов несущих металлических конструкций при различных ситуациях сложной пространственной разветвлённой системы (также относительно мало рекомендаций по выбору упрощенных инженерных моделей);

- теоретическое прогнозирование состояния конструкций и его использование во время проведения быстрых экспресс-обследований, поиска дефектов и повреждений.

2. Программные отечественные вычислительные комплексы не позволяют исследовать динамическое взаимодействие сооружения с подвижной нагрузкой при учете инерционности масс моста крана и самой подвижной нагрузки, а также нелинейное поведение сооружений во временной области.

3. Мало информации о частотах основных пространственных форм свободных колебаний.

4. Отсутствуют рекомендации по снижению продольно-горизонтальных амплитуд колебаний крана-перегрузателя и диссипации (в натуральных условиях).

По теме первого раздела опубликована одна публикация [5].

РАЗДЕЛ 2

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ, ПОВРЕЖДЕНИЙ И АВАРИЙ МОСТОВЫХ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ (ИЗ ОПЫТА НАТУРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ)

В данном разделе приводится анализ и некоторая классификация нагрузок, дефектов, повреждений и аварий металлоконструкций мостовых перегружателей, известных из литературы и личного опыта автора по натурному обследованию (автор участвовал в проведении натуральных обследований несущих металлоконструкций более 20 мостовых перегружателей).

2.1. Классификация нагрузок

В нормативной базе [28, 37] в расчётах несущих металлоконструкций перегружателей можно выделить статические и динамические нагрузки, расчётные случаи и сочетания нагрузок.

Основные виды **статических** нагрузок:

- «весовые» (вертикальные от элементов крана, оборудования, снега, обледенения и т.д.);

- «подвижные» (условно, при расчётах по нормам, они как бы статически, без динамики, переносятся на конструкцию моста), влияние которых возможно в любом месте вдоль моста крана (вес грейферной тележки, вес груза и горизонтальные силы от его веса при отклонении грузовых канатов от вертикали);

- перепад температуры на 70°C .

Основные виды **динамических** нагрузок (квазистатические):

- горизонтальные инерционные от разгона-торможения тележки, направленные вдоль (поперек) подтележечного рельса (равные 10% от веса гружёной тележки);

- горизонтальные инерционные от пуска (остановки) механизма передвижения крана;
- вертикальные и горизонтальные от работы механизма подъема груза (учитывается динамическим коэффициентом);
- вертикальные от передвижения перегружателя, грейферной тележки с грузом по неровностям путей, стыкам рельс (коэффициент толчков);
- горизонтальная от наезда крана или тележки на концевые буферные упоры;
- перекос крана, вызванный взаимным смещением опор (учитывается рабочий и аварийный перекос);
- ветровая (учитывается рабочие и нерабочее состояния крана), допускается определять по [3];
- сейсмическая, допускается определять по [46] (при необходимости).

При расчёте металлоконструкций перегружателя нужно учитывать коэффициент сочетания нагрузок [27] и расчётные случаи состояния крана (рис. 1.5).

Из натурного анализа работы металлоконструкций перегружателя было выявлено, что, помимо нормативных динамических нагрузок, кран испытывает временные дополнительные динамические эксплуатационные нагрузки. Эти нагрузки не учтены нормами, так как они идут в нарушение руководства по эксплуатации перегружателя и нормативной документации.

Причины дополнительных динамических нагрузок связаны с различными обстоятельствами:

- нарушение синхронности передвижения опор крана (перекос крана), отличается от нормативной тем, что происходят многократные пуски и торможения за один цикл передвижения (отсутствует плавность хода);
- различие высотных поперечных отметок кранового пути одной опоры (для двухпутного пути);
- перепад высотных отметок эстакад, по которым движется кран;

- гололед или засыпание снегом подкранового пути (происходит пробуксовка или скольжение колес крана);
- разные высотные отметки подтележного пути (одностороннее скатывание тележки на ездовых балках, или поперечное раскачивание тележки);
- боковой износ головки подтележного рельса и износ реборды колеса тележки (возникает трение между рамой грейферной тележки и ездовой балкой крана из-за уменьшения свободного габарита);
- неудовлетворительное техническое состояние подтележного рельса (выколы в головках, отсутствие крепления стыков, смещение рельсов, ослабление прижимных планок, трещины в шейках, дефекты и др.);
- отказ приборов безопасности (отсутствие сброса скорости передвижения тележки во время подъезда к буферам; неработоспособность приборов контроля забегания опор);
- технические ошибки эксплуатации крана (отсутствие пружинных или гидравлических буферов для гашения удара тележки в тупике моста крана).

Существует ряд недостатков в техническом контроле металлоконструкций эксплуатационными службами крана: не убираются пылевые отложения на металлоконструкциях, некачественно и несвоевременно проводится ремонт и очистка путей передвижения перегружателей, имеются коррозионные разрушения и др. (рис. 2.1).

Перегрузочные нагрузки на ездовые балки перегружателя создаются, в основном, от нарушения условий забора материала грейфером (неправильный захват материала из штабеля, вызывающий завал грейфера породой, отрыв смерзшейся породы, захват рельсовой футеровки днищ склада и др.).



Рис. 2.1. Дефекты и повреждения металлоконструкций перегружателя:
 а – пылевые отложения на опоре; б - вырез отверстия 0,7x0,7 м в верхнем поясе пролетного строения перегружателя; в – поперечная трещина с раскрытием в трубе пролетного строения; г – отсутствие крепления стыков и выкол в подошве рельса; д – разрыв диафрагмы жесткости ригеля опоры; е - сквозная коррозия элементов диафрагмы внутри мостовой пролетной балки перегружателя; ж - отложение производственной пыли на консоли перегружателя высотой до 15 см

Подкрановые и подтележечные рельсы перегружателя имеют свои допуски на укладку и эксплуатацию. Предельные отклонения рельсов для кранов принимаются в соответствии с НПАОП 0.00-1.01-07 [146], где сказано, что, если козловой кран пролетом 30 м и более, то отклонения для рельсовых путей определяются по нормам для перегружателей, см., например, руководство по эксплуатации «Перегружатели мостовые» Ф 01 3153 701РЭ [20].

Плохое состояние рельсов крана и подтележечных путей (трещины в шейке или головке рельса, выколы, горизонтальный и вертикальный износ головки, смещение в плане, зазоры и др. дефекты), требует постоянного ухода и рихтовки. Иногда рельсы продолжают использовать с перечисленными дефектами, что приводит к дополнительному увеличению нагрузок на несущие элементы крана, воспринимающие эти нагрузки (и влечёт их повреждение, вплоть до выхода из работы). Например, под подошвой стыка подтележечного рельса в ездовой балке проявляются трещины в сварных швах или в околошовной зоне ездовых балок.

2.2. Основные виды повреждений металлоконструкций и аварий мостовых кранов-перегружателей

Дефекты, повреждения и аварии строительных конструкций, зданий и сооружений описаны в трудах Я. Аугустина, Б. И. Беляева, Ф. Д. Дмитриева М. Н. Лащенко, Р. Рубицки, М. М. Сахновского, Р. Хэммонда, А. Н. Шкинева и др. [174-182].

В соответствии с ДБН В.1.2-14-2009 [183] и ДБН 362-92 [147] дефекты и повреждения металлоконструкций крана, в зависимости от значимости элемента для работоспособности конструкции, а также от степени опасности дефекта или повреждения, отнесены к одной из категорий – А, Б, В:

- к категории "А" отнесены дефекты и повреждения особо ответственных элементов и соединений, представляющие непосредственную опасность разрушения;

- к категории "Б" отнесены дефекты и повреждения, не представляющие в момент обнаружения непосредственной опасности для конструкций, но могут в дальнейшем вызвать повреждения других элементов (узлов, соединений) и при их развитии перейти в категорию "А";

- к категории "В" отнесены дефекты и повреждения, не относящиеся к категории "А" и "Б", и наличие которых не связано с угрозой разрушения.

Из проведенного анализа документации ПИ «Днепрпроектстальконструкция» и из личного многолетнего натурного опыта натурного обследования более 20 перегружателей было обнаружено, что для всех кранов наблюдалось два вида почти «стандартных» повреждений: первый - трещины в ездовых балках и выработка металла под подошвой рельса, второй - существенное однонаправленное смещение опор крана с балансиров в продольном направлении (из-за движения грузовой тележки).

Для перегружателя решётчатого типа наиболее характерны: ослабление заклепочного поля; коррозия узловых фасонок главных ферм и консоли крепления ездовой балки; трещины по основному металлу в опорном подкесе; погиби горизонтальных связей главных ферм; возникновение усталостных трещин в элементах верхнего пояса, вплоть до разрушения, негативное влияние состояния крепления рельса и др.

Для крана трубчато-балочного типа - поперечные трещины в трубе пролетного строения в месте крепления к ригелю опоры; трещины в диафрагмах пролетного строения с развитием их на основной металл трубы; разрушения элементов ригеля у опор, вызванные перекосными нагрузками; трещины в поперечных балках; отсутствие соосности (в плане) внутренней диафрагмы с креплением наружной поперечной балки.

Для крана шпренгельного типа – выработка металла в верхнем поясе коробчатых балок от трения рельса; коррозионные потери сечения коробчатых балок из-за образования внутреннего конденсата и внешних агрессивных сред; коррозионные повреждения узлов шпренгельной системы и др.

Дефекты и повреждения металлоконструкций мостовых кранов-перегрузателей целесообразно привязать к основным несущим элементам, к месту их возникновения и развития.

Существуют различия в конструктивном выполнении основных несущих металлоконструкций для перегружателей решетчатого, трубчатого и шпренгельного типа. Основные несущие металлоконструкции крана - пролетное строение, ездые балки (для передвижения грейферной тележки), опоры (стойка и стяжка) и узлы сопряжения пролетного строения с опорами. Различия приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Основные несущие металлоконструкции кранов-перегрузателей

Основной несущий элемент крана	Тип перегружателя		
	решётчатый	трубчатый	шпренгельный
Пролетное строение	Главные фермы с рамами и горизонтальными связями по верхним поясам ферм	Балка в виде трубы	Шпренгельная система (виде арки с подвесками) к которой подвешана коробчатая балка
Опоры	Пространственные решетчатые	Стержневая (труба с ребром жесткости)	Стержневая коробчатая стойка
Ездые балки	Двухтавровое сечение с горизонтальными связями с креплением к стойкам главных ферм	Двухтавровое сечение с креплением по всей длине к трубе пролетного строения	Входит в сечение пролетного строения

В нормах [146] сказано, что общая потеря сечения металла может достигать 20 % для эксплуатации крана в паспортном режиме. При 10% и более кран считается ограниченно работоспособным. При потерях более 20 % нужно выводить кран из эксплуатации или устранять повреждения путем ремонта (усиление поврежденных мест).

Перегрузатели находятся длительное время в эксплуатации на открытом воздухе с агрессивной внешней средой (градирни, тушильные башки, атмосферные осадки, известковая пыль и др.). Это приводит к значительной коррозии, особенно при отсутствии должного ухода (очистке и окраске конструкций). Коррозия уменьшает площадь сечения металла, вызывает концентраты напряжений.

Например, кран-перегрузатель, находясь в зоне влияния тёплых водяных паров тушильных башен коксохимического завода, приобретает значительные потери сечения металла в пролетном строении консоли. При толщине стенки 10 мм утоньшение металла происходит вплоть до возникновения сквозных отверстий.

Другой пример общего поражения неравномерной и язвенной коррозией всей конструкции крана-перегрузателя (пролетного строения, опор и других элементов) - при производстве вспучивания шлака. Металл основных конструкций имеет язвенные поражения диаметром 10-70 мм глубиной до 3-5 мм (при толщинах стенок от 10-30 мм).

Слабые места, подверженные коррозионным влияниям, - свободные края фасонки соединений раскосов и стоек с поясами главных ферм кранов решетчатого типа. При толщине фасонки 10-12 мм края имеют всего 1-2 мм, что приводит к концентратам напряжений с дальнейшим образованием трещин в них.

Помимо коррозии, на кранах имеется механическая потеря сечения (выработка), которая образуется вследствие трения металла о металл. Основное место выработки в перегрузателях - это верхний пояс ездовой балки (подрельсовая часть). Из-за ослабления креплений рельса к поясу или

разболтанности стыковых креплений происходит скольжение подтележного рельса по верхнему поясу. С течением времени образуется выработка в основном металле пояса глубиной 2-6 мм и более. Значения зависят от интенсивности езды грейферной тележки. Выработка под рельсом ухудшает плотность крепления прижимных планок (при нивелировке подтележного пути приходится выполнять подкладки под рельс). В итоге - возможность образования продольных трещин в полке в месте её соединения со стенкой ездовой балки. Особо актуальна эта проблема в кранах шпренгельного типа, где ездовая балка входит в пролётное сечение и имеет подрельсовую толщину 10-14 мм. Это отличается от кранов решетчатого и трубчатого типа (толщина верхнего пояса ездовой балки 25-30 мм), где есть возможность ездовую балку демонтировать и заменить на новую.

Существуют работы, которые посвящены усталостным повреждениям в ездовых балках кранов перегружателей. Появление трещин в околошовной зоне (в сварном шве или по кромке сварного шва) верхнего пояса ездовых балок, переходящие на основной металл стенки балки, приводят к полному разрыву балки (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Трещины в ездовой балке перегружателя трубчато-балочного типа:
 а - трещина в сварном шве верхнего пояса с выходом на основной металл стенки балки; б – трещина в стенке по границе околошовной зоны сварного шва верхнего пояса балки

Концевой Е.М. и Розеншейн Б.М. [96] рассматривали вопросы по ремонту металлоконструкций кранов, приводили примеры аварий перегружателей и причины их возникновения.

В труде [184] обращено внимание на невыполнение инструкций завода изготовителя по усилению надпорных узлов на перегружателях длиной консоли 30 и более метров на кранах, отработавших срок службы 15 лет. Описываются современные методы неразрушающего контроля при оценке НДС металлоконструкций кранов-перегружателей и необходимости создания специальных методик по технической диагностике кранов.

Описанные дефекты при неблагоприятных сочетаниях нагрузок могут приводить к авариям.

Авария с обрушением консоли произошла в 2006 г. на Ясиновском коксохимическом комбинате после 14 лет эксплуатации крана [184].

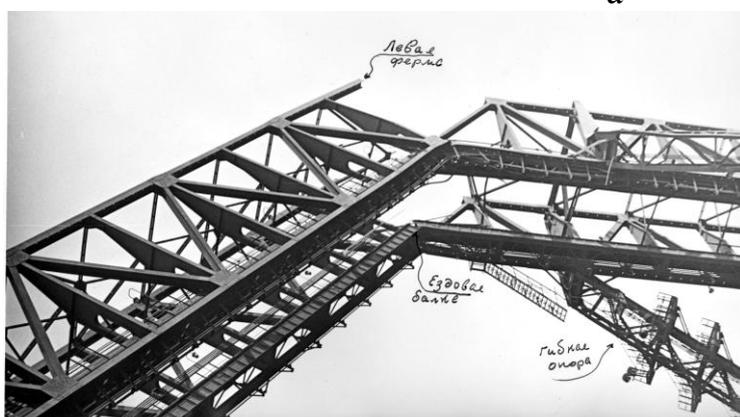
В Польше после 10 лет эксплуатации крана-перегружателя произошел разрыв верхнего пояса главных ферм в середине пролета [174].

При отсутствии или неработоспособности противоугонной системы под напором ветра тормоза колес не справляются, кран начинает набирать скорость и двигается до тех пор, пока не столкнется с жестким упором или рядом стоящим краном. Происходит превышение паспортной скорости - более 0,5 м/с (проектная).

Авария перегружателя решётчатого типа (полный разрыв обоих поясов главных ферм крана, рис. 2.3) вызвана развитием усталостных трещин в месте ослабления основного металла заклепочным полем в узле крепления верхнего пояса главных ферм (по сечению установки заклепок). Трещина развивалась до полного разрыва обоих поясов главных ферм крана.



а



б



в

Рис. 2.3. Обрушение консоли гибкой опоры перегружателя решетчатого типа: а – общий вид перегружателя; б – фрагмент сопряжения верхнего пояса главных ферм с гибкой опорой; в – фрагмент разрыва по заклепочному полю элемента верхнего пояса главных фермы

Падение консоли ремонтного помещения трубчато-балочного крана (рис. 2.4) было вызвано развитием трещины в околошовной верхней (растянутой) зоне сопряжения трубы пролетного строения с ригелем опоры. Трещина развивалась почти до половины сечения (характерно образование коррозионного налета), затем произошёл необратимый надлом остального сечения до полного разрыва. Причиной явились совокупность динамических нагрузок (выезд тележки на консоль, подъем и опускание грейфера, толчки от движения по рельсовому пути и др.).



а



б



в

Рис. 2.4. Обрушение консоли ремонтного помещения перегружателя трубчато-балочного типа: а – обрушение консоли ремонтного помещения; б – разрыв трубы пролетного строения и ездовой балки, в – отрыв консоли вместе с диафрагмой и стенкой ригеля

Обрушение моста перегружателя решетчатого типа вызвано разрывом элемента стяжки гибкой опоры, стойки опор разъехались в стороны (рис 2.5).



Рис. 2.5. Обрушение моста перегружателя решетчатого типа

Перекас крана решетчатого типа жесткой конструкции (рис. 2.6), вызван взаимным смещением (забегание, перекас) опор крана - более 2,5 м (при нормативном аварийном 0,6 м). Причина - поломка прибора безопасности, ограничивающего перекас крана.



а

б

Рис. 2.6. Перекас перегружателя решетчатого типа:

а – трещина в опорном подкосе; б – смещение опоры крана с кранового пути

2.3. Оценка НДС конструкций крана при действии «условного статического» торможения тележки

Повреждения в основных несущих элементах металлоконструкций зависят от эксплуатационных нагрузок, влияния очагов коррозии, накопления усталости металла и др. На примере трубчато-балочного перегружателя проведены исследования влияния разгона-торможения грейферной тележки на напряженное состояние металлоконструкций крана.

Выделим одну из возможных причин возникновения повреждений и аварий – технологическую цикличность крана: забор материала грейфером тележки, перемещение её и выгрузка грейфера, возврат в исходное положение (см. выше 4 операции). В нормах при нагрузках минимум от четырех

торможений и разгонов в каждом цикле, плюс самого движения тележки, динамика и выносливость конструкций крана почти не учитывается (кроме квазистатического коэффициента, «назначенного» ещё в прошлом веке и не подтвержденного современными исследованиями).

Нагрузка от движения грейферной тележки вызывает, в частности, продольно-горизонтальные деформации перегружателя (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Схема деформации крана в его вертикальной плоскости при движении тележки

Напряжения считались при суммировании нагрузок: собственный вес металлоконструкций крана; вес механического и электрического оборудования; расчётная масса грейферной тележки (178 т); горизонтальная инерционна продольная нагрузка (условно «квазистатическая динамическая нагрузка») при передвижении грейферной тележки (216 кН).

Горизонтальное перемещение моста крана составило 20,26 мм от горизонтального усилия в 216 кН (влияние торможения грейферной тележки).

Наибольшие напряжения получены в ригелях опор, рис. 2.8 а, в трубе пролетного строения (в месте сопряжения трубы с ригелем), рис. 2.8 б, в опоре (сопряжения опоры с ригелем), рис. 2.8 в.

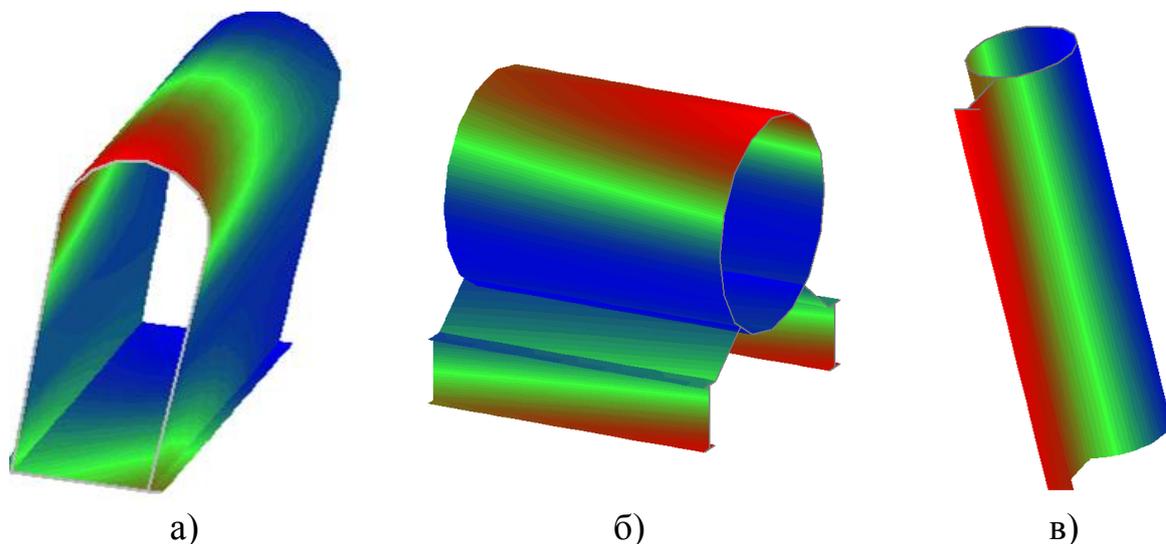


Рис. 2.8. Напряжения в фрагментах металлоконструкциях крана:
а – ригель опоры; б – труба пролетного строения; в – опора крана

Анализ напряжений в конструкциях опоры, трубы и ригеля крана при различном положении грейферной тележки от разгона (торможения) представлен в табл. 2.2.

Таблица 2.2
Таблица амплитуд напряжений (МПа) в элементах крана при разгоне (торможении) тележки

Несущие элементы крана		Положение тележки				
		на консоли длинной опоры	на длинной опоре	в середине пролёта	на короткой опоре	на консоли короткой опоры
со стороны консоли	опора	6,5	3,5	6,5		
	труба	0	0	0		
	ригель	14,0	15,0	16,0		
со стороны пролёта	опора	1,0	8,5	8,0	8,25	8,0
	труба	14,5	14,5	13,0	14,5	12,5
	ригель	17,5	18,5	17,0	20,0	19,5

Заметим, что использование подробной пространственной расчетной схемы не всегда обязательно. Некоторые комплексные исследования, даже в упрощённой постановке, бывают полезны. Например, результаты расчета на

собственный вес перегружателя и знакопеременную нагрузку при движении тележки выявили наиболее напряженные элементы в местах сопряжения трубы пролетного строения и стойки опоры с ригелем опоры с размером амплитуд циклических напряжений 8,0 – 20,0 МПа.

В дальнейшем наибольшее внимание при анализе динамических характеристик будет обращено на продольно-горизонтальную форму собственных колебаний. Эта форма колебаний, как показали расчеты и обследования, возникает в кранах чаще, чем при других видах динамических нагрузок. Т. е., при торможении и разгоне тележки результаты, полученные теоретическим путем, подтверждаются фактом наличия соответствующих поврежденных участков конструкций, обнаруженных при натурных обследованиях.

2.4. Рекомендации по обследованию

Существует ряд общих методик и рекомендаций по обследованию строительных конструкций, в том числе для мостовых кранов – по обнаружению дефектов и повреждений [2, 146-156]. Но для такого длинномерного и высокого промышленного сооружения (мостовой кран-перегрузатель) применение этих методик должно быть ограничено.

Перед началом выполнения работ по натурному обследованию, нужно изучить паспорт крана (паспортные характеристики, документацию, проведенные ранее ремонты металлоконструкций и др.) и его рабочие чертежи. Изучить особенности конструкций отдельных узлов, отличающихся от типовых решений (при необходимости некоторые из них можно уточнять в ходе проведения обследования). Весьма желательно перед обследованием сделать хотя бы приближённые статические и динамические расчёты.

Одним из самых ответственных элементов перегружателя (для всех типов) является стяжка опор. Но в большинстве случаев она покрыта слоем технологической пыли. Следует произвести очистку монтажных стыков и

узлов сопряжений для осмотра их на наличие повреждений (коррозия, вмятины, трещины и т.п.).

Осмотр ездовых балок производится со специальной площадки на грейферной тележке, или на перемещающихся подвесных люльках. Особое внимание нужно уделять сварному шву и околошовной зоне сопряжения верхнего пояса со стенкой ездовой балки.

Мост крана и стойки опор визуально осматривается со смотровых площадок и лестниц. Внимание уделяется сопряжению моста с опорами и горизонтальным связям опор.

На решетчатых конструкциях, расположенных на открытом воздухе, в местах соединительных планок спаренных уголков образуется щелевая коррозия в их соединениях, что приводит к разрушению сварных швов.

У перегружателей шпренгельного типа в узлах шпренгельной системы образуются пылевые «карманы», с дальнейшим их коррозионным повреждением.

Также нужно внимательно осматривать предыдущие места ремонта на возможность развития в них повреждений, вызванных не правильным конструкторским решением или проведением технического контроля.

Важно произвести поверочный расчёт металлоконструкций с определением наиболее нагруженных элементов, а также выделить элементы, которые воспринимают циклические напряжения от основных технологических режимов.

Далее создаётся теоретический проектный динамический паспорт, который затем уточняется после ввода перегружателя в эксплуатацию. Проводятся текущие замеры (в зависимости от срока эксплуатации или проведения ремонтов, реконструкции, наличия повреждений и т.п.) динамических характеристик, их вносят в «текущий» (после «первичного») динамический паспорт перегружателя.

Весьма целесообразно, используя программный комплекс, разрабатывать расчетные теоретические ситуации возможных повреждений основных

несущих конструкций с получением их «испорченных» динамических характеристик. По этим данным создаётся «Атлас влияния повреждений на собственные частоты и формы» для каждого крана.

Примеры получения динамического паспорта и «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» будет представлен в разделе 6 данной работы.

2.5. Выводы по разделу 2

1. Обнаружена связь расчётных мест концентрации напряжений, вызванных динамической нагрузкой типа торможение-разгон тележки (полученных теоретическим путем) с поврежденными участками элементов крана при натурных обследованиях.

2. Показано, что одной из возможных причин возникновения повреждений может быть технологическая цикличность, которая включает в себя забор материала грейфером тележки, перемещение его и возвращение в исходное положение (без учета количества торможений и разгонов самой тележки - как минимум четыре операций).

3. Весьма часто организация не может практически провести полное качественное обследование металлоконструкций перегружателя, хотя известно, что аварийные состояния возникают из-за совокупности множества факторов. Следует дополнять методики обследований менее трудоёмкими научными предложениями, которые способны качественно и количественно контролировать состояние основных конструкций, способствовать поиску повреждений.

4. Анализ эксплуатации, обследований и аварий перегружателей подчеркнул важность динамических нагрузок (в том числе подвижных) эксплуатационного технологического цикла, оказывающих существенное влияние на техническое состояние несущих металлоконструкций.

5. Приведены некоторые рекомендации по проведению обследования перегружателей разных типов. Рекомендовано предварительно составлять динамические паспорта кранов на разных этапах их службы, создание «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» (подробности см. в разделе 6).

По теме второго раздела опубликована одна публикация [185].

РАЗДЕЛ 3

ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ПО РАЗВЕТВЛЁННЫМ МОДЕЛЯМ НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ПОДВИЖНУЮ НАГРУЗКУ

В данном разделе рассмотрены исследования расчётных динамических характеристик перегружателей решетчатого и трубчато-балочного типа с использованием программного комплекса «Selena» [186]. Проведен анализ НДС пространственной стержневой расчетной модели этих кранов. Особое внимание уделялось информативному модальному анализу пространственной системы с большим числом степеней свободы. Разработана методика расчёта взаимодействия инерционной конструкции моста с инерционной грузовой тележкой при помощи системы компьютерной алгебры «Maple».

3.1. Создание динамических разветвлённых моделей перегружателей и поверочные статические расчёты

Статический и динамический расчёты несущих металлоконструкций кранов выполнены по программному комплексу "Selena" для проверки работоспособности крана в рабочем и нерабочем состоянии с определением максимальных напряжений в разных группах несущих металлоконструкций. Для несущих металлоконструкций и их элементов расчет выполняется согласно [27] с учетом коэффициентов: сочетаний, перегрузок, динамики и др.

Принятые модели кранов (решетчатого и трубчато-балочного типа) являются пространственными, стержневыми с жестким сопряжением стержней в узлах и шарнирно-неподвижным закреплением низа опор.

Мостовой перегружатель **трубчато-балочного** типа представляет собой двухконсольный мост пролетом 76,2 м с опорами равной жесткости. Длина консолей 24,7 и 25,6 м. Пролетное строение состоит из сварной трубы диаметром 2900 мм, подвешенных к трубе ездовых балок (двутаврового сечения) и смотровой площадки с одной стороны трубы. Труба пролетного строения подкреплена поперечными опорными и кольцевыми промежуточными диафрагмами жесткости. Под каждой промежуточной диафрагмой приварены поперечные балки с шагом примерно 5,9 м, к консолям которых прикреплены ездовые балки. Верхние пояса ездовых балок по всей длине соединены с трубой гнутым тормозным листом. На длинной консоли пролетного строения устроено помещение с оборудованием для ремонта грейферной тележки. Опоры крана представляют собой пространственный портал с затяжкой, внутри которого проходит пролетное строение. Ригели опор коробчатые, соединенные в уровне верхних и нижних поясов горизонтальными связями и поперечными балками. Стойки опор состоят из труб, в нижней части попарно соединены в опорные короба, установленные на верхние балансиры тележек механизма передвижения крана. Передвижение крана осуществляется синхронно работающими приводами на каждой из четырех ходовых тележек по двухрельсовым путям подкрановой эстакады. Высота (от уровня головки кранового рельса) опор свободной консоли составляет 33,8 м, ремонтной консоли – 25,8 м. Ширина опор по низу (база крана) – 20 м. Грейферная 4-х катковая тележка базой 5,0 м и массой 105 т (в т. ч. грейфер -16 т, груз – 16 т) - подвесного типа с пространственной рамой перемещается вдоль моста крана.

Пространственная схема перегружателя (по рабочим чертежам) в ПК Selena имеет 190 узлов, 218 элементов, 27 типа конечных элементов (рис. 3.1). Схема основного поперечного сечения пролетного строения перегружателя представлена на рис. 3.1, а.

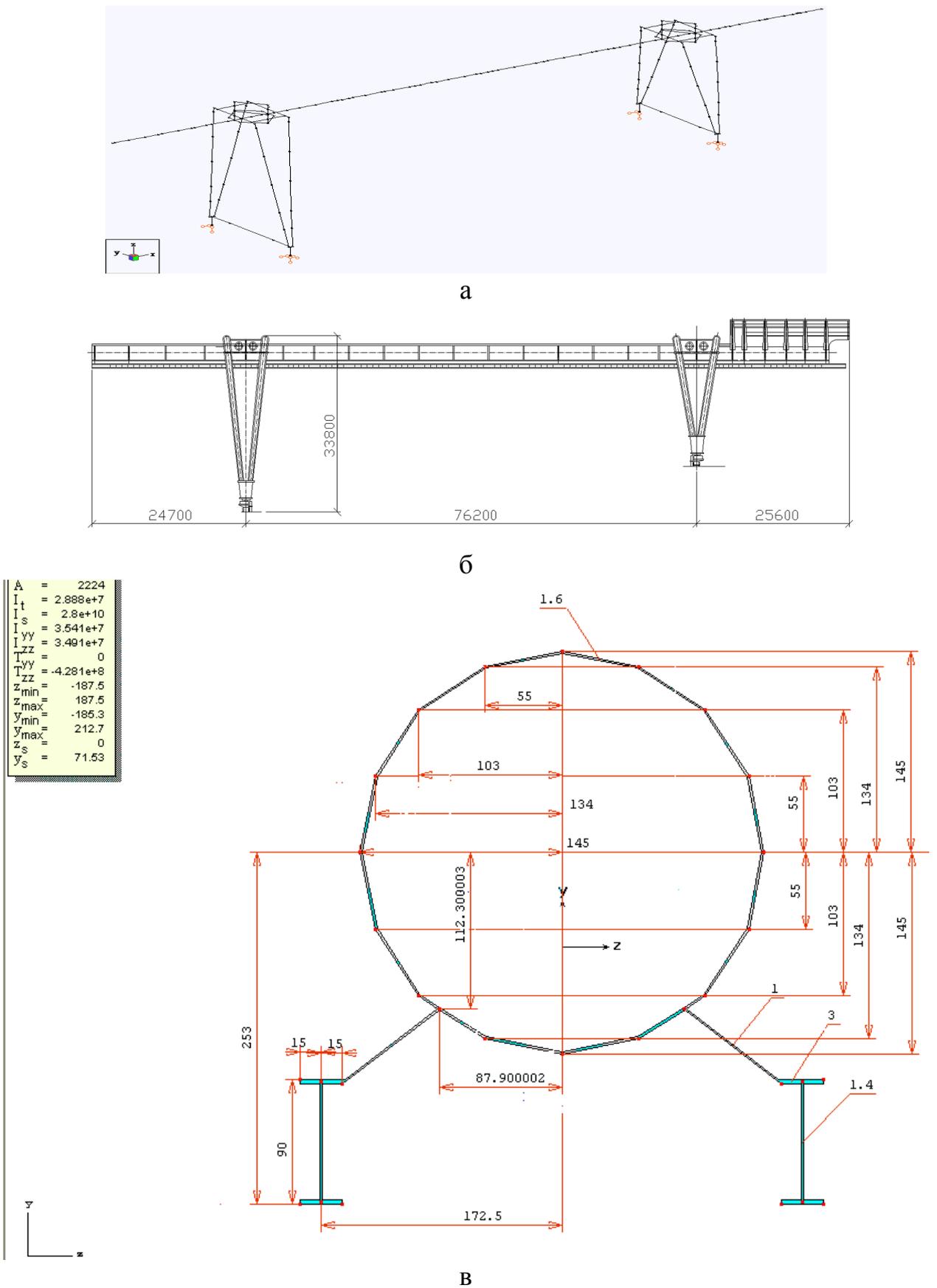


Рис. 3.1. Мостовой перегружатель трубчато-балочного типа:
 а – пространственная расчётная модель крана; б – основные геометрические
 параметры (мм); в – сечение (см) пролетного строения ($\text{Ø}2900 \times 16$ мм)

Мостовой перегружатель **решётчатого** типа представляет собой двухконсольный мост пролетом 76,2 м, опирающийся на жесткую (пространственную) и гибкую (плоскую) опоры. Длины консолей:

- со стороны жесткой опоры – 28,00 м;
- со стороны гибкой опоры - 33,44 м.

Пролетное строение образовано двумя вертикальными главными фермами с треугольной решеткой и дополнительными стойками. Верхние пояса главных ферм соединены горизонтальными связями с полураскосной решеткой. В плоскости стоек главные фермы соединены вертикальными связями, образующими вместе со стойками открытые снизу поперечные рамы. К консолям поперечных рам (опорным кронштейнам) прикреплены ездовые балки, по которым передвигается грейферная тележка.

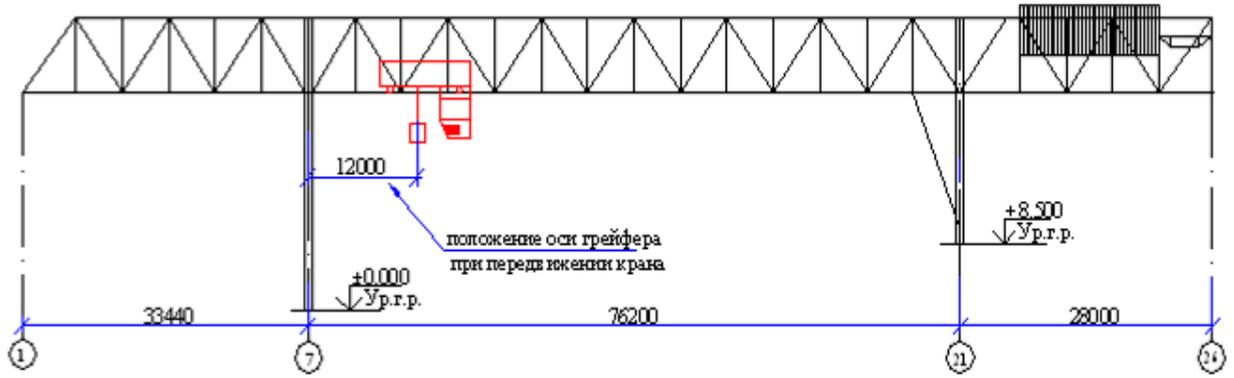
Гибкая и жесткая опоры с пролетным строением соединены жестко на заклепках, не допускающих взаимного смещения опор и моста. В плоскости, перпендикулярной мосту, ветви опор и соответствующая поперечная рама пролетного строения образуют единую раму с затяжкой.

Все заводские соединения сварные, монтажные соединения – на заклепках.

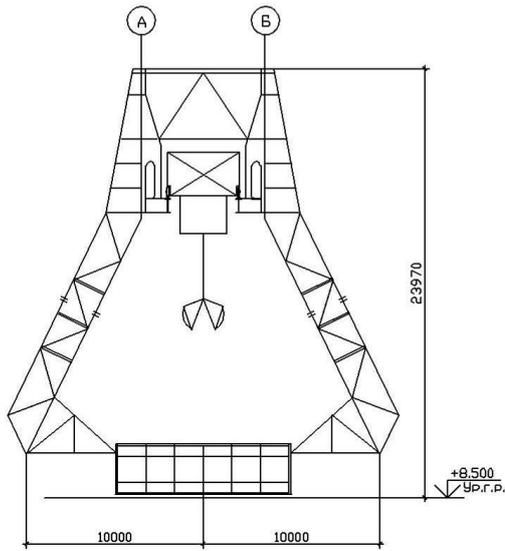
Грейферная 4-х катковая тележка массой 93 т (в т. ч. грейфер -15 т, груз – 15 т) перемещается по ездovým балкам двутаврового сечения.

Разработанная пространственная схема перегружателя решётчатой конструкции по рабочим чертежам в ПК Selena имеет 621 узлов, 1184 элементов, 54 типа конечных элементов, рис. 3.2.

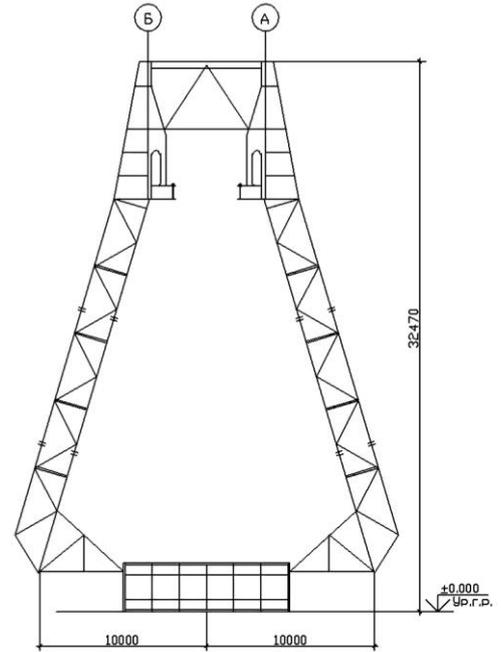
Выборка элементов статического расчёта на прочность с максимальными напряжениями в различных группах металлоконструкций перегружателей (рис. 3.3) представлена в таблице 3.1.



а

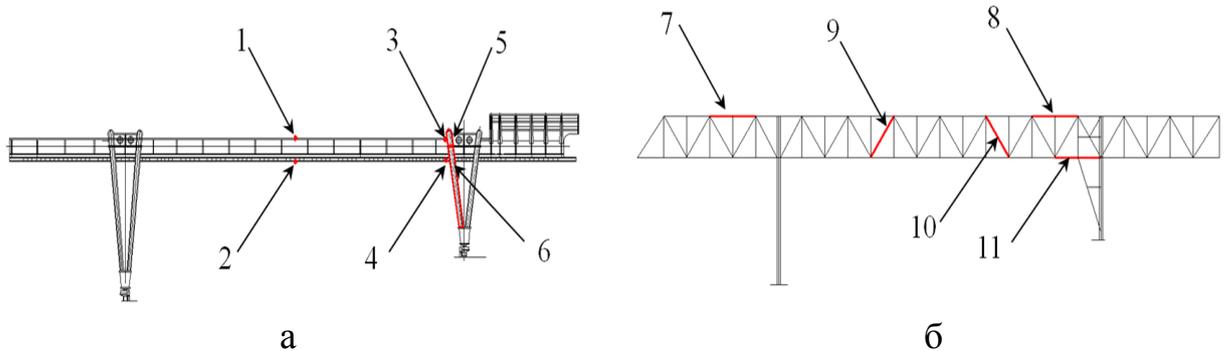


б



в

Рис. 3.2. Мостовой перегружатель решётчатого типа: а- схема перегружателя; б - схема жесткой опоры; в – схема гибкой опоры (мм)



а

б

Рис. 3.3. Маркировка точек для выборки элементов (табл. 3.1): а- трубчато-балочный перегружатель; б – решётчатый перегружатель

Таблица 3.1

Расчет элементов на прочность (выборка максимальных напряжённых элементов), МПа

Тип крана	Элемент сечения	Точка	Сочетание нагрузок						
			передвижение тележки	особое передвижение тележки (наезд на буфер)		передвижение моста		Ry	
трубчатый	труба пролетного строения	1	-206	-100		-164		310	
		2	235	139		193			
		3	261	307		279			
		4	-231	-257		-288			
	ригель опоры	5	-192	-191		-264		315	
	стойка опоры	6	-194	-141		-261			
решетчатый	верхний пояс	7	374	298		103		310	
		8	264	310		36			
	раскос	9	-136	-284*	-104	-216*	-23		-47*
		10	-132	-275*	-102	-212*	-53		-110*
	нижний пояс	11	-265	-261*	-353	-348*	-54		-53*

* - проверка несущей способности по устойчивости элементов

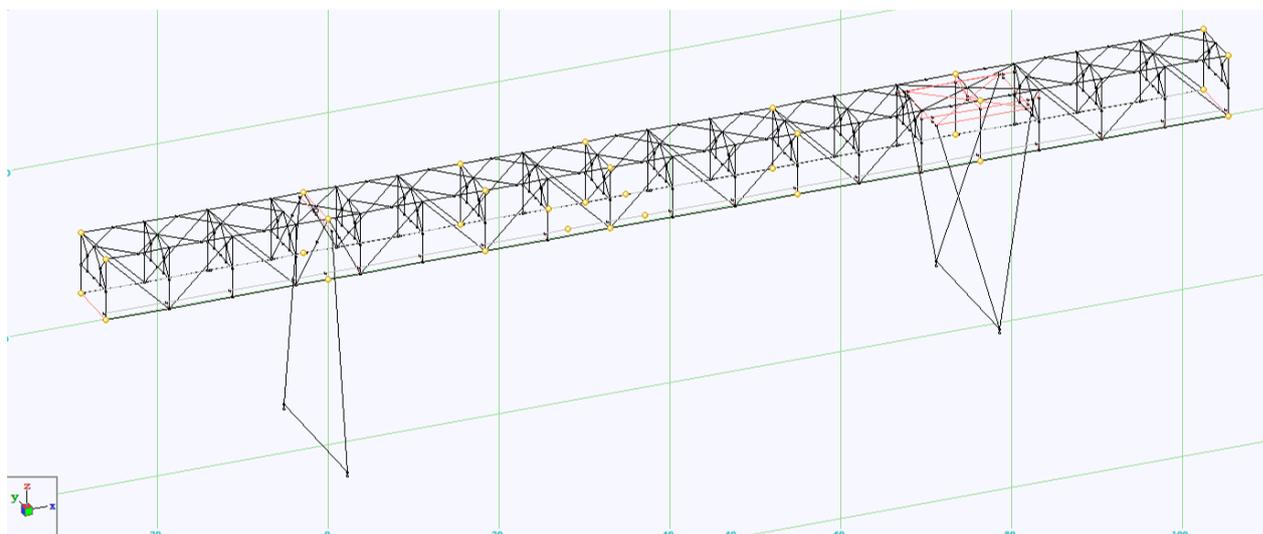
Как оказалось, максимальные напряжения в **трубчато-балочном** перегружателе возникли в элементах крепления трубы ригеля от сочетаний с наездом тележки на буфер. Описываемый **решётчатый** кран был запроектирован в 50-х годах, поэтому из-за ужесточения крановых норм отдельные элементы нижнего и верхнего пояса не прошли проверку по прочности и устойчивости.

Заметим, что по подобным расчётам и результатам обследований рассматриваемая конструкция крана в конце XX века была усилена.

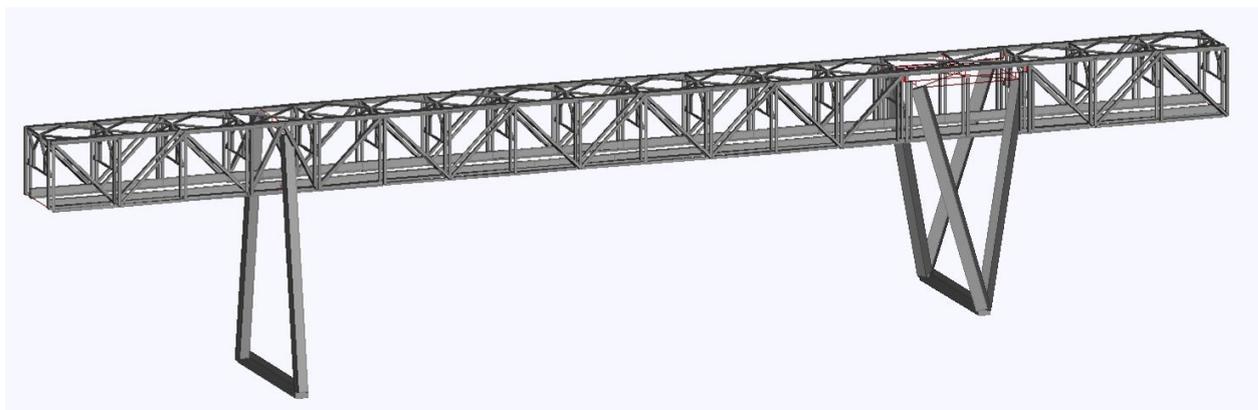
3.2. Исследования собственных колебаний мостового крана-перегрузчика решетчатой конструкции

3.2.1. Перегрузчик с подвижно-шарнирным соединением моста и опоры

Кран представляет собой двухконсольный мост пролетом 76,35 м, опирающийся на жесткую (пространственную) и шарнирную (плоскую) опоры (рис. 3.4). Длины консолей: со стороны жесткой опоры – 28,00 м, со стороны шарнирной опоры – 33,00 м.



а



б

Рис. 3.4. Схемы перегружателя решетчатого типа:
а - пространственная расчетная схема; б - 3D модель перегружателя

Пролетное строение образовано двумя вертикальными главными фермами с треугольной решеткой и дополнительными стойками. Верхние пояса главных ферм соединены горизонтальными связями с ромбической решеткой. В плоскости стоек главные фермы соединены вертикальными связями, образующими вместе со стойками открытые снизу поперечные рамы. К консолям поперечных рам (опорным кронштейнам) прикреплены ездые балки, по которым передвигается грейферная тележка. Грейферная 4-х катковая тележка массой 130 т (в т. ч. грейфер -16 т, груз – 16 т) перемещается по ездным балкам двутаврового сечения. Все элементы главных ферм Н-образного составного (из листов) сечения. Связи в уровне верхних поясов главных ферм выполнены из уголков крестового сечения.

Поперечные рамы – решетчатые, П-образного типа. Поперечные сечения элементов рам составные (решетка из уголков, элементы стоек – сварные двутавры). Стойки рам являются стойками главных ферм. К нижним узлам поперечных рам крепятся консоли (опорные кронштейны), которые служат опорами ездных балок. Кронштейны имеют двутавровое сечение.

Ездные балки – сварные неразрезные, составного двутаврового сечения. Стыки балок вынесены за опоры. Тормозная система выполнена в виде горизонтальной балки с опиранием на ездную балку и окаймляющий элемент, закрепленный вдоль тормозной конструкции к нижнему поясу главной фермы крана.

Жесткая и гибкая опоры в плоскости перпендикулярном мосту представляет собой поперечные рамы с замкнутым контуром. Высота опор: жесткой опоры –25,5 м, гибкой опоры – 28,2 м. Ширина опор по низу крана – 20 м. Жесткая и гибкая опоры крана – решетчатые. В плоскости рамы опор решетка раскосная, в плоскости пролетного строения решетка жесткой опоры – полураскосная.

Сечения поясов ветвей – двутавровые, сварные. Ригеля опор составного П-образного сечения - клепаные. Решетка выполнена из уголков. Соединения элементов в узлах на заклепках или сварке.

Общая масса крана-перегрузателя 846 т, из них: мост 449 т, жесткая опора 83 т, шарнирная опора 47 т.

Пространственная схема этого решетчатого перегружателя в ПК Selena имеет 339 узлов, 717 элементов, 22 типа конечных элементов, 32 сосредоточенных масс (рис. 3.4, а), пространственная 3D модель (рис. 3.4, б).

Схемы шарнирной и жесткой опор имеют шарниры, дающие свободный поворот моста относительно оси опоры. Шарнирная - опирается на три опоры, из них две имеют горизонтальное скольжение, а центральная крепится на сферическом шарнире.

В результате расчета на свободные колебания при условии, что грейферная тележка стоит в середине пролета и шарнирно-неподвижно закреплены на рельсах обе опоры крана, были получены основные частоты и формы собственные колебаний (рис. 3.5).

Анализ собственных формы и частот показал, что в вертикальной плоскости крана на низшей частоте (0,65 Гц) горизонтальные колебания происходят вдоль пролетного строения крана с изгибом пролетного строения на жесткой опоре. При более высокой частоте (0,85 Гц) направление второй формы колебаний меняется на горизонтальные изгибные перемещения моста в поперечном направлении. Эта форма соответствует собственным колебаниям простой балки с консолями.

Третья форма с частотой 1,7 Гц (также в горизонтальной плоскости) отличается активными колебаниями консоли крана на шарнирной опоре. И только в четвертой форме появились изгибные вертикальные колебания моста основного тона с частотой 1,97 Гц. (Пятая форма аналогична третьей).

Так как масса грейферной тележки (130 т) значительна, дальнейшие исследования были проведены по оценке её влияния на пространственные собственные формы колебаний крана. На примере решетчатого перегружателя показано влияние статического перемещения грузовой тележки по мосту крана. Было выбрано пять вариантов установки

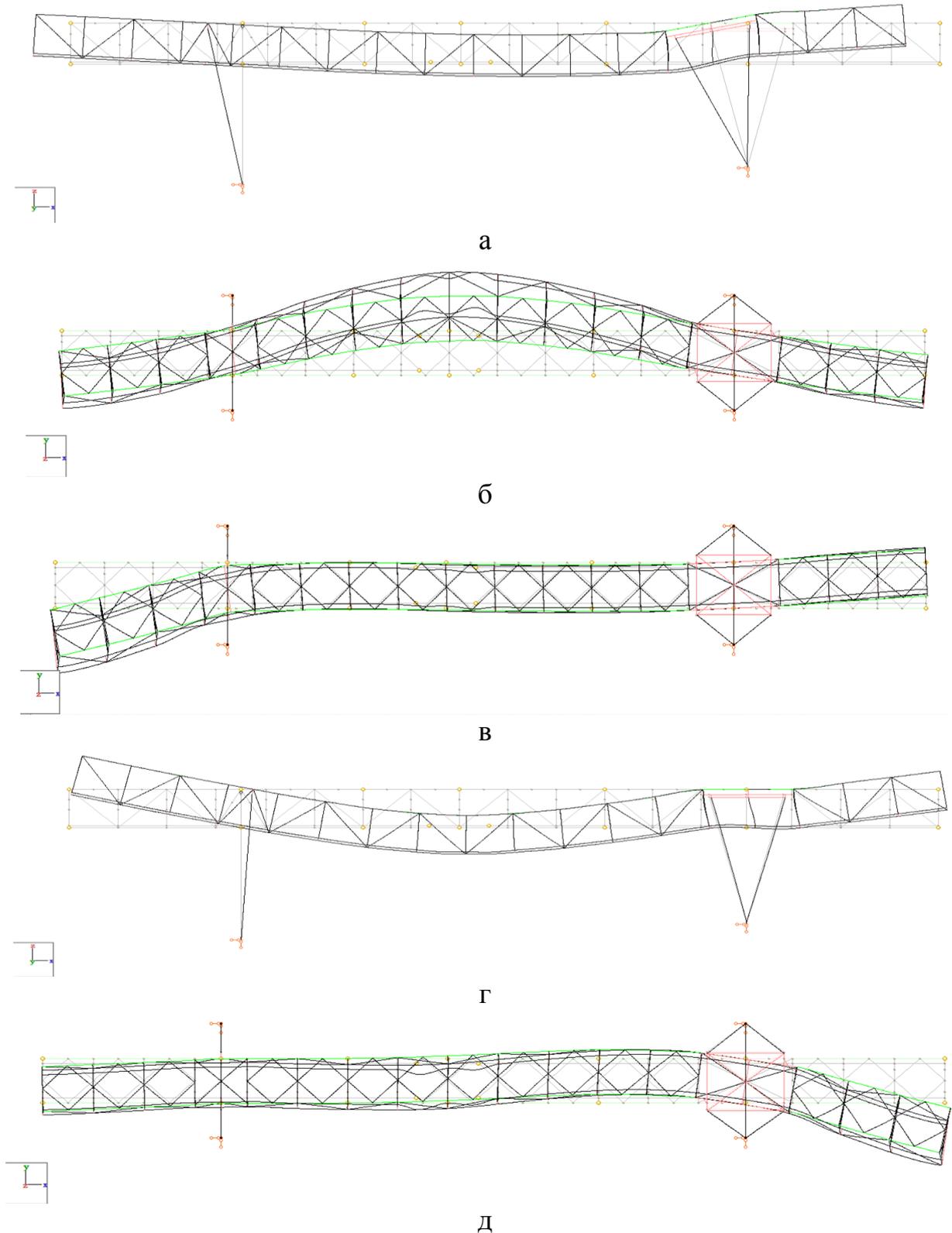


Рис. 3.5. Основные формы собственных колебаний решетчатого перегружателя:
 а – продольно-горизонтальная, 0,65 Гц; б – поперечно-горизонтальная изгибная с закручивание моста крана, 0,85 Гц; в – поперечно-горизонтальная с закручиванием консоли шарнирной опоры, 1,70 Гц; г – вертикальная изгибная, 1,97 Гц; д – поперечно-горизонтальная с закручиванием консоли жесткой опоры, 2,02 Гц

тележки: на консолях, на опорах и в середине пролета. По результатам расчетов видно влияние расположения тележки на частоту и форму колебаний крана (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Влияние положения тележки на частоты и формы собственных колебаний

Положение тележки	Частота (Гц) и форма собственных колебаний									
	первая	вторая		третья	четвёртая		пятая			
консоль шарнир. опоры	0,66	продольно-горизонтальная	0,85	попереч.-гориз. с закруч. консоли	1,48	поперечно-горизонтальная с закручиванием консоли	1,83	вертикал	2,29	попереч.гориз. с закруч.
шарнир. опора	0,66		1,29		1,58		2,05	попереч.-гориз. с закруч. консолей	2,43	вертикал.
пролёт	0,65		0,85	попереч.-гориз. с закруч.	1,70		1,97	вертикал	2,02	попереч.гориз. с закруч. консолей
жесткая опора	0,66		1,33		1,73		2,24	попереч.-гориз. с закруч.	2,46	вертикал
консоль жесткой опоры	0,64		0,95	продол.-гориз.	1,52		1,97		2,15	

Частота первой продольно-горизонтальной формы остается без изменений. Частота второй увеличивается при расположении тележки на опорах, и форма горизонтально-поперечна с закручиванием моста или консолей. Третья форма остается постоянной с частотой от 1,48-1,73 Гц. Вертикальная форма собственных колебаний меняется от 1,83 Гц при установке грейферной тележки на консоли шарнирной опоры крана до 2,46 Гц при нахождении её на жесткой опоре. На рис. 3.6 представлены графики изменения частот поперечно-горизонтальной и вертикально-изгибной форм собственных колебаний при различных положениях тележки.

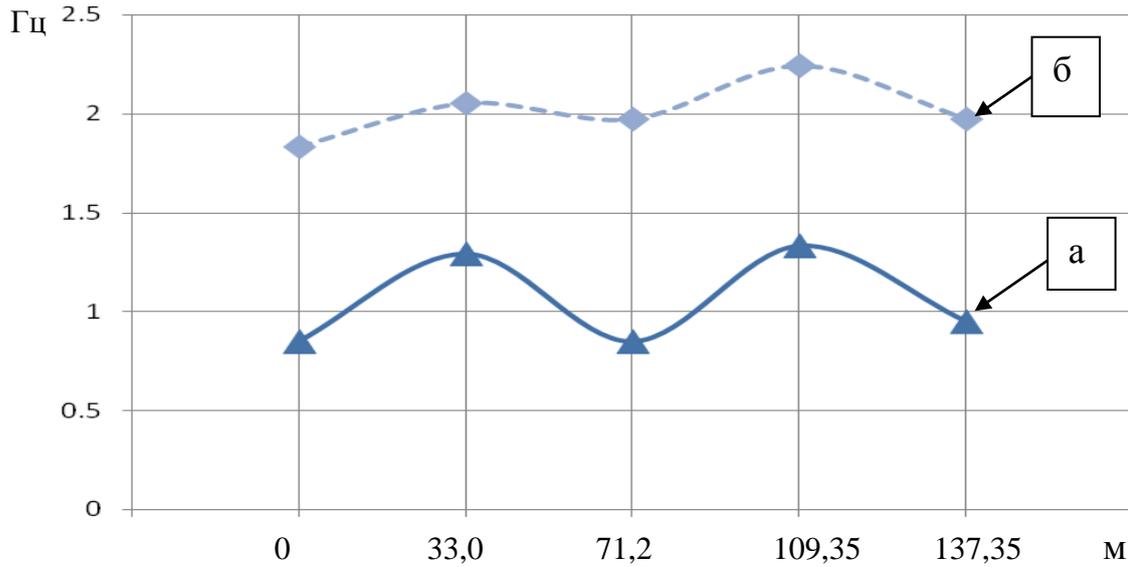


Рис. 3.6. График изменения частоты собственных колебаний от перемещения тележки по мосту крана: а – поперечно-горизонтальная форма; б – вертикально-изгибная форма

Если в схему шарнирной опоры установить один сферический шарнир (без ограничителей), дающий возможность поворота и наклона моста крана (согласно заводским чертежам), то низшая форма собственных колебаний будет соответствовать кручению моста на шарнирной опоре с частотой 0,58 Гц (рис. 3.7).

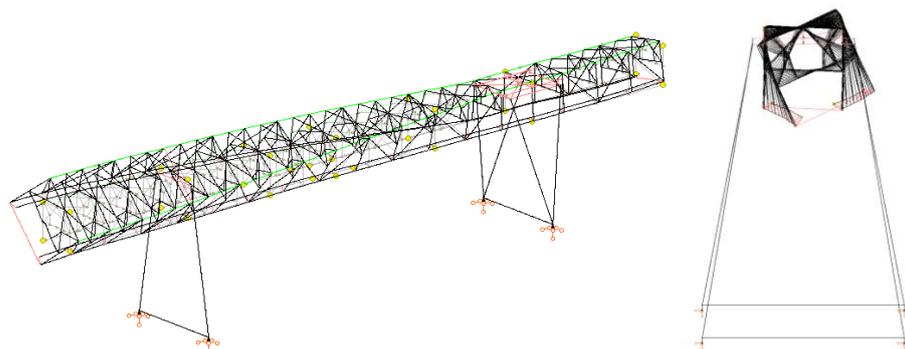


Рис. 3.7. Крутильные собственные колебания с частотой 0,58 Гц решетчатого перегружателя

Заметим, что опора перегружателя в реальной конструкции имеет ограничители наклона моста, которые препятствуют проявлению этой формы.

3.2.2. Перегрузатель с жесткой конструкцией соединения опоры и моста

Общая конструкция крана описана в подразделе 3.1. Пространственная расчетная динамическая модель перегружателя решетчатого типа с жестким соединением конструкций опор и моста включает в себя 20 сосредоточенных масс (рис. 3.8). В сечениях 7 и 21 в массу моста добавляется половина массы опоры. В сечение 14н ещё включается масса грейферной тележки. Общая масса моста составляет 550 т, а грейферная тележка -128 т. Динамический расчет собственных колебаний перегружателя производится при условиях, что грейферная тележка стоит в середине пролета, а обе опоры крана шарнирно закреплены на рельсах.

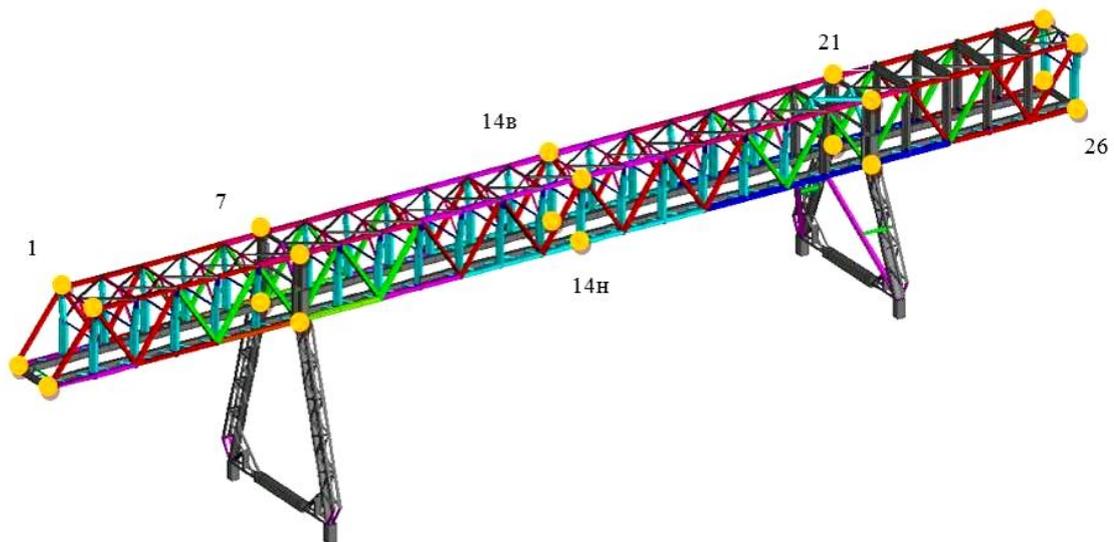


Рис. 3.8. Пространственная 3-D модель решетчатого перегружателя с сосредоточенными массами (сечение 1 – $4 \times 8,78$ т; сечение 7 – $4 \times 39,06$ т; сечение 14в – $4 \times 37,77$ т; сечение 14н – $2 \times (37,77 \text{ т} + 63,9 \text{ т})$; сечение 21 – $4 \times 41,24$ т; сечение 26 – $4 \times 10,62$ т)

На рис. 3.9 приведены пять низших форм собственных колебаний, где за единицу принято наибольшее перемещение амплитуды колебаний. Низшая форма является продольно-горизонтальной в вертикальной плоскости с незначительным вертикальным изгибом моста крана на частоте 0,61 Гц.

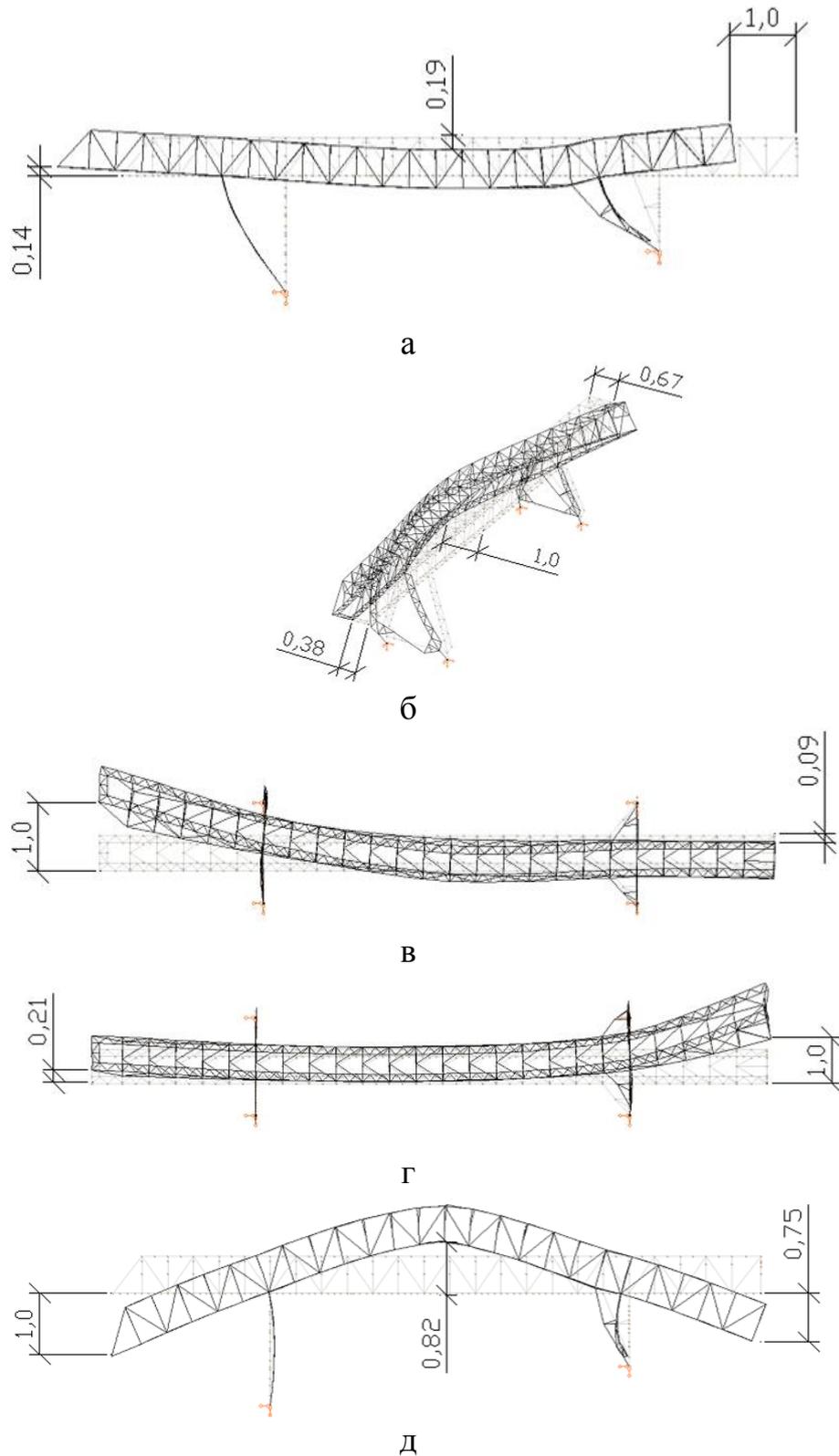


Рис. 3.9. Схемы форм собственных колебаний перегружателя:
 а – горизонтально-продольная в вертикальной плоскости на частоте 0,61 Гц;
 б – горизонтально-поперечные изгибные колебания моста с закручиванием и смещением гибкой опоры моста - 0,62 Гц; в – горизонтально-поперечные колебания консоли гибкой опоры (вид сверху) - 0,83 Гц; г – горизонтально-поперечные колебания консоли жесткой опоры (вид сверху) - 1,03 Гц;
 д – изгибные вертикальные колебания моста - 1,72 Гц

Вторая - поперечно-горизонтальные изгибные колебания моста с закручиванием со смещением гибкой опоры и горизонтальными колебаниями консоли жесткой опоры. Третья и четвёртая – поперечно-горизонтальные колебания консоли опор. Пятая – изгибные вертикальные колебания моста крана с максимальными перемещением консоли гибкой опоры.

3.3. Особенности собственных колебаний мостового крана-перегрузателя трубчато-балочной конструкции

Общая конструкция и схемы описаны в подразделе 3.1. Пространственная расчетная динамическая схема перегружателя (рис. 3.10) трубчато-балочного типа равной жесткостью обеих опор включает в себя 11 сосредоточенных масс. В результате расчета на свободные колебания были получены основные частоты и формы собственные колебаний (рис. 3.11).

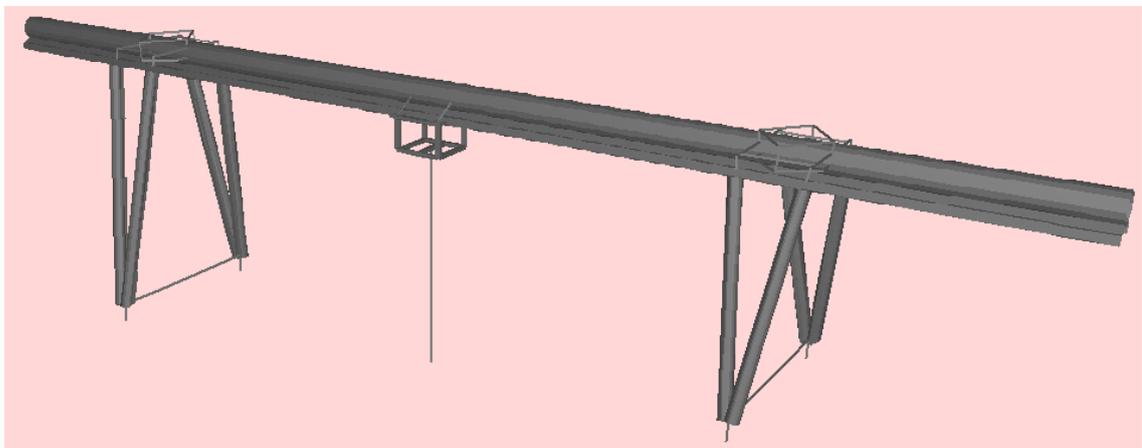


Рис. 3.10. 3D модель трубчато-балочного перегружателя с грейферной тележкой и грузом

Рассмотрим частоты и формы собственных колебаний крана, которые описаны и представлены (выборочно) на рис. 3.11 при условиях, что закреплены обе опоры крана (рабочее состояние «передвижение тележки» или нерабочее состояние крана) и грейферная тележка в середине пролета. Качественно каждая из собственных форм существенно отличается: то

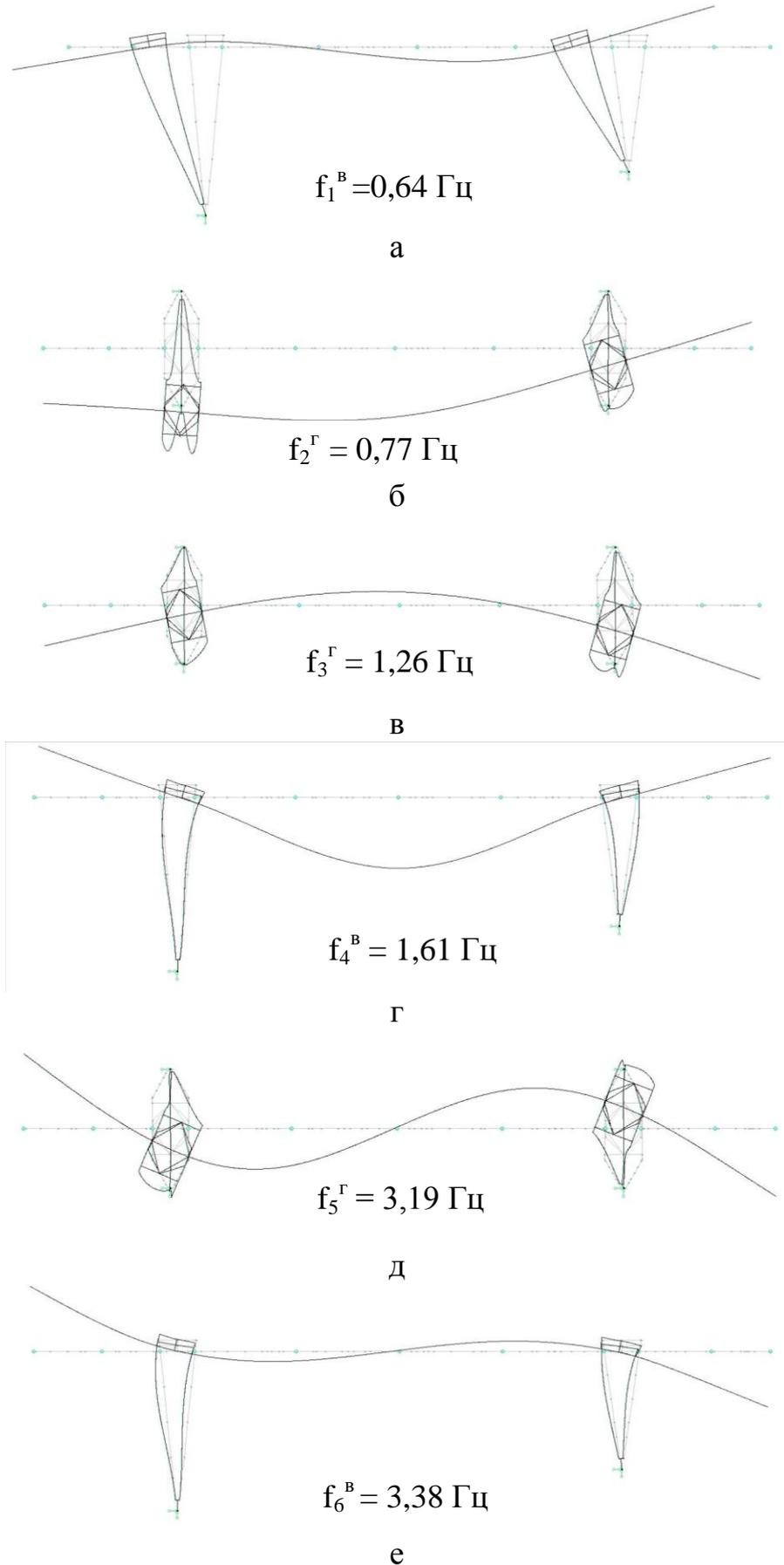


Рис. 3.11. Формы и частоты собственных колебаний перегружателя

колебания конструкции моста происходят в вертикальной плоскости (частоты таких форм с номером формы в нижнем индексе - имеют верхний индекс «в»), то в горизонтальной плоскости - индекс «г».

Как видно из рис. 3.11, при самой низкой частоте (0,64 Гц), как и в кранах, рассмотренных выше, наблюдается продольно-горизонтальное раскачивание трубы вдоль ее оси с небольшим смещением опор и поворотами трубы в вертикальной плоскости, как рама с гибким ригелем. Продолжение воздействия условного возмущения с более высокой частотой (0,77 Гц) вызывает смещения практически только в горизонтальной плоскости моста. Пока активно смещается верхняя часть моста над длинной опорой, эта форма сопровождается поворотом вокруг вертикальной оси короткой опоры. На частоте 1,26 Гц происходит изгиб основного тона моста в горизонтальной плоскости. И только в четвертой форме система колеблется в вертикальной плоскости с частотой 1,61 Гц.

В нормах на проектирование грузоподъемных кранов существует расчет на перекося, определяемый взаимным смещением опор крана. Собственные колебания, отображающие форму перекося, возможно смоделировать при условии, что одна из опор свободно перемещается вдоль кранового пути (рабочее состояние «передвижение крана», рис. 3.12) [146]. Это соответствует закреплению в натурном эксперименте одной опоры противоугоном.

«Забегающая» форма собственных колебаний представлена взаимным смещением одной из опор крана (рис. 3.13). Частота формы меняется с 0,14 до 0,18 Гц и зависит от установки грейферной тележки и закреплений длинной или короткой опор (табл. 3.3).

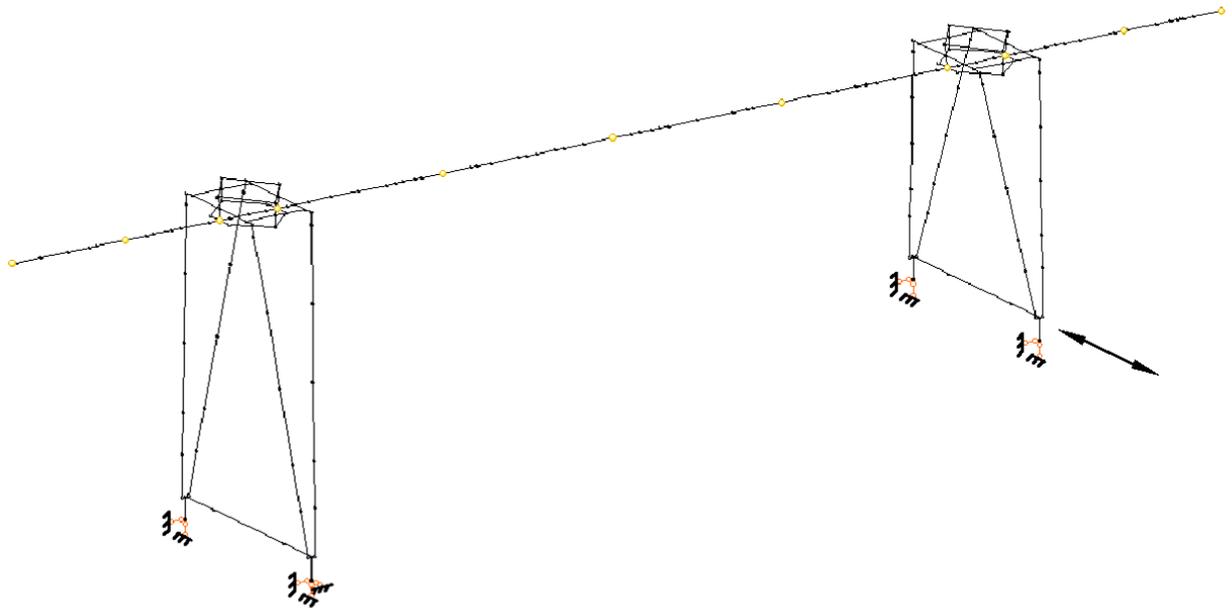


Рис. 3.12. Схема закрепления связей на опорах крана

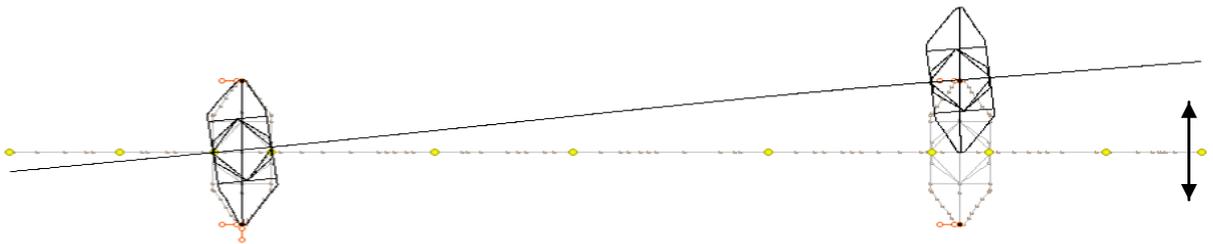


Рис. 3.13. «Забегающая» форма собственных колебаний крана

Таблица 3.3

Частота собственных колебаний «забегающей» формы колебаний крана

Закрепление противоуголков	Положение грейферной тележки		
	Короткая опора	Середина пролета	Длинная опора
длинная опора	0,14 Гц	0,16 Гц	0,16 Гц
короткая опора	0,18 Гц	0,17 Гц	0,15 Гц

Для низших форм (рис. 3.11 а, б, в, г) собственных колебаний данного крана место расположения грейферной тележки с грузом принципиально не меняло формы. Частота собственных колебаний поперечно-горизонтальной и вертикальной форм более существенно зависит от места расположения грейферной тележки на мосту крана (при установке тележки

над опорой она увеличивается приблизительно на 10-20%), что приведено в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Частоты собственных колебаний при различном закреплении
противоугонов крана

Закрепление противо- угоннов	Положение тележки	Форма собственных колебаний			
		первая	вторая	третья	четвёртая
длинная опора	пролёт	0,64	0,81	1,18	1,61
	корот. опора	0,65	0,87	1,35	2,17
	длин. опора	0,64	0,74	1,35	2,17
короткая опора	пролёт	0,64	1,00	1,26	1,61
	корот. опора	0,64	0,98	1,35	2,17
	длин. опора	0,64	1,13	1,35	2,17
обе опоры	пролёт	0,64	0,77	1,26	1,61
	корот. опора	0,64	0,87	1,35	2,17
	длин. опора	0,64	0,73	1,36	2,17

3.4. Влияние различий коэффициента неупругого сопротивления в подсистемах на вынужденные колебания системы с несколькими степенями свободы

Известно, что на амплитуды резонансных колебаний большое влияние оказывают параметры диссипации [118, 129, 133]. Например, при линейном (вязком) трении динамический коэффициент осциллятора на резонансе равен примерно $\mu = \pi/\delta$, где $\delta = \ln A_n/A_{n+1}$ – логарифмический декремент колебаний. В стороне от резонанса динамический коэффициент будет равен:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2}\right)^2 + \frac{\delta^2}{\pi^2} \frac{\theta^2}{\omega^2}}}, \quad (3.1)$$

где ω , θ - частота собственных и вынужденных колебаний.

Важно отметить, что во многих универсальных вычислительных комплексах часто принимается так называемое **“пропорциональное”** (жесткостям или массам) трение. Традиционным для строительных конструкций является модель комплексного трения. Рекомендации в программных комплексах по выбору параметров трения в подсистемах моделей для пользователя практически отсутствуют (принятие гипотез пропорционального трения авторы комплексов выполняют по умолчанию, не посвящая пользователя в возможные ошибки).

Проверим два варианта гипотез «пропорционального распределения сил неупругого сопротивления» и сравним реакции систем с несколькими степенями свободы на гармоническое (резонансное) воздействие при помощи различных вычислительных комплексов. Пример – система с двумя степенями свободы цепочечного типа (рис. 3.14). (Кстати, эта модель является классической для задачи крана с ДГК, которой будет уделено внимание ниже, в разделе 3 и 5). Были проведены расчеты с использованием различных вычислительных комплексов: применялись численные методы либо линейной алгебры при реализации МКЭ (в программных комплексах SCAD, Selena), либо решения дифференциальных уравнений движения во временной области (метод Рунге-Кутты 4-го порядка, MatLab, Maple [6]).

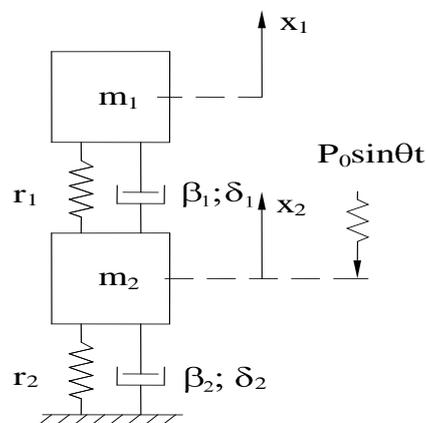


Рис. 3.14. Линейная динамическая модель с двумя степенями свободы и произвольными параметрами

На рис. 3.15 приведено (по расчетам на программном комплексе «Selena») несколько АЧХ перемещений обеих масс при четырех сочетаниях значений логарифмических декрементов колебаний δ_i для фиксированных (базовых) параметров масс m_i и жесткостей r_i подсистем (заметим, что подобные расчеты сооружений с неодинаково демпфированными подсистемами, 2-й и 3-й столбцы, на большинстве отечественных программных комплексах выполнять не удастся).

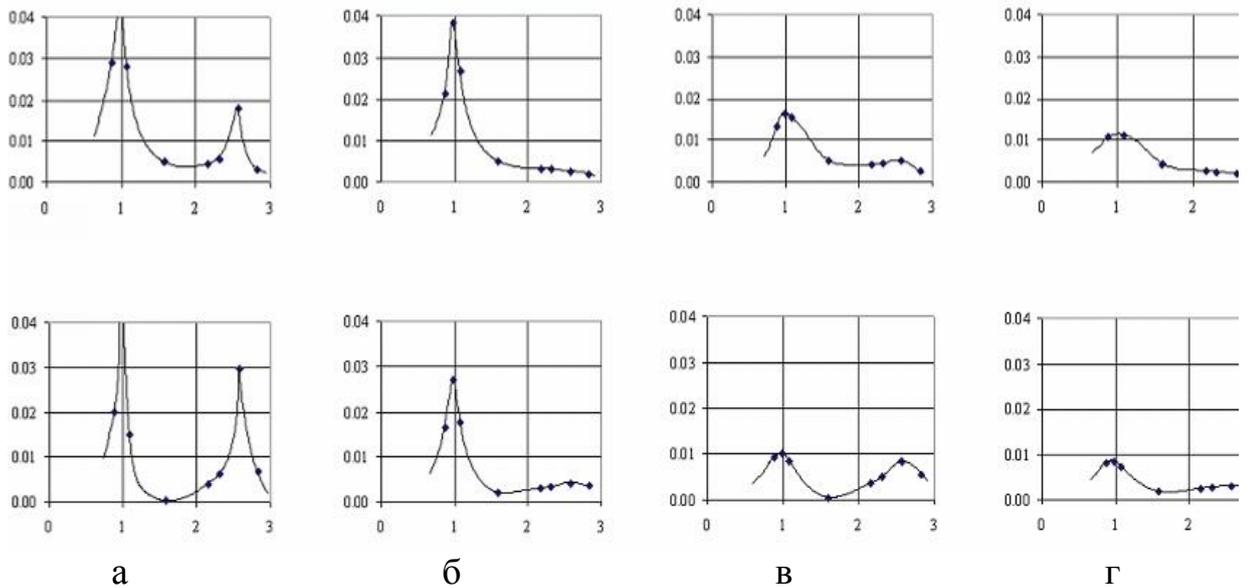


Рис. 3.15. АЧХ перемещений (м) верхней (верхний ряд графиков) и нижней (нижний ряд) масс модели (рис. 3.14) при гармоническом возмущении с амплитудой силы $P_0=10\text{кН}$ при значениях: а - $\delta_1=\delta_2=0,15$ ($A_1^{\text{верхн}} = 0,122\text{м}$; $A_1^{\text{нижн}} = 0,076\text{м}$ - не в масштабе); б - $\delta_1=1,5$ и $\delta_2=0,15$; в - $\delta_1=0,15$ и $\delta_2=1,5$; г - $\delta_1=\delta_2=1,5$

Графики позволяют определить две резонансные частоты базовой системы. Для наглядности графики даны в одном масштабе и свидетельствуют том, что при увеличении трения в верхней подсистеме (рис. 3.15, б) амплитуды колебаний обеих масс больше в 2-3 раза, чем при таком же их увеличении в нижней подсистеме (рис. 3.15, в). Уже этот результат противоречит обеим гипотезам пропорционального трения – массы и жесткости не изменялись! Заметим, что перенос возмущающей силы с

нижней массы на верхнюю принципиально не изменил выводы и соотношения, т.к. резонансные формы близки к собственным.

Результаты дальнейших исследований получены при изменениях базовых параметров всей системы: в 10 раз увеличивались или жесткость какой-либо подсистемы, или ее масса (табл. 3.5). Всего рассчитано 12 различных вариантов, причем для тестирования расчетов по МКЭ составлялись уравнения движения.

Таблица 3.5

Результаты расчета системы с двумя степенями свободы на вынужденные гармонические колебания при $P_0 = 10\text{кН}$ (на резонансных частотах)

N п/п	m_1 , кг	m_2 , кг	r_1 , Н/м	r_2 , Н/м	f_I , Гц	f_{II} , Гц	δ_1	δ_2	$\delta_{\text{экв}}$	$A_I^{\text{верх}}$, м	$A_I^{\text{ниж}}$, м	$A_{II}^{\text{верх}}$, м	$A_{II}^{\text{ниж}}$, м	Прим.
1	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,98	2,57	0,15	0,15	-	0,122	0,076	0,018	0,030	Selena
2	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,98	2,57	0,15	0,15	-	0,123	0,076	0,018	0,029	SCAD
3	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,98	2,57	0,15	0,15	-	0,117	0,073			Matlab
4	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	1,51	5,3	0,15	1,5	-	0,0060	0,0006	0,00012	0,0010	Selena
5	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	1,51	5,3	0,15	1,5	-	0,0072	0,0009	0,00017	0,00167	Matlab
6	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	1,51	5,3	-	-	$\sim r_1 1$, 377	0,0012	0,0005	0,00011	0,001	Selena
7	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	1,11	7,21	1,5	0,15	-	0,09	0,086	0,00029	0,0003	Selena
8	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	1,11	7,21	-	-	$\sim r_1 1$, 377	0,012	0,011	0,00030	0,00032	Selena
9	$2 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,48	1,68	0,15	1,5	-	0,011	0,010	0,0085	0,0010	Selena
10	$2 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,48	1,68	-	-	$\sim m_1 1$, 377	0,012	0,011	0,0011	0,00046	Selena
11	$20 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,35	2,28	1,5	0,15	-	0,022	0,014	0,0005	0,0087	Selena
12	$20 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	0,35	2,28	-	-	$\sim m_1 1$, 377	0,011	0,007	0,0003	0,0054	Selena

Первые три варианта (строки 1-3 табл. 3.5) показывают удовлетворительные результаты взаимного тестирования трех видов инструментария при одинаковом трении в подсистемах (несколько заниженные (на 5%) амплитуды на первом резонансе в 3-й строке связаны с сокращенным счетом во времени).

В строках 4 и 5 увеличены жесткость и трение нижней подсистемы в 10 раз. Программные комплексы «Selena» и «MatLab» дали относительно близкие порядки. Если принять трение всей системы единым и пропорциональным жесткостям, то получим:

$$\delta_{\text{эКВ}} = \frac{\delta_1 r_1 + \delta_2 r_2}{r_1 + r_2} \quad (3.2)$$

То для строк 6, 8, 10, 12 величина $\delta_{\text{эКВ}}=1,377$, амплитуды уменьшаются примерно в 5 раз, и ошибка этой гипотезы достигает 100% (несколько меньшей будет ошибка при увеличении жесткости и трения не нижней, а верхней подсистемы – строки 7, 8).

Последние строки 9-12 «проверяют» гипотезу пропорциональности масс. Увеличение массы и трения нижней подсистемы в 10 раз (строка 9) на низкочастотном резонансе дают близкие с гипотезой (строка 10) амплитуды, а на высокочастотном они в 2-8 раз различаются. Но если изменения массы и трения внести в верхнюю подсистему (строки 11 и 12), то ошибка гипотезы больше на первом резонансе (50%). Заметим, что данные вводы были проверены на пространственной модели крана-перегрузателя ниже.

Другая проблема, стоящая перед конструктором, заключается в создании хороших демпфирующих устройств. Такое направление развивается очень слабо. Причиной является плохая обеспеченности расчетными комплексами, которые корректно смогут учитывать не только геометрические, но и физические, а так же конструкционные нелинейности.

Весьма перспективной можно считать методику расчета моделей без применения МКЭ с исследованием колебаний во временной области. Она позволяет конструировать новые демпфирующие устройства и узлы (см. в разделах 3 и 5)

В программных комплексах существует множество вариантов задания динамической нагрузки. Рассмотрим случаи возникновения вынужденных колебаний - моделирующие колебания от технологических воздействий

(работа механизмов подъема грейфера, вибрация генераторов постоянного тока и т.п.) на примере крана трубчатой конструкции.

Задание вынужденной гармонической нагрузки рассматривается программным комплексом как ее амплитудное значение. В расчете эта нагрузка умножается на функцию $\sin(\omega t)$, где ω - круговая частота возбуждения колебаний и t – время.

Для получения максимальных напряжений или перемещений конструкция должна войти в резонанс (частота возбуждающих колебаний должна равняться частоте собственных колебаний изучаемой формы). Для предотвращения бесконечных колебаний вводим внутреннее трение в элементах крана, т.е. коэффициент неупругого сопротивления, зависящий от логарифмического декремента колебаний.

Приведём результаты нескольких расчетов крана-перегрузателя на гармонические резонансные вертикальные колебания (силовые, в среднем сечении пролета). Одни расчеты для проверки выполним на SCAD, а другие - на ПК SELINA, причем будет изменяться соотношение демпфирующего фактора в опорах и в конструкции моста (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Результаты расчетов крана-перегрузателя (для среднего сечения моста) на вынужденные колебания при различных коэффициентах неупругого сопротивления γ для моста/опор при вертикальной гармонической возмущающей силе с амплитудой 30 кН

γ мост/опора	Резонансная вертикальная частота	Вертикальные перемещения, мм
0,1 / 0,1	3.19 Гц (1-й верт. резонанс)	9.391
	5.78 Гц (2-й верт. резонанс)	1.144
0,1 / 10	3.19 Гц	1.272
	5.78 Гц	1.085
10 / 0,1	3.19 Гц	0.325
	5.78 Гц	0.250

Расчет показал, что существенное (на 2 порядка) увеличение трения в опорах крана снижает амплитуды вертикальных колебаний всего в 7-8 раз только на низшей из двух частот: с 9,39 мм и 1,14 мм (соответственно на 5-й и 9-й резонансных частотах) до 1,27 мм и 1,08 мм. А такое же повышение трения в мосту снижает амплитуды более существенно: до 0,32 мм и 0,25 мм, т.е., примерно в 30 и 4-5 раз соответственно.

На примере крана-перегрузателя решетчатого типа конструкции, рассмотренного в подразделе 3.2.1, было исследовано влияние условной гармонической силы с резонансной частотой, приложенной в местах расположения колес грузовой тележки в середине пролета, на перемещения нижнего пояса в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Нагрузка была принята $P=4 \times 40$ кН (10% от веса грузовой тележки) с резонансной частотой по горизонтальной первой форме 0,65 Гц и вертикальной четвертой форме 1,97 Гц.

Были приняты следующие условия соотношения диссипативных свойств в подсистемах для семи вариантов:

первый – во всех конструкциях одинаковый коэффициент неупругого сопротивления равный 0,05;

второй – в нижнем поясе фермы в 2 раза больше – 0,1;

третий – в нижнем поясе фермы в 10 раз больше – 0,5;

четвертый - в ездовой балке в 2 раза больше – 0,1;

пятый - в ездовой балке в 10 раз больше – 0,5;

шестой - в верхнем поясе фермы в 2 раза больше – 0,1;

седьмой - в верхнем поясе фермы в 10 раз больше – 0,5.

Результаты расчётов горизонтальных U_x и вертикальных U_z колебаний нижнего пояса фермы представлены в табл. 3.7.

Из полученных результатов видно, что при увеличении трения в ездových балках пролетного строения амплитуда снижается в 2 раза при вертикальных колебаниях и почти в 3 раза - при продольно-горизонтальных.

Таблица 3.7

Амплитуды перемещений нижнего пояса фермы в среднем сечении пролёта

Направление резонансной гармонической силы	Варианты диссипативных свойств	Перемещение, м	
		U_x	U_z
вертикальное	1	0,009	0,050
	2	0,008	0,045
	3	0,005	0,024
продольно-горизонтальное	1	0,250	0,084
	4	0,210	0,071
	5	0,093	0,031
	1	0,250	0,084
	6	0,212	0,071
	7	0,103	0,033

3.6. Анализ влияния вариантов усиления пролетного строения перегружателя трубчато-балочной конструкции на частоты и формы его собственных колебаний

В данном подразделе исследуется влияние усиления пролетного строения на собственные частоты крана-перегрузателя трубчато-балочного типа. Для сравнения примем четыре модели крана-перегрузателя:

– без усиления (рис. 3.16);

– первый вариант усиления - шпренгельная система усиления на опоре ремонтной консоли крана, разработанная по проекту ОАО «НИПТКИ Укркранэнерго» (рис. 3.17, а);

-второй вариант усиления (той же организации) - шпренгельная система усиления на обеих опорах крана (рис. 3.17, б);

- третий вариант - п-образное усиление всего пролетного строения крана, разработанное в ООО «ПИ «Днепрпроектстальконструкция» (рис. 3.18).

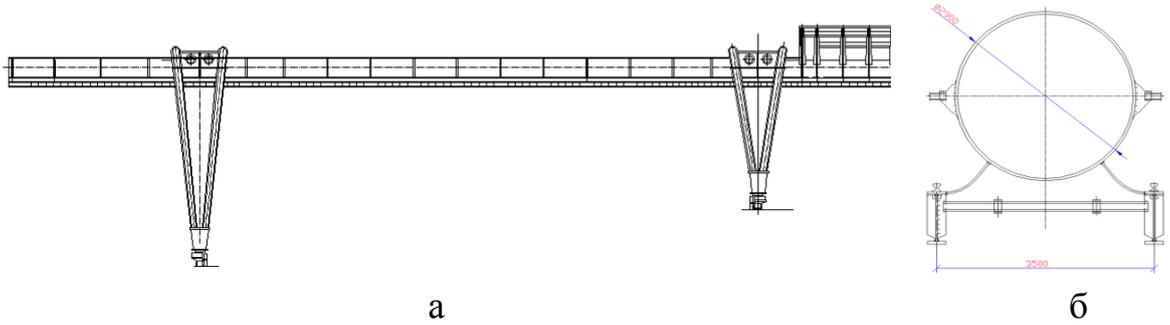


Рис. 3.16 Схема крана-перегрузателя без усиления:
а – общий вид; б – типовое сечении пролетного строения

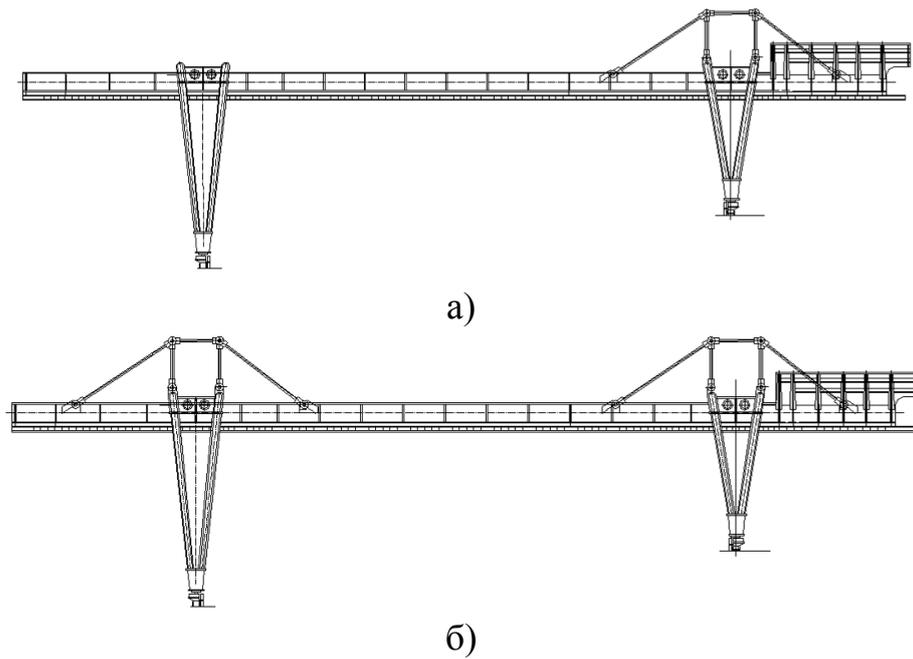


Рис. 3.17. Схема крана-перегрузателя с усилением надопорных узлов:
а – опоры ремонтной консоли крана; б – обеих опор крана

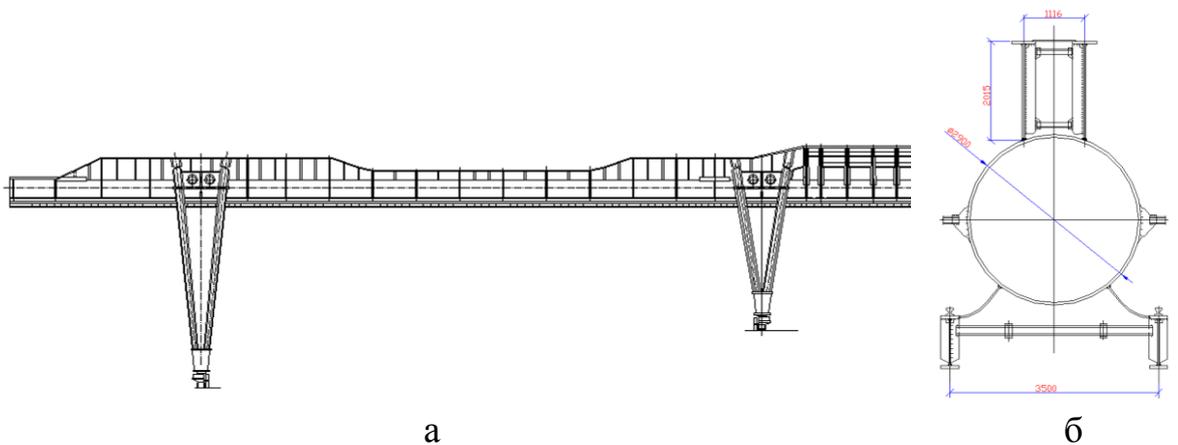


Рис. 3.18 Схема крана-перегрузателя с П-образным усилением пролетного строения крана: а – общий вид; б – типовое сечении пролетного строения

Частоты собственных колебаний при трёх положениях тележки (над опорами и в середине пролета) сведены в таблицу 3.8.

Результаты расчётов показали, что влияний усилений по первому и второму вариантам на частоты собственных колебания сказываются незначительно. Усиление по третьему варианту изменило частоту собственных колебаний: для второй формы - уменьшение на 5-10%; для третьей формы – уменьшение до 5%; для четвёртой формы – увеличение до 10%.

3.6. Теоретические исследования статико-динамического взаимодействия подвижной нагрузки тележки и конструкции моста крана во временной области (с применением дифференциальных уравнений)

Известны различные пути исследования колебаний многих типов сооружений. Методы решения задач теории колебаний изложены в трудах Бидермана В. Л., Киселева В. А., Пановко Я. Г. [128, 133, 187] и др. Например, в стержнях исследуются поперечные (изгибные), продольные, крутильные формы колебаний и определяются собственные частоты аналитическим путём. В основном, в литературе изложены некоторые способы исследования линейных и нелинейных колебаний систем с большим (для линейных) и малым (для нелинейных) числом степеней свободы, в том числе сложные расчеты на подвижную нагрузку, но методы расчета не охватывают в полной мере действительной работы металлоконструкций и нуждаются в их уточнении. Однако, на практике необходимо численными методами быстро делать расчеты систем с десятками динамических степеней свободы. Основные отечественные программные комплексы (Лира, SCAD Office, Selena [186, 188, 189] и др.) не позволяют исследовать нелинейное поведение сооружений во временной области, что особенно важно при расчетах на реальные подвижные нагрузки. В этих случаях целесообразно

Таблица 3.8

Собственные частоты колебаний крана-перегрузжателя при различных типах усиления

№ собственной формы	Схема	Положение груза	Собственные частоты колебаний, Гц			
			Вариант без усиления	1 вариант	2 вариант	3 вариант
1		на левой опоре	0,66	0,68	0,7	0,76
		середина на правой опоре	0,66	0,68	0,7	0,76
2		на левой опоре	0,73	0,73	0,73	0,70
		середина на правой опоре	0,77	0,78	0,77	0,73
3		на левой опоре	1,36	1,34	1,39	1,34
		середина на правой опоре	1,27	1,28	1,29	1,27
4		на левой опоре	2,17	2,17	2,18	2,29
		середина на правой опоре	1,62	1,63	1,63	1,78
5		на левой опоре	3,12	3,15	3,19	3,03
		середина на правой опоре	3,24	3,28	3,32	3,14
6		на левой опоре	3,38	3,49	3,9	4,31
		середина на правой опоре	3,39	3,47	3,92	4,34
			3,38	3,5	3,9	4,31

применять иные пути: составлять индивидуальную статико-динамическую модель (для нелинейных систем нельзя применять принцип суперпозиции и складывать полученные отдельно результаты статики и динамики), записывать дифференциальные уравнения движения и решать их во временной области при помощи, например, одной из систем компьютерной алгебры «Maple» [190, 191].

3.6.1. Макет-аналог для упрощённых исследований основного тона вертикальных колебаний моста

Исследуем, для примера, колебания невесомой шарнирно-опёртой балки (рис. 3.19) с сосредоточенной приведенной массой в середине пролета. Параметры системы приняты близкие к параметрам основного пролета моста перегружателя: пролет $L=76,35$ м, модуль упругости $E=2,0594 \cdot 10^{11}$ Н/м², приведенная масса балки $m_6=145000$ кг, момент инерции $I=1.8119$ м⁴, параметр вязкого трения $\beta=60000$ Нс/м, логарифмический декремент колебаний - 0,15, жесткость балки $r=48EI/L^3=4,02 \cdot 10^7$ Н/м.

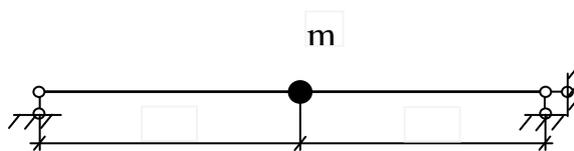


Рис. 3.19. Статико-динамическая модель шарнирно-опёртой балки

Для решения одномассовой системы принято дифференциальное уравнение второго порядка:

$$m_6 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) + \beta \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) + ry(t) = f(t). \quad (3.3)$$

Исследуем, для начала, колебания балки относительно положения её статического равновесия (рис. 3.20), как принято в классических учебниках по строительной механике. С начальными условиями перемещение массы по вертикали вверх $y_0=0,01$ м; время начала отсчета $t=0$ с; начальная скорость массы $\dot{y}_0=0$ м/с; в правой части уравнения функция $f(t)=0$, что означает отсутствие силы тяжести и возмущения. (Ниже дадим примеры, которые могут являться тестированием таких задач).

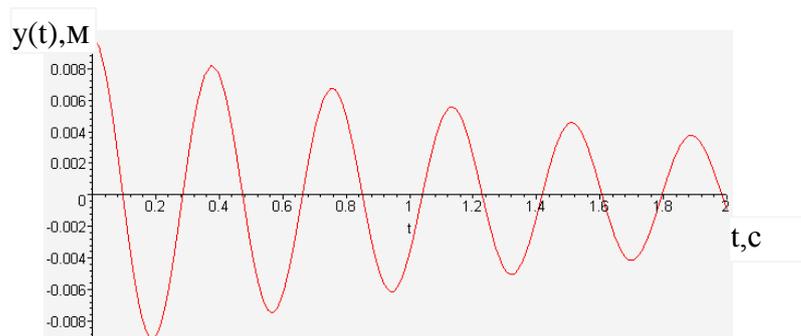


Рис. 3.20. График перемещений массы во времени

Аналитическое решение дифференциального уравнения (применение оператора “dsolve”) для перемещений массы во времени, представлено в виде:

x

(3.4)

Затухающие свободные колебания балки имеют частоту 2,65 Гц, а логарифмический декремент колебаний - 0,15. Если для контроля задать эти же жесткость и массу, а также коэффициент неупругого сопротивления ($\gamma=\delta/\pi$) системы в исходные данные программного комплекса «Selena», то при помощи метода конечных элементов можно получить такую же частоту 2,65 Гц при 22 конечных элементах. Основной тон изгибных колебаний балки представлен на рис. 3.21.

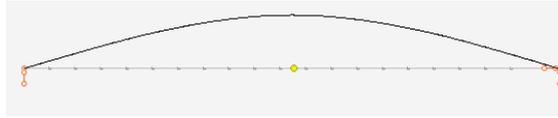


Рис. 3.21. Первая форма собственных колебаний балки

Другой вариант тестирования – по прогибу от силы тяжести (проверяется прогиб, частота и декремент).

Статический прогиб массы (рис. 3.19) от внезапно приложенных сил тяжести ($f(t)=m_0g$, где g – ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$) составил $0,0353 \text{ м}$. Графическое решение показано на рис. 3.22, аналитическое имеет вид:

$$y(t) = -\frac{9483}{5206436000} \sqrt{5828} e^{\left(\frac{-6t}{29}\right)} \sin\left(\frac{2\sqrt{5828}t}{29}\right) - \frac{9483}{268000} e^{\left(\frac{-6t}{29}\right)} \cos\left(\frac{2\sqrt{5828}t}{29}\right) + \frac{9483}{268000}. \quad (3.5)$$

Для проверки статического прогиба (в программном комплексе «Selena») был задан собственный вес сосредоточенной «точечной» массы $145000 \cdot 9,81 = 1422000 \text{ Н}$. В результате расчёта прогиб составил $0,0353 \text{ м}$.

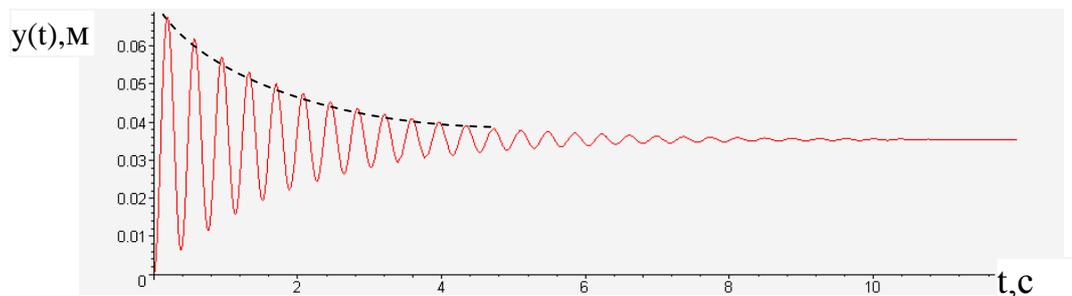


Рис. 3.22. График перемещения массы во времени при внезапном приложении силы тяжести

Если в дифференциальное уравнение (3.3) вместо вязкого трения β добавить нелинейность типа «кулоново» сухого трения $H\text{sign}$ (3.6), то график колебаний перемещения массы при внезапном приложении силы тяжести будет ограничен «мёртвой зоной» без движения массы после двух секунд (рис. 3.23).

$$m_0 \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) + H \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) + r y(t) = f(t). \quad (3.6)$$

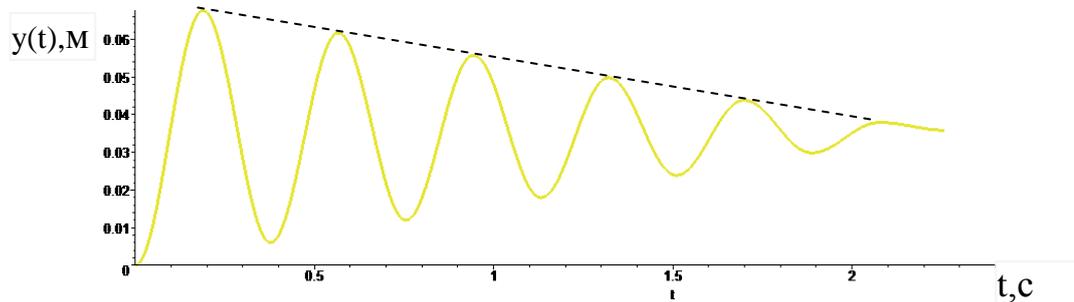


Рис. 3.23. График перемещения массы (с сухим трением) во времени при внезапном приложении силы тяжести

Также, по характеру затухающих колебаний можно контролировать какой тип трения принят в системе, для вязкого трения β описывается по экспоненте (рис. 3.22), а для «кулоново» сухого трения $H \operatorname{sign}$ – по прямой линии.

3.6.2. Система с двумя степенями свободы (мост с тележкой)

Рассмотренную балку (рис. 3.19) усложним таким образом, чтобы приближенно смоделировать колебания моста крана-перегрузателя вместе с движущейся по нему тележкой с грузом. Для этого над осциллятором-мостом с параметрами (m_2, β_2, r_2) , принятых для балки в предыдущем подразделе, была установлена еще одна поддресоренная масса (m_1, β_1, r_1) с упруго-диссипативными связями. Иными словами, балку с тележкой упрощаем до системы с двумя степенями свободы для решения в «Maple» (цепочка из двух масс представлена на рис. 3.24).

Параметры системы: пролет $L=76,35$ м, $E=2,0594 \cdot 10^{11}$ Н/м², $m_2=145000$ кг, $I=1,8119$ м⁴, вязкое трение $\beta_2=200000$ Н·с/м, $r_2=4,02 \cdot 10^7$ Н/м, $m_1=160000$ кг, $r_1=6,0 \cdot 10^7$ Н/м, $\beta_1 = 200000$ Н·с/м.

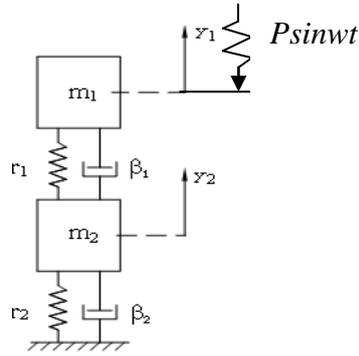


Рис 3.24. Система с двумя степенями свободы

Общий вид системы из двух дифференциальных уравнений 2-го порядка в среде Maple при условии, что к системе приложен только собственный вес:

$$\begin{cases} m_2 \left(\frac{d^2}{dt^2} y_2(t) \right) + r_2 y_2(t) - r_1 y_1(t) - y_2(t) + \beta_2 \left(\frac{d}{dt} y_2(t) \right) - \beta_1 \left(\left(\frac{d}{dt} y_1(t) \right) - \left(\frac{d}{dt} y_2(t) \right) \right) = m_2 g; \\ m_1 \left(\frac{d^2}{dt^2} y_1(t) \right) + r_1 y_1(t) - y_2(t) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} y_1(t) - \frac{d}{dt} y_2(t) \right) = m_1 g + P \sin(\omega t). \end{cases} \quad (3.7)$$

Систему уравнений (3.7) решают, в отличие от замкнутой явной формы типа (3.3) для осциллятора, методом Рунге-Кутты для численного интегрирования. Графики перемещений верхней и нижней масс при нулевых начальных условиях представлены на рис. 3.25.

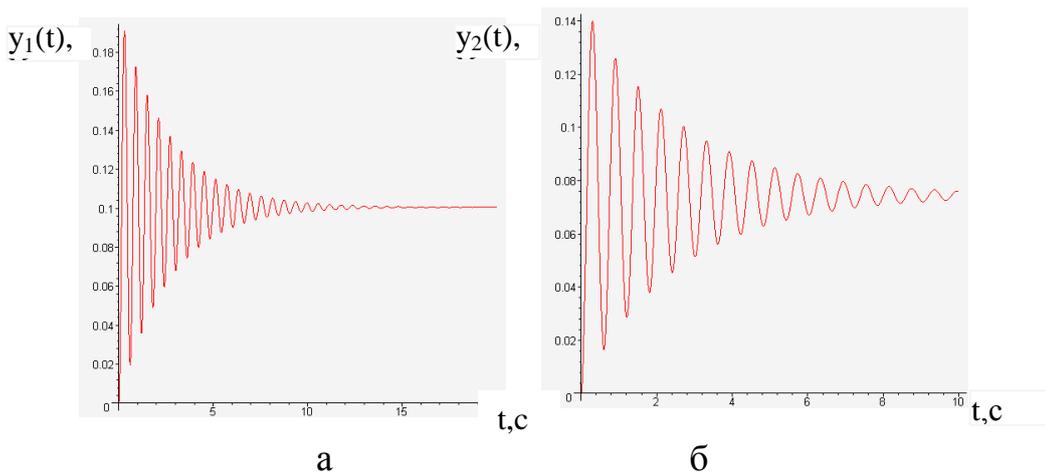


Рис. 3.25. Графики перемещений масс во времени при внезапном приложении сил тяжести: а - верхней массы; б – нижней массы

Статический прогиб верхней и нижней массы, и собственная частота колебаний для контроля были получены на «Selena» и приведены в таблицы 3.9.

Таблица 3.9

Частота собственных колебаний, Гц			Статический прогиб (от положения статического равновесия), м		
№ формы	Maple	Selena	Масса	Maple	Selena
1	1,66	1,66	верхняя	0,1	0,1
2	4,9	4,93	нижняя	0,074	0,074

Заметим, что частота колебаний моста с тележкой (1,7 Гц) должна понизится примерно в 2 раза по сравнению с частотой без тележки и эта частота близка к частоте вертикальных колебаний двухконсольного моста.

Далее рассмотрим эту же систему из двух масс. Прикладываем к первой массе гармоническую динамическую нагрузку порядка 10% от веса верхнего груза (тележки) $P_0=157000$ Н на резонансной низшей частоте (1,66 Гц) основного тона цепочки. Общий вид системы двух дифференциальных уравнений 2-го порядка в среде Maple повторяет систему (3.6), но в правой части нижнего уравнения добавляется одно слагаемое $P_0 \sin \omega t$. Начальные условия для системы - перемещение (статический прогиб системы) $y_1=0,1$ м, $y_2=0,074$ м, начальная скорость $\dot{y}_1=0$ м/с, $\dot{y}_2=0$ м/с.

Графики перемещений верхней и нижней масс представлены на рис. 3.26.

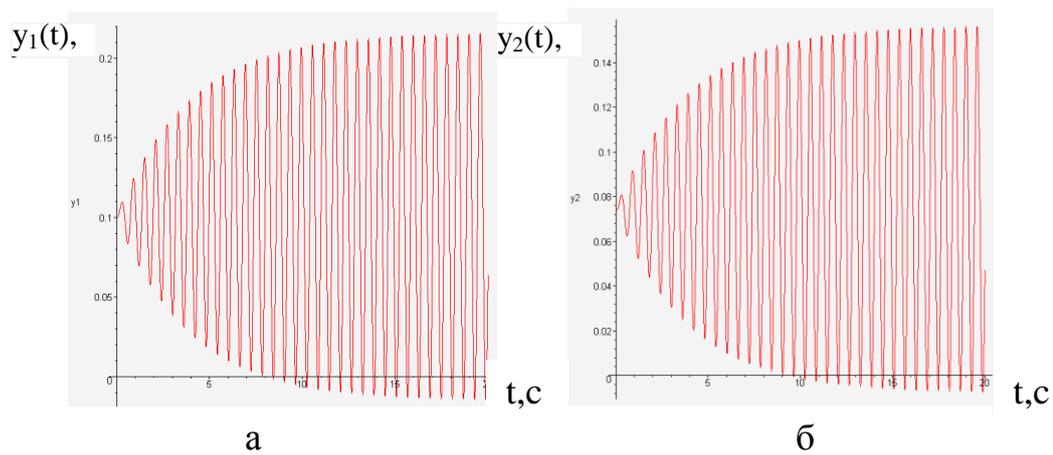


Рис. 3.26. Графики перемещений масс во времени от гармонической динамической нагрузки на резонансе (1-й формы собственных колебаний): а - верхней массы; б – нижней массы

Динамические прогибы системы, полученные при решении в среде «Maple» ($m_1=0,100$ м и $m_2=0,074$ м) и в программном комплексе «Selen» ($m_1=0,103$ м и $m_2=0,076$ м) отличаются между собой на 6%.

3.6.3. Моделирование динамического взаимодействия инерционного моста с инерционной движущейся тележкой

Учебники по строительной механике до сих пор под термином «расчет на подвижную нагрузку» понимают применение статических линий влияния. В исследовании динамики мостовых перегружателей применим наиболее корректный четвертый тип моделей взаимодействия по Я. Г. Пановко.

Для кранов рекомендуется следующая методика расчёта. Целесообразно составлять индивидуальную статико-динамическую модель и записывать дифференциальные уравнения движения, решая их во временной области.

Для расчета, например, весьма условного крана без консолей ($l=60$ м) была принята упрощенная модель исследования вертикальных колебаний по основному тону моста с одной степенью свободы. Масса балки m_b берется в виде приведенной к среднему сечению половинной массы моста (154 т). Грузовая тележка с грузом m_{gp} (105 т) перемещается со скоростью v по балке

(рис. 3.27). Амплитуда колебаний моста A_y зависит от его жесткости r и коэффициента трения β .

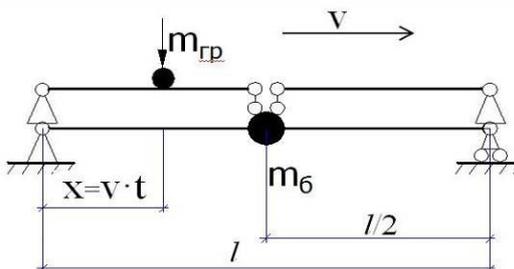


Рис. 3.27. Условная динамическая модель движения груза по балке

В решении дифференциального уравнения (3.8) присутствует переменная суммарная масса, которая изменяется за время прохождения грузовой тележки (по принципу двух рычагов – балок верхнего уровня, см. «внеузловую передачу нагрузок на фермах»). Их собственный вес: $P_б = m_б g$ и $P_гр = m_гр g$.

$$(m_б + m_гр) \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) + \beta \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) + r y(t) = P_б + P_гр. \quad (3.8)$$

Далее приведен для тестирования задачи график изменения суммарного собственного веса балки и тележки при прохождении движущейся нагрузки со скоростью 5 м/с от левой опоры к правой (рис. 3.28, а) и график колебаний среднего сечения балки (рис. 3.28, б). На рис. 3.28, б можно наблюдать колебания балки от движущейся тележки с увеличением амплитуды колебаний до 20% от максимального статического прогиба 149 мм.

Как видно из рис. 3.28, б период колебаний среднего сечения балки вначале увеличивается, а после прохождения тележкой середины балки – уменьшается.

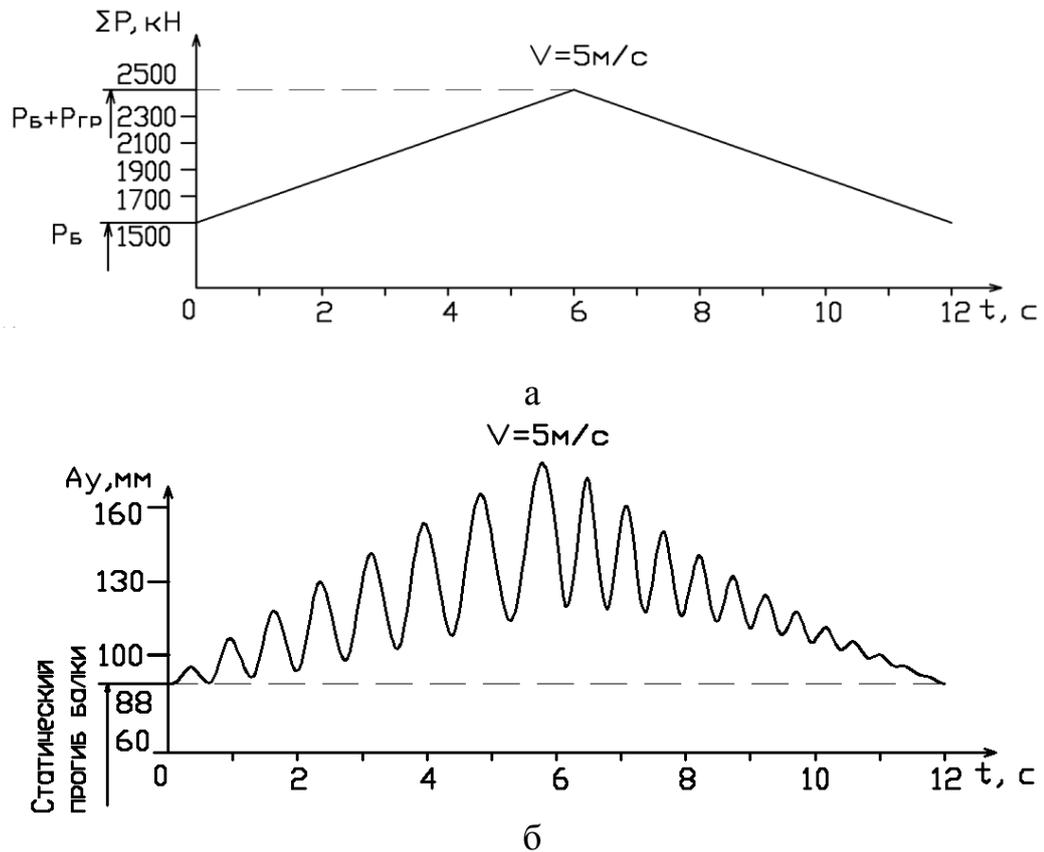


Рис. 3.28. Динамические расчёты перегружателя: а – тест-график изменения суммарной силы тяжести переменной массы в зависимости от положения тележки; б – результат динамического расчёта амплитуды перемещения среднего сечения моста

Следующий тест-пример – движение тележки с грузом по той же балке со скоростью 5 м/с, но при расстоянии 5 м между колёсами (рис. 3.29). В уравнении движения добавляется $m_{гр1} = m_{гр2}$ (57 т) и собственный вес этих грузов (в правой части) уравнения (3.9).

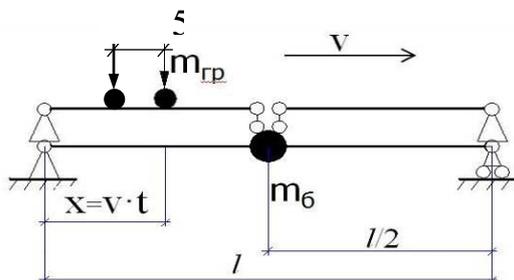


Рис. 3.29. Условная динамическая модель движения двух грузов по балке

$$(m_o + m_{ep1} + m_{ep2}) \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) + \beta \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) + ry(t) = P_o + P_{ep1} + P_{ep2}. \quad (3.9)$$

Аналитическое решение дифференциального уравнения (3.10) в Maple имеет вид:

$$\begin{aligned} Ay(t) = & -\frac{1}{15200000} e^{\left(\frac{30(-10 + \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2}) t}{1540 + 19 xzp1 + 19 xzp2} \right)} (2990524 xzp1^2 - 29250 - \\ & - 8284 \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2} xzp1 + 242306639 xzp1 + \\ & + 5981048 xzp1 xzp2 + 2990524 xzp2^2 - \\ & - 8284 \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2} xzp2 + 242306639 xzp2 + \\ & + \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2}) / (29250 + 361 xzp1 + 361 xzp2) - \\ & - \frac{1}{15200000} e^{\left(-\frac{30(10 + \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2}) t}{1540 + 19 xzp1 + 19 xzp2} \right)} (-29250 + 242306639 xzp1 + \\ & + 242306639 xzp2 + 2990524 xzp1^2 + \\ & + 8284 \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2} xzp1 + 5981048 xzp1 xzp2 + \\ & + 2990524 xzp2^2 + 8284 \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2} xzp2 - \\ & - \sqrt{-292500 - 3610 xzp1 - 3610 xzp2}) / (29250 + 361 xzp1 + 361 xzp2) + \frac{109 xzp1}{100000} + \\ & + \frac{109 xzp2}{100000} + \frac{8393}{95000}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Графическое решение (3.9) колебаний среднего сечения балки приведено на рис. 3.30, б, график изменения суммарной силы тяжести - на рис. 3.30, а.

Таким образом, для анализа динамического взаимодействия моста условного крана с инерционной грузовой тележкой могут быть распространены решения на многомассовые плоские и пространственные модели кранов с консолями с учётом торможения, разгонов, ударов об упоры и др. В этих моделях меняются только типы уравнений, их количество и усложняются переходные процессы.

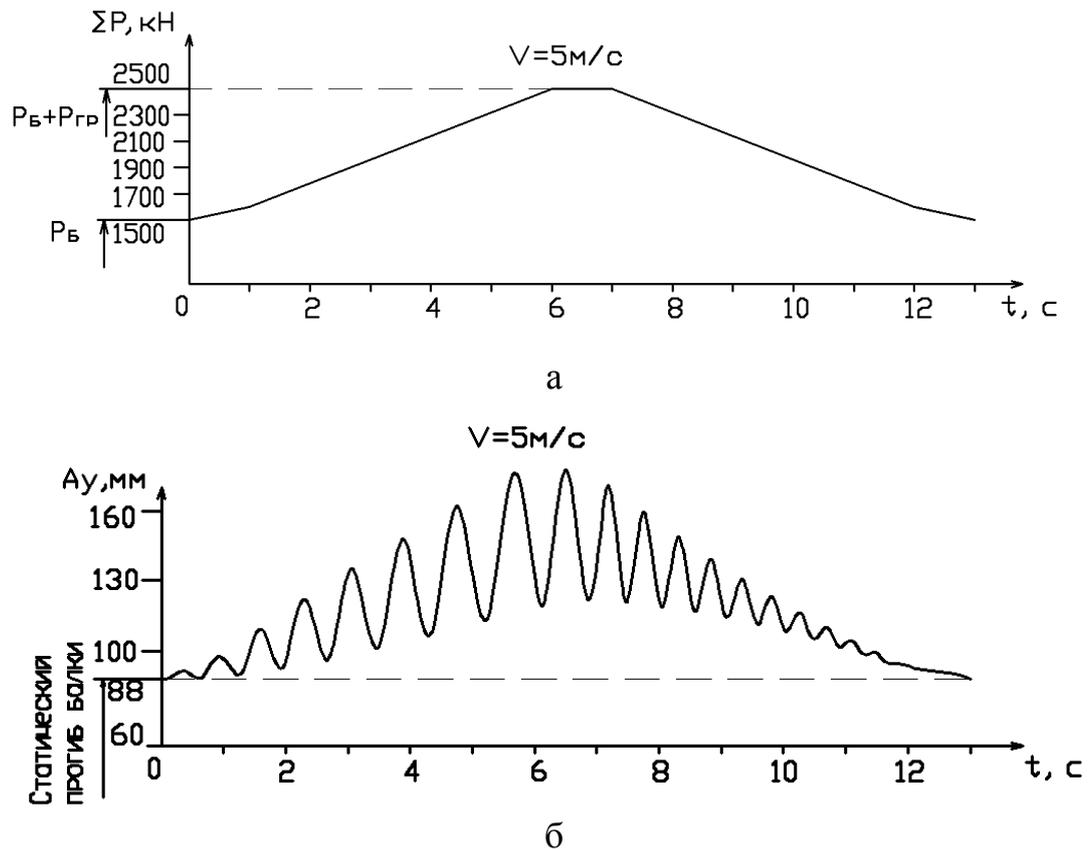


Рис. 3.30. Динамические расчёты перегружателя: а – тест-график изменения суммарной силы тяжести основной переменной массы в зависимости от положения колес тележки; б – результат динамического расчёта амплитуды перемещения среднего сечения моста

3.7. Выводы по разделу 3

1. Так как в большинстве известных из литературы исследований собственных колебаний перегружателей приводились обычно данные по формам вертикальных колебаний, то проведенные в данном разделе исследования расширили знания о пространственных продольных, поперечных, совместных горизонтальных (они начинаются порядка 0,6-0,7 Гц), крутильных и вертикальных (выше 1,0 Гц).

2. Положение грейферной тележки существенно не влияет на низшую продольно-горизонтальную форму с частотой около 0,6 Гц. Частота собственных колебаний горизонтальной и вертикальной форм существенно зависит от места расположения грейферной тележки на мосту крана (при установке тележки над опорой она увеличивается приблизительно на 20%).

3. Вторая и третья формы являются поперечно-горизонтальными с закручиванием моста (частоты их у решётчатого крана выше на 10% и 35% соответственно). Лишь четвертая форма является вертикальной формой собственных колебаний (в решётчатом выше частота на 22%).

4. Проведенные исследования показали некорректность моделей «пропорционального трения» для неоднородных (композитных, из разных материалов) систем и необходимость тщательного учета действительного вида и величин трения по всем подсистемам перегружателя.

5. Комплексная расчетно-экспериментальная методика анализа динамического взаимодействия инерционного моста крана всех конструкций с инерционной грузовой тележкой (п. 3.6.3) могут быть распространены на многомассовые плоские и пространственные модели кранов с консолями с учётом торможения, разгонов, ударов об упоры и др. (меняются только типы уравнений, их количество, усложняются переходные процессы). После проведения эксперимента в натуральных условиях и статистического усреднения времени полного технологического цикла с измерением скоростей, времени разгонов и торможений для конкретного крана создается база данных о технологических процессах цикла, содержащая и контрольные виброграммы моста по типу полученных автором и приведенных в следующем разделе.

По теме третьего раздела опубликовано ряд публикаций [6-9, 192].

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРАНА И ТЕЛЕЖКИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В данном разделе описана методика проведения динамических испытаний при различных режимах движения перегружателя и тележки в натуральных условиях с дальнейшим определением динамических характеристик (частоты, амплитуды и логарифмических декрементов колебаний основных форм) металлоконструкций крана.

4.1. Методика проведения экспериментов

Для изучения собственных, свободных и вынужденных колебаний мостового перегружателя в условиях его натурной эксплуатации были проведены специальные экспериментальные исследования. Испытания динамических режимов работы крана проводились на работающем мостовом перегружателе трубчато-балочной конструкции (испытывался также и вариант усиленной конструкции моста), установленном на рудном дворе агломерационного цеха ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Режимы работы крана при испытаниях не отличались от эксплуатационных режимов.

Проводилось несколько контрольных записей виброскоростей основных форм колебаний крана с последующим анализом и сравнением их с теоретическими результатами (см. раздел 3).

Известны два основных принципа измерений колебаний – кинематический и динамический. В нашем случае принимался динамический принцип. Он заключается в том, что с помощью инерционной схемы создается система координат, в которой измеряется перемещение колеблющегося крана. Зная соотношение характеристик инерционной схемы

и характеристик изучаемого движения, можно перейти от относительных перемещений к действительным перемещениям.

Самые распространенные методы измерения колебания – механический, оптический и электрический [83, 152, 157, 160, 161]. В эксперименте применялся электрический метод. Особенность данного метода заключается в том, что механическое перемещение с помощью датчика преобразовывается в электрическую величину с последующим вводом и обработкой её компьютером.

Рабочие операции крана и некоторые их характеристики:

1 – опускание порожнего грейфера происходит со скоростью около 1,5 м/с, время опускания 10-15 с;

2 – подъем грейфера с грузом производится со скоростью 1,2 м/с, время подъема составляет 20-25 с. Высота достигает 25 м. При подъеме грейфера с грузом ощущается сильная вибрация грейферной тележки и кабины;

3 – освобождение грейфера от груза происходит постепенно за 5-7 с;

4 – горизонтальное движение тележки вдоль моста крана происходит с переменной скоростью, так как машинист крана вынужден сбавлять скорость тележки из-за раскачивания грейфера (особенно порожнего) в направлении движения, а также из-за устройств безопасности «линейки» при прохождении по консолям крана к буферным устройствам. Тележка обычно перемещается на расстояние всего около 80-100 м со средней скоростью 4-5 м/с (15-18 км/ч). Время движение тележки по мосту с грузом 15-17 с, без груза 15-20 с;

5 – перемещение крана вдоль наземных путей осуществляется при условии, что тележка с пустым грейфером устанавливается в створе опоры. Движение крана происходит со скоростью 0,5 м/с.

В перегружателе выделяются наружные и внутренние основные источники вибрации.

К наружным вибрациям относятся воздействие ветра (галопирование, порывы ветра, срывной флатер), сейсмическое воздействие (землетрясение), влияние от железнодорожных путей (прохождение состава) и др.

К внутренним источникам относятся машины с вращающимися движениями (генераторы преобразования постоянного электрического тока с частотой вращения 1000 об/мин на консоли ремонтного помещения, механизмы подъема/опускания грузозахватного органа расположены в грейферной тележке); силы, образованные под воздействием дисбаланса (по мере старения машин, неуравновешенные силы увеличиваются); разность высотных отметок подтележечного рельса; влияние толчков от передвижения по рельсам моста крана по крановому наземному пути или грейферной тележки по подтележечному пути (вертикальные колебания); разгон или торможение моста крана или грейферной тележки (поперечно-горизонтальные колебания); разгон или торможение грейферной тележки (продольно-горизонтальные колебания); подъем или опускание грейфера (вертикальные колебания); наезд на тупики крана или удар в буферное устройства грейферной тележки (происходит редко).

В качестве приемника свободных и вынужденных колебаний крана устанавливались два сейсмометра типа СМ-3 в различных сечениях пролетного строения и тележки для записей виброскоростей колебаний низа трубы пролетного строения в горизонтальном и вертикальном направлениях в середине пролета и на опоре (чтобы снизить влияние вертикальных перемещений моста крана).

Вибропреобразователи СМ-3 позволяют измерять сигналы виброскоростей в диапазоне частот 0,6 до 20,0 Гц (параметры характеристики датчиков). Преобразование скорости перемещения в электрический сигнал обеспечиваются катушкой, связанной с сейсмической массой и перемещающейся относительно магнитного сердечника, скрепленного с корпусом вибропреобразователя.

Применялись стандарты измерения вибрации [193-194].

В качестве регистрирующей аппаратуры был принят персональный компьютер (с аналоговым входом сигналов). Применение цифровых электронных вычислительных средств для анализа исходных данных,

получаемых при экспериментальном исследовании сооружений, требует представления сигнала в цифровом формате. Аналоговый сигнал с сейсмометра передавался на звуковую плату компьютера через аналоговый вход с преобразованием сигнала из аналогового в цифровой для последующей записи в цифровой формат (wma).

Полученные виброграммы обрабатывались для вывода относительной спектральной плотности, логарифмического декремента колебаний, частоты собственных колебаний и др.

4.2. Натурные динамические испытания трубчато-балочного крана-перегрузателя

Запись виброграмм свободных колебаний грейферной тележки производилась при установке её в створе опоры для исключения влияния податливости моста крана. Сейсмометр вертикального действия крепился на раме тележки. Колебания вызывались движением грейфера без груза. Последовательность операций: тележка (установлена на опоре ремонтной консоли) и кран в состоянии покоя; опускание грейфера, остановка грейфера (рис. 4.1).

Обработка записи виброграммы вертикальных колебаний рамы (рис. 4.2, а) позволила выделить основную собственную частоту 3,34 Гц (рис. 4.2, б).



Рис. 4.1. Схема установки грейферной тележки крана и место установки сейсмометра

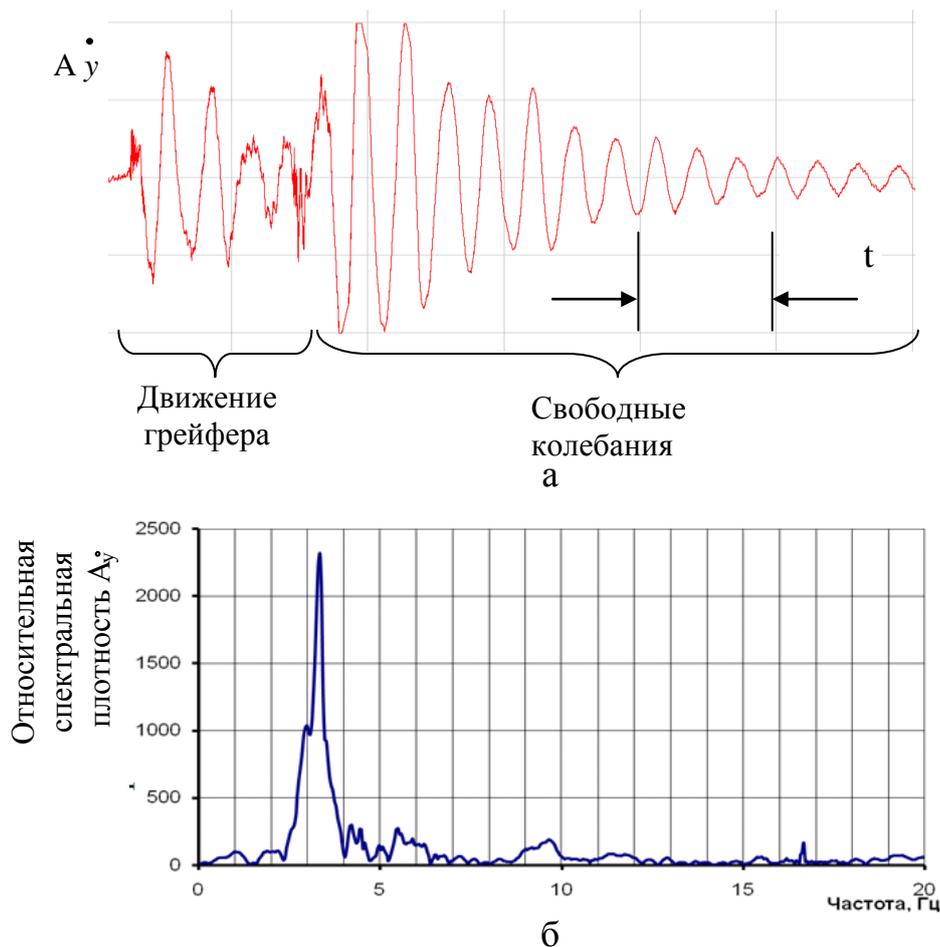


Рис. 4.2. Вертикальные собственные колебания тележки:
 а - виброграмма скоростей колебаний рамы тележки;
 б – относительная спектральная плотность

Для исследования важной (для прочности крана и комфорта машиниста) низкочастотной формы колебаний (продольно-горизонтальной в вертикальной плоскости крана) устанавливался горизонтальный сейсмометр внутри трубы пролётного строения моста крана. Максимальные продольные перемещения (размах $2A=30$ мм) моста крана измерялись теодолитом.

Измерения производились при передвижении тележки (с полным грейфером, поднятым в транспортное положение) от короткой опоры (положение I) к длинной с остановкой в середине пролёта (положение II на рис. 4.3, в). Обработка записи виброграммы горизонтальных колебаний моста крана (рис. 4.3, а) выделила основную собственную частоту 0,72 Гц (рис. 4.3, б).

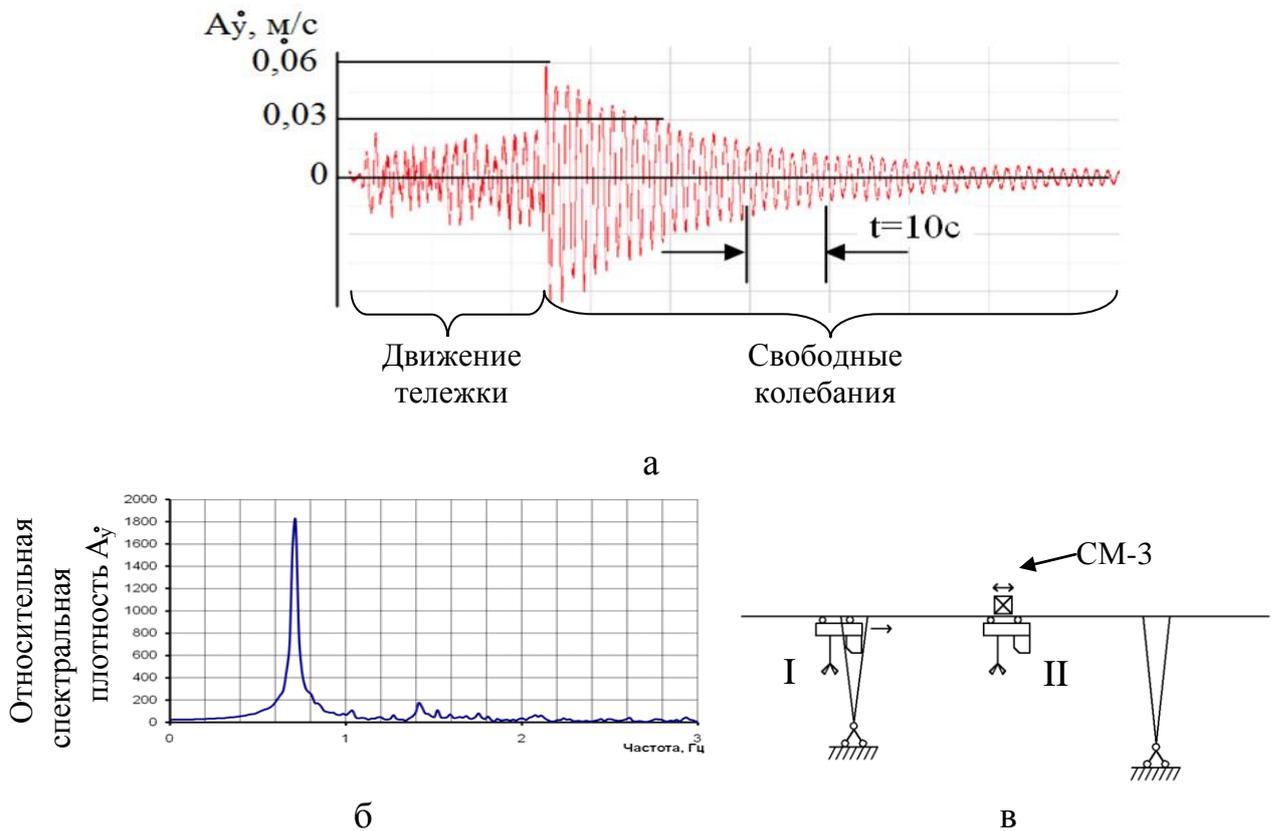


Рис. 4.3. Продольно-горизонтальные колебания в плоскости **трубчатобалочного** крана (переезд тележки с опоры к середине пролёта): а - виброграмма скоростей продольно-горизонтальных колебаний моста крана; б - относительная спектральная плотность; в – схема движения тележки и место установки горизонтального датчика

На рис. 4.4 представлена виброграмма вертикальных колебаний моста крана, которые соответствуют вертикальной низшей форме колебаний (1,52 Гц). Для этого вертикальный датчик и тележка устанавливались в середине пролёта крана, вертикальные колебания вызывались движением грейфера. Последовательность операции: тележка и кран в состоянии покоя, опускание грейфера, набор груза, подъем грейфера с грузом, остановка грейфера. Относительная спектральная плотность определялся в зоне свободных колебаний моста крана.

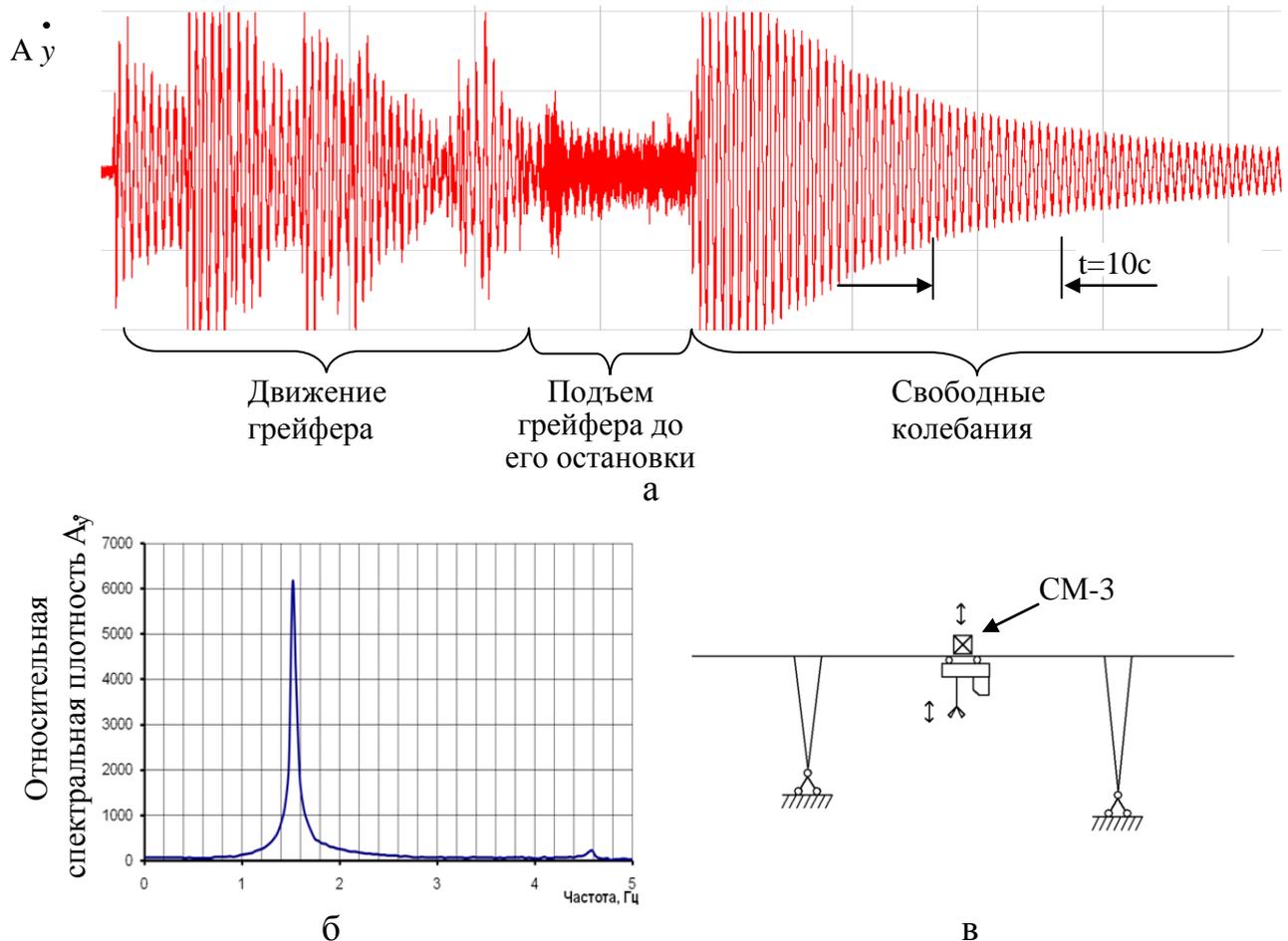


Рис. 4.4. Вертикальные колебания моста крана вызваны набором груза, его подъемом и остановкой грейфера грузовой тележки: а - виброграмма скоростей вертикальных колебаний моста крана; б - относительная спектральная плотность; в – схема места установки тележки и вертикального датчика

На базе измерений колебаний технологического рабочего цикла записывались виброграммы вертикальных собственных колебаний (рис. 4.5, а) при различных положениях тележки (рис. 4.5, в). Последовательность операций: тележка переезжает с середины пролета (I) на короткую консоль (II) крана с одновременной разгрузкой грейфера, на консоли набирает груз и поднимает грейфер. Затем тележка едет в пролет (III), высыпает груз и останавливается. Анализ относительной спектральной плотности рабочего цикла (рис. 4.5, б) показал максимальные пики на частоте 1,52 Гц и 2,16 Гц, что соответствует теоретическим расчётам собственных колебаний при положениях тележки в пролёте и на опоре. Также проявились незначительные всплески на частотах вблизи 3,3 Гц, что

объясняется влиянием собственной частоты тележки (частично загруженной и порожней) на вертикальные колебания моста крана.

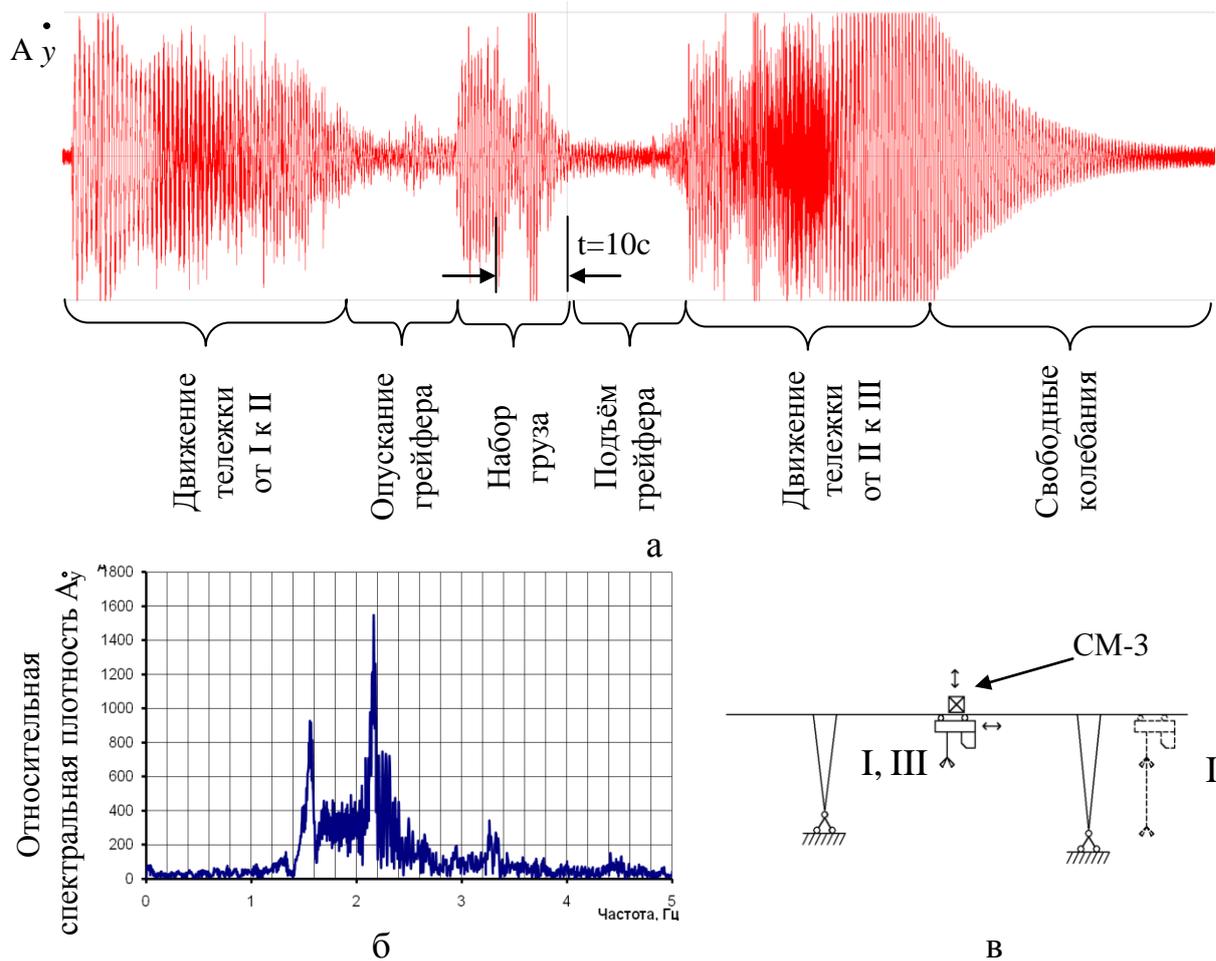


Рис. 4.5. Вертикальные колебания моста крана вызваны перемещением грузовой тележки (с грузом) по мосту крана: а – виброграмма скоростей вертикальных колебаний моста крана; б – относительная спектральная плотность; в – схема движения грейфера тележки и место установки вертикального датчика

На рис. 4.6 представлена виброграмма горизонтальных колебаний моста крана из его вертикальной плоскости (поперечные). Последовательность операций: тележка (установлена на опоре свободной консоли) и кран в состоянии покоя, кран начинает движение, перемещается вдоль кранового пути, останавливается. Для двух участков виброграммы (рис. 4.6, а) посчитаны два частотных спектра: первый – от начала до конца движения моста (рис. 4.6, б), второй – только затухающие свободные колебания (рис. 4.6, в) моста.

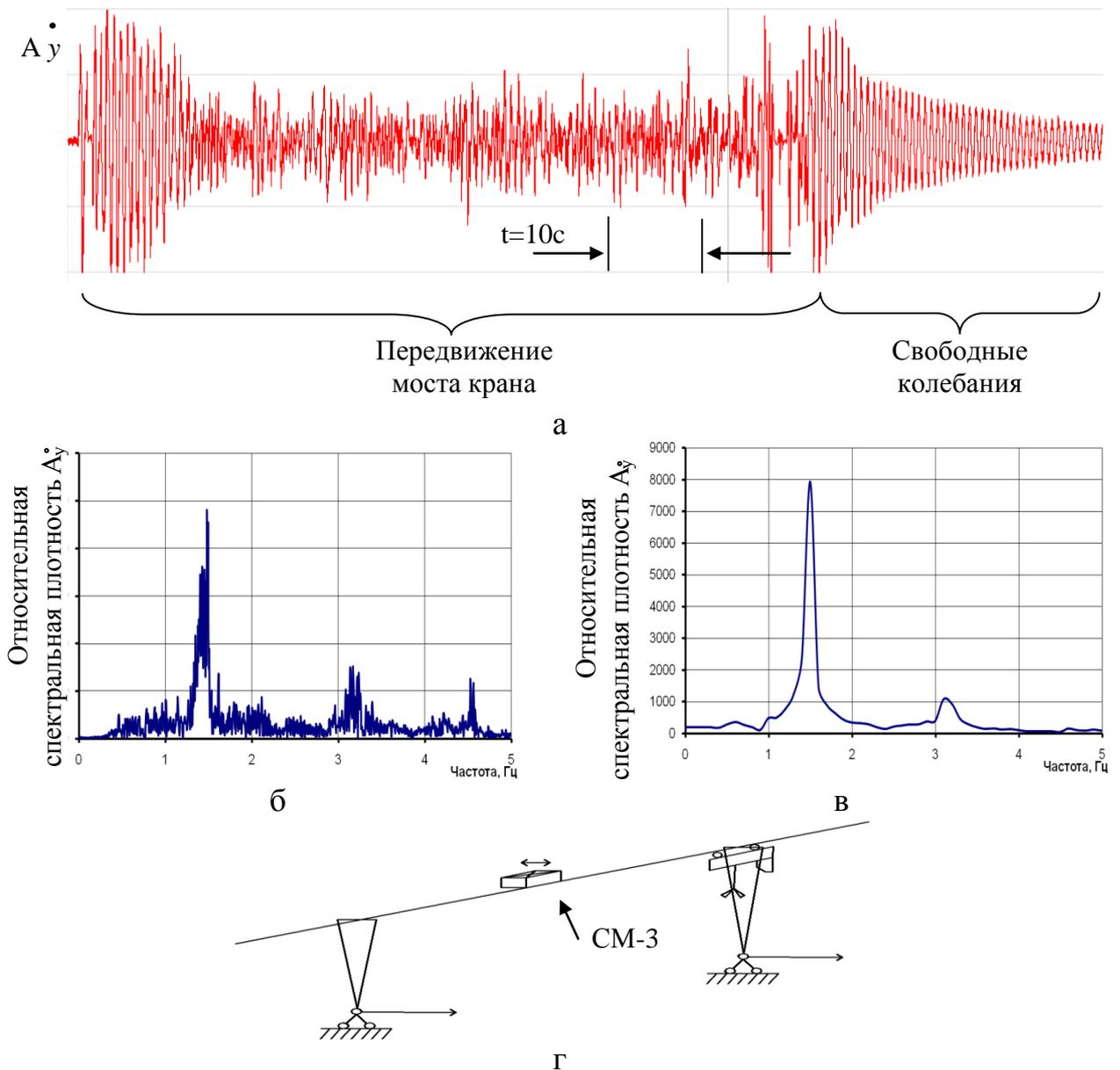


Рис. 4.6. Горизонтальные колебания моста крана из его вертикальной плоскости (поперечные) а - виброграмма скоростей горизонтальных колебаний моста крана (два участка); б, в - относительная спектральная плотность для двух участков виброграммы (а); г – схема места установки тележки и горизонтального датчика

Аналогичные испытания были проведены и на кране такого же типа, трубчато-балочном, но с **п-образным усилением** всего пролетного строения крана, разработанным в ООО «ПИ «Днепрпроектстальконструкция» (рис. 3.18).

Относительные спектральные плотности основных форм колебаний представлены на рис. 4.7.

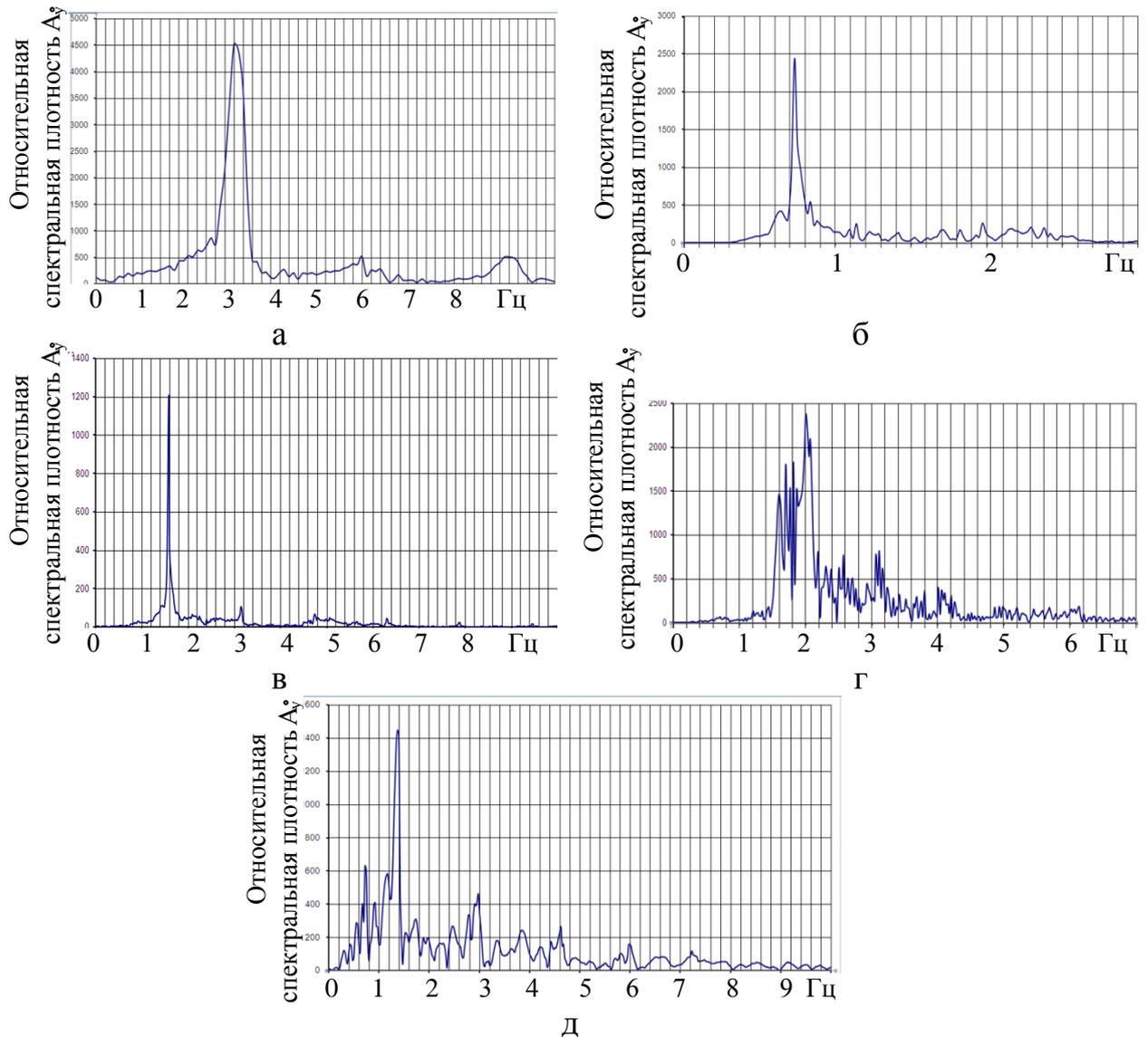


Рис. 4.7. Относительная спектральная плотность колебаний трубчатобалочного крана с п-образным усилением: а – вертикальные колебания рамы тележки; б – горизонтально-продольные колебания моста, вызванные движением тележки; в – вертикальные колебания моста, вызванные движением грейфера; г – вертикальные колебания, вызванные движением тележки; д – горизонтально-поперечные колебания моста крана

4.3. Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований

Для определения собственных частот и логарифмического декремента колебаний δ использовались виброграммы вынужденных и затухающих

колебаний. Вертикальные колебания тележки представлены на рис. 4.2, а моста на рис. 4.4, 4.5, а горизонтальные моста – на рис. 4.3 и 4.6.

Как известно, среднее значение логарифмического декремента колебаний приближённо (при малом трении) равно:

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{A_0}{A_m}, \quad (4.1)$$

где A_0 , A_m – начальная и конечная амплитуды, разделенные m периодами свободных затухающих колебаний.

В работах [170, 195] принимается время затухания колебаний в качестве серьезной и полезной характеристикой кранов-перегрузателей. Оно определяется из условия уменьшения амплитуды до 5% от первоначальной величины.

Число колебаний за этот период времени равно:

$$n = \frac{1}{\delta} \ln \frac{A}{0,05A} = \frac{1}{\delta} \ln 20, \quad (4.2)$$

при этом время затухания можно, учитывая $t = nT$, связать с декрементом:

$$t = \frac{T}{\delta} 2,303 \lg 20 \cong \frac{3T}{\delta},$$

где T – период собственных колебаний.

В результате обработки виброграмм для различных форм свободных колебаний были определены: частота свободных колебаний, логарифмический декремент колебаний и время снижения амплитуды в 20 раз, а также для самой низкочастотной формы – амплитуда скорости продольно-горизонтальных колебаний. Данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Теоретические и экспериментальные данные по формам собственных колебаний трубчато-балочного перегружателя

		Форма собственных колебаний				
		моста перегружателя				тележки
		продольно-горизонт.	поперечно-горизонт.	вертикальная		
Теория	частота, Гц	0,64	1,26	1,61	2,17	-
Эксперимент	частота, Гц	0,72	1,5	1,52	2,16	3,34
	амплитуда скоростей, м/с	0,06	-	-	-	-
	логарифмический декремент колебаний	0,068	0,063	0,043		0,19
	время уменьшения амплитуды в 20 раз, с	62	32	46	32	5
Расчетное положение тележки		пролет	опора	пролет	опора	опора

Проведенный эксперимент показал, что логарифмический декремент пролетного строения для каждой формы собственных колебаний оказался различным, он лежит в пределах 0,043-0,068. Эти значения существенно отличаются от рекомендованного 0,15 для стальных конструкций в последних редакциях союзного СНиП «Нагрузки и воздействия», что не позволяет без оговорок применять гипотезу «пропорционального трения» в расчётах на вынужденные колебания.

Наибольшее время затухания колебаний 62 с (с учётом уменьшения амплитуды в 20 раз) в горизонтально-продольной форме собственных колебаний и 46 с в вертикальной, если тележка расположена в середине пролета. Заметим, что показатели (табл. 4.1) не регламентируются в нормативной базе для мостовых перегружателей. В связи с этим длительные работы крана на некоторых режимах могут влиять на организм машиниста, электрооборудование и долговечность металлоконструкции.

Экспериментальные и теоретические данные трубчато-балочного крана с п-образным усилением представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2
Теоретические и экспериментальные данные по формам собственных колебаний перегружателя с п-образным усилением

		Форма собственных колебаний				
		моста перегружателя				тележки
		продольно-горизонт.	поперечно-горизонт.	вертикальная		
Расчет	частота, Гц	0,76	1,32	1,78	2,29	-
Эксперимент	частота, Гц	0,73	1,38	1,58	2,0	3,0
	логарифмический декремент колебаний	0,07	-	0,031		0,26
	время уменьшения амплитуды в 20 раз, с	59	-	61	48	3,8
Расчетное положение тележки		пролет	опора	пролет	опора	опора

Анализ динамических характеристик перегружателей (без и с усилением) показал, что частота продольно-горизонтальной формы собственных колебаний и время затухания не существенно изменились при усилении пролётно-го строения. Вместе с тем, усиление довольно заметно проявилось на частоте вертикальных колебаний и на увеличении времени затухания колебаний на 30-50%.

4.4. Выводы по разделу 4

1. В результате натурного исследования динамики двух вариантов кранов-перегружателей были получены виброграммы скоростей вертикальных и горизонтальных колебаний мостов и тележек при реальных технологических режимах работы сооружения. Данные об основных

динамических характеристиках свободных и вынужденных колебаний позволили зафиксировать не менее четырёх параметров для четырёх собственных форм крана и одной формы – для тележки. Частоты свободных колебаний сравнивались с частотами полученными в программном комплексе «Selen». Теоретические значения оказались близки к экспериментальным.

2. Результаты эксперимента показали, что для каждой собственной формы крана имеется свое значение логарифмического декремента колебаний. Низкий логарифмический декремент колебаний (от 0,03) отражается на длительном времени гашения амплитуд колебаний моста, что характерно для большепролетных стальных сооружений и является их недостатком.

3. Проведенные экспериментальные исследования позволяют уточнять методики проведения обследования и обработки испытаний, а также динамическую модель и диссипативные свойства всей системы. Эти данные необходимы для проведения корректных динамических расчетов на ЭВМ, для контроля состояния конструкций путем периодической паспортизации, мониторинга и для поиска мест возможных повреждений (см. раздел 6).

По теме четвертого раздела опубликована публикация [196].

РАЗДЕЛ 5

СОЗДАНИЕ УПРОЩЕННЫХ (ИНЖЕНЕРНЫХ) ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

В пятом разделе предложены рекомендации по составлению некоторых упрощённых (для специальной научной или инженерной цели) динамических моделей перегружателя. Такие модели целесообразно применять для расчётов собственных и вынужденных колебаний линейных и нелинейных систем, а также для расчётов во временной области на подвижную нагрузку.

Представлен переход от пространственной многомассовой модели крана до простой модели с одной (1 степенью свободы) или с пятью (6 степеней свободы) масс для каждой основной формы колебаний.

Даны рекомендации по способам снижения амплитуд колебаний перегружателя.

5.1. Рекомендации по составлению упрощённых расчетных моделей перегружателей

Мостовой кран-перегрузатель является сложной пространственной стержневой или оболочечной конструкцией. Для **упрощения**, а также, в некоторых случаях, для **уточнения** процесса динамического расчета крана-перегрузателя иногда целесообразно сформировать «инженерную» динамическую модель. Это касается, например, той части динамических расчетов, которые нельзя реализовать в современных вычислительных комплексах («ЛИРА», «SCAD», «Selena» и др.) при **уточнённом** учёте различных нелинейных характеристик и при необходимости расчётов во временной области (при сложных операциях, при взаимодействии с подвижными нагрузками и т. п.). Даже в линейных задачах иногда

необходимо отделить и исследовать основные конструкции, которые наиболее влияют на конкретную форму собственных колебаний.

Динамическая модель позволит конструктору добавить в систему реальное нелинейное внешнее трение, учесть влияние всех видов нелинейностей (конструктивной, физической, геометрической и генетической), возможность произвести подбор и настройку динамических гасителей колебаний и т.п.

Для получения таких моделей разветвлённую пространственную динамическую модель (с десятками и сотнями стержней, жесткостей, масс элементов и динамических степеней свободы) упрощаем (в зависимости от конкретно исследуемой низкочастотной формы собственных колебаний крана) до модели с 1-3 стержнями с приведенными определёнными массами и условными связями. Для этого многомассовую пространственную модель упрощаем до плоской с несколькими степенями свободы. Массы в моделях условно принимаются точечными (не учитывающими моменты инерции масс при поворотах сечения).

Ниже рассмотрены несколько примеров упрощённого моделирования собственных форм и задач для крана.

Для примера возьмем **продольно-горизонтальную I форму** колебаний крана. Деформированные схемы продольно-горизонтальной формы колебаний крана представлена на рис. 3.5, а, 3.9, а и 3.11, а. Моделирование упрощения для этой формы может быть в двух вариантах: плоская пяти массовая модель (рис. 5.1, а) и осциллятор (рис. 5.1, б).

С учетом характера деформации, заменяем мостовую часть и опоры крана балками эквивалентной жесткости. Количество степеней свободы (со следующими условиями приложения пяти сосредоточенных масс) будет равняться одной (рис. 5.1).

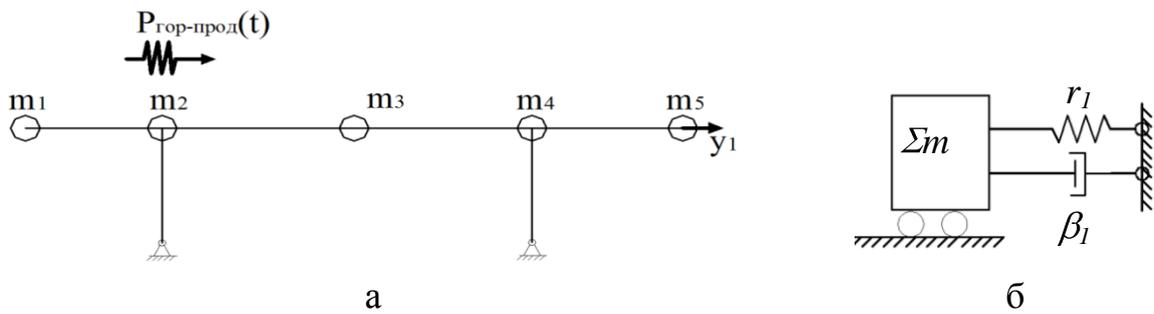


Рис. 5.1. Упрощенные инженерные модели для анализа I формы - продольно-горизонтальных колебаний крана: а – плоская стержневая (влиянием вертикальных колебаний пренебрегаем); б – осциллятор

Для анализа I формы собственных колебаний достаточно модели одномассового (сумарная масса $m_{\Sigma}=m_1+m_2+m_3+m_4+m_5$) осциллятора с жесткостью r_1 , и внутренним трением β_1 обеих опор «вдоль моста».

Дифференциальное уравнение движения при вынужденных (в правой части – $P... (t)$) и свободных (при условии, что $P(t)=0$) колебаниях имеет вид:

$$m_{\Sigma} \cdot \ddot{y}_1 + \beta_1 \cdot \dot{y}_1 + r_1 \cdot y_1 = P_{\text{прод-гор}}(t), \quad (5.1)$$

где y_1 - динамические и статические перемещения; \dot{y}_1 , \ddot{y}_1 - амплитуды скорости и ускорения; $P_{\text{прод-гор}}$ – внешнее воздействие.

Правая часть (5.1) может состоять из эквивалентной гармонической силы $P \sin(\omega t)$ или сил при разгоне-торможении тележки $P_i(t)$ и др.

Динамическая упрощенная модель **IV формы** (вертикальные колебания, см. рис. 3.5, г, 3.9, г и 3.11, г) собственных колебаний аналогична I форме, но отличается тем, что здесь учитываются четыре степени свободы (на рис. 5.2 для удобства составления (канонических) уравнений движения изменим нумерацию масс и обобщённых координат).

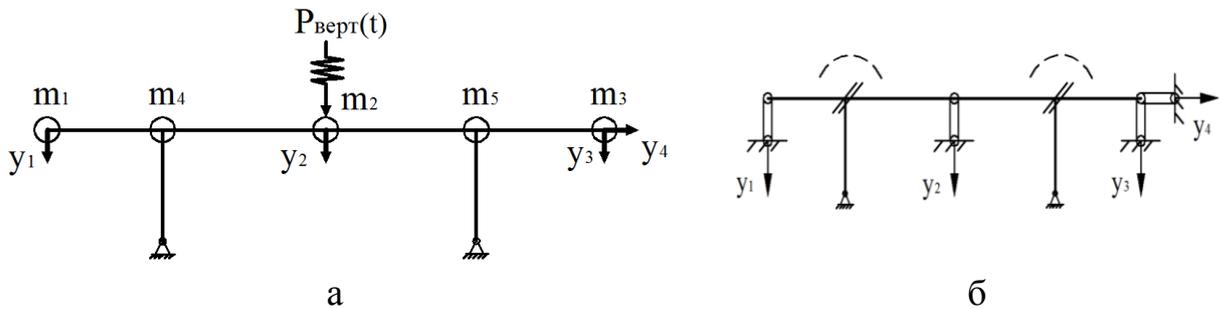


Рис. 5.2. Упрощенная инженерная плоская модель для исследования вертикальных колебаний крана: а – схема точечных масс и координат; б – дополнительные связи (неизвестными условными перемещениями и моментами инерции масс m_4 и m_5 пренебрегаем)

Система дифференциальных уравнений движения крана в соответствии с моделью на рис. 5.2 (при начальных условиях $t=0$, $y_i \neq 0$, $\dot{y}_i = 0$ и без учёта трения) имеет вид:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{y}_1 + r_{11} \cdot y_1 + r_{12} \cdot y_2 + r_{13} \cdot y_3 = m_1 \cdot g; \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 + r_{21} \cdot y_1 + r_{22} \cdot y_2 + r_{23} \cdot y_3 = m_2 \cdot g + P_{\text{верт}}(t); \\ m_3 \cdot \ddot{y}_3 + r_{31} \cdot y_1 + r_{32} \cdot y_2 + r_{33} \cdot y_3 = m_3 \cdot g; \\ m_{\Sigma} \cdot \ddot{y}_4 + r_4 \cdot y_4 = 0. \end{cases}, \quad (5.2)$$

где r_{ik} – реакция в i -ой условной связи метода перемещений от смещения на «единицу» k -ой связи (реакция в связях определяются при помощи программного комплекса).

Моделирование поперечно-горизонтальных колебаний **II** и **III** пространственных форм (с инженерной точностью) можно проводить одним стержнем моста, колеблющимся в горизонтальной плоскости в зависимости от жесткостей упругих опор - условных пружин (рис. 5.3). Эквивалентные жесткости пружинных опор определяются при помощи МКЭ из пространственной модели через податливость от приложенных единичных сил (прикладываются поочередно в верхнем сечении каждой опоры горизонтально, в направлении y_2 и y_4).

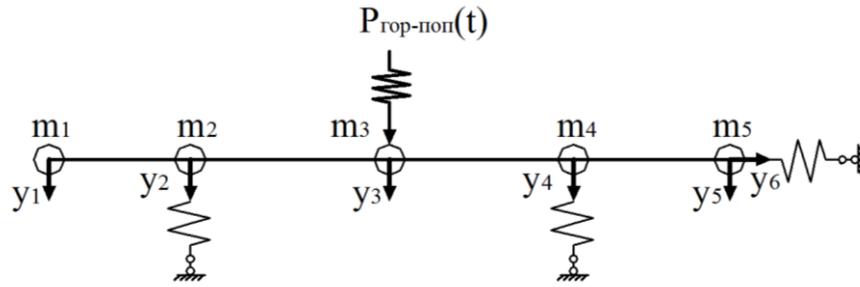


Рис. 5.3. Упрощенная инженерная модель для анализа поперечно-горизонтальных и продольно-горизонтальных колебаний крана (вид сверху на кран)

Модель имеет шесть степеней свободы и позволяет изучить несколько (до пяти) поперечно-горизонтальных форм (рис. 3.5, б, в, рис. 3.9, б, в и рис. 3.11, б, в), и одну продольно-горизонтальную форму колебаний.

Вид системы дифференциальных уравнений следующий:

$$\begin{cases} \ddot{m}_1 \cdot y_1 + r_{11} \cdot y_1 + r_{12} \cdot y_2 + r_{13} \cdot y_3 + r_{14} \cdot y_4 + r_{15} \cdot y_5 = 0; \\ \ddot{m}_2 \cdot y_2 + r_{21} \cdot y_1 + r_{22} \cdot y_2 + r_{23} \cdot y_3 + r_{24} \cdot y_4 + r_{25} \cdot y_5 = 0; \\ \ddot{m}_3 \cdot y_3 + r_{31} \cdot y_1 + r_{32} \cdot y_2 + r_{33} \cdot y_3 + r_{34} \cdot y_4 + r_{35} \cdot y_5 = P_{гор-поп}(t); \\ \ddot{m}_4 \cdot y_4 + r_{41} \cdot y_1 + r_{42} \cdot y_2 + r_{43} \cdot y_3 + r_{44} \cdot y_4 + r_{45} \cdot y_5 = 0; \\ \ddot{m}_5 \cdot y_5 + r_{51} \cdot y_1 + r_{52} \cdot y_2 + r_{53} \cdot y_3 + r_{54} \cdot y_4 + r_{55} \cdot y_5 = 0; \\ \ddot{m}_6 \cdot y_6 + r_6 \cdot y_6 = 0. \end{cases} \quad (5.3)$$

Заметим, что в каждой форме модели здесь принимались условные координаты «у» по разным направлениям (на рис. 5.3 «у» - это горизонтальные колебания).

В этих примерах упрощенных инженерных моделей принято различное количество линейных степеней свободы: одна степень свободы (рис. 5.1), четыре (рис. 5.2) и шесть (рис. 5.3). Сложные нагружения технологического цикла на этих моделях показаны условно в виде некоторых силовых воздействий: гармонических, импульсных или случайных функций $P_i(t)$,

связанных с движением тележки ($P_{\text{прод-гор}}$, $P_{\text{поп-гор}}$), с работой механизмов подъёма грейфера ($P_{\text{верт}}$) и др.

Исторически, одной из величин, которая характеризовала динамические нагрузки на сооружения и динамические свойства инженерного сооружения, являлся динамический коэффициент. В различных задачах и отраслях техники наполнение этого коэффициента принималось разным. В мостостроении ограничивались долгие годы одним коэффициентом с некоторой добавкой к статической нагрузке от собственного веса. В классической теории колебаний под коэффициентом динамичности понимают во сколько раз амплитуда установившихся вынужденных (гармонических) колебаний (перемещений $A^{\text{дин}}$) на круговой частоте θ при возмущающей силе $P(t)=P_0\sin\theta t$ больше перемещения ($A^{\text{стат}}$), вызываемого статически приложенной силой P_0 [133].

$$\mu = \frac{A^{\text{дин}}}{A^{\text{стат}}} \quad (5.4)$$

Некоторые авторы иногда распространяют такую методику «единого динамического коэффициента» и на систему с несколькими степенями свободы, что является ошибочным. Если в осцилляторе такой коэффициент справедлив для перемещения, скоростей, ускорения, динамических напряжений и т. п., то в моделях с большим числом степеней свободы имеется несколько пиков на амплитудно-частотной характеристике, которая, в свою очередь, различна для разных сечений конструкций.

В протяженной плоской или пространственной конструкции мостового перегружателя имеются элементы с большей и меньшей жесткостями или массами, они могут на разных частотах по-разному откликаться на одно и то же возмущение. Следовательно, в разных сечениях конструкции будут различные динамические коэффициенты, что удобно изображать в виде эпюр этого коэффициента.

Рассмотрим пример использования эпюр динамических коэффициентов перемещений перегружателя трубчато-балочного типа при двух случаях (рис. 5.4):

1 - нагрузка вызвана горизонтальной инерционной силой разгона-торможения грейферной тележки ($P_{гор}=100$ кН), на резонансной частоте $\theta_{гор}=2\pi\cdot 0,64$ рад/с;

2 - нагрузка вызвана вертикальной условной инерционной силой подъема или опускания грейфера тележки ($P_{верт}=100$ кН), на резонансной вертикальной частоте $\theta_{верт}=2\pi\cdot 1,61$ рад/с. Либо сила P может условно моделировать движение тележки.

В первом случае исследуются продольно-горизонтальная форма колебаний в вертикальной плоскости перегружателя (рис. 3.11, а). Другой случай - вертикальная (изгибная) форма колебаний (рис. 3.11, г). К модели перегружателя сначала к мосту по его продольной оси в вертикальной плоскости прикладывалась горизонтальная гармоническая нагрузка $P_0\sin\theta t$ на резонансной частоте 0,64 Гц. Затем к той же точке и в том же направлении прикладывалась статическая нагрузка P_0 .

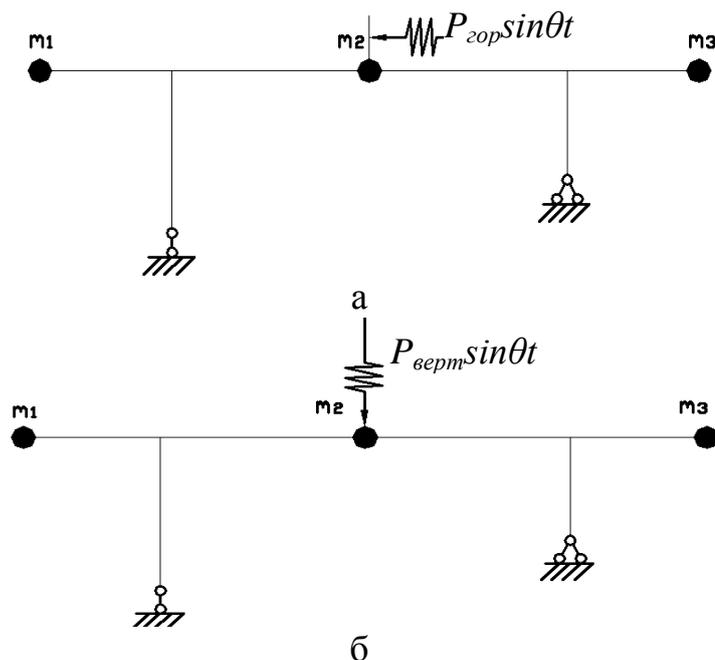


Рис. 5.4. Расчетная динамическая схема для расчёта на вынужденные гармонические колебания: а – горизонтальные; б – вертикальные

Результаты вычисления перемещений по формуле (5.4) и их сопоставления по сечениям приведены в виде эпюр динамических коэффициентов для некоторых сечений (рис. 5.5, а). Аналогично исследовалась и вертикальная форма колебаний (рис. 5.5, б). Эпюры динамических коэффициентов по перемещениям представляют как бы условную нагруженность плоской или пространственной системы.

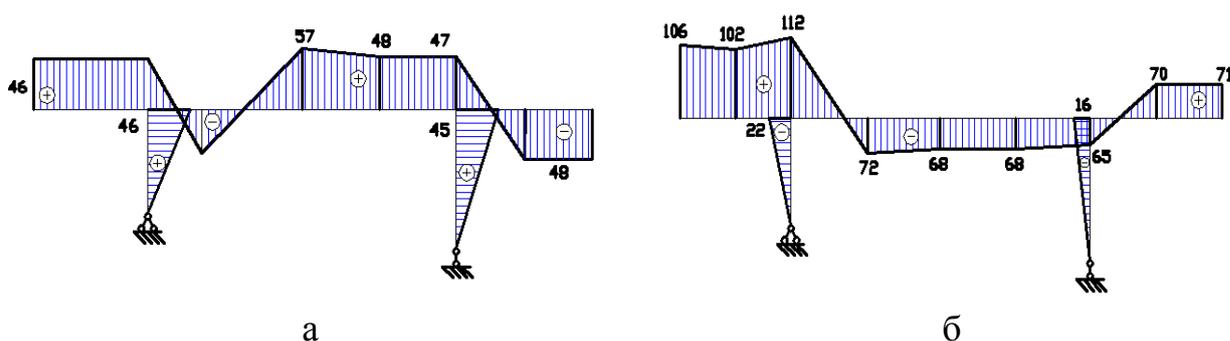


Рис. 5.5. Эпюры динамических коэффициентов по перемещениям для двух форм колебаний: а – для формы рис. 3.11; б – для формы рис. 3.11, г

Эпюры динамических коэффициентов по перемещениям позволяют увидеть реальную картину распределения амплитуд

перемещений крана от динамической нагрузки $P(t)$ и показывают наглядно ошибочность стандартной методики умножения всех статических нагрузок на единый «динамический коэффициент», а также отдельных динамических нагрузок (от движения, торможения и др.) на различные коэффициенты перегрузки.

5.2. Рекомендации по устройству дополнительных мероприятий, направленных на снижение амплитуд колебаний кранов-перегрузателей

Динамические нагрузки могут быть опасны для сооружения (в нормах расчёты конструкций на выносливость ещё имеют много белых пятен), приборов и оборудования, а также и для человека.

Машинист крана постоянно сталкивается с вибрационными явлениями на рабочем месте. Источниками возникновения колебаний являются как природные явления (сейсмика и ветер), так и влияние электрического оборудования (генераторы постоянного тока) и технологических процессов (разгон-торможение и передвижение крана или грейферной тележки, набор-выгрузка груза и др.). Вибрация относится к вредным факторам производства. Воздействие ее может повлиять на качество работы, снижение производительности труда из-за дискомфорта и привести к возникновению профзаболеваний (виброблезнь и т.п.). Спектр вибрации делится на три частотных диапазона: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. В нашем случае имеем дело с низкочастотным диапазоном для общей вибрации - частота 1-4 Гц. Например, вибрация с частотой ниже 1 Гц вызывает укачивание (морскую болезнь) - продольно-горизонтальная форма собственных колебаний крана, а слабая гармоническая вибрация с частотой 1-2 Гц вызывает сонливое состояние – горизонтально-поперечная и вертикальная формы собственных колебаний крана. В международных стандартах ИСО 2631-2006 и ИСО 5349-2001 нормируемым параметром вибрации используется средне квадратическое значение виброускорения в 1/3-октавных полосах частот. В санитарных нормах СН и стандарте ГОСТ 12.1.012-2004 нормируются значения виброскоростей и виброускорений.

Для обеспечения безопасной эксплуатации крана применяют индикаторные, предохранительные и контрольные устройства. К предохранительным устройствам относятся противоугольные устройства кранов, буферные устройства, ограничители пути и грузоподъемности. К индикаторным устройствам относятся указатели: ветрового давления, силомеры и указатели массы. Контрольными являются приборы, учитывающие работу, произведенную краном («работомеры»).

Помимо основных устройств можно применять еще устройства для гашения вибрации. Они повышают уровень комфортности оператора,

улучшают условия управления краном и снижают нагруженность элементов конструкции.

В мостовых кранах для снижения вибрации используют следующие виды устройств гашений колебаний: рычажно-гидравлические устройства; устройства, использующие силу трения рельса; устройства с демпфированием блоков подвески, динамические гасители колебаний (ДГК) и др. В причальных контейнерных перегружателях зарубежных фирм (Koncranes, Kocks Crane, Liebherr и др.) используют электронную или механическую систему гашений амплитуд колебаний.

Например, ДГК [116-118] предназначены для снижения вибрации колебаний конструкции. Они могут быть разделены на две группы: линейные и нелинейные. Линейными гасителями называют такие, в которых при деформации упругой связи возникают усилия, пропорциональные деформации. К линейным относят гасители с вязким трением и с внутренним неупругим сопротивлением. К нелинейным относят гасители с нелинейными пружинными связями, с применением, например, «кулонова» сухого трения и конструктивного сопротивления, которые связаны с потерями энергии в элементах, на опорах с трением при колебаниях груза и т.п.

Основными параметрами гасителя являются его парциальная частота и демпфирование. Важную роль, определяющую размеры гасителя, играет его масса, которая большей частью совершает поступательное или вращательное движение. Относительную массу гасителя обычно задают предварительно.

Для примера был разработан и запатентован (в соавторстве с к.т.н. Д. С. Ярошенко) ДГК для продольно-горизонтальной формы перегружателя [197]. Общий вид модели представлен на рис. 5.6.

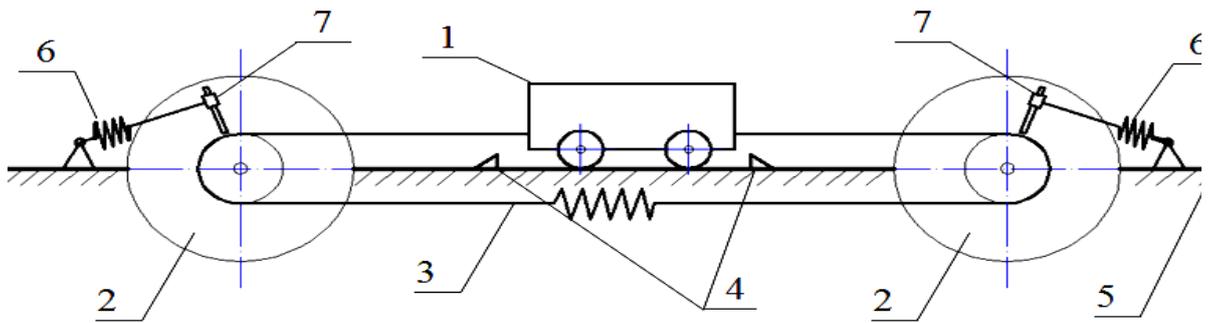


Рис. 5.6. Схема ДГК для снижения продольно-горизонтальных колебаний крана-перегрузчика: 1 - масса ДГК; 2 - барабаны; 3 - гибкий элемент (передача гибким телом); 4 - ограничители; 5 - объект гашения колебаний (кран-перегрузчик); 6 - упругие элементы

Если рассматривать только первую форму колебаний крана-перегрузчика, то его можно моделировать как систему с одной степенью свободы. Присоединение ДГК при некоторых упрощающих допущениях (передача 3 – нерастяжима, пренебрегается проскальзыванием передачи 3 относительно барабанов 2) добавляет в систему еще одну динамическую степень свободы (рис. 5.7). Здесь угловые координаты φ_1 и φ_2 выражаются через обобщенную координату перемещений массы ДГК X_2 : $\varphi_1 = X_2/r_1$; $\varphi_2 = X_2/r_2$.

Пути создания новых вариантов выполнения ДГК:

- изменение значений параметров динамической модели ДГК;
- вариация схемы расположения (расстояния и симметричность относительно положения равновесия массы ДГК) и выполнения ограничителей («жесткие», упруго-диссипативные);
- изменение характера работы упругих элементов ДГК (оба – на сжатие и растяжение; оба – только на сжатие; оба – только на растяжение; один – на сжатие, другой – на растяжение);
- начальная ориентация (в недеформированном состоянии) упругих элементов ДГК.

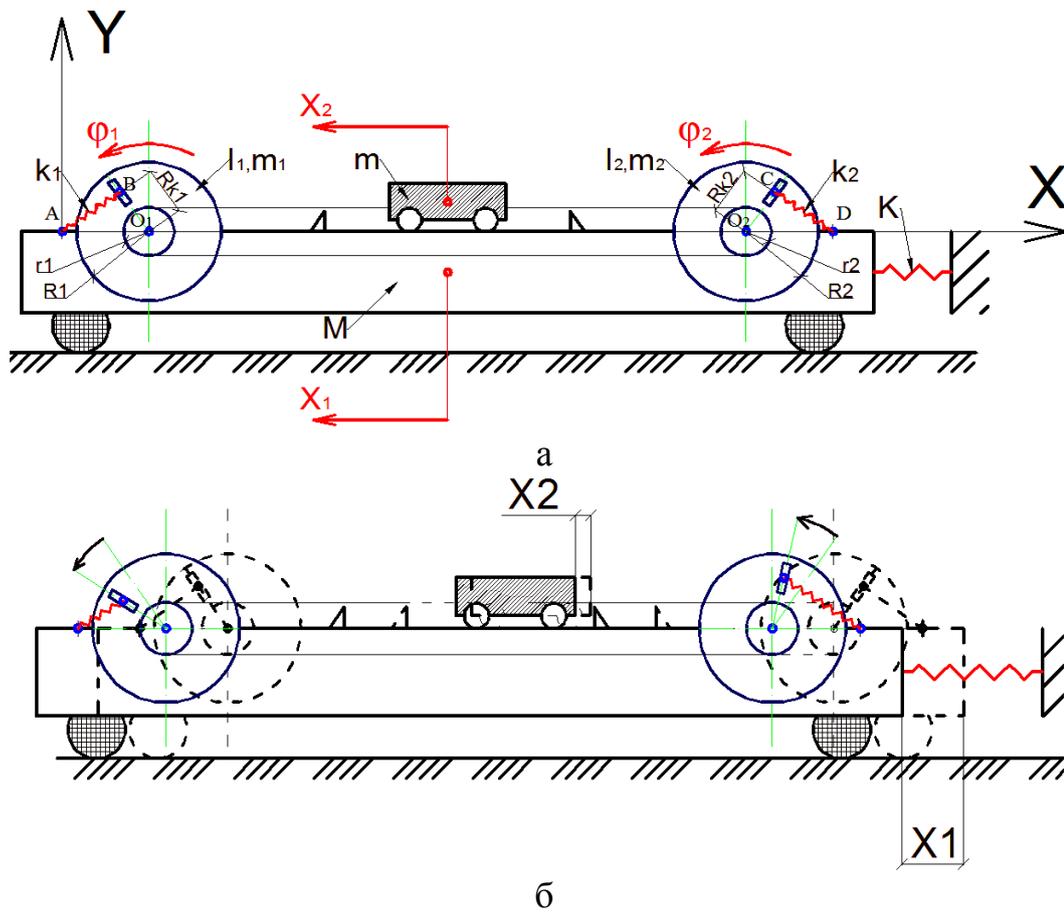


Рис. 5.7. Динамическая модель крана-перегрузателя с ДГК: а – схема с основными обозначениями; б – деформированная схема

Ниже представлен расчёт запатентованного устройства, выполненный соавтором патента, Д. С. Ярошенко.

Вариант 1. Система рассматривается без учета возможности ударов массы ДГК об ограничитель 4 (рис. 5.6). Радиусы барабанов и моменты инерции их масс принимаются равными. В системе не учитываются силы неупругого сопротивления, жесткости упругих элементов k_1 и k_2 принимаются равными. Масса барабанов не учитывается.

На схеме и далее приняты следующие обозначения и значения параметров: $M=4,56 \cdot 10^5$ кг - масса модели перегружателя; $K=8,82 \cdot 10^6$ Н/м - жесткость модели перегружателя; $\beta=10^5$ Нс/м коэффициент сопротивления модели перегружателя; $m=M/20=2,28 \cdot 10^4$ кг - масса модели ДГК; $k_1=k_2=7,16 \cdot 10^4$ Н/м - жесткость упругого элемента; $R_1=2,5$ м - большой радиус барабана; $r_1=1,0$ м - меньший радиус барабана; $R_{k2}=2,0$ м расстояние

от оси барабана до точки закрепления упругого элемента; $L_{0k2}=3,855$ м - длина упругого элемента в начальном недеформированном состоянии; $m_2=200$ кг - масса барабана; $I_2=625$ кг·м² момент инерции масс барабана.

Все динамические перемещения системы по варианту 1 описываются через обобщенные координаты линейных перемещения масс крана-перегрузателя и ДГК, X_1 и X_2 соответственно.

Уравнение кинетической энергии инерционных элементов системы:

$$\begin{aligned} T &= \frac{(M + m_1 + m_2 + m) \dot{X}_1^2}{2} + \frac{m \cdot \dot{X}_2^2}{2} + \frac{I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{I_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2}{2} = \\ &= \frac{(M + m_1 + m_2 + m) \dot{X}_1^2}{2} + \frac{m \cdot \dot{X}_2^2}{2} + \frac{I_1 \cdot \dot{X}_2^2}{2 \cdot r_1^2} + \frac{I_2 \cdot \dot{X}_2^2}{2 \cdot r_2^2}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Уравнение потенциальной энергии деформации упругих элементов:

$$\Pi = \frac{K \cdot X_1^2}{2} + \frac{k_1 \cdot \Delta_1^2}{2} + \frac{k_2 \cdot \Delta_2^2}{2}, \quad (5.6)$$

где Δ_1 и Δ_2 – деформации упругих элементов k_1 и k_2 .

$$\Delta_1 = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} - \sqrt{(X'_B - X'_A)^2 + (Y'_B - Y'_A)^2}; \quad (5.7)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{(X_C - X_D)^2 + (Y_C - Y_D)^2} - \sqrt{(X'_C - X'_D)^2 + (Y'_C - Y'_D)^2}. \quad (5.8)$$

Производные уравнения Лагранжа:

$$\frac{\partial T}{\partial X_1} = M \cdot \dot{X}_1; \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X_2} = m \cdot \dot{X}_2 + I_1 \cdot \frac{\dot{X}_2}{r_1^2} + I_2 \cdot \frac{\dot{X}_2}{r_2^2} = \dot{X}_2 \cdot \left(m + \frac{I_1}{r_1^2} + \frac{I_2}{r_2^2} \right); \quad (5.10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_1} \right) = (M + m_1 + m_2 + m) \ddot{X}_1; \quad (5.11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_2} \right) = \ddot{X}_2 \cdot \left(m + \frac{I_1}{r_1^2} + \frac{I_2}{r_2^2} \right). \quad (5.12)$$

Производные уравнений потенциальной энергии деформации упругих элементов системы определялись средствами символьной математики.

Далее приведены некоторые результаты численных расчётов данной системы. Исследовались свободные незатухающие колебания массы ДГК (рис. 5.8.). Для этого основная масса «зажималась»: жесткость упругого элемента, подобранная как для модели крана-перегрузателя, увеличивалась на 6 порядков. Свободные затухающие колебания массы ДГК вызывались начальными условиями (задавалось начальное перемещение массы $X_2(0)$, рис. 5.9) .

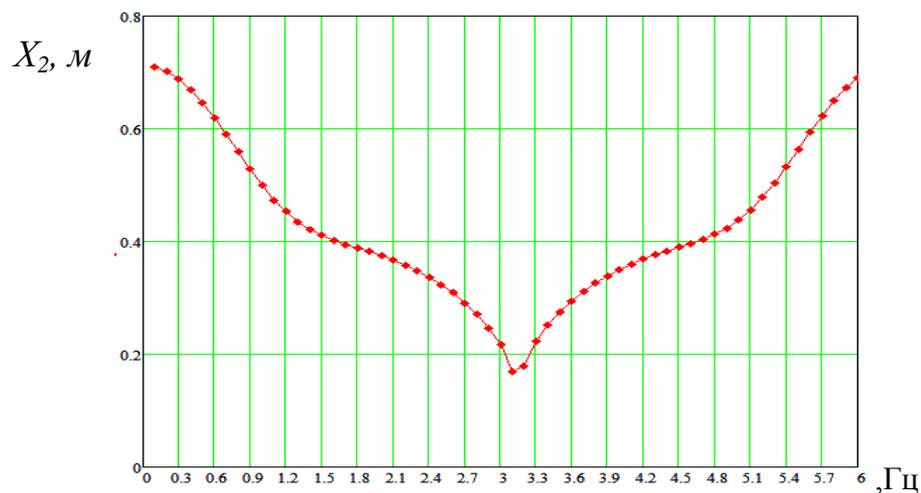


Рис. 5.9. График изменения частоты собственных незатухающих колебаний массы ДГК в зависимости от величины начального ее отклонения при выбранных параметрах, начальное отклонение массы ДГК (X_2), м.

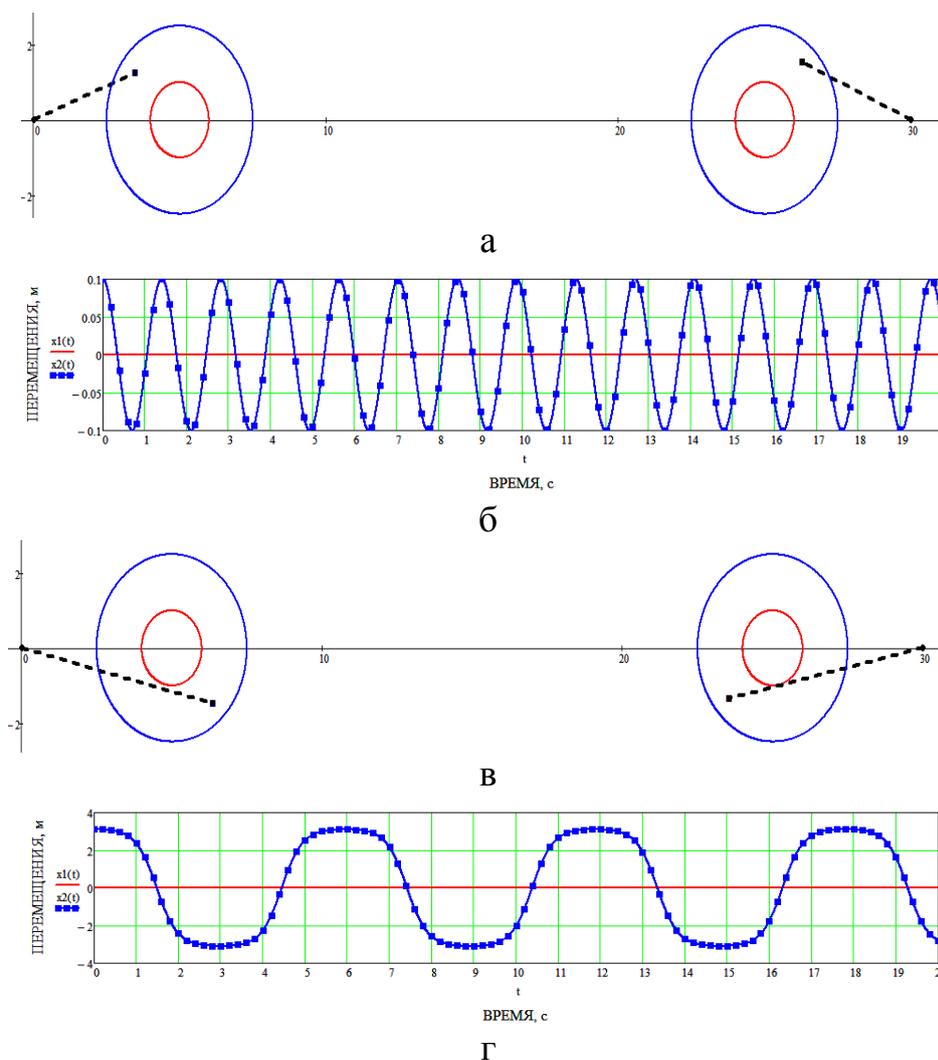


Рис. 5.8. Начальное положение системы (а, в) и виброграмма незатухающих колебаний (б, г)

Вариант 2. Динамическая модель аналогична варианту 1, однако учитываются силы неупругого сопротивления (вязкое трение) в упругих элементах ДГК. В таком случае в уравнениях Лагранжа добавляются слагаемые, отвечающие за диссипацию энергии:

$$D = \frac{\beta \cdot \dot{X}_1^2}{2} + \frac{\beta_1 \cdot \dot{\Delta}_1^2}{2} + \frac{\beta_2 \cdot \dot{\Delta}_2^2}{2}, \quad (5.13)$$

где $\dot{\Delta}_1$ и $\dot{\Delta}_2$ - скорости деформирования упругих элементов ДГК (вывод уравнений для Δ_1 и Δ_2 - вариант 1).

В результате пробных расчетов данной модели системы было выявлено следующее:

- частота свободных колебаний системы не существенно изменяется в процессе колебаний и при выбранных параметрах составляет 0,7-0,712 Гц;
- логарифмический декремент колебаний системы изменяется в процессе колебаний более ярко и при выбранных параметрах составляет 0,013-0,28;
- при больших начальных отклонениях массы ДГК от положения равновесия процесс возвращения массы к нему носит неперiodический характер;
- при больших отклонениях массы ДГК возможно изменение равновесного положения массы.

Следующий пример ДГК (из многочисленных возможных вариантов реализации иных конструкций устанавливаемых на мосту крана для снижения его продольно-горизонтальных колебаний) состоит из элемента крепления к подвижной части гибкого элемента и сосредоточенных масс m на концах (рис. 5.10).

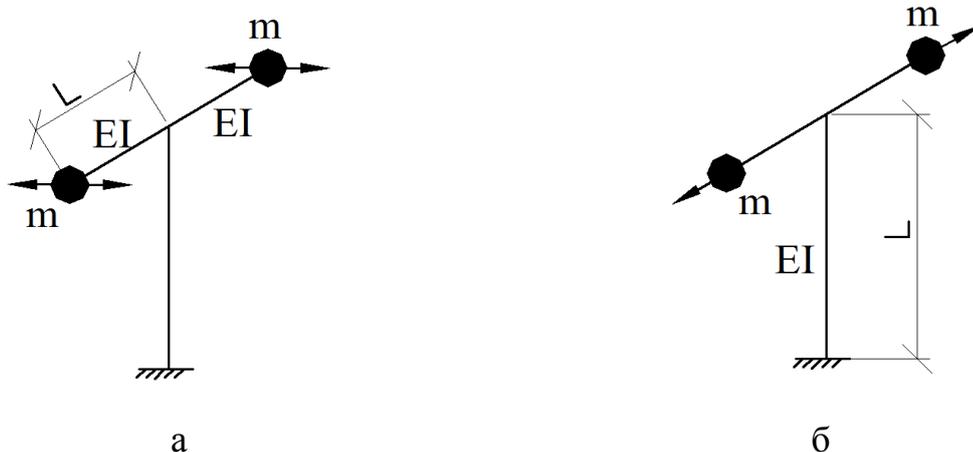


Рис. 5.10. Динамический гаситель колебаний: а - схема ДГК, снижающего продольно-горизонтальные колебания крана; б – ДГК, снижающий поперечно-горизонтальные колебания крана

Настройка ДГК выполняется на его парциальную частоту, близкую к резонансной частоте рассматриваемой формы собственных колебаний.

$$\theta^2 = \frac{r_1}{m}, \quad (5.14)$$

r_1 - жесткость упругого элемента ДГК, m - сосредоточенная масса одной из сторон гибкой пластины (принимается до 5% от массы мостовой балки крана-перегрузателя). Заметим, что уточнённая настройка связана с соотношением масс объекта и ДГК, с видом и величиной демпфирования и здесь не приводятся.

Нужная жесткость пластинчатой конструкции упругого элемента ДГК для консольной схемы равна:

$$r_1 = \frac{3EI}{L^3}, \quad (5.15)$$

где EI - жесткость пластины на изгиб.

Если упругие конструкции имеют более сложную схему (например, на рис. 5.10 может добавлять упругость работа стойки на изгиб, кручение и т.п.), то применяется МКЭ.

Расстояние от точки крепления консоли до сосредоточенной массы равно:

$$L = \sqrt[3]{\frac{3EI}{\theta^2 m}}. \quad (5.16)$$

Варианты установки ДГК на мосту перегружателя показаны на рис. 5.11. Упругими элементами могут быть пластины, канаты (типа известного демпфера Стокбриджа), рессоры и т.п.

При установке на мосту, например, 2х6,4 т двух гасителей эффективность снижения продольно-горизонтальных колебаний моста по уровню напряжений в опорном подкосе перегружателя составила 21%, а по перемещению моста по горизонтали - 41%.

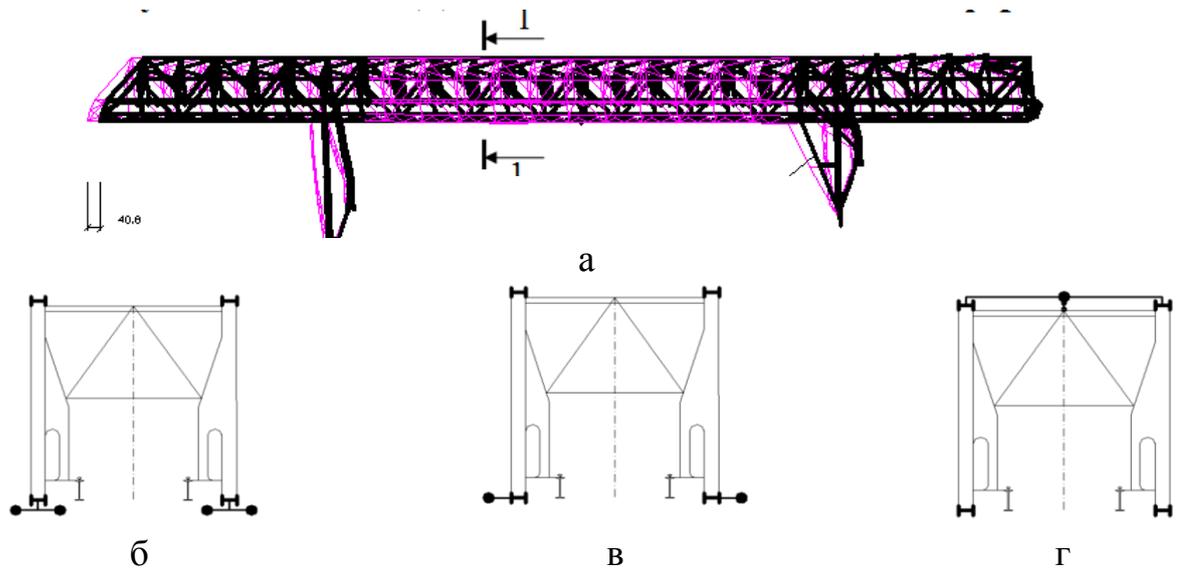


Рис. 5.11. Схема размещения ДГК на мосту перегружателя для снижения продольно-горизонтальных колебаний: а - схема крана; б, в – установка ДГК на нижнем поясе фермы; г - установка ДГК на верхнем поясе фермы

Также возможно применение демпферов с оттяжками для вертикальных изгибных колебаний (рис. 5.12, а) и поперечно-горизонтальных колебаний из плоскости крана (рис. 5.12, б).

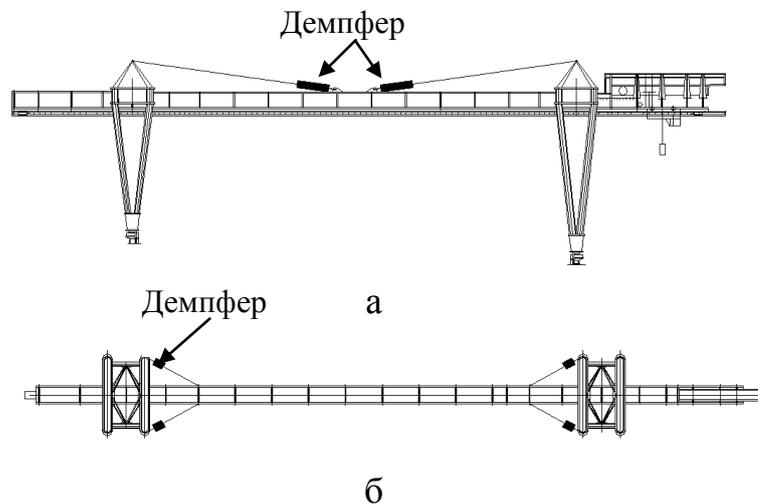


Рис. 5.12. Схема установки оттяжек с демпфером: а – для гашения вертикальных колебаний; б – для гашения поперечно-горизонтальных колебаний

Можно также установить ДГК с массой $m_{\text{ДГК}}$ (через упругую связь с жесткостью $r_{\text{ДГК}}$) с демпфером сухого трения $H_{\text{ДГК}}$ и вязкого - $\beta_{\text{ДГК}}$. Тогда уравнение совместных колебаний крана и ДГК становится нелинейным:

$$\begin{cases} m_{дгк} \ddot{y}_{дгк} + \beta_{дгк} (\dot{y}_{дгк} - \dot{y}_1) + H_{дгк} \text{sign}(\dot{y}_{дгк} - \dot{y}_1) + r_{дгк} (y_{дгк} - y_1) = 0, \\ m_{\Sigma} \ddot{y}_1 - \beta_{дгк} (\dot{y}_{дгк} - \dot{y}_1) - H_{дгк} \text{sign}(\dot{y}_{дгк} - \dot{y}_1) - r_{дгк} (y_{дгк} - y_1) + \beta_1 \dot{y}_1 + r_1 y_1 = P_{прод-гор}(t). \end{cases} \quad (5.17)$$

5.3. Выводы по разделу 5

1. Применение упрощенных динамических моделей позволит конструктору расширить диапазон решений. Например, добавлять в систему и расчётную схему нелинейное трение, проводить подбор и настройку динамических гасителей колебаний и т.п.

2. В качестве примера разработки мероприятий по гашению колебаний крана предложены и запатентованы (**патент № 99209** на полезную модель) конструкции для гашения колебаний первой формы.

3. Создано несколько упрощенных инженерных моделей для анализа колебаний крана и поиска путей создания схем, нацеленных на снижение колебаний по некоторым опасным резонансным формам.

4. В упрощенные динамические модели (рис. 5.1, 5.2, 5.3) могут добавляться кинематические и силовые воздействия: гармонические, импульсные или случайные функции $P_i(t)$, связанные с движением тележки ($P_{прод-гор}$, $P_{пон-гор}$), с работой механизмов подъёма грейфера ($P_{верт}$) и др. Для их уточнения каждому типу перегружателя целесообразно проводить натурные испытания.

5. Эпюры динамических коэффициентов по перемещению (динамическим напряжениям и т.д.) позволяют увидеть реальную картину распределения амплитуд перемещений (и других параметров) крана от динамической нагрузки $P(t)$. Они уточняют стандартную методику умножения всех статических параметров на единый «динамический коэффициент».

По теме пятого раздела опубликованы две публикации [11, 198] и получен патент на полезную модель «Динамический гаситель колебаний крана-перегружателя» (приложение Б) [197].

ГЛАВА 6

ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КРАНОВ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УСКОРЕННОГО ПОИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ, ПАСПОРТИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА

В шестом разделе рассмотрены рекомендации по применению динамических характеристик для технической диагностики металлических конструкций кранов-перегрузателей. Приведен пример составления динамического паспорта перегружателя и фрагменты «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы», которые позволяют провести поиск мест некоторых опасных силовых конструкционных повреждений несущих элементов и сократить время на проведение обследования.

6.1. Рекомендации по проведению паспортизации сооружения

Динамическая паспортизация крана позволяет косвенно следить за техническим состоянием основных несущих металлоконструкций, а также обнаруживать аварийное и предаварийное состояние:

- влияние общей коррозии, уменьшение сечения несущих элементов металлоконструкций;
- добавочные нагрузки от пыли, снега, гололеда (увеличение массы моста крана);
- разрушение несущих элементов в пролетном строении (ослабление заклепочного поля монтажных стыков, развитие трещин вплоть до разрывов элементов);
- разболтанность стыков соединений и креплений подтележечного рельса;
- жесткость рамы «мост и опоры» пролетного строения от действия горизонтальных сил;

- выявление мест локальных разрушений на основе анализа собственных частот основных форм колебаний – продольно-горизонтальная, поперечно-горизонтальная, вертикальная;

- наблюдение за параметрами амплитуд вынужденных колебаний крана.

Также в динамический паспорт нужно включать собственную частоту колебаний грейферной тележки для оценки состояния металлоконструкций несущей рамы (в связи с затруднённым внешним осмотром). Кроме того, необходимо контролировать несовпадение (отстройку) частот собственных вертикальных колебаний тележки с собственными частотами моста крана. Также опасны частые остановки тележки и крана для доводки грузов, которые приводят к резонансному раскачиванию крана.

В динамический паспорт вносят основные динамические параметры крана и грейферной тележки: частоту и период основных собственных форм колебаний; логарифмический декремент колебаний по формам колебаний; время затухания свободных колебаний (до уровня 5%). Паспорт можно разделить на две части на графическую и описательную часть (образец формы паспорта представлен на рис. 6.1).

Помимо динамических характеристик в форму паспорта должно входить:

- тип крана, грузоподъёмность, регистрационный, инвентарный и заводской номер;

- место расположения объекта;

- год ввода в эксплуатацию и количество отработавших лет;

- выработка ресурса металлоконструкции по количеству технологических циклов нагружений [146];

- дата проведения динамических испытаний, с указанием температуры воздуха, скорости и направления ветра, а также время суток;

- фамилия и подпись руководителя бригады;

- номер и тип датчика измерения динамических характеристик;

Динамический паспорт мостового перегружателя
трубчато-балочного типа на 23 июля 2014 г.

№ п/п	инв.№ _____, рег.№ _____, зав.№ _____			
1	Место расположения	Аглофабрика, рудный двор		
2	Год ввода в эксплуатацию	1980		
3	Кол-во отработанных лет	34		
4	Кол-во циклов	3 000 000		
5	Грузоподъёмность, т	32		
6	Геометрические размеры			
	длина моста, м	27+76+30		
	высота опор, м	30		
7	Дата предыдущего испытания	15 октября 2013 г.		
8	Температура воздуха			
9	Направление и скорость ветра			
10	Время испытаний			
11	Используемые тип датчиков	гориз. направления	Тип	№
	вертик. направления			
12	Динамические характеристики собственных колебаний	Частота	Амплитуда	Логарифм. декремент колебаний
13	1 – продольно-гориз. в пл., Гц	0,64		
14	2 – поперечно-гориз.из пл., Гц	0,7-1,1		
15	3 - поперечно-гориз.из пл., Гц	1,2-1,4		
16	4 – вертикальная изгибная, Гц	1,6-2,2		
17	Вертикальная собственная частота тележки, Гц	3,3		
18	Демпфирующие устройства			
19	Наличие и состояние динамических гасителей колебаний			
20	Примечания			

ФИО руководителя работ

подпись

Рис. 6.1. Образец описательной части формы динамического паспорта крана-перегрузателя

Заштрихованные участки соответствуют формам собственных колебаний, в которых частота – переменная, меняющаяся в соответствии с местом, скоростью и массой тележки, движущейся по мосту крана. Теоретический паспорт позволяет понять, какие собственные формы колебаний с частотами ожидать при работе крана. Экспериментальный паспорт позволит производить динамический мониторинг перегружателя для дальнейшей диагностики технического состояния его металлоконструкций.

6.2. Методика составления «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы»

Методика основана на применении метода вибрационного неразрушающего контроля. Она позволяет интегрально определить по анализу динамических характеристик (частоте, амплитуде, форме, логарифмическому декременту колебаний и др.) состояние и работоспособность конструкций, выявить локализации разрушений даже в труднодоступных местах. Методика позволит определить возможные места предаварийных разрушений элементов с составлением теоретической части динамического паспорта.

В теоретическую часть паспорта можно добавить базу различных вариантов повреждений или аварийных состояний металлоконструкций перегружателей. Для этого составляются динамические характеристики для основного работоспособного состояния, а дальше набираются возможные случаи повреждения металлоконструкций крана и делаются новые расчеты.

Рассмотрим этот алгоритм на примере моделирования динамических характеристик и нагруженности металлоконструкций пространственной модели перегружателя решетчатого типа (раздел 3, рис. 3.8) с применением программного комплекса «Selena». При описанных ниже ситуациях многотонная подвижная грейферная тележка располагалась в середине пролета.

На рис. 3.9 представлены результаты расчета собственных колебаний (работоспособного состояния) перегружателя при условиях, что грейферная тележка стоит в середине пролета, а обе опоры крана закреплены. Напомним, что на этих формах за единицу принято наибольшее перемещение амплитуды колебаний.

Для решетчатого перегружателя устранялись поочередно некоторые характерные стержневые несущие элементы. Составлялся теоретический динамический паспорт, который можно сравнивать с паспортом без нанесения повреждения.

На рис. 6.3, а представлен случай разрушения элемента **верхнего пояса** у гибкой опоры перегружателя. При сравнении рис. 3.9, а и рис. 6.3, б, отсутствие разрушенного элемента (по схеме рис. 6.3, а) привело к новым горизонтально-поперечным перемещениям моста на 0,95 единиц. За единицу принято наибольшее перемещение в этой форме (рис. 6.3, б) по горизонтально-продольному направлению в вертикальной плоскости перегружателя. Появилось закручивание среднего сечения основного пролета моста. В работоспособном состоянии крана первая форма (рис. 3.9, а) имела наибольшее перемещение на **единицу** по всем сечениям моста в продольно-горизонтальном направлении, закручивание рам моста относительно его продольной оси отсутствовало.

Происходит добавление к низшей собственной форме (рис. 3.9, а) горизонтально-изгибных колебаний с закручиванием моста (рис. 6.3, б). Кроме того, при таком дефекте понизилась частота 3-й формы с 0,83 Гц до 0,72 Гц –на 13,3% (горизонтальные колебания консоли, рис. 3.9, в) и 5-й – в вертикальной плоскости: с 1,72 Гц до 1,43 Гц –на 16,8% (с резким добавлением местного изгиба в горизонтальной плоскости в зоне нанесения дефекта, рис. 6.3, в).

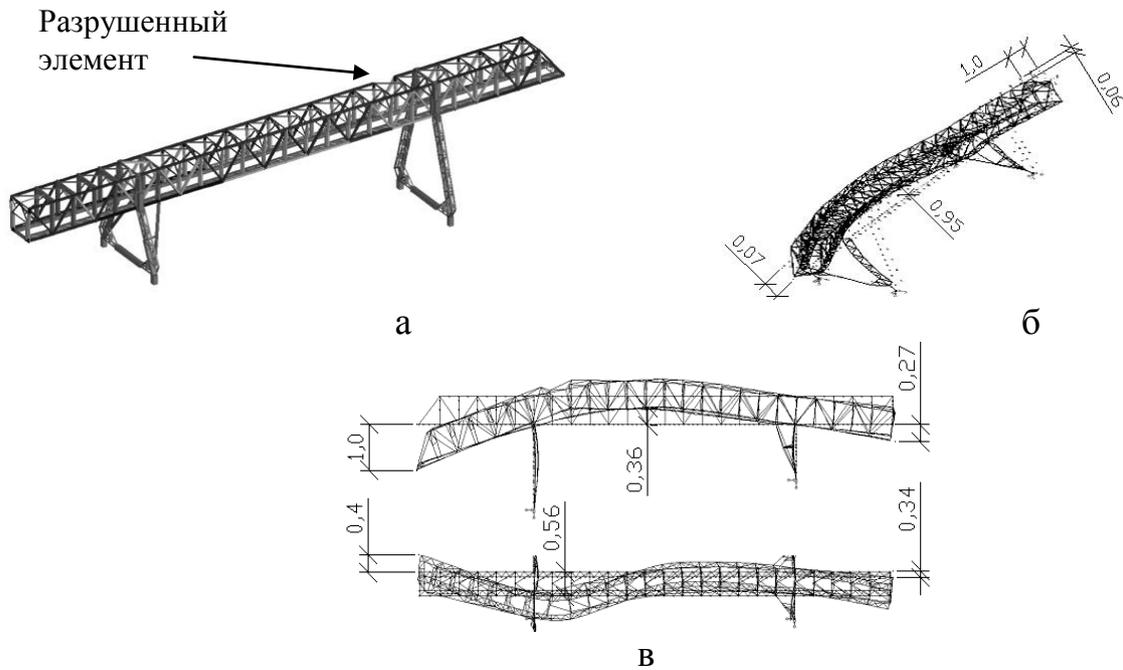


Рис. 6.3. Формы собственных колебаний перегружателя с поврежденным верхним поясом: а – пространственная модель перегружателя с разрушенным элементом верхнего пояса у гибкой опоры; б – низшая форма собственных колебаний на частоте 0,61 Гц; в – пятая форма собственных колебаний на частоте 1,43 Гц

На рис. 6.4 представлен пример наглядного составления теоретического динамического паспорта, где верхняя часть представляет работоспособное состояние крана, а нижняя указывает на его аварийное состояние.

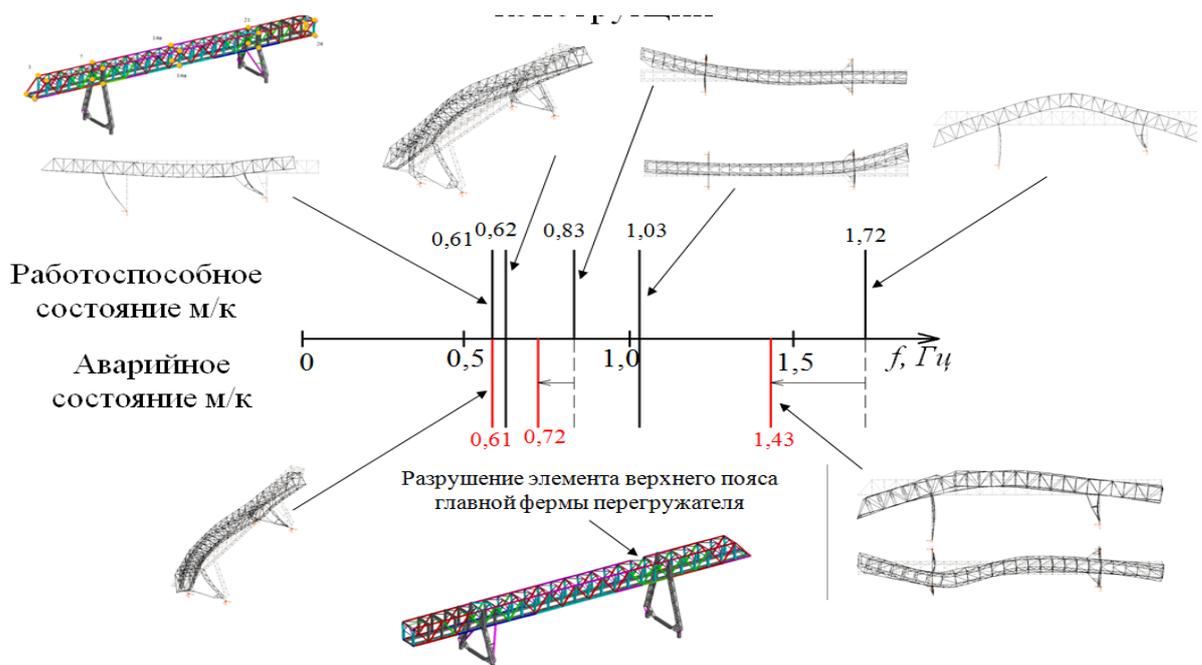


Рис. 6.4. Пример влияния аварийного состояния (разрушен элемент верхнего пояса) на собственные формы и частоты колебаний

Исследования НДС элементов моста перегружателя при двух состояниях (работоспособном и аварийном) при выезде тележки на консоль длинной опоры (рис. 6.5), показали распределение напряжений в элементах главных ферм крана. Напряжения в распорке (соединяющей верхние пояса главных ферм) увеличились в 20 раз, в верхнем поясе неповрежденной фермы - в 4 раза, в нижнем поясе поврежденной фермы - в 4 раза (результаты напряжений в элементах представлены в табл. 6.1). Перемещение консоли в аварийном состоянии значительно проявилось в прогибе - 219 мм (было 97) и горизонтальном изгибе консоли из плоскости крана на 214 мм (в работоспособном состоянии его не было).

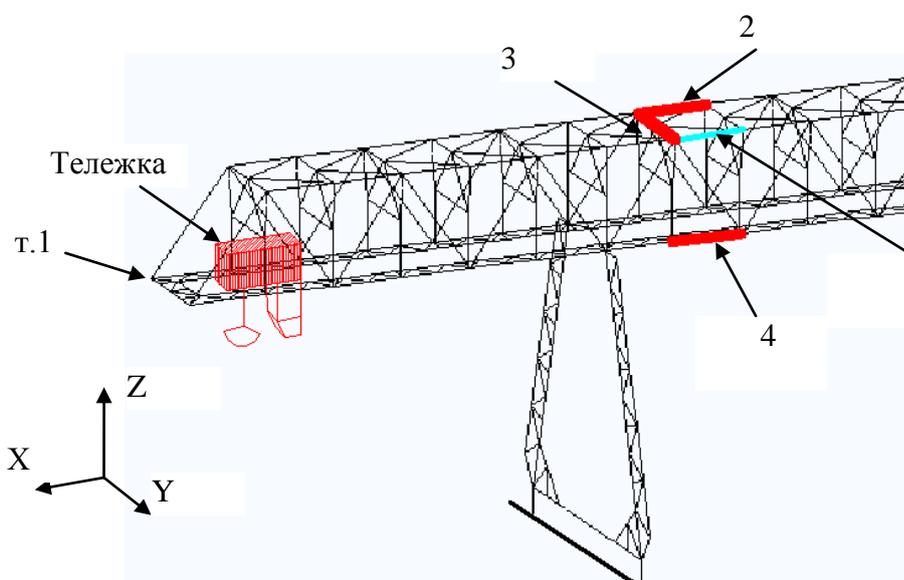


Рис. 6.5. Фрагмент моста перегружателя: 1 – разрушенный элемент; 2 - верхний пояс фермы; 3 - распорка верхних поясов ферм; 4 – нижний пояс фермы

Исследования НДС элементов моста перегружателя при двух состояниях (работоспособном и аварийном) при выезде тележки на консоль длинной опоры (рис. 6.5), показали распределение напряжений в элементах главных ферм крана. Напряжения в распорке (соединяющей верхние пояса главных ферм) увеличились в 20 раз, в верхнем поясе неповрежденной фермы - в 4 раза, в нижнем поясе поврежденной фермы - в 4 раза (результаты напряжений в элементах представлены в табл. 6.1). Перемещение консоли в аварийном состоянии значительно проявилось в прогибе - 219 мм (было 97) и

горизонтальном изгибе консоли из плоскости крана на 214 мм (в работоспособном состоянии его не было).

Таблица 6.1

НДС крана при работоспособном и аварийном состоянии
(разрушен элемент верхнего пояса, рис. 6.5)

Элементы крана	Напряжения, МПа	
	работоспособное	аварийное
Распорка	+14	+350
верхний пояс фермы	+48	+188
нижний пояс фермы	-43	-168
Перемещение консоли (т.1), мм		
Координаты	работоспособное	аварийное
X	17	13
Y	0	214
Z	-97	-219

На рис. 6.6, а представлен случай разрушения элемента **гибкой опоры**. Реакция динамической модели перегружателя показала снижение частоты 0,61 Гц второй формы собственных колебаний (рис. 6.6, б) до низшей формы с частотой 0,58 Гц.

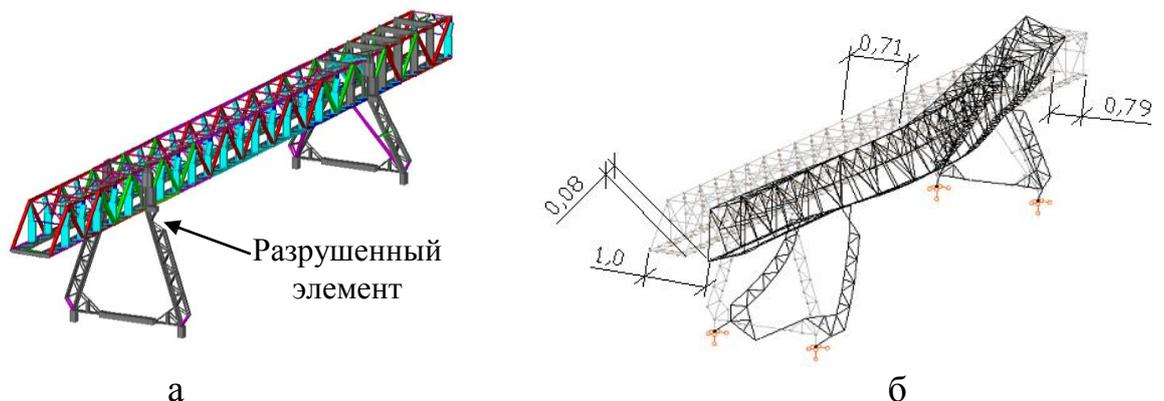


Рис. 6.6. Низшая форма собственных колебаний перегружателя с поврежденным элементом гибкой опоры: а – пространственная модель перегружателя с разрушенным элементом гибкой опоры; б – низшая форма горизонтально-поперечных изгибных колебаний моста с закручиванием и смещением гибкой опоры на частоте 0,58 Гц

Следующий случай представлен разрушением элемента **опорного подкоса** (рис. 6.7). Реакция динамической модели – снижение частот 1-ой (рис. 3.9, а) и 5-ой (рис. 3.9, д) формы собственных колебаний, без изменения направления колебаний.

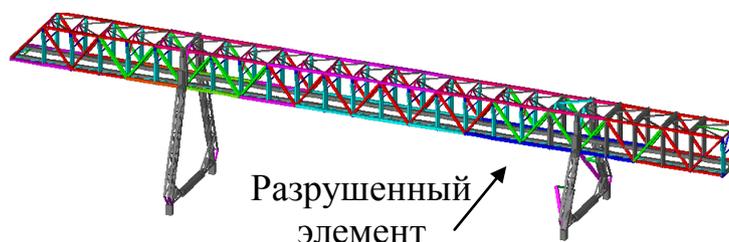


Рис. 6.7. Схема перегружателя с разрушенным опорным подкосом

Напряжения во втором (целом) подкосе увеличились с 28 МПа до 45 МПа (при условии – тележка в центре пролёта). Разрушение не сказалось на вертикальный прогиб моста, но существенно повлияло на продольно-горизонтальное смещение в плоскости крана увеличилось на 50% (табл. 6.2).

Таблица 6.2

НДС крана при работоспособном и аварийном состоянии
(разрушен опорный подкос)

Элементы крана	Напряжения, МПа	
	работоспособное	аварийное
Опорный подкос	+28	+45
Перемещение нижнего пояса центрального сечения, мм		
Координаты	работоспособное	аварийное
X	84	127
Y	0	0
Z	85	85

Фрагмент составления «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» с базой данных теоретического (без повреждений) и

аварийного паспорта (с присутствующими повреждениями) иллюстрируется в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Фрагменты «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» для трёх показательных повреждений решетчатого крана (графики собственных форм, приведенные выше, здесь повторно не показаны)

Состояние металлоконструкций перегружателя	Динамический частотный паспорт	Указание места разрушенного элемента
Работоспособное		
Аварийное		
Работоспособное		
Аварийное		
Работоспособное		
Аварийное		

Снижение частоты при разрушении верхнего пояса главной фермы составляет 13% для третьей и 17% для пятой форм собственных колебаний. При разрушении элемента гибкой опоры перегружателя происходит снижение на 6% частоты второй формы собственных колебаний; понижение частот на 26% и 4% соответственно для первой и пятой форм собственных колебаний.

Составленный таким образом «Атлас влияния повреждений на собственные частоты и формы» позволит проводить быстрый анализ при изменении частоты колебаний одной из форм с последующим указанием возможной причины.

6.3. Выводы по разделу 6

1. Показано как использование метода динамической диагностики существенно улучшает эффективность и снижает время натурального обследования кранов-перегрузателей, предотвращая аварийные состояния.

2. Разработана форма динамического паспорта крана, которая содержит результаты натуральных динамических испытаний и динамических расчётов. Экспериментальная часть паспорта помогает вести динамический мониторинг технического состояния, а теоретическая – оценить, какие собственные формы колебаний ждуть в эксплуатационном состоянии крана.

3. Представлена методика составления «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» на основании созданного набора всевозможных аварийных ситуаций перегружателя. Такой Атлас позволит проводить быстрый анализ при изменении частоты собственных колебаний и соотношения нормированных перемещений одной из форм, с последующим указанием мест и возможной причины повреждений основных несущих металлоконструкций.

По теме шестого раздела опубликованы публикации [12, 13, 198].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основании проведенного комплексного анализа динамических характеристик пространственных несущих металлоконструкций мостовых перегружателей получены новые решения важной народно-хозяйственной и научно-практической задачи проектирования и эксплуатации крупных (до 1000 т), эксплуатируемых в тяжёлых условиях (срок службы 12-15 лет) при почти непрерывных режимах работы, весьма дорогостоящих кранов-перегружателей. Методики расчетов, испытаний и диагностики основаны на развитии динамических расчётных моделей крана, на связи частот и форм собственных колебаний крана с его возможными повреждениями, на систематизации динамических натуральных испытаний, а также предложений по динамической диагностике и паспортизации сооружения.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Составленная классификация кранов-перегружателей, нагрузок, особенностей эксплуатации, а также анализ аварий, методик расчетов, обследований и испытаний позволили выделить важность динамических (в т.ч. подвижных) нагрузок эксплуатационного технологического цикла, оказывающего существенное влияние на техническое состояние стальных конструкций. Проведенный анализ собственных и вынужденных колебаний пространственной модели крана привёл к новым возможностям прогнозирования повреждений, что было подтверждено фактом наличия соответствующих поврежденных участков конструкций, обнаруженных при натуральных обследованиях.

2. Исследования статической и динамической нагруженности и модальный анализ при помощи программного комплекса «Selena» сложной многомассовой пространственной стержневой модели двух кранов (решётчатого и трубчато-балочного типов) численным методом (МКЭ) показали, что конструкция этих двух кранов и положение грейферной

тележки не влияют на тип низшей продольно-горизонтальной формы собственных колебаний с частотой около 0,6 Гц. Во второй форме проявляются поперечно-горизонтальные колебания из плоскости крана: для решётчатого крана при этом преобладает изгиб моста (0,85 Гц), для трубчато-балочного крана - изгиб опоры (0,77 Гц). В третьей форме наблюдаются поперечно-горизонтальные колебания из плоскости крана: для решётчатого крана - колебания консолей (1,7 Гц), трубчато-балочного - изгиб моста (1,26 Гц). И лишь четвертое место с более высокочастотным процессом занял изгиб моста в вертикальной плоскости крана на частоте 1,97 Гц для решётчатого и 1,61 Гц для трубчато-балочного (большинство исследователей перегружателей ранее считали эту форму как бы единственной достойной внимания). Частота собственных колебаний 2, 3 и 4 форм существенно зависит от места расположения грейферной тележки на мосту крана (частота собственных колебаний крана при установке тележки над опорой увеличивается приблизительно на 20%).

Для наглядности распределения и удобства анализа долей статических и динамических параметров стальной конструкции трубчато-балочного крана был применён метод построения эпюр динамических коэффициентов (по перемещениям при разных резонансных формах).

3. Предложена модель моста крана для расчета во временной области на подвижную нагрузку с учётом статико-динамического взаимодействия инерционных конструкций и моста перегружателя, и тележки. Разработана методика расчета с использованием системы компьютерной алгебры «Maple» при решении дифференциальных уравнений совместных колебаний моста и движущейся тележки. Исследовано время затухания процесса, статический и динамический прогибы. Учтено изменение мгновенной частоты собственных колебаний совместной системы (при рабочих скоростях до 15 км/ч расположение тележки изменяет частоту некоторых форм до 20%).

4. Проведены экспериментальные натурные исследования влияния режимов движения перегружателя и тележки на динамические

характеристики металлоконструкций. Обработаны многочисленные виброграммы, различие теоретически определённых частот собственных колебаний крана по четырем низшим формам и соответствующих результатов эксперимента по свободным колебаниям не превышает 10%. Логарифмический декремент колебаний моста крана оказался разным для каждой формы собственных колебаний и находится для четырех низших форм в пределах 0,043-0,068 (этот факт при расчетах при помощи МКЭ обычно не учитывается, что приводит к ошибке при анализе вынужденных колебаний). Наибольшее время уменьшения амплитуд свободных колебаний в 20 раз (в момент установки тележки в середине пролета) при горизонтально-продольной форме составляет 62 секунды, а при вертикальных колебаниях – 46 секунд. Повышенная длительность процесса затухающих колебаний вредна для стальных конструкций (узлов с концентраторами напряжений), приборов, оборудования и машиниста.

5. Известно, что по методу динамического формообразования оценки параметров собственных колебаний на предпроектной стадии ускоряют процесс (без выполнения полных расчетов на все сочетания нагрузок). Предложена методика составления инженерных (упрощённых) динамических моделей перегружателя для расчетов собственных и вынужденных колебаний (для перехода от пространственной многомассовой модели перегружателя к системам, имеющим от 1 до 6 степеней свободы). Это позволяет **конструктору**, например, добавлять в подсистемы фрикционные элементы, а **расчетчику** - учесть реальное (из экспериментов) внешнее нелинейное трение, различное в каждой подсистеме. Такие модели удобны при расчетах и конструировании демпфирующих устройств, снижающих амплитуды колебаний вибрационных циклов крана.

При низшей из форм колебаний наиболее нагружены элементы в местах сопряжения трубы пролетного строения и опоры, эквивалентные циклические напряжения достигают амплитуд 16 МПа. Этим колебаниям соответствует амплитуда перемещения 15 мм на частоте порядка 0,65 Гц

(ускорения при этом достигают уровня $0,3 \text{ м/с}^2$, - дискомфортного для длительного пребывания машиниста). Была разработана схема демпфирования этих колебаний и получен патент № 99209 на полезную модель с устройством преобразования движения.

6. Показано, как при помощи метода динамической диагностики, как варианта неразрушающего метода контроля, можно существенно улучшать эффективность натурального обследования с выявлением параметров НДС, близких к аварийным. Разработана форма динамического паспорта. Для трубчато-балочного крана паспорт содержит результаты натуральных испытаний и расчётов. Теоретическая часть паспорта позволяет оценить, какие собственные формы колебаний ожидать в эксплуатируемом кране, а экспериментальная часть текущего паспорта помогает вести динамический мониторинг технического состояния его металлоконструкций и предотвращать аварии.

7. Разработана методика построения «Атласа влияния повреждений на собственные частоты и формы» путём условного выключения определенного элемента из работы (на примере решётчатого крана). Это позволяет провести поиск мест некоторых опасных силовых конструктивных повреждений несущих элементов и сократить время на проведение обследования.

8. Научные и практические положения, изложенные в диссертации, могут быть использованы проектными организациями, службами эксплуатации мостовых перегружателей, а также при разработке нормативно-технической документации. Результаты исследований приняты в проектную практику ООО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция», ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э.Дзержинского», а также внедрены в учебный процесс ГВУЗ «ПГАСиА» (приложение А).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия : ГОСТ 27584-88. – [Действующий от 01-01-1990]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 17 с.
2. Методика проведення експертного обстеження (технічного діагностування) кранів мостового типу : ОМД 0120253.001-2005 / [відповідальні виконавці О. Є. Чиковані та ін.]. – Харків: Підйомно-транспортна акад. наук України, 2005. – 158 с.
3. Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 01-01-2007]. - К. : Мінбуд України, 2006. – 78 с.
4. Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, И. И. Губанов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1987. – 352 с.
5. Влияние различий диссипативных свойств в подсистемах сложно-составных сооружений на амплитуды вынужденных колебаний / В. Кулябко [и др.] // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – 2007. – №15. – P. 341-348.
6. «Безопасность по проекту» сооружений с обеспечением комфорта людей – динамическая и виброэкологическая паспортизация и мониторинг / В. В. Кулябко [и др.] // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – 2007. – № 42. – С. 166-172.
7. Кулябко В. 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. В 2-х томах: Т. 1. - 2007, - Вип. 7. - С. 344-348.
8. Кулябко В. В. О расчете мостов и дорог на любые подвижные нагрузки с учетом инерционности, поддресоривания, торможения, разрыва

связей, переменных скоростей и интервалов движения / В. В. Кулябко, А. В. Макаров // Зб. Дороги і мости. – 2008, вип. 9. - С. 129-140.

9. Новое в исследовании и проектировании пространственных конструкций : сб. тезисов докладов научной сессии / МОО «Содействие развитию и применению пространственных конструкций в строительстве». – М.: МОО «Содействие развитию и применению пространственных конструкций в строительстве», 2008. – 66 с.

10. Кулябко В. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований собственных колебаний трубчатого мостового крана-перегрузателя / В. Кулябко, А. Макаров, Д. Тихонов // Theoretical Foundations in Civil Engineering. – 2009. – №17. – P. 179 – 184.

11. Structure dynamics: calculations, designing, diagnostic tests and nonlinear damping / Vladimir Kulyabko [and other] // Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies. – 2015. - №1(7). - P. 520-530.

12. Перспективы использования информационных технологий при решении проблем динамики конструкций и сооружений / В.В. Кулябко [и др.] // Проблемы использования информационных технологий в сфере образования, науки и промышленности. – 2013. – №1. – С. 10-19.

13. Кулябко В. 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. - 2014. – Вип. 10. - С. 352-359.

14. Краны грузоподъемные. Термины и определения : ГОСТ 27555-87. - [Действующий от 01-01-1989]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 26 с.

15. Краны грузоподъемные. Ряды основных параметров : ГОСТ 1575-81. – [Действующий от 01-01-1988]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.
16. Грузоподъемные машины: учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование»/ М. П. Александров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 400с.: ил.
17. Проект 4777КМ-1. Кран-перегрузатель. Пояснительная записка. – М. : Главстройпроект – Проектстальконструкция, 1961. – 13с.
18. Инструкция по эксплуатации перегружателя грузоподъемностью 30 тонн, пролётом 76,2 метра. № И-2468 / ГУММАШ – СКМЗ. – М. : ГУММАШ – СКМЗ, 1980. – 27 с.
19. Дудко Г.Д. Монтаж мостовых кранов-перегрузателей / Г. Д. Дудко, Ю. Л. Колчинский. – М. : Стройиздат. 1990. – 223 с.
20. Перегрузатели мостовые. Руководство по эксплуатации : Ф01 3153 701РЭ. – Красноярск : Сибтяжмаш, 1985. – 182 с.
21. Справочник по кранам. В 2 т. Т. 1. Общие расчеты, материалы, приводы, металлические конструкции / под ред. А. И. Дукельского. – [2-е изд.]. – Л. : Машиностроение, 1971. – 400 с.
22. Мостовые перегружатели / Б. В. Беглов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 224 с.
23. Кобзев А. П. Специальные грузоподъемные машины: [учеб. пособие]. В 8 кн. Кн. 4. Козловые краны и мостовые перегружатели. Краны кабельного типа / А. П. Кобзев, В. П. Пономарев; под ред. К. Д. Никитина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 140 с.
24. Мельников Н. П. Развитие конструктивной формы крановых конструкций // Исследования и развитие теории конструктивных форм крановых металлоконструкций : сб. науч. тр. М. ЦНИИпроектстальконструкция, 1982. - С. 3-40.

25. Основные данные по проектированию и расчёту кранов. – М.-Л.: Гос. Инспекция Котлонадзора, 1943. – 50 с.

26. Указания по проектированию стальных конструкций кранов-перегрузателей / Главстройпроект-Проектстальконструкция. – М.: Главстройпроект-Проектстальконструкция, 1962. – 42 с.

27. Единые Нормы и Технические Условия на проектирование, расчет и изготовление крановых конструкций. Часть II. Глава 3. Металлические конструкции кранов-перегрузателей и козловых кранов большой грузоподъёмности / ЦНИИПроектстальконструкция. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1971. – 101 с.

28. Руководящий технический материал. Нормы расчета и проектирования стальных конструкций мостовых перегружателей и козловых кранов большой грузоподъёмностью : РТМ 24.090.62-81. – М: Минтяжмаш, 1981. – 113 с.

29. Руководящий технический материал. Краны грузоподъёмные. Основные положения расчета : РТМ 24.090.26-77. – М.: НИИинформтяжмаш, 1978. – 14 с.

30. Руководящий технический материал. Краны грузоподъёмные. Расчетные нагрузки : РТМ 24.090.27-77. – М.: НИИинформтяжмаш, 1985. – 102 с.

31. Руководящий технический материал. Краны грузоподъёмные мостовые. Нормы расчета и проектирования : РТМ 24.090.30-77. – М.: НИИинформтяжмаш, 1978. – 31 с.

32. Руководящий технический материал. Краны грузоподъёмные. Стальные конструкции. Методы расчета : РТМ 24.090.32-77. – М.: НИИинформтяжмаш, 1978 – 59 с.

33. Руководящий технический материал. Материалы для сварных металлоконструкций : РТМ24.090.52-79. – М.: НИИинформтяжмаш, 1980 – 19 с.

34. Руководящий технический материал. Выносливость стальных конструкций. Метод расчета : РТМ 24.090.53-79. М.: НИИинформтяжмаш, 1980 – 59 с.

35. Руководящий технический материал. Краны грузоподъемные мостовые и козловые. Нормы проектирования: РТМ 24.090.54-79. – М.: НИИинформтяжмаш, 1980 – 86 с.

36. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения: ГОСТ 1451-77. – [Действующий с 01-01-1978]. – М.: Издание официальное, 1977. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).

37. Нормы расчета стальных конструкций мостовых и козловых кранов: ОСТ 24.090.72-83. – [Действующий с 01-07-1984]. – М.: Издание официальное, 1983. – 91 с. – (Отраслевой стандарт СССР).

38. Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций: ОСТ 24.09-5821-01-93. - [Действующий с 25-06-1993]. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 135 с.

39. Проектирование и расчет транспортно-технологических грузоподъемных кранов для обслуживания предприятий металлургической промышленности. РД 24.090.120-07: [справочное руководство] / И.И.Абрамович, Р. А. Лалаянц, Н. В. Модин, Е. М. Певзнер. - М.–Череповец: НПО «ВНИИПТМАШ», 2007. – 123 с.

40. Краны грузоподъемные. Технические условия на капитальный, полнокомплектный и капитально-восстановительный ремонты: РД 22-32-02. - [Действующий с 02-01-2002]. – М. : ГУП «СКТБ БК», 2002. – 132 с.

41. Krane. Grundsätze fuer Stahltragwerke Berechnung: DIN 15018, Teil 1, 1984. – 23 p.

42. Federation Europeenne de la Manutention. Section I. Heavy lifting and handling equipment / The total 3rd Edition revised comprises booklets 1 to 5 and 7 to 9.

43. Consists of the following parts, under the general title Cranes — Proof of competence of steel structures: ISO/FDIS 20332-1:2008(E). In 2 part. Part 1. General. – 2008. – 71 p.

44. Crane Manufacturers Association of America Specification #70. For Electric Overhead Traveling Cranes. – 2000. – 88 p.

45. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. - [Чинний від 01-01-2015]. - К. : Мінрегіон України, 2014. - 110с.

46. Будівництво у сейсмічних районах України : ДБН В.1.1-12:2014. - [Чинний від 01-10-2014]. - К. : Мінрегіон України, 2014.- 110с.

47. Справочник по кранам. В 2 т. Т.1. Общие расчеты, материалы, приводы, металлические конструкции / под ред. А. И. Дукельского. – [2-е изд.]. - Л. : Машиностроение, 1971. – 400 с.

48. Краны грузоподъемные. Режимы работы : ГОСТ 25546-82. - [Действующий с 01-01-1986]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 9 с. – (Межгосударственный стандарт).

49. Абрамович И. И. Козловые краны общего назначения / И. И. Абрамович, Г. А. Котельников. – М. : Машиностроение, 1971. - 279 с.

50. Абрамович И. И. Грузоподъемные краны промышленных предприятий : [справочник] / И. И. Абрамович, В. Н. Березин, А. Г. Яуре. – М. : Машиностроение, 1989. – 360 с. : ил.

51. Богуславский П.Е. Металлические конструкции грузоподъемных машин и сооружений / П. Е. Богуславский. – М. : Машгиз, 1961. - 519с.

52. Братусь Н. Г. Краны с трубчато-балочными пролетными строениями / Н. Г. Братусь, В. А. Каскевич, Л. В. Титаренко. – М. : Машиностроение, 1989. – 184 с. : ил.

53. Гохберг М. М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М. М. Гохберг. - [3-е изд., перераб. и дополн.]. - Л. : Машиностроение, 1976. - 456 с. : ил.
54. Вайсон А. А. Подъемно-транспортные машины / А. А. Вайсон. - М. : Машиностроение, 1964. - 592 с.
55. Кубланов Н. П. Строительная механика и металлические конструкции кранов / Н. П. Кубланов, И. Е. Спенглер. - К. : Будівельник, 1968. - 268 с.
56. Расчёты металлургических кранов. / С. А. Казак, В. И. Котов, П. З. Петухов, В. Н. Суторихин. - М. : Машиностроение, 1973. - 264 с.
57. Парницкий А. Б. Мостовые краны общего назначения / А. Б. Парницкий, А. П. Шабашов. - [3-е изд.]. - М.-Свердловск : Машгиз, 1961. - 319с.
58. Лобов Н. А. Динамика грузоподъемных кранов / Н. А. Лобов. - М. : Машиностроение, 1987. - 160 с. : ил.
59. Казак С. А. Динамика мостовых кранов / С. А. Казак. - М. : Машиностроение, 1968. - 332 с.
60. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. - Москва-Киев : Машгиз, 1962. - 266 с.
61. Considerations of Various Moving Load Models in Structural Dynamics of Large Gantry Cranes / V. Gašić [and other] // FME Transactions. - 2013. - Vol 41: no 4. - P. 311-316.
62. Dynamic Behaviour of a Nonlinear Gantry Crane System / Hazriq Izzuan Gaafar [and other] // Procedia technology. - 2013. - № 11. - P. 419-425.
63. Investigation of sway angle characteristics in gantry crane system by PSD analysis / R. Ghazali [and other] // Proceedings of Mechanical Engineering Research Day. - 2015. - №1. - P. 85-86.

64. Hybrid Control for an Overhead Crane / A. Saedian [and other] // International Journal of Physical Sciences. – 2012. – Vol. 7 (14). – P. 2220-2224.

65. Nonlinear Coupling Control Laws for an Underactuated Overhead Crane System / Y. Fang [and other] // IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. – 2003. - Vol 8: no. 3. – P. 418-423.

66. Radlov K. System "girder crane-building" dynamic analysis in case of earthquake / K. Radlov, N. Kotzev // Recent. – 2010. – Vol. 11: no. 1 (28). – P. 46-49.

67. Барштейн М. Ф. Исследование поперечных сил, возникающие при движении мостового крана / М. Ф. Барштейн, А. Н. Зубков // Динамика сооружений. Сб. Науч. Тр. ЦНИИСК. - 1968. - С. 4-31.

68. Бук В. А. Статистические характеристики рельсовых нитей мостовых кранов и их аппроксимация / В. А. Бук, А. М. Захезин // Динамика машин и рабочих процессов. – 1986. – Вып. 243. – С. 50-53.

69. Спицына Д. Н. Исследования затухания колебаний крановых мостов // Исследования и расчеты крановых металлоконструкций и канатов. – 1959. – № 23. – С. 39.

70. Лобов Н. А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути : [учеб. пособие] / Н. А. Лобов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 232 с. : ил.

71. Будиков Л. Я. Метод расчета оптимальных тормозных характеристик механизмов передвижения грузоподъемных кранов [Электронный ресурс] / Л. Я. Будиков, Р. В. Шишкин // Наукові вісті Далівського університету : зб. наук. праць. – Луганськ, 2012. - № 7. [электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe (11.12.14). - Назва з екрану.

72. Стукаленко М. И. Подъемные сооружения. Специальная техника // О новом подходе к разработке динамических моделей подъема мостовых кранов. – 2003. – №1. – С. 8-9.

73. Стукаленко А. М. Влияние длины полиспастного подвеса на динамику подъема мостового крана при нормальной работе и обрывке каната // Труды Одесского политехнического университета. – 1998. Вып. 1(5). – С. 96-97.

74. Стукаленко М. И. Математическая модель подъема груза мостовым краном // Труды Одесского политехнического университета. – 1998. Вып. 1(5). – С. 92-95.

75. Каряченко Н. В. О продольных колебаниях канатов грузотранспортирующих установок, несущих подвижную инерционную нагрузку / Н. В. Каряченко, Р. Ф. Ильин // Подъемно-транспортная техника. – Днепропетровск. – 2006. – Вып. 4(20). – С. 32-41.

76. Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць / Харківський політехнічний ін-т, Нац. техн. ун-т. - Харків : НТУ ХПІ, 2008. - с. 104.

77. Москаленко В. И. Продление ресурса решетчатых металлоконструкций рудного перегружателя / В. И. Москаленко, А. Н. Гибаленко, В. В. Губанов // Сборник научных трудов УкрНИИПСК. – 2008. – Вып. 2. – С. 96-103.

78. Болотин В.В. Теория датчиков повреждений и счетчиков ресурса / В. В. Болотин, С. М. Набойщиков // Расчеты на прочность. – 1983. – Вып.24. – С. 79-94.

79. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.: ил.

80. Слободяник В. А. Вопросы обоснования модернизации кранов мостового типа как альтернативы покупки нового крана / В. А. Слободяник,

Л.М. Козарь // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2013. – Вип. 136. – С. 204-208.

81. Дубов А. А. Техническая диагностика и неразрушающий контроль / А. А. Дубов // Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования. – 2010. – №2. – С. 49-54.

82. Иванов В. Н. Техническое диагностирование подъемно-транспортных машин и оборудования: монография / В. Н. Иванов. – Х. : Индустрия, 2009. – 204 с.: ил.

83. Машиностроение : энциклопедия. В 7 т. Т. 3. Измерение, контроль, испытания и диагностика / [Клюев В. В. И др.] ; под ред. К. В. Фролова. – М. : Машиностроение, 1996. – 464 с. : ил.

84. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / [В. В. Клюев и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – [2-е изд.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с. : ил.

85. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования : [учебное пособие] / В. В. Носов. – [2-е изд.]. – С-П. : Лань, 2012. – 384 с. : ил.

86. Методические указания. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании РД ИКЦ «КРАН» - 007-97 : РД 1-112-5-97, М. : ВНИИПТМАШ, 2002. – 75 с.

87. Оперативный контроль напряженного и усталостного состояния сварных соединений неразрушающим методом по магнитной характеристике металла – коэрцитивной силе / Г. Я. Безлюдько [и др.] // – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 1. – С. 58-59.

88. Попов В. А. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2004. – № 9. – С. 13-16.

89. Пустовой В. Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В. Н. Пустовой. – М. : Транспорт, 1992. – 256 с.

90. Слободяник В. А. Новая жизнь «перетрудившихся» кранов. Как продлить срок службы мостовых кранов на второй расчётный срок // Подъёмные сооружения. Специальная техника. – 2006. – № 5. – С. 22-23.

91. Танченко А. Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов высоконагруженных машин при действии комплекса динамических нагрузок /А. Ю. Танченко, Н. А. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 2009. – № 1. – С. 134-147.

92. Нащекин М. В. Действительная работа стальных неразрезных циклически нагруженных балок: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Максим Валерьевич Нащекин. - Магнитогорск, 2001. – 166 с.

93. Емелин Е. И. Обоснование основных параметров строительных металлоконструкций козловых кранов больших пролётов и высокой грузоподъёмности: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Евгений Иванович Емелин. – М., 1983. – 191 с.

94. Березкина Ю. В. Остаточный ресурс сварных ездовых балок коробчатого сечения с учётом инерционных воздействий: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Юлия Викторовна Березкина. – Магнитогорск, 1983. – 154 с.

95. Яхнин Р. Н. Ремонт металлоконструкций мостовых кранов / Р. Н. Яхнин. – М. : Металлургия, 1990. – 96 с.

96. Концевой Е. М. Ремонт крановых металлоконструкций / Е. М Концевой, Б. М. Розеншейн. – М. : Машиностроение, 1979. – 206 с.: ил.

97. Соколов Л. И. Ремонт металлоконструкций металлургических кранов / Л. И. Соколов. – М. : Металлургия, 1982. – 88 с.

98. Конструкции грузоподъемных кранов и подъемников металлические. Капитальный ремонт : ТУ У 29.2-21674530-001-2003. – [Действующий с 16-06-2003]. – К. : ЗАО СП «Монтажспецтехника», 2003. – 186 с.

99. Вантажопідіймальні крани, підіймальні пристрої і відповідне обладнання. Виготовлення : СОУ МПП 53.020-158:2006. – [Чинний від 01-05-2007]. – К.: Мінпромполітики України, 2006. – 144 с. – (Стандарт Мінпромполітики України).

100. Оборудование подъемно-транспортное. Требования к изготовлению, ремонту и реконструкции металлоконструкций грузоподъемных кранов : РД 24.090.97-98. – [Чинний від 01-05-2007]. – К. : Мінпромполітики України, 2006. – 144 с. – (Стандарт Мінпромполітики України).

101. Справочник по техническому обслуживанию, ремонту и диагностированию грузоподъемных машин. Том 2. / В. С. Котельников [и др.]. - М. : ПИО ОБТ, 1996. - 408 с.

102. Банах В. А. Статико-динамические расчетные модели зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях: монография / В.А. Банах. – Запорожье : ЗГИА, 2012. – 322 с.

103. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия : справочник проектировщика / [Барштейн М. Ф. и др.]; под ред. Б. Г. Коренева. – М. : Стройиздат, 1981. – 215 с.

104. Динамический расчет зданий и сооружений : справочник проектировщика / [Барштейн М. Ф. и др.]; под ред. Б. Г. Коренева. – [2-е изд.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

105. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций : справочник проектировщика / [Амбришвили Ю. К. . и др.]; под ред. Б. Г. Коренева. – М.: Стройиздат, 1986. – 461 с.: ил.

106. Дукарт А. В. Динамический расчет балок и рам: [учеб. пособие] / А. В. Дукарт, Олейник А. И. ; под общ. ред. А. В. Дукарта. – М. : Изд ВЗПИ, 1990. – 189 с.
107. Коренев Б. Г. Справочник по динамике сооружений / Б. Г. Коренев, И. М. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.
108. Сорокин Е. С. Динамический расчет несущих конструкций зданий / Е. С. Сорокин. – М.: Стройиздат, 1956. – 340с.
109. Френель П. М. Расчет строительных конструкций на динамическую нагрузку / П. М. Френкель. – М.: Стройиздат, 1958. – 136с.
110. Филипов А. П. Методы расчета сооружений на колебания / А. П. Филипов. - М. – Л.: Стройиздат, 1940. – 232 с.
111. Рекомендации по виброзащите несущих конструкций производственных зданий / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1988. – 217 с.
112. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация : ГОСТ 26568-85. – [Действующий от 01-01-1987]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1985. – 11 с.
113. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования : ГОСТ 12.1.012-2004. [Действующий от 30-06-2008]. – М. : Стандартиформ, 2010. – 20 с.
114. Борьба с шумом на производстве : справочник / [Юдин Е. Я. И др.] ; под общ. ред. Е. Я. Юдина. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.: ил.
115. Колесников А. Е. Шум и вибрация : учебник / А. Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1988. – 248 с.: ил.
116. Новак С. М. Защита от вибрации и шума в строительстве / С. М. Новак, А. С. Логвинец. – К. : Будівельник, 1990. – 184 с.
117. Коренев Б. Г. Динамические гасители колебаний : теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. – М. : Наука, 1988. – 304 с.

118. Загора А.Л. Гашение колебаний мостовых конструкций / А. Л. Загора, М. И. Казакевич ; под ред. Н. Г. Бондаря. – М.: Транспорт, 1983. – 143 с.
119. Бондаренко Л. Н. Подъемные сооружения. Специальная техника // Теория гасителей колебаний трения качения для грузоподъемных машин. – 2003. – №1. – С. 6-7.
120. Сейсмостойкое строительство зданий : [учеб. пособие] / И. Л. Корчинский [и др.]. – М. : Высш. школа, 1971. – 320 с.
121. Мартемьянов А. И. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах : [учеб. пособие] / А. И. Мартемьянов. – М. : Стройиздат, 1985. – 255 с.
122. Николаенко Н. А. Динамика и сейсмостойкость сооружений / Н. А. Николаенко, Ю. П. Назаров. – М. : Стройздат, 1988. – 312с.: ил.
123. Ньюмарк Н. Основы сейсмостойкого строительства : сокр. пер. с англ. / Н. Ньюмарк, Э. Розенблюэт ; под ред. Я. М. Айзенберга. – М. : Стройиздат, 1980. – 344 с. – (Перевод изд. : Fundamentals of earthquake Engineering / N.M. Newmark, Roesnblueth).
124. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений : пер. с англ. / Ш. Окамото. – М. : Стройиздат, 1980. – 342 с. : ил. – (Перевод изд. : Introduction to earthquake engineering / Shunzo Okamoto).
125. Поляков В. С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В. С. Поляков, Л. Ш. Килимник, А. В. Черкашин. – М.: Стройиздат, 1989. – 320 с.
126. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф. М. Диментберга. – М. : Машиностроение, 1980. – 544 с.
127. Бабаков И. М. Теория колебаний: [учеб. пособие] / И. М. Бабаков. – [4-е изд.]. – М. : Дрофа, 2004. – 592 с.

128. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов / В. Л. Бидерман. – М. : Высш. школа, 1980. – 408 с.
129. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания : пер с 4-го америк. изд. АН Обморшева / Дж. П. Ден-Гартог. – М. : Гос. изд. физ.-мат. лит, 1960. – 580 с.
130. Машиностроение : энциклопедический справочник. В 6 т. Т. 1. Инженерные расчеты в машиностроении / под ред. Е. А. Чудакова. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1947. – 456 с.
131. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивого движения / Д. Р. Меркин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 312 с.
132. Основы теории колебаний: [учеб руководство] / В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин ; под ред. В. В. Мигулина. – [2-е изд.]. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 392 с.
133. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1977. – 224 с.
134. Смирнов А. Ф. Устойчивость и колебания сооружений / А. Ф. Смирнов. – М. : Трансжелдориздат, 1958. - 572 с.
135. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний / С. П. Стрелков. – [2-е изд.]. – М. : Наука, 1964. – 440 с. : ил.
136. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер ; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука ; под ред. Э. И. Григолюка. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
137. Ананьев И. В. Динамика конструкций летательных аппаратов / И. В. Ананьев, Н. В. Колбин, Н. П. Серебрянский. – М. : Машиностроение, 1972. – 416 с.

138. Барченков А. Г. Исследование динамического действия подвижной нагрузки на автодорожные мосты : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.22.05 / Александр Григорьевич Барченков. – Воронеж, 1973. – 40 с.

139. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.

140. Казей И. И. Динамический расчет пролетных строений железнодорожных мостов / И. И. Казей. – М. : Всес. изд.-полигр. объедин. МПС СССР, 1960. – 468 с.

141. Редченко В. П. Діагностика стану прогонових будов мостів за динамічною дією рухомого навантаження // Дороги і мости: зб. наук. пр. – 2007. – Вип. 7. – С. 143-147.

142. Орленко В. П. Вертикальные колебания пролетных строений при сходе с них подрессоренной нагрузки // Вопросы теории колебаний и динамики мостов : труды ДИИТа. – 1966. – Вып. 56. – С. 115-126.

143. Кулябко В. В. Колебания сложных систем под действием массивной подвижной нагрузки с учетом односторонности связей / В. В. Кулябко, А. А. Дубихвост // Modern Building Materials, Structures and Techniques. – 1997. – Vol. 3. – P. 163-168.

144. Кулябко В. В. Взаимодействие движущегося автотранспорта с нелинейными упруго-диссипативными конструкциями и основаниями дорог / В. В. Кулябко, И. И. Давыдов, А. А. Дубихвост // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2001. – Вип. 61. – С. 192-196.

145. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Краны мостовые и козловые : РД 10-112-5-97. – [Действующий с 01-01-1998]. – М. : Госгортехнадзор РФ, 1997. – 54 с.

146. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів : НПАОП 0.00-1.01-07. – [Чинний від 18-06-2007]. – Х. : Форт, 2007. – 256 с.

147. Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений : ДБН 362-92. – [Действующий с 01-07-1992]. – К. : Госстрой Украины, 1992. – 47 с.

148. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий / ЦНИИппромзданий. – М. : ЦНИИппромзданий, 1997. – 222 с.

149. Мости та труби. Обстеження і випробування : ДБН В.2.3-6:2009. – [Чинний від 01-03-2010]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 44 с.

150. Гроздов В. Т. Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. – С.-П. : Издательский дом KN+, 2001. – 140 с.

151. Ремнев В. В. Обследование технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / В. В. Ремнев, А. С. Морозов. – М. : Маршрут, 2005. – 196 с.

152. Обследование и испытание сооружений : учеб. для вузов / О. В. Лужин, А. Б. Злочевский, И. А. Горбунов, В. А. Волохов ; под ред. О. В. Лузина. – М. : Стройиздат, 1987. – 263 с.: ил.

153. Тетиор А. Н. Обследование и испытание сооружений / А. Н. Тетиор, В. Н. Померанец. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 207 с.

154. Методические указания по обследованию специальных металлургических кранов : РД 10-112-6-03. – [Действующий с 15-05-2003]. – М. : Госгортехнадзор РФ, 2003. – 146 с.

155. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть I. Общие положения : РД 10-112-96. – [Действующий с 28-03-1996]. – М. : Госгортехнадзор РФ, 1996. – 27 с.

156. Методическими указаниями по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые : РД 10-112-5-97. – [Действующий с 01-01-1998]. – М. : Госгортехнадзор РФ, 1996. – 53 с.

157. Бауманн Э. Измерение сил электрическими методами / Э. Бауманн ; пер. с нем. А. С. Вишенкова, С. Н. Герасимова ; под ред. И. И. Смыслова. – М. : МИР, 1978. – 381 с.
158. Добрынин С. А. Методы Автоматизированного исследования вибрации машин: справчник / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с. : ил.
159. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Г. Кайно ; пер. с англ. – М. : МИР, 1990 – 656 с. : ил.
160. Кассандрова О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1970. – 104 с.
161. Крылов Н. А. Испытание конструкций сооружений / Н. А. Крылов, К. А. Глуховской. – Л. : Стройиздат, 1970. – 270 с.
162. Сидоренко М. К. Виброметрия газотурбинных двигателей / М. К. Сидоренко. – М. : Машиностроение, 1973. – 224 с.
163. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справочное пособие / Б. С. Касаткин [и др.]. – К. : Наукова думка, 1981. – 584 с.
164. Краны козловые электрические. Методы испытаний : ГОСТ 25251-82. – [Действующий с 01-07-1983]. – М. ИПК Издательство стандартов, 1982. – 8 с.
165. Редченко В. П. Особенности использования спектрального анализа при исследовании колебаний строительных конструкций // Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. – 2009. – Вип. 4(78). – С. 44-48.
166. Редченко В. П. Моніторинг технічного стану мостів методами пасивної вібраційної діагностики // Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 33. – С.223-227.

167. Сергеев А. А. Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролётное строения автодорожных мостов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Сергеев Алексей Анатольевич. – М., 2007. – 197 с.

168. Кирпичев А. А. Новые технологии вибрационного мониторинга зданий и сооружений для контроля их состояния / А. А. Кирпичев, А. Г. Миронов // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2001. – № 1. – С. 54-61.

169. Альперин В. М. Исследования металлоконструкций крана-перегрузателя трубчато-балочной конструкции / В. М. Альперин, О. И. Ганиза, В. А. Соболев // Металлические конструкции кранов. Исследование конвейеров. – 1975. – Вып. 347. – С. 72-73.

170. Альперин В. М. Экспериментальные исследования действительной работы металлоконструкций грузоподъемных сооружений / В. М. Альперин, О. И. Ганиза, В. И. Латыш // Натурные испытания металлических конструкций трубчато-балочного крана-перегрузателя. Материалы по металлическим конструкциям : ЦНИИпроектстальконструкция. – 1977. – Вып. 19. – С. 149-160.

171. Альперин В. М. Экспериментальные исследования действительной работы металлоконструкций грузоподъемных сооружений / В. М. Альперин, О. И. Ганиза // Исследования и развитие теории конструктивных форм крановых металлоконструкций : сб. науч. тр. М. ЦНИИпроектстальконструкция, 1982. - С. 80-88.

172. Гусев Ю. Б. К вопросу о диагностировании состояния металлоконструкций углеперегрузателя // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 38. – С 50-58.

173. Нагорный В.М. Определение динамических характеристик большегрузных изделий с помощью вибростендов // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2010. – №4(22). – С. 39-42.

174. Аугустин Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский ; пер. с польск. Д. Д. Попова. – М. :Стройиздат, 1978. – 183 с.

175. Беляев Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б. И. Беляев, В. С. Корниенко. – М. : Стройиздат, 1968. – 206 с. : ил.

176. Дмитриев Ф. Д. Крушения инженерных сооружений / Ф Д Дмитриев. – М. : Стройиздат, 1953. – 188 с.

177. Лащенко М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М. Н. Лащенко. – Ленинград : Стройиздат, 1969. – 182 с.

178. Рубицки Р. Повреждения и дефекты строительных конструкций / Р. Рубицки ; пер. с нем. К. Ф Плитта ; под ред. И. А. Физделя. – М. : Стройиздат, 1982. – 432 с. : ил.

179. Сахновский М. М. Уроки аварий стальных конструкций / М. М. Сахновский, А. М. Титов. – К. : Будівельник, 1969. – 200 с.

180. Хэммонд Р. Аварии зданий и сооружений. Причины и уроки аварий современных сооружений различных типов / Ролт Хэммонд. – М. : Стройиздат, 1960. – 188 с.

181. Шкинев А. Н. Аварии в строительстве / А. Н. Шкинев. – [4-е изд.]. – М. : Стройиздат, 1984. – 320 с. : ил.

182. Аварии стальных конструкций промышленных зданий и сооружений и их причины / укладчик автор текста Б. И. Беляев. – М. : Центральное бюро технической информации, 1965. – 76 с. : ил.

183. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14-2009. – [Чинний від 01-12-2009]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 24 с.

184. Исследование и практика применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш» / В. А. Гудошник [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – №2. – С. 46-50.

185. 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.

186. Универсальный программный комплекс для расчета и проектирования строительных конструкций Selena [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://selenasys.com/>

187. Киселев В. А. Строительная механика: Специальный курс. Динамика и устойчивость / Киселев В. А. - М. : Стройиздат, 1980. - 616с.

188. «ЛИРА®». Проектирование и расчет строительных и машиностроительных конструкций [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lira.com.ua/products/lira/>

189. SCAD Office — программный комплекс, позволяющий провести расчет и проектирование стальных и железобетонных конструкций. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/scad-office/scad-office.html>

190. Дьяконов В. П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании / В. П. Дьяконов – М. : СОЛОН-Пресс, 2006. – 720 с.

191. Васильев А. Н. Maple 8. Самоучитель. / А. Н. Васильев - М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 352 с., ил.

192. 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.

193. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования : ГОСТ 31191.1-2004. - [Действующий с 2008 – 07 - 01]- М. : Стандартинформ, 2008. – 28 с.

194. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 2. Общие требования : ГОСТ 31191.2-2004. - [Действующий с 2008 – 07 - 01]- М. : Стандартинформ, 2008. – 8 с.

195. Испытание крана-перегрузателя трубчато-балочной конструкции L=76,2 м, Q=32 т / ОРИС 594. - М. : ЦНИИПСК, 1973. - 136с. инв. № 253914.

196. 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.

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

198. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справки о внедрении



ПУБЛІЧНЕЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ДНІПРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ
ім. Ф. Е. ДЗЕРЖИНСЬКОГО»

51925, Україна, м. Дніпродзержинськ, вул. Кірова, 18-Б. Телетайп 349119, для телеграм - УТЕС.
Комерційна частина (05692) 3-05-97; поставки: (0569) 53-46-26; поставки за кордон: (0569)53-74-54
Факс (0569) 53-16-36, 53-18-68, e-mail: kanc@dmkd.dp.ua
Р/р 26006303170001 філії „Відділення Промінвестбанку в м. Дніпродзержинськ Дніпропетровської обл.”
Р/р 26003814480100 Дніпропетровської обласної дирекції АППБ „Аваль”

Від 8.11.12 № 092-1246

На № _____

Г

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник ПКВ
Олейник Н.О.

Г

" " _____ 2012 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Макарова Андрія Віталійовича з динаміки мостових рудно-грейферних кранів-перевантажувачів на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та спорудження

Комісія у складі:

Голова комісії - Єлісеєв О.В. Голова - головний інженер проекту;

Члени комісії:

Бондарев С.Г – начальник кранового бюро;

Галаєв Ю.В – ведучий інженер.

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Макарова А.В. з динаміки мостових рудно-грейферних кранів-перевантажувачів використані співробітниками проектно-конструкторського відділу ПАТ «Дніпровського металургійного комбінату ім. Ф.Е. Дзержинського». Впроваджені методики спрощених моделей кранів-перевантажувачів для оцінки теоретичного прогнозування рівнів динамічних напружень, що дало можливість застосування динамічної паспортизації перевантажувачів: скоротити час простою перевантажувачів, виконання довготривалих спостережень за основними формами та частотами власних коливань.

Голова комісії

Єлісеєв О.В.

Члени комісії

Бондарев С.Г

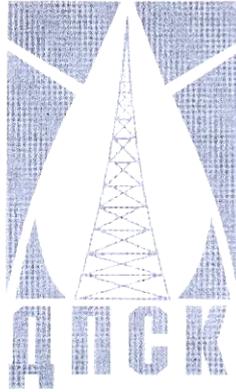
Галаєв Ю.В.

«__» _____ 2012р.

ПРОЕКТНИЙ ІНСТИТУТ
"ДНІПРОПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦІЯ"
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

49000, г. Дніпропетровськ,
пр. К.Маркса, 59а, офіс 25
Телефон/ факс: (056) 744-46-62
744-00-71
E-mail: dir@pidpsk.dp.ua

Розрахунковий рахунок 26004000210000
В філії АТ «Укресімбанк»
м. Дніпропетровськ МФО 305675
Код за ЄДРПОУ 36639358



ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ
"ДНЕПРОПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ"
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

49000, г. Днепропетровск,
пр. К.Маркса, 59а, офис 25
Телефон/ факс: (056) 744-46-62
744-00-71
E-mail: dir@pidpsk.dp.ua

Расчетный счет 26004000210000
В филиале АО «Укрэксимбанк»
г. Днепропетровск МФО 305675
Код ОКПО 36639358

*Лист № 642
от 27.12.2011*

СПРАВКА

о внедрение результатов диссертационной работы
Макарова Андрея Витальевича

Инженер Макаров А.В. проводил многолетние исследования с 2007 по 2011г. на мостовых кранах-перегрузателях ПАО «Алчевского металлургического комбината» 3 крана трубчатого и 1 решетчатого типа, ПАО «Енакиевского металлургического завода» 2 крана решетчатого типа, ПАО «Днепропетровского металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского» 2 крана трубчатого типа, ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» 3 крана трубчатого и 1 шпренгельного типа и др.

Были выполнено натурное обследование строительных конструкций, проведены динамические испытания мостовых кранов-перегрузателей с виброзаписью вибрационных процессов на всех основных этапах технологического цикла работы крана.

Результаты проведенных испытаний инженера Макарова А.В. позволили дать рекомендации, направленные на уточнение динамических моделей и усилий работы крана, на продление остаточного ресурса несущих конструкций кранов-перегрузателей, на понижение уровня динамических напряжений, снижение вероятности усталостного разрушения основных несущих конструкций. Даны рекомендации по снижению амплитуд основных видов колебаний; по улучшению условия работы и вибрационный комфорт машинистов кранов-перегрузателей.

Справка выдана для предъявления в специализированный совет по защите диссертаций ПРАСА. Исследования, описанные в кандидатской диссертации Макарова А.В., применяются уже на практике ООО ПИ ДПСК.

Директор



Шереметьев В.В.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
 «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»
 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24А, тел. (056) 745-23-72, факс (0562) 47-07-88,
www.pgasa.dp.ua E-mail: postmaster@mail.pgasa.dp.ua

№ _____

на № _____

892547

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ДВНЗ «Придніпровська
 державна академія будівництва
 та архітектури» д.т.н., професор

Большаков В.І.

2015 р.



Акт впровадження

результатів дисертаційної роботи Макарова А.В. на тему:
 «Динамічні розрахунки, випробування та діагностика сталевих
 конструкцій великопрогонових мостових перевантажувачів»

Ми, що підписалися нижче, завідувач кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій д.т.н., проф. Єгоров Є.А., начальник навчального відділу д.т.н., проф. Тріфонов І.В., склали даний акт про те, що результати досліджень Макарова А.В. були використані у навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 7,8.06010101 – «Промислове і цивільне будівництво», а також лягли в основу розроблених Кулябко В.В. та Макарова А.В. методичних вказівок «Динамічні розрахунки конструкцій сталевих моста мостового крана-перевантажувача гратчастого типу».

Завідувач кафедри металевих,
 дерев'яних та пластмасових
 конструкцій д.т.н., проф.

Єгоров Є.А.

Начальник навчального відділу
 д.т.н., проф.

Тріфонов І.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патент на полезную модель



(11) **99209**(19) **UA**(51) МПК
F16F 7/10 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2014 12842**(22) Дата подання заявки: **01.12.2014**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **25.05.2015**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **25.05.2015,
Бюл. № 10**(72) Винахідники:
**Макаров Андрій Віталійович,
UA,
Ярошенко Денис Сергійович,
UA**(73) Власники:
**Макаров Андрій Віталійович,
вул. Бабушкіна, 42, кв. 9, м.
Дніпропетровськ, 49000, UA,
Ярошенко Денис Сергійович,
вул. Петровського, 17, с.
Кам'яне, Дніпропетровська
обл., 52461, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ДИНАМІЧНИЙ ГАСНИК КОЛИВАНЬ КРАНА-ПЕРЕВАНТАНТАЖУВАЧА

(57) Формула корисної моделі:

Динамічний гасник коливань крана-перевантажувача, що має масу та передачу у вигляді барабанів з гнучким елементом, який відрізняється тим, що він додатково обладнаний пружними елементами, закріпленими між об'єктом гасіння коливань і барабанами, при цьому вузол кріплення пружних елементів до барабанів виконаний з можливістю зміни відстані від точки їх закріплення до осі барабана, тим самим змінюючи налаштування гасника.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **99209** (13) **U**(51) МПК
F16F 7/10 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 12842**
 (22) Дата подання заявки: **01.12.2014**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.05.2015**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.05.2015, Бюл.№ 10**

(72) Винахідник(и):
Макаров Андрій Віталійович (UA),
Ярошенко Денис Сергійович (UA)
 (73) Власник(и):
Макаров Андрій Віталійович,
вул. Бабушкіна, 42, кв. 9, м.
Дніпропетровськ, 49000 (UA),
Ярошенко Денис Сергійович,
вул. Петровського, 17, с. Кам'яне,
Дніпропетровська обл., 52461 (UA)

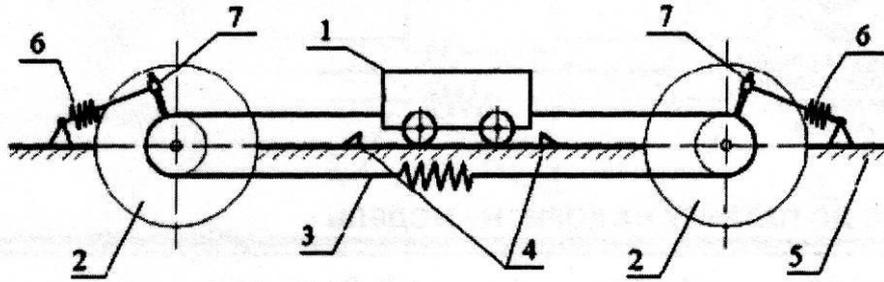
(54) ДИНАМІЧНИЙ ГАСНИК КОЛИВАНЬ КРАНА-ПЕРЕВАНТАНТАЖУВАЧА

(57) Реферат:

Динамічний гасник коливань крана-перевантажувача має масу та передачу у вигляді барабанів з гнучким елементом. Він додатково обладнаний пружними елементами, закріпленими між об'єктом гасіння коливань і барабанами. Вузол кріплення пружних елементів до барабанів виконаний з можливістю зміни відстані від точки їх закріплення до осі барабана, тим самим змінюючи налаштування гасника.

UA 99209 U

UA 99209 U



UA 99209 U

Корисна модель належить до будівництва і призначена для зниження надмірних коливань будівельних споруд і транспортних машин, у тому числі, кранів-перевантажувачів.

Корисна модель може бути ефективною при зниженні надмірних коливань досить масивних будівель, споруд та їх окремих конструкцій, де динамічні навантаження діють із частотами, близькими до першої частоти власних коливань конструкції.

Відомі гасники коливань висотних будівель [1], що мають у своїй конструкції масу, з'єднану з пружними елементами системою блоків і поліспастів. В даних пристроях погашення коливань відбувається за рахунок інтенсивних переміщень маси гасника від коливань об'єкта.

Недоліками даних пристроїв є їхня складність і можливість налаштування частоти гасника лише за рахунок зміни його маси.

Найбільш близьким до запропонованої корисної моделі є пристрій [2], що містить масу, пружні елементи, котрі з'єднують об'єкт з масою, реверсувальний обгінний пристрій з барабанами, гнучким елементом і храповими механізмами, датчик коливань і з'єднаний з ним релейний елемент.

Основним недоліком цього пристрою є те, що робота пристрою регулюється складним вимірювальним і керуючим обладнанням, що потребує для своєї роботи подачу електроенергії, що знижує надійність гасника при її відсутності (наприклад при проведенні обстежень і ремонтів конструкцій кранів-перевантажувачів, аварійних ситуаціях).

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення надійності гасника за рахунок створення можливості змінювати його налаштування на певну частоту шляхом регулювання кріплення вузлів пружних елементів, що пов'язують масу гасника з об'єктом.

Поставлена задача вирішується тим, що гасник коливань, який має масу, пов'язану з барабанами через гнучкий елемент, відповідно до корисної моделі, додатково обладнаний пружними елементами, закріпленими між об'єктом гасіння коливань і барабанами, при цьому вузол кріплення пружних елементів до барабанів виконаний з можливістю зміни відстані від точки їх закріплення до осі барабанів, тим самим змінюючи налаштування гасника, а сама маса гасника рухається поміж обмежувальних елементів.

Суть корисної моделі пояснюється графічним матеріалом, де зображено загальний вигляд гасника коливань.

Гасник коливань має масу 1, що зв'язується з барабанами 2 гнучким елементом 3 і рухається поміж обмежувальних елементів 4. Барабани 2 з'єднуються з об'єктом гасіння коливань 5 пружними елементами 6 і мають у своїй конструкції вузли кріплення пружних елементів 7, що дозволяють змінювати відстані від точки їх закріплення до осі барабанів, тим самим змінюючи налаштування гасника.

Гасник коливань працює наступним чином.

Під впливом коливань об'єкта 5 маса 1 починає переміщатися відносно нього, що призводить до обертання барабанів 2, пов'язаних з масою 1 через гнучкий елемент 3. Динамічне зусилля від роботи гасника передається на об'єкт 5 пружними елементами 6. Налаштування гасника на необхідну частоту коливань відбувається шляхом переміщення вузлів кріплення пружних зв'язків 7 впоперек барабана 2. Динамічні переміщення маси 1 можуть відбуватися між обмежувальними елементами 4.

Перевагою даного пристрою є можливість налаштування гасника коливань шляхом зміни точок закріплення пружних елементів на барабанах за допомогою спеціальних вузлів кріплення.

Джерела інформації:

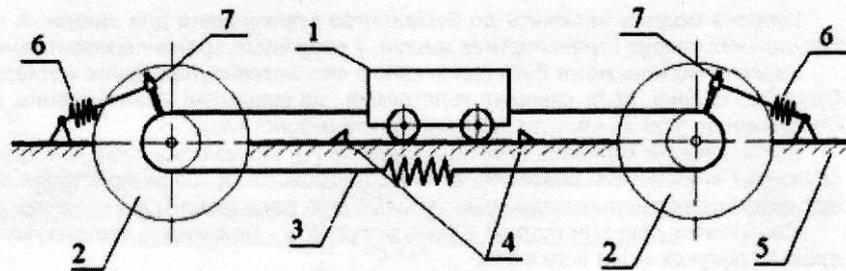
1. Joseph L. Ingredients of High-Rise Design Taipei 101 the World's Tallest Building / L. Joseph, D. Poon, S-S. Shieh // STRUCTURE magazine, June 2006. - P. 40-45. - аналог.

2. А.с. 806931 СССР, М. Кл.3 F16F 15/02. Гаситель колебаний / С.В. Иносов, Ю.В. Чудутов, В.В. Гужовский, И.И. Попрцкий, В.И. Слепян (СССР). - 2766982/25-28; заявл. 17.05.79; опубл. 23.02.81, Бюл. № 7. - прототип.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Динамічний гасник коливань крана-перевантажувача, що має масу та передачу у вигляді барабанів з гнучким елементом, який відрізняється тим, що він додатково обладнаний пружними елементами, закріпленими між об'єктом гасіння коливань і барабанами, при цьому вузол кріплення пружних елементів до барабанів виконаний з можливістю зміни відстані від точки їх закріплення до осі барабана, тим самим змінюючи налаштування гасника.

UA 99209 U



Комп'ютерна верстка М. Мацело

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601