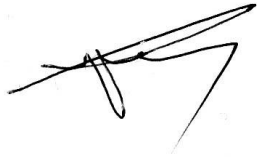


**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ЕРМАК ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ**



УДК 624.042; 624.014

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ  
И КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Украинской государственной академии железнодорожного транспорта Министерства транспорта Украины (г. Харьков).

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор **Горохов Евгений Васильевич**, Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, ректор, заведующий кафедрой металлических конструкций.

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор **Гордеев Вадим Николаевич**, ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского», первый заместитель председателя правления;

доктор технических наук, профессор **Пичугин Сергей Федорович**, Полтавский государственный технический университет им. Ю. Кондратюка, заведующий кафедрой конструкций из металла, дерева и пластмасс;

доктор технических наук, профессор **Мущанов Владимир Филиппович**, Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, проректор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики.

**Ведущая организация:** Одесская государственная академия строительства и архитектуры, кафедра металлических и деревянных конструкций (г. Одесса).

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2003 года на заседании специализированного ученого совета Д 12.085.01. в Донбасской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2, I корпус, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2, I корпус.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2003 года.

Ученый секретарь  
специализированного ученого  
совета, кандидат технических  
наук, доцент

А.М. Югов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Конструкции промышленных зданий, оборудованных мостовыми кранами, составляют значительную часть украинского фонда строительных металлоконструкций.

Большинство этих сооружений построено более 30 лет тому назад. В последнее время от недосмотра и по известным причинам экономического характера темпы износа эксплуатируемых металлоконструкций прогрессируют, увеличилось число аварий, многие цеха нуждаются в реконструкции по причинам моральной амортизации.

Указанные обстоятельства привели к необходимости отнести проблему обеспечения безопасной эксплуатации и продления ресурса промышленных зданий к числу важных государственных проблем.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию и решению научно-технических задач по двум ответственным направлениям этой многоплановой проблемы:

- расчетная оценка технического состояния эксплуатируемых сооружений;
- разработка перспективных предложений для совершенствования конструкций производственных зданий с учетом требуемых условий технического содержания, ремонтпригодности, долговечности.

Первое из указанных направлений развивается путем уточнения расчетов. Если учесть, что проектирование большинства эксплуатируемых промышленных зданий выполнялось на основе достаточно условных допущений, актуальной является задача выявления и устранения противоречий между проектными расчетными схемами и фактической работой конструкций, т.е. задача формирования адекватных расчетных моделей.

Уточнение условий действительной работы реализованных конструкций и определение параметров адекватных расчетных моделей часто связаны с необходимостью проведения специальных натурных экспериментов и разработкой соответствующей теоретической и методической базы. Результаты таких испытаний, выполненных под руководством автора на различных объектах Украины и России, составляют значительную часть диссертационной работы.

Направление исследований, посвященных внесению и обоснованию рациональных изменений в конструктивную форму элементов каркаса промышленных зданий - для экономии стали, снижения вероятности повреждений и улучшения условий технического содержания, также является актуальным для решения данной проблемы. Особое внимание в диссертации уделено вопросам усиления и модернизации элементов и соединений, которые

находятся в зоне непосредственного влияния тяжелых и динамичных, вертикально действующих и боковых крановых нагрузок.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Тема и содержание диссертации связаны с выполнением:

–плана работы секции «Строительные металлические конструкции» научно-координационного Совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин при президиуме НАН Украины;

–отраслевой научно-технической программы 0.55.01.121 Госстроя (бывшего СССР) «Разработать и внедрить прогрессивные способы строительного обеспечения реконструкции и технического перевооружения промышленных предприятий, сокращающие сроки ввода мощностей, стоимость строительно-монтажных работ за счет максимального использования конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений».

Задания и этапы на 1986-90 гг.

С21аб. Провести научно-исследовательские работы и разработать предложения по оценке состояния металлических конструкций (к главе СНиП II-23-81);

О2.01.16 пп. Разработать предложения по выбору параметров активного регулирования усилий в металлоконструкциях эксплуатируемых зданий и сооружений с применением дополнительных затяжек;

– координационного плана секции «Расчет пространственных систем по комплексной схеме» научно-координационного Совета по строительной механике, теории сооружений и сейсмостойкости зданий и сооружений» ЦНИИСКА им. Кучеренко.

Тема-задание на 1985-90 гг. «Исследование вопросов оптимального проектирования стальных конструкций каркасов с упругими связями для промышленных зданий».

Автор являлся научным руководителем и ответственным исполнителем указанных научно-исследовательских работ, имеющих номера госрегистрации 79041199, Б983267, 02840000294, 01860026078, 01880005177, 01860026084, 01910029753.

**Цель работы** подчинена решению актуальной проблемы продления технического ресурса конструкций промышленных зданий путем уточнения расчетной оценки их работоспособного состояния и модернизации для условий долговременной безотказной работы.

**Задачи исследований:**

– теоретическое и экспериментальное изучение действительной работы и причин характерных повреждений конструкций эксплуатируемых цехов для

выявления неточностей проектных расчетных схем и недостатков традиционно применяемых конструктивных решений;

- формирование вариантов адекватных расчетных моделей каркасов производственных зданий;

- постановка численных и натурных экспериментов для обоснования приемлемой точности указанных моделей, для уточнения схематизации элементов и узлов, для анализа влияния различных элементов и связей на работу и возможности усиления основных конструкций каркаса;

- разработка конструктивных мер для продления сроков износа и моральной амортизации крановых и подкрановых конструкций путем ограничения перекосов мостовых кранов и создания начальных усилий, разгружающих колонны каркаса от изгиба вертикальными крановыми нагрузками;

- разработка предложений для проектирования экономичных конструкций промышленных зданий, приспособленных к условиям длительной эксплуатации и возможной реконструкции, с использованием принципов упрощения конструктивной формы, разделения функций элементов каркаса и управления их напряженно-деформируемым состоянием;

- внедрение результатов исследований и разработок, приведенных в диссертации, для оценки и восстановления работоспособного состояния конструкций и решения задач реконструкции промышленных зданий со стальным каркасом.

**Объект исследования** - стальные конструкции одноэтажных промышленных зданий, оборудованных мостовыми кранами.

**Предметом исследования** являются: действительная работа конструкций эксплуатируемых цехов, расчетные модели для оценки их фактической несущей способности, способы усиления и модернизации этих конструкций для увеличения сроков эксплуатации.

**Методы исследования:**

- методы математического моделирования - для формирования, анализа и синтеза расчетных моделей конструкций “крановых” цехов по критерию соответствия действительной работе этих конструкций;

- методы строительной и теоретической механики - для анализа усилий, напряжений и деформаций крановых и подкрановых конструкций на различных вариантах расчетных моделей; для анализа движения мостового крана с перекосами и теоретического определения соответствующих боковых сил;

- методы экспериментального исследования работы конструкций промышленных зданий в натурных условиях;

– методы математической статистики - для обоснования достоверности результатов натурных испытаний конструкций с учетом вероятной изменчивости параметров распределения усилий.

**Научную новизну полученных результатов определяют:**

– расчетная модель поперечных конструкций каркасов в виде комбинированной системы с упругими шарнирно-стержневыми связями, адекватно учитывающая пространственный характер работы этих конструкций, при локальных воздействиях, и упругость узловых соединений; обоснованно приемлемая по точности расчетов; универсально формируемая, в отношении различных компоновочных и конструктивных решений каркасов;

– экспериментально-теоретические методы определения упругих характеристик узлов сопряжения и опирания элементов каркаса;

– «эффект опорного сечения» неразрезной подкрановой эстакады, который проявляется в изгибно-крутильных деформациях балки и колонны в узле их сопряжения и соответствующих напряжениях неожиданно высокого уровня, которые необходимо учитывать при оценке работоспособности таких конструкций;

– метод ограничения перекосов мостовых кранов во время движения - для повышения долговечности крановых и подкрановых конструкций и улучшения динамических характеристик системы кран-каркас; постановка и решение задачи о рациональных параметрах настройки противоперекосных устройств;

– метод усиления колонн стального каркаса промышленных зданий созданием начальных усилий, обратных по знаку изгибающим моментам от крановой нагрузки;

– новая конструкция стальной колонны с авторегулируемой обратной связью по отношению к нагрузке от давления кранового поезда;

– усовершенствованная конструктивная схема каркаса производственных зданий с частичным разделением функций несущих элементов и двойной адаптацией к основным технологическим (крановым) воздействиям.

**Практическое значение полученных результатов.** Использование принципов формирования вариантов расчетных моделей каркаса промышленных зданий в виде плоских или пространственных комбинированных систем с упругими связями, а также методов определения расчетных параметров упругих связей дает возможность решать эту ответственную задачу на основе единого подхода, с достаточной точностью, и проектировать, при необходимости, усиление эксплуатируемых конструкций изменением количества или регулированием жесткости продольных «дисков» каркаса.

Выявление и обоснование закономерности «эффекта опорного сечения» неразрезной подкрановой эстакады, близкой по конструкции узлов и работе к

рамной системе, позволяет учитывать, на этапе оценки работоспособности эксплуатируемого сооружения, более опасное напряженное состояние, чем это прогнозировалось при проектировании.

Установка между ходовой частью мостовых кранов и подкрановыми конструкциями упругих противоперекосных устройств (стабилизаторов) является эффективным способом улучшения условий эксплуатации и продления сроков безремонтной работы.

Усиление стальных колонн созданием начальных усилий, разгружающих стержень колонны от изгиба внецентренными крановыми нагрузками является рациональным методом увеличения грузоподъемности внутрицеховой подкрановой эстакады для целей реконструкции.

Предложения для совершенствования конструктивной схемы и конструкций каркаса промышленных зданий дают возможность улучшить, по сравнению с традиционно применяемыми решениями, экономические и эксплуатационные показатели в отношении расхода стали, условий технического надзора, ремонтпригодности, долговечности.

**Внедрение результатов работы.** Результаты исследований, посвященных методическим вопросам проведения натурных экспериментов, включены в материалы Государственного стандарта Украины ДСТУ Б В.2.6-10-96 «Конструкции стальные строительные. Методы испытаний нагружением».

Сформированные автором расчетные модели поперечных и неразрезных продольных конструкций каркаса включены в информационно-экспертную систему, разработанную для технической эксплуатации Большого высоковольтного зала (г. Запорожье) - уникального большепролетного и высотного «кранового» цеха.

Предложение об ограничении перекосов мостовых кранов путем установки и настройки стабилизирующих устройств было реализовано на ГП «Завод им. Малышева» (г. Харьков).

Методы определения фактической жесткости узлов сопряжения и опирания элементов стального каркаса реализованы в ходе работ по обследованию технического состояния конструкций промышленных зданий на предприятиях Украины и России: «Турбоатом» (г. Харьков), «Запорожтрансформатор» (г. Запорожье), Тырнаузский металлургический комбинат (Кабардино-Балкария).

Рекомендации для учета на адекватных расчетных моделях элементов, создающих или увеличивающих эффект неразрезности, использовались при решении задач обеспечения безотказности и восстановления после аварийного отказа конструкций сталелитейного цеха Приднепровского завода стрелочных переводов (г. Днепропетровск).

Материалы исследований опубликованы в учебных пособиях к изучению курса «Металлические конструкции» для студентов ВУЗов специальности «Промышленное и гражданское строительство».

**Личный вклад соискателя.** По теме диссертации автором опубликовано 27 работ. Лично соискателем, без соавторов, опубликовано в специальных научных изданиях и в материалах международных конференций 17 работ (публикации тезисов докладов не учтены).

Конкретно, личный вклад автора в совместно подготовленных публикациях и изобретениях следующий:

- формирование уточненной расчетной модели поперечных конструкций эксплуатируемых «крановых» цехов в виде комбинированной системы с упругими стержневыми связями; обоснование достаточной точности и рациональности этой модели; разработка методов определения расчетных характеристик «внешних» и «внутренних» упругих связей;

- выявление и анализ эффектов разгрузки или перенапряжения элементов каркаса, связанных с явной или неявной неразрезностью стропильных и подкрановых конструкций;

- постановка и решение задачи об оптимальном соотношении характеристик изгибной жесткости подкранового и надкранового элементов колонн для проектирования стального каркаса «крановых» цехов;

- разработка способа усиления стальной подкрановой колонны созданием начальных усилий, разгружающих ее от изгиба крановыми нагрузками; проектирование конструкций предварительно напряженной колонны;

- постановка и анализ результатов всех натурных и численных экспериментов.

- разработка идеи об ограничении перекосов мостовых кранов как способа снижения повреждаемости крановых и подкрановых конструкций; участие в разработке конструкции противоперекосных упругих устройств (стабилизаторов); развитие метода расчета боковых сил при перекосах на случай движения и работы мостовых кранов, оснащенных стабилизаторами; постановка задачи об оптимальной настройке стабилизаторов для минимизации боковых сил и улучшения динамических характеристик системы «кран-каркас».

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались на:

- международных конференциях и симпозиумах: «Повышение долговечности строительных конструкций железнодорожного транспорта» (Москва, 1992 г.); «Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций» (Белгород, 1993 г.); «Исследования и строительство в экстремальных условиях» (Москва, 1996 г.); «Металлостроительство - 96. Состояние и перспективы развития» (Донецк-Макеевка, 1996 г.); «Современные



строительные конструкции из металла и древесины» (Одесса, 1997 г.); «Теория и практика металлических конструкций» (Донецк-Макеевка, 1997 г.); «Надежность и безопасность зданий и сооружений в условиях особых воздействий» (Санкт-Петербург, 2001 г.);

– всесоюзных (СССР) конференциях: «Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике» (Вильнюс, 1983 г.); «Индустриальные технические решения для реконструкции зданий и сооружений промышленных предприятий» (Донецк-Макеевка, 1986 г.);

– Украинских республиканских и государственных конференциях по металлическим конструкциям (Днепропетровск, 1973 г.; Мариуполь, 1978 г.; Житомир, 1984 г.; Симферополь, 1988 г.; Киев, 1992 г.);

– региональных тематических конференциях и семинарах: «Вопросы оптимизации при расчете и проектировании металлических конструкций» (Свердловск, 1981 г.); «Вопросы проектирования и эксплуатации фонарей промышленных зданий» (Магнитогорск, 1993 г.);

– научно-практических конференциях ХИИТа - ХарГАЖТ 1971-2001 гг.

В полном объеме законченная диссертационная работа докладывалась: на расширенном заседании научно-технического совета Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В.Н. Шимановского (май 2002 г.); на расширенном заседании кафедры «Строительные материалы, конструкции и сооружения» Украинской государственной академии железнодорожного транспорта (декабрь 2002 г.); на расширенном заседании семинара кафедры металлических конструкций Донбасской академии строительства и архитектуры (январь 2003 г.); на заседании Ассоциации кафедр металлических конструкций ВУЗов СНГ (Киев, апрель 2003 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в монографии, научных журналах и сборниках научных трудов (19 публикаций), материалах и тезисах научных конференций (15 публикаций), авторских свидетельствах (5).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи разделов, общих выводов, списка использованных литературных источников и приложений.

Диссертация изложена на \_\_\_\_\_ страницах, в том числе \_\_\_\_\_ страниц основного текста, \_\_\_\_\_ страниц списка литературы ( \_\_\_\_\_ наименований), \_\_\_\_\_ полных страниц с рисунками и таблицами, \_\_\_\_\_ страниц приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложена общая характеристика работы; названы актуальные задачи, с решением которых связано достижение цели исследования;

перечислены новые результаты, которые удалось получить, сведения о внедрении этих результатов, сведения о выступлениях автора работы перед научной общественностью и публикациях, сведения о структуре и объеме диссертации.

**В первом разделе** выполнен краткий анализ развития конструктивных форм и методов расчета, примененных при создании эксплуатируемых промышленных зданий, оборудованных мостовыми кранами. Приведены примеры характерных повреждений элементов таких цехов от силовых воздействий, которые свидетельствуют о недостатках конструктивных решений и расчетных схем проектирования. Выполнен также аналитический обзор научных трудов, определяющих развитие и совершенствование расчетных моделей, изучения и обоснования расчетных величин крановых воздействий на конструкции промышленных зданий.

Данные о структуре и техническом состоянии Украинского фонда эксплуатируемых металлоконструкций содержится в работах В.Н.Гордеева, Е.В.Горохова, В.П.Королева, М.А.Микитаренко, А.И.Оглобля, А.В.Перельмутера, В.Н.Шимановского, А.В.Шимановского, А.М.Югова.

Задачам и мерам по сохранению основных фондов и реконструкции объектов строительства посвящены также труды Д.Ф.Гончаренко, Ю.А.Зданевича, Н.П.Мельникова, Г.А.Молодченко, В.Ф.Мущанова, В.А.Пермякова, М.М.Сахновского, А.Л.Шагина, С.Н.Шаповалова и др.

Для оценки технического состояния эксплуатируемых конструкций должна быть обеспечена точность поверочных расчетов, близкая к параметрам действительного состояния этих конструкций, что требует уточнения предпосылок проектирования, прежде всего, в отношении схематизации расчетной модели.

Историю развития расчетных предпосылок для анализа работоспособности стальных конструкций производственных зданий можно проследить по работам Е.И.Беленя, Г.И.Белого, М.М.Бердичевского, С.А.Бернштейна, А.Н.Гениева, Н.С.Стрелецкого, J.F.Vaker, М.Зибелинга и др.

Результаты экспериментально-теоретического изучения действительной работы металлоконструкций производственных зданий, имеющие значение для оценки работоспособности таких сооружений, изложены в трудах В.В.Горева, В.В.Зверева, А.И.Кикина, В.С.Казарновского, И.В.Левитанского, Ю.Р.Томлинга, Г.А.Шапиро и др.

Принципы формирования расчетных моделей, адекватно учитывающих действительные условия работы строительных конструкций, обсуждались в публикациях исследований Н.П.Абовского, И.И.Гольденבלата, В.В.Кулябко, В.Н.Мастаченко, А.В.Перельмутера, В.И.Сливкера, В.И.Феодосьева и др.

Моделирование работы системы мостовой кран — подкрановый путь предложено Н.А.Лобовым.

Вопросы совершенствования расчетов сооружений на стадии эксплуатации с применением методов теории надежности разрабатывались в трудах В.В.Болотина, А.Я.Барашикова, Ю.А.Павлова, С.Ф.Пичугина, А.Р.Ржаницына, Ю.И.Тетерина, В.П.Чиркова и др.

В частности, целесообразным является вероятностно-статистический подход к определению характеристик фактической податливости узловых и опорных связей стального каркаса. Такой вывод может быть обоснован анализом работ В.Н.Алехина, Е.И.Беленя, И.Н.Лебедича, А.Б.Ренского, М.Н.Askroyd, R.M.Bennett, R.E.Melchers, G.Z.Tucker и др.

Важное значение для объективной оценки надежности строительных сооружений имеют результаты уточнения вероятных величин временных нагрузок. Существенный вклад в эту проблему сделан трудами М.И.Казакевича, Р.И.Кинаша, Б.Н.Кошутина, В.А.Отставнова, В.А.Пашинского, А.Я.Прицкера, Б.Ю.Уварова и др.

Наиболее трудными для обоснования расчетных величин являются горизонтальные воздействия (боковые силы) на каркас производственных зданий от мостовых кранов. Изучению таких нагрузок экспериментальным путем в натуре и на моделях посвящены работы В.П.Балашова, Е.В.Горохова, И.В.Изосимова, С.Ф.Пичугина, И.Р.Руховича, А.В.Фигаровского, G.Bierett и др.

Изучение действительной работы и причин преждевременного износа промышленных зданий (по данным А.И.Конакова, Ю.С.Эглескална и др.) дает основание для критического отношения к традиционно применяемой конструктивной схеме каркаса и конструктивной форме некоторых его элементов (Н.С.Стрелецкий, К.А.Шишов, В.Ф.Сабуров и др.) а также — продолжения исследований вопросов рационального усиления и совершенствования этих конструкций для удобства технического надзора, ремонтпригодности и продления безопасной работы. В качестве наиболее перспективных, рассматриваются методы, основанные на регулировании и авторегулировании напряженно-деформируемого состояния элементов (предложения В.В.Бирюлева, В.Г.Богзы, Ю.В.Гайдарова, А.С.Городецкого, Л.В.Енджиевского, М.Н.Лашенко, В.С.Шмуклера, M.J.Balas, G.Rozvany и др.) и решении задач оптимального проектирования, имеющих особое значение для обоснования эффективности модернизированных конструкций (труды А.И.Виноградова, В.Н.Гордеева, Я.М.Лихтарникова, Я.И.Олькова, В.А.Пермякова, В.В.Трофимовича, И.С.Холопова и др.).

На основании проведенного анализа определены задачи диссертационной работы.

Структурно-логическая схема поставленных и решенных в данном исследовании задач показана на рис. 1.

**Второй раздел** посвящен постановке задачи формирования адекватных расчетных моделей каркаса эксплуатируемых цехов и обоснованию необходимых уточнений, которые нужно сделать для приближения этих моделей к действительной работе конструкций.

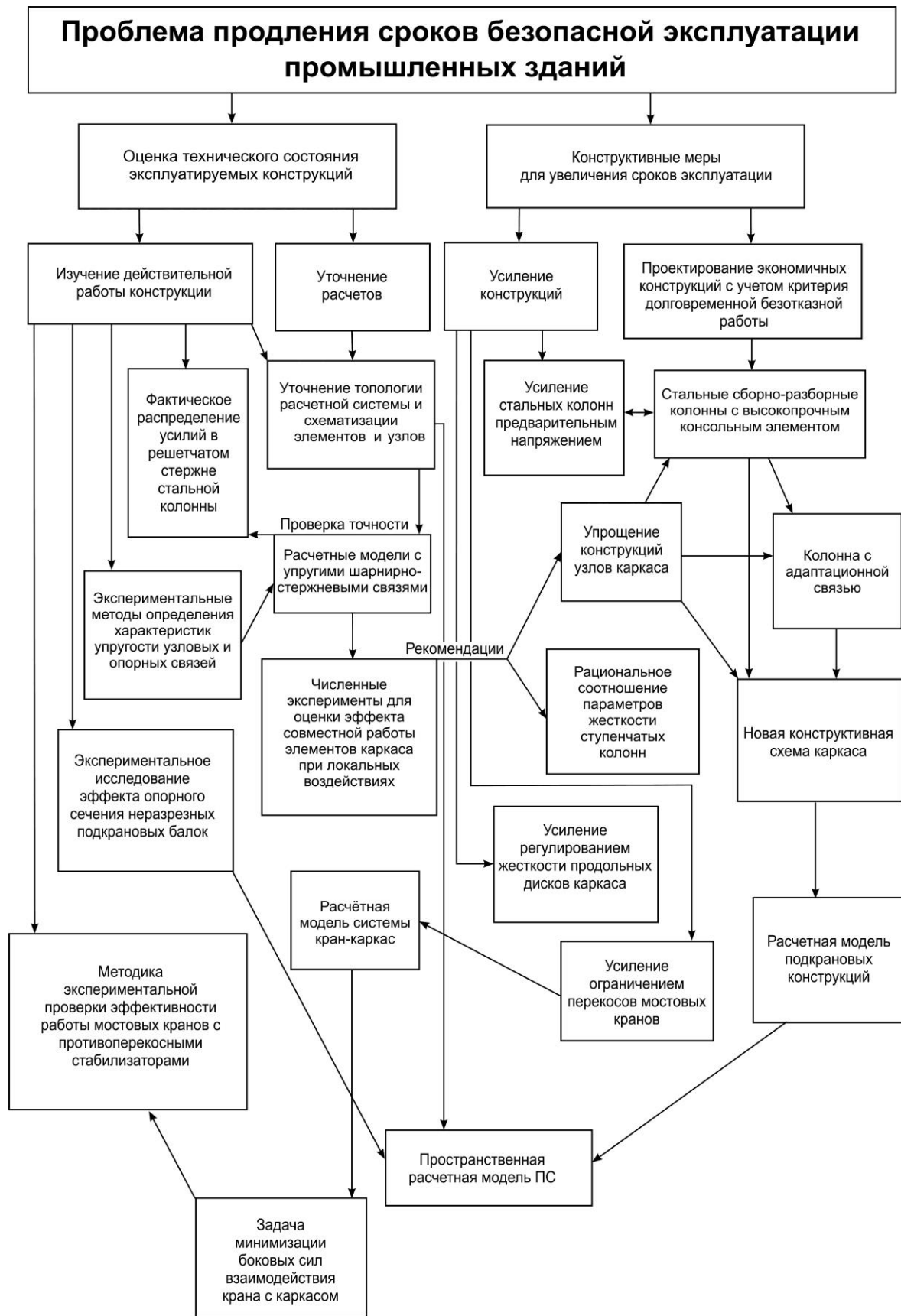


Рис. 1. Структурно-логическая схема, решенных в данном исследовании задач

Выбор рационального варианта расчетной модели, как известно, является задачей синтеза по критерию точности расчетов, близкой к параметрам

фактической работы конструкций, которые устанавливаются по экспериментальным данным.

Адекватная расчетная модель формируется, в общем случае, путем последовательных уточнений - либо поэтапным усложнением исходной упрощенной (при проектировании) схемы, либо поэтапным упрощением полной схемы каркаса. Уточняющие изменения вносятся на основе новых данных о действительной работе и техническом состоянии эксплуатируемых конструкций, а также – на основе результатов численных экспериментов.

Рассмотрены следующие задачи уточнений:

- схематизации топологии расчетной системы таким образом, чтобы учесть все элементы и связи, которые существенно влияют на распределение усилий и деформации моделируемых конструкций;

- схематизации элементов, с учетом их фактического конструктивного оформления, и определения их расчетных параметров, с учетом дефектов и повреждений;

- моделирования узлов, с учетом фактической упругой податливости.

При формировании адекватных расчетных моделей с указанными уточнениями учитывалось, что:

- возможности современного программного обеспечения для ЭВМ, разработанного в Украине, позволяют рассчитывать стержневые системы любой сложности;

- реализация идеи уточнения за счет учета большого количества элементов не является целесообразной, если пользоваться не реальными, а идеализированными характеристиками, так как при большой размерности задачи, в такой постановке, погрешность расчетов будет увеличиваться;

- для большинства эксплуатируемых цехов применена конструктивная схема каркаса, основанная на реализации принципа концентрации материала, поэтому решение указанных задач уточнения проводилось путем совершенствования традиционно используемых схематизаций – подсистем поперечных и продольных конструкций каркаса; такой подход позволяет подробно учесть индивидуальные особенности и реальные условия работы этих конструкций, а также – те наработки предыдущего поколения ученых и инженеров, которые сохраняют свое значение при рассмотрении вопроса с современных позиций;

- к построению пространственных расчетных моделей различной сложности необходимо обращаться в случаях анализа многосвязной конструктивной схемы, учета локальных воздействий на значительную часть каркаса, а также – в случаях применения неразрезной или рамной внутрицеховой подкрановой эстакады, когда учет совместной работы поперечных и продольных конструкций нужен – либо по критерию выявления максимальных напряжений

(раздел 5), либо по критерию рационального управления напряженно-деформируемым состоянием (раздел 7 диссертации).

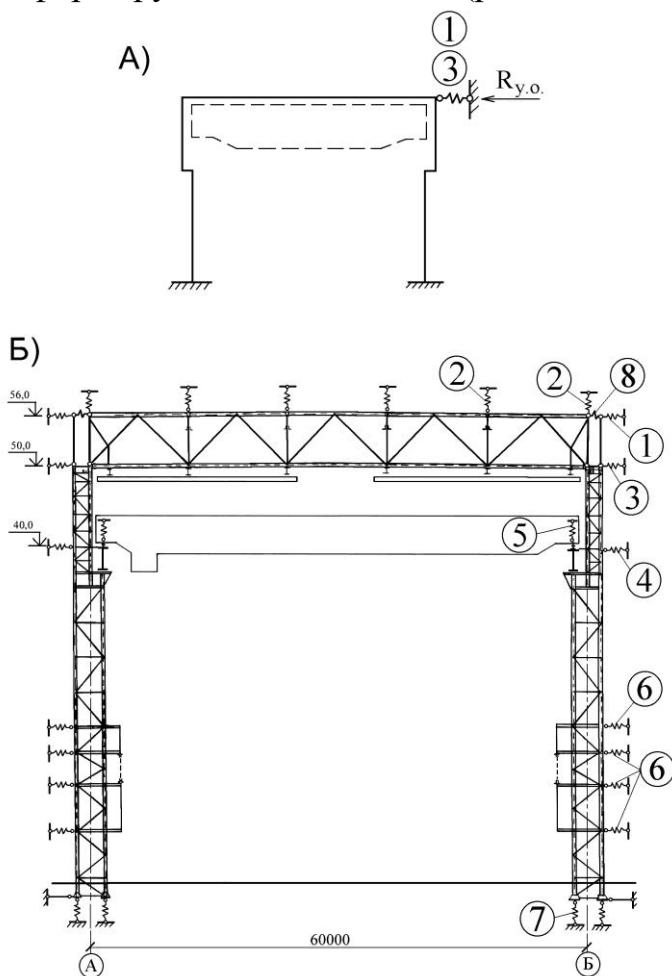


Рис. 2. Расчетные модели локально нагружаемых поперечных рам каркаса: А) исходная упрощенная; Б) уточненная

На первом этапе уточнений исходной расчетной схемы поперечных конструкций каркаса (рис. 2А) делается дополнительный учет элементов и параметров системы, существенно влияющих на ее работу в своей плоскости. Примерами из практики обследования сооружений и соответствующими расчетами показано, что, при формировании адекватных моделей нужно учитывать:

- фактическое конструктивное оформление решетчатых элементов - схематизацией их плоскими фермами с неразрезными поясами (рис. 2Б); такое уточнение выявляет, по сравнению с известной методикой поэтапного расчета с использованием исходной схемы (рис. 2А), разницу в величинах усилий до 10 – 20 %, причем, из-за такой погрешности возможно перенапряжение ответственных элементов – поясов ригеля и подкрановых ветвей колонн;

- совместную работу стропильных конструкций с фонарными фермами, которые, для зданий прошлой (30 лет и более) проектировки, имеют значительные размеры и жесткость элементов; приведенные результаты расчетов статически неопределимых (с учетом неразрезности поясов) стропильно-фонарных систем подтверждают перераспределение усилий (по сравнению с исходными проектными схемами) с догрузением и опасным изменением знака усилий, в одних случаях, и резервированием несущей способности с обеспечением «живучести» конструкций в аварийных ситуациях – в других;

– работу неучтенных при проектировании элементов и связей, создающих частичную неразрезность и распорность стропильных ферм, что приводит к сжатию и искривлению приопорных панелей нижних поясов (фонарных ферм, расположенных над средними опорами стропильных конструкций; связей, моделирующих конструктивное замыкание верхних поясов этих конструкций кровельным диском; связей и элементов здания, увеличивающих горизонтальную жесткость каркаса в уровне нижних поясов стропильных ферм; монтажных связей не устраненных после окончания работ и др.);

– податливость связей, моделирующих конструктивно малую жесткость соединений, в том числе – фактическую податливость узловых и опорных креплений элементов каркаса, которые предложено моделировать упругими шарнирно-стержневыми связями единичной длины (элементы 7 и 8 на рис. 2Б) и определять осевую жесткость этих связей по результатам натуральных испытаний (раздел 4 диссертации).

**Третий раздел** посвящен моделированию конструкций каркаса промышленных зданий для расчета на локальные воздействия (нагрузки от мостовых и подвесных кранов, перегрузы участков покрытия и перекрытий, деформации основания и др.) В таких случаях адекватная расчетная модель дополняется упругими связями (рис. 2Б), которые интегрально учитывают влияние на работу локально загруженной плоской подсистемы остальных элементов каркаса, не представленных на схеме в явном виде.

На расчетной комбинированной системе (КС) поперечных конструкций каркаса (рис. 2Б) указанные упругие связи расставлены в соответствии с известным допущением, что эффект ее пространственной работы в системе каркаса обеспечивается т.н. «продольными дисками» - кровельным (1), связевыми (3), подстропильными, стропильными (в продольном направлении здания) и фонарными фермами (2), подкраново-тормозными (4 и 5), дисками перекрытий (6) и др. В отличие от исходной проектной схематизации (рис. 2А) со всеми уточнениями, которые были внесены, начиная с 40-х годов, данная расчетная модель учитывает любое число и расположение продольных дисков, позволяет рассчитывать нерегулярные схемы каркаса (разная высота пролетов, разный шаг колонн и др.) на различные, а не только крановые локальные воздействия.

Учитывая стержневое моделирование упругих связей, можно обойтись без составления матрицы податливостей, и использовать для расчета данной системы готовое программное обеспечение («Лира», «Скад»), при наличии, в числе исходных данных, величин осевой жесткости упругих связей.

В общем случае, эти характеристики определяются из условия совместности деформаций таких связей и соответствующих продольных дисков в узлах их крепления к поперечным рамам - от единичной силы.



Если продольный диск рассматривать как неразрезную балку, то используется формула:

$$(EA)_{cv} = \frac{\bar{P} \cdot \bar{l}_{cv}}{\Delta_{\delta}^u}, \quad (1)$$

при условии, что нужно сделать дополнительный расчет величины смещения упругой опоры этой балки  $\Delta_{\delta}^u$  от  $\bar{P}$ .

Если известна жесткость продольного диска на сдвиг, то можно пользоваться формулой:

$$(EA)_{cv} = \frac{G \cdot A_{\delta} \cdot \bar{l}_{cv}}{a}, \quad (2)$$

которая выведена при допущениях, что сдвиг диска происходит в плоскости локально загруженной поперечной рамы, что он одинаков на всей ширине диска и что для данного случая справедлив закон Гука при сдвиге. В этой формуле  $a$  – шаг поперечных рам.

Для типовых конструкций горизонтально расположенных продольных дисков составлена таблица характеристик жесткости соответствующих упругих связей (табл. 1), которая может быть использована при составлении адекватных расчетных моделей.

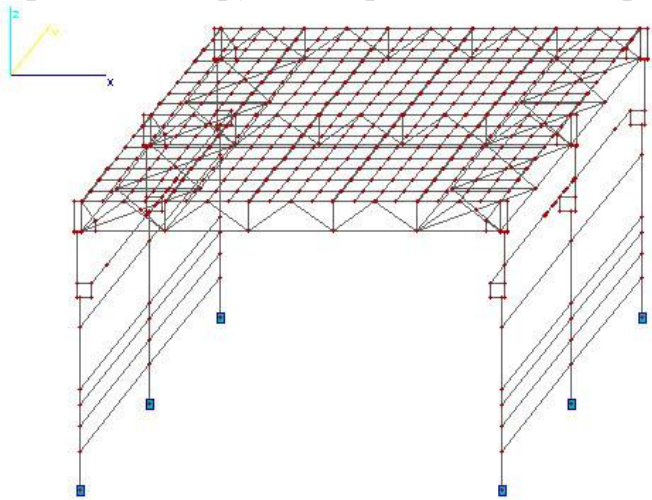
Таблица 1

### Жесткости упругих связей

№№ свя- зей	Конструкция продольного диска	Шаг поперечных рам, м	$(EA)_{cv}$ , кН
1	Сборные железобетонные плиты 3,0×12,0 м	12,0	30000
1	Сборные железобетонные плиты 1,5×6,0 м	12,0	21000
1	Мелкоразмерные (0,5×1,5 м) сборные железобетонные плиты по прогонам.	6,0	15000
1	Стальной профилированный настил по прогонам, с креплением в каждой волне.	12,0	5500
1	Стальной профилированный настил по прогонам, с креплением через волну.	12,0	300
3	Связи по нижним поясам стропильных ферм, крестовые, из уголков. Крепление на сварке.	12,0	1500
4	Тормозные балки (стальной лист - 1000×7 мм). Крепление на сварке.	12,0	3000
4	Тормозные фермы ( $h_{cp} = 1,2$ м). Крепление на сварке.	12,0	2000

Рациональность предлагаемой расчетной модели (КС) обоснована сравнением ее по точности результатов расчетов усилий и деформаций от

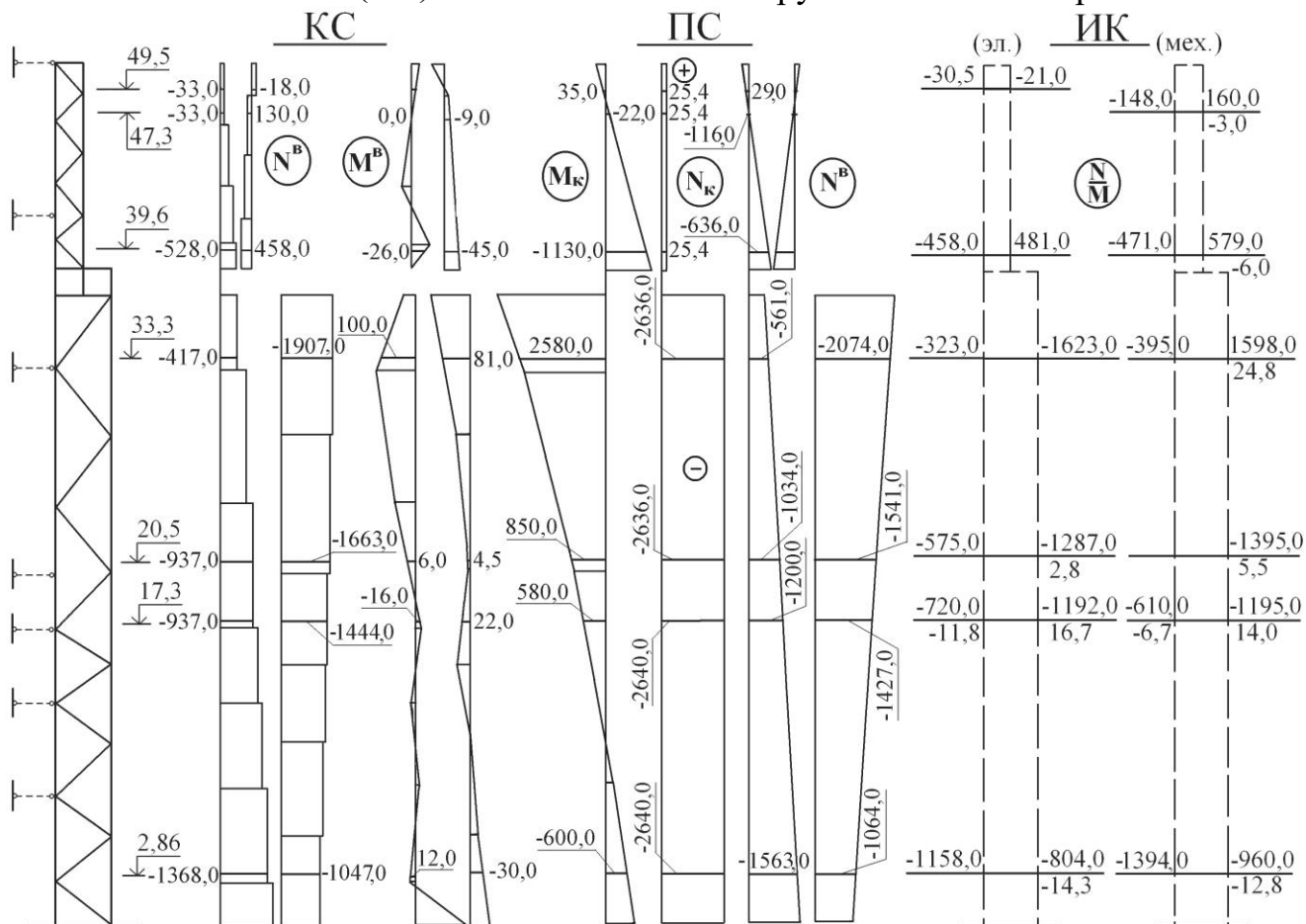
различных локальных воздействий с пространственной моделью ПС (рис. 3). Адекватность ее проверена результатами натурных испытаний объекта расчета – стальной колонны каркаса цеха. Указанные результаты (ИК) – усилия, по показаниям электрических и механических тензометров, от вертикальной крановой нагрузки – представлены на рис. 4.



Показано, что расчетная модель КС с упругими связями удобна для решения задач синтеза, требующих анализа большого объема расчетной информации, например:

- исследование влияния и значимости различных продольных дисков на распределение усилий и величины деформаций поперечных конструкций каркаса;
- оптимизация параметров расчетной подсистемы;
- вариантное проектирование конструктивных схем каркасов.

Рис. 3. Пространственная расчетная модель (ПС)



Размерности усилий: N (кН), M (кН×м)

Рис. 4. Сравнение результатов расчетов на КС и ПС  
с данными натурных испытаний

Для решения первой из указанных задач в диссертации поставлены численные эксперименты на объектах с различными размерами и конструктивными решениями элементов каркаса. Для определения усилий и перемещений использовались варианты расчетных моделей, производных от базовой (рис. 2Б) с последовательным включением упругих связей в разных уровнях, т.е. первый вариант модели вообще их не имел, а последний – имел полный набор (1-6). Результаты этих расчетов показали, что регулированием количества и жесткости продольных дисков можно усиливать поперечные конструкции каркаса, например, при увеличении технологических нагрузок жесткость таких связей нужно увеличивать, а при неравномерных осадках опор – «выключать» их из работы или уменьшать жесткость «абсолютно необходимых» связей.

Расчеты подтвердили известные выводы о том, что учет эффекта пространственной работы значительно повышает горизонтальную жесткость поперечных конструкций каркаса и разгружает от изгиба, особенно при горизонтальных локальных воздействиях, опорные сечения колонн. Это, в свою очередь, позволяет критически пересмотреть известные рекомендации для проектирования:

- о целесообразности применения „жестких” улов сопряжения ригелей и колонн поперечных рам;
- о рациональном соотношении характеристик изгибной жесткости подкрановых и надкрановых участков ступенчатых колонн каркаса промышленных зданий.

С учетом последнего, была поставлена и решена задача оптимизации этого соотношения, что имеет значение для предварительного назначения параметров статически неопределимой системы КС (или другого, например, пространственного, варианта, расчетной модели).

Оптимальное решение, согласно классической постановке задачи по А.И.Виноградову, определено при рассмотрении множества систем с заданным очертанием осей, а математически, как обычно, определялась минимальное значение целевой функции при ограничениях на параметры системы и параметры состояния. Усилия от крановых нагрузок определялись на расчетной системе с упругими связями.

Оптимальное соотношение параметров системы получилось достаточно стабильным для различных условий проектирования однопролетных цехов (заданных отделом теоретических исследований ЦНИИПСК).

Для поперечных рам с жесткими узлами  $n_{omm}^{жс} = 4,0 \div 5,0$ , - с узлами, податливыми при повороте  $n_{omm}^{ш} = 7,0 \div 9,0$ , что позволяет уточнить известные рекомендации, сделанные на основании инженерного опыта:  $n^{жс} = 5,0 \div 10,0$ ;  $n^{ш} = 15,0 \div 20,0$ .

**Четвертый раздел** диссертации посвящен вопросам определения характеристик упругой податливости и моделирования узловых и опорных связей «верхних» и «нижних» узлов каркаса (узлов сопряжения элементов и крепления этих элементов к фундаментам).

Исследование указанных вопросов проведено при следующих предпосылках:

– достаточно достоверную информацию о фактической жесткости узловых и опорных связей можно получить только из опыта - по результатам экспериментов на натуре; теоретическое решение такой задачи является очень сложным из-за необходимости учета вероятности снижения жесткости элементов в узлах в процессе постепенного износа (ослабление болтовых соединений, деформации фланцев и пластин, дефекты сварных швов, коррозия и другие факторы, имеющие случайную природу), а для «нижних» узлов – еще свойства и состояние грунтов основания;

– жесткость узлов оценивается по величине изгибающих моментов от испытательной нагрузки, в качестве которой используется вертикальное давление, передаваемое на каркас мостовыми кранами.

Для достоверности экспериментальных данных о работе узлов, статические испытания (измерение, с помощью электротензометрии, усилий, характеризующих степень защемления элементов каркаса в узлах) совмещались с динамическими.

При разработке методики и проведении динамических испытаний:

– используется возможность (при объединении тензодатчиков в мост) записывать осциллограммы изгибающих моментов в поперечных сечениях колонны каркаса и определять величины этих усилий по таким реализациям;

– используются в качестве параметров распределения усилий безразмерные функции, определяющие положения нулевых точек характерной для колонны «кранового» цеха эпюры изгибающих моментов (рис. 5):

$$\frac{M_2 - M_1}{M_2} = K_{1-2} = \frac{Z_{1-2}}{Z_{1-2} - Z_6}; \quad \frac{M_3 - M_4}{M_3} = K_{3-4} = \frac{Z_{3-4}}{Z_{3-4} - Z_4}; \quad (3)$$

Эти функции считаются случайными, распределенными по нормальному закону;

– для определения обоснованных величин  $K_{1-2}$  и  $K_{3-4}$  по вероятностным характеристикам (математическое ожидание и дисперсия), используются, с

целью получения статистической выборки, осциллограммы (рис. 6) усилий в четырех поперечных сечениях колонны, записанные в разное время;

– экспериментально полученная эпюра изгибающих моментов (с помощью величин  $K_{1-2}$  и  $K_{3-4}$ ) используется для оценки степени защемления колонны упругими связями.

Результаты статических и динамических испытаний каркасов зданий, отличающихся, разными типами узловых соединений выявили **в отношении «верхних» узлов:**

– возможное (и частое) отличие работы элементов в типовых жестких узлах от расчетных предположений (из-за неудачных проектных решений, по-

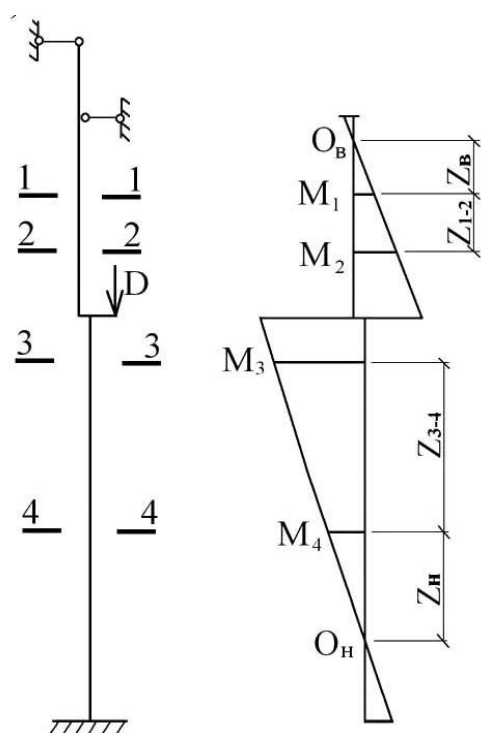


Рис. 5. Общий вид эпюры изгибающих моментов от нагрузки «Д»

грешностей монтажа, постепенного износа);

– соответствие работы узлов - с опиранием ригелей на колонны «сверху» - податливой при поворотах схеме, предполагаемой проектом;

**в отношении «нижних» узлов:**

– существенное отличие фактических и расчетных (жесткое защемление) усилий по причинам податливости основания, недостаточной анкеровки и др.; необходимость корректировки расчетной модели для учета этих и других обстоятельств, снижающих жесткость узла.

Для замены на расчетных моделях жестко защемленных узлов на упругие связи нужно экспериментально определять характеристики таких

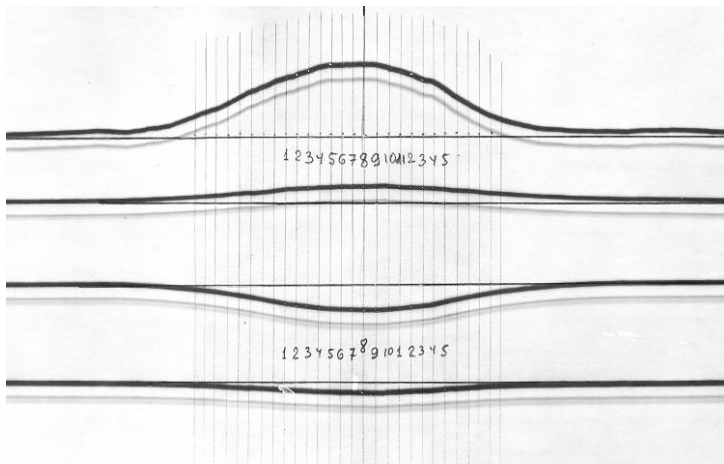


Рис. 6. Осциллограммы усилий в поперечных сечениях колонны

связей, учитывающие возможность упругих осадок и поворотов опор. При допущении, что податливость опорных связей каркаса оценивается по величинам упругих перемещений точек колонны в зоне «нижнего» узла, от испытательной нагрузки, разработана и реализована методика измерения таких перемещений с помощью прогибомеров по дистанционной схеме.

Данные измерений и соответствующие им величины испытательных силовых воздействий дают возможность определить коэффициенты податливости основания.

Схематизация опорных связей на расчетных моделях выполняется с использованием упругих стержней единичной длины, жесткость которых соответствует указанным выше характеристикам.

**В пятом разделе** диссертации представлены результаты экспериментально-теоретического исследования неизвестных, по-видимому, особенностей фактического напряженно-деформируемого состояния элементов неразрезной внутрицеховой подкрановой эстакады, которое нужно учитывать при оценке эксплуатационной пригодности таких конструкций.

При проведении испытаний эстакады с неразрезными подкрановыми балками (6×24,0 м), установленными на высокие колонны, измерения выявили неожиданно высокий уровень напряжений в крайних точках нижнего пояса опорного сечения балки (в 2,5 раза больше теоретических, по проекту) и такие же, примерно, «ответные» напряжения в подкрановой ветви колонны. Причем, положение точек с наибольшими напряжениями зависит от положения крановой нагрузки – со стороны загруженного и незагруженного пролетов эти точки расположены по диагонали относительно опоры, а при переезде крана через опору в соседний пролет ситуация меняется косо-симметрично (рис. 7).

Исследование этого явления, названного «эффектом опорного сечения», проведено поэтапно. Теоретически – расчетом на различных вариантах расчетных моделей, учитывающих упругие осадки и повороты опор, влияние косо

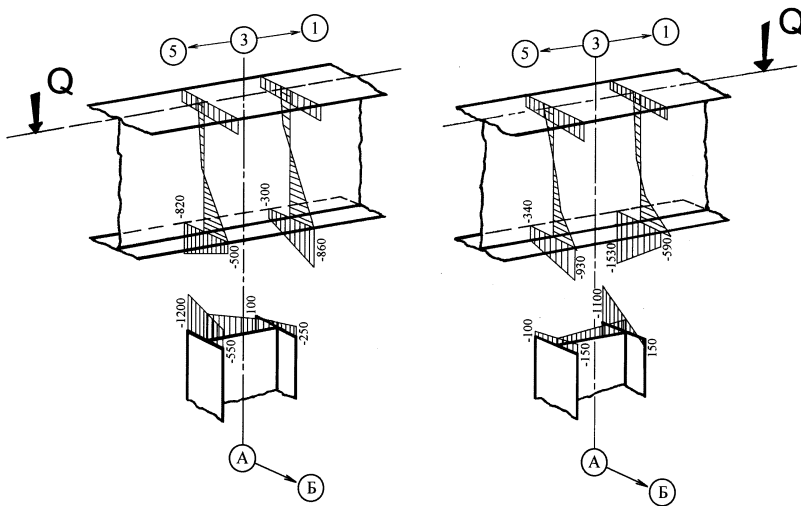


Рис. 7. Результаты статических испытаний «балка-колонна»

изгиба и стесненного кручения, совместную работу балки и колонны (пространственная модель) с выявлением характера деформаций и величин напряжений в зоне опорного узла. Экспериментально – последовательным уточнением методики испытаний – статических (измерение напряжений в точках) и динамических (запись графиков изменения этих напряжений во времени), а

также – выявлением поворотов подкрановой ветви колонны с помощью нивелира с лазерной приставкой, зеркал и приемного экрана.

Сделано заключение, что «эффект опорного сечения» обусловлен сложными изгибно-крутильными деформациями подкрановой балки и колонны в зоне узла их сопряжения, которые можно объяснить такими причинами:

- асимметричность тонкостенного профиля подкраново-тормозного стержня и влияние эксцентриситета крановой нагрузки относительно центра изгиба;

- неудачная (не применяемая в современных конструкциях, но характерная для долговременно эксплуатируемых цехов) конструкция узла опирания подкрановой балки на колонну (непосредственно через нижний пояс), в соответствии с которой нагрузка от крана передается от балки на край опорной грани колонны и которая создает взаимное упругое защемление элементов эстакады в таком узле, приближая ее к работе рамной системы;

- наличие, в связи с работой подкрановой балки как неразрезного ригеля рамной эстакады, значительных продольных сил, существенно эксцентричных относительно центров изгиба подкраново-тормозной балки и колонны.

Расчетная модель, которая бы достаточно точно учитывала все указанные обстоятельства и воспроизводила бы реальную картину напряженного состояния приопорных элементов балки и колонны, получается очень сложный, составленный из большого числа конечных элементов – пластин. Поэтому, при проектировании неразрезных подкрановых эстакад рекомендуются известные

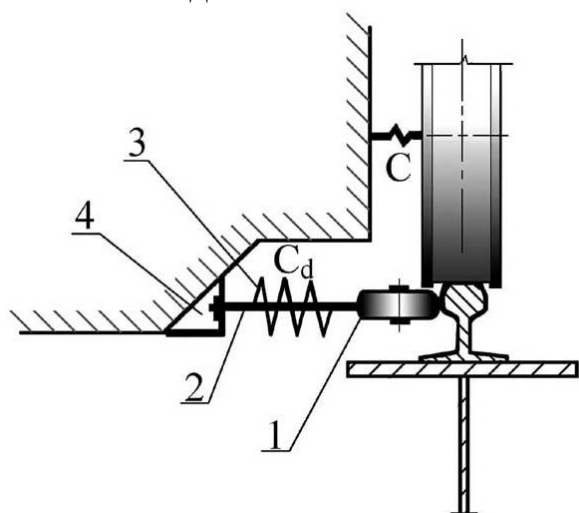
конструктивные меры, исключая или снижающие «эффект опорного сечения». А при обследовании конструкций, реализованных в прошлые годы, основным методом выявления максимальных напряжений остается экспериментальный, на основе методических разработок, приведенных в данном разделе.

**Шестой раздел** диссертации посвящен методу повышения надежности крановых и подкрановых конструкций ограничением перекосов мостовых кранов.

Известно, что боковые силы упругого динамического взаимодействия ходовых колес с рельсами, при движении и работе мостовых кранов с перекосами, являются причиной преждевременного износа указанных элементов, а также креплений и соединений рельсов, подкрановых и тормозных балок, что ведет к сокращению сроков безотказной эксплуатации цеха.

При разработке данного метода принималось во внимание, что для большинства мостовых кранов перекосы являются неизбежными (в силу зависимости их от многих причин), поэтому нужны специальные конструктивные меры для ограничения перекосов в пределах проектных зазоров между рельсами и ребрами ходовых колес.

С этой целью, предложено устанавливать между краном и подкрановыми конструкциями упругие противоперекосные устройства (стабилизаторы), основным элементом которых (рис. 8) является пружинный демпфер (3). При движении мостового крана стабилизаторы, контактируя с рельсами через роликовые балансиры (или одиночные ролики), изменяют силовое взаимодействие крана с каркасом, ограничивают перекосы и обеспечивают плавность хода.



**Рис. 8. Схема устройства и установки стабилизаторов**

Эффективность предлагаемого метода подтверждена экспериментально и теоретически.

На базе известной схематизации (Н.А. Лобов) «кран-путь» составлена расчетная модель, которая описывает процесс движения крана с перекосами и включение стабилизаторов в работу (рис. 9).



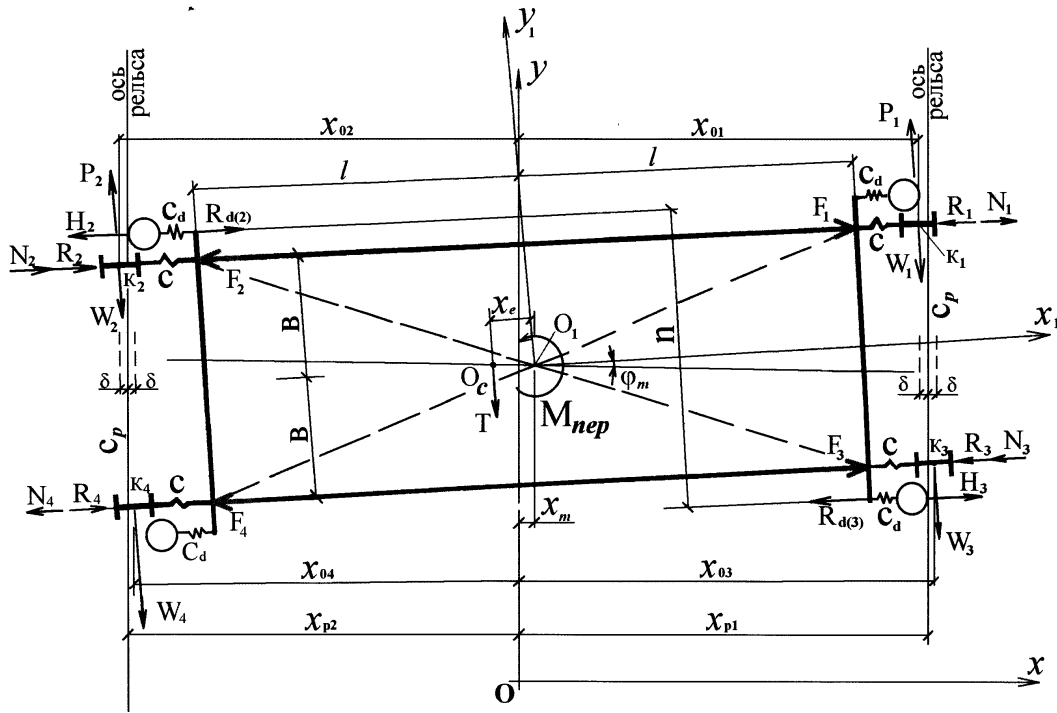


Рис. 9. Расчетная модель системы кран-путь с упругими противоперекосными связями

Соответственно изменены дифференциальные уравнения несвободного движения крана:

$$\begin{cases} m_n \cdot \ddot{x} = \sum_{i=1}^4 F_i - R_{d1} - R_{d3} + R_{d2} + R_{d4}; \\ J_0 \cdot \ddot{\varphi} = (P_1 - P_2 + W_2 - W_1) \cdot l + \sum_{i=1}^4 F_i \cdot b + \sum_{i=1}^4 R_{di} \cdot n / 2; \\ N'_i = R_i - F_i \geq 0; \quad N''_i = F_i - R_i \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

Первое уравнение системы (4) описывает поперечное движение центра моста, второе – его вращательное движение (уравнения Лагранжа второго рода), уравнения, записанные третьими в этой системе, определяют соотношение сил, действующих на колеса крана.

Разработано и используется программное обеспечение «Stub» для ЭВМ, которое позволяет выполнять анализ движения крана и синтез параметров настройки стабилизаторов.

Для мостового крана грузоподъемностью 15 тс решение такой задачи показывает, что при рациональных величинах этих параметров максимальная величина боковой силы может быть снижена до 12 кН (рис. 10), а величины боковых сил контакта реборд колес с рельсами, полученные экспериментально, в среднем, в 1,5-2 раза больше.

Экспериментальная проверка эффективности работы мостового крана оснащенного стабилизаторами, выполнена при значительных отклонениях подкрановых путей от идеальной трассы (ГП «Завод им. Малышева, г. Харьков). До установки стабилизаторов кран работал с «упругими» перекосами (наличие силового контакта колес с рельсами). Замена ходовых колес производилась, в среднем, через каждые полгода.

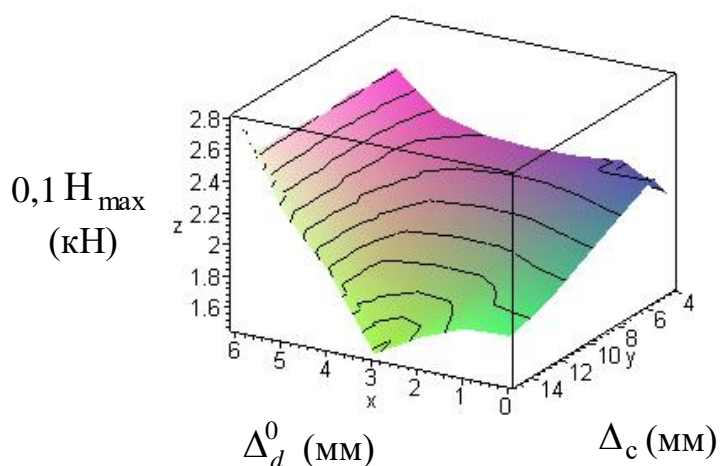


Рис. 10. Графическое представление задачи минимизации  $H_{\max}$  в зависимости от параметров  $\Delta_d^0$ ,  $\Delta_c$

( $\Delta_c$  – размер, определяющий начальное положение ролика стабилизатора относительно реборды колеса и боковой поверхности головки рельса,  $\Delta_d^0$  – предварительная деформация пружины демпфера)

Согласно программы испытаний, были выполнены: контроль отсутствия упругих перекосов; запись величин боковых сил контакта роликов стабилизаторов с рельсами; запись формы и интенсивности горизонтальных колебаний.

Испытания подтвердили работоспособность противоперекосных устройств и соответствие фактических максимальных боковых сил, передаваемых стабилизаторами на каркас, их расчетно-теоретическим величинам.

Динамические характеристики системы «кран-каркас», при наличии дополнительных упругих элементов, значительно улучшились (рис. 11).

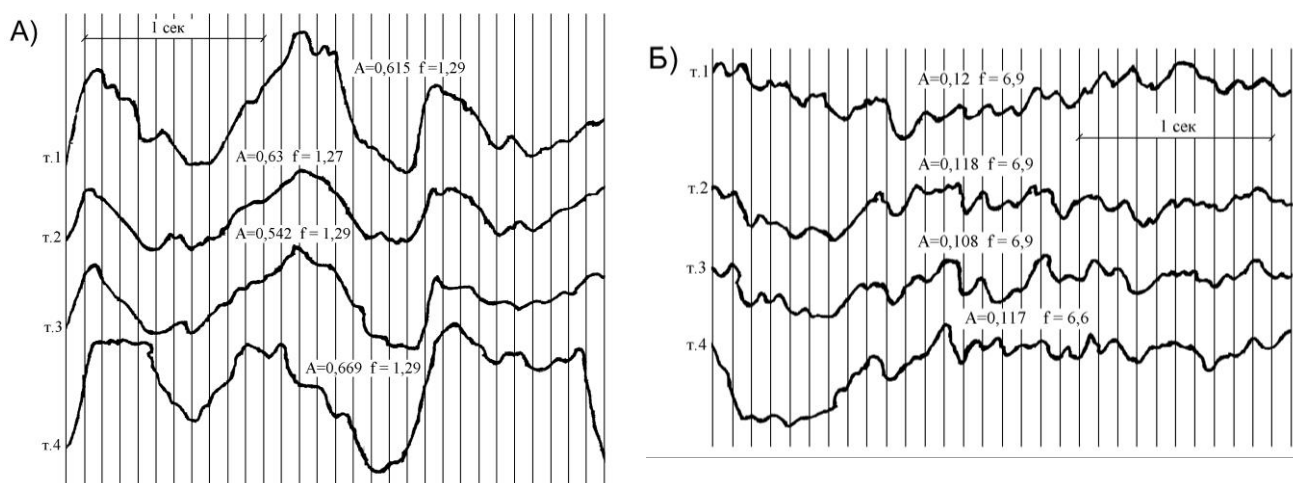


Рис. 11. Виброграммы при движении крана: А) без стабилизаторов;  
Б) с участием стабилизаторов

Частоты колебаний, в среднем, увеличились в 4 раза, амплитуды – уменьшились в 2,5 раза, время затухания колебаний сократилось до 0,3 сек.

Заключительный **седьмой раздел** содержит авторские предложения для усиления и совершенствования конструкций каркаса производственных зданий, в соответствии с актуальной задачей обеспечения удобства технического надзора, ремонтпригодности, долговечности.

На основе принципов разделения функций несущих конструкций, упрощения конструктивной формы, регулирования и авторегулирования усилий, использования высокопрочных элементов и соединений разработана новая конструктивная схема каркаса, которая отличается следующими особенностями:

1. Подкрановая эстакада цеха отделена от стенового ограждения, которое передает нагрузки от собственного веса и ветровых воздействий на фахверк, установленный по всему периметру здания, кровля поддерживается всеми колоннами каркаса;

2. Колонны каркаса, несущие крановые мосты, выполняются двух марок – К1 (рис. 12) и К2 (рис. 13), чередуясь через 12 м. Конструкции стержня этих колонн выполняются из широкополочных двутавров (лучшая конструктивная форма для изготовления, контрольных осмотров, защиты от коррозии).

Консольные элементы изготовлены из высокопрочной стали; соединение их с другими элементами колонны выполняется фрикционным (на высокопрочных болтах), что повышает надежность в зоне динамических крановых воздействий.

При разработке конструкции колонны К1 реализован принцип активной приспособляемости к увеличению давления крановой нагрузки, который реализуется следующим образом.

Подкрановая балка устанавливается на консольный элемент колонны, который имеет неподвижную цилиндрическую опору. Роль второй (упруго-податливой) опоры подкрановой консоли выполняют элементы усиления (стальные канаты или жесткие стержни из высокопрочной стали).

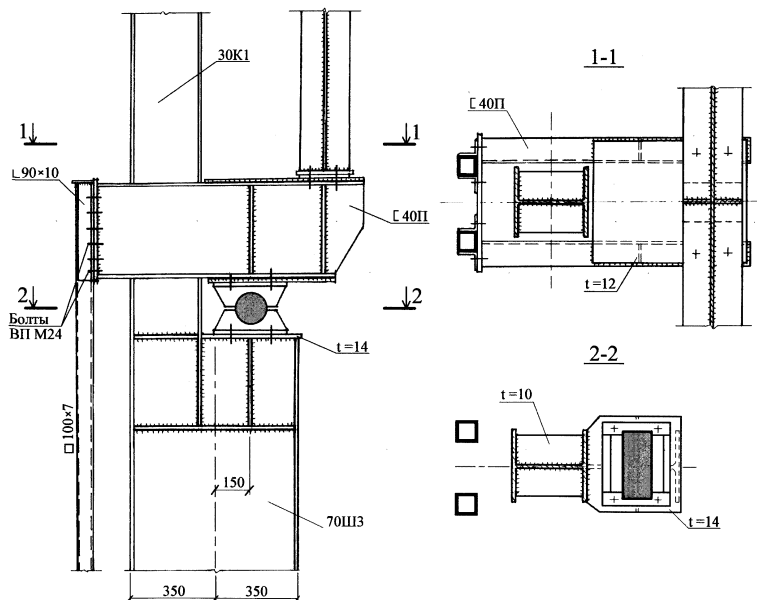


Рис. 12. Вариант конструкции стальной колонны К1 с авторегулируемым усилением

При наезде кранового поезда элементы усиления (регулирования) включаются в работу колонны, ограничивая поворот консоли и вертикальные перемещения подкрановой балки в пределах нормативных допусков. Причем это включение является авторегулируемым: чем больше нагрузка, тем больше реактивное натяжение элементов усиления. Передача давления кранов на подкрановую часть колонны через шарнирную опору дает возможность уменьшить плечо внешнего изгибающего момента.

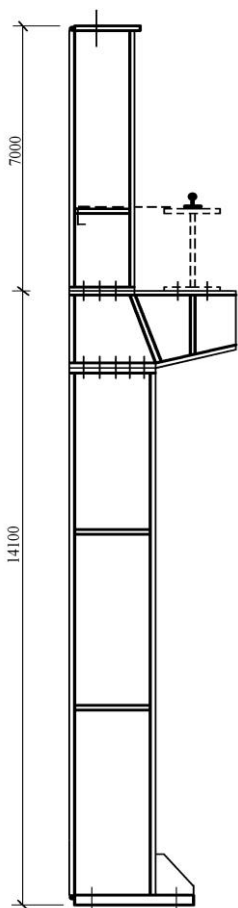


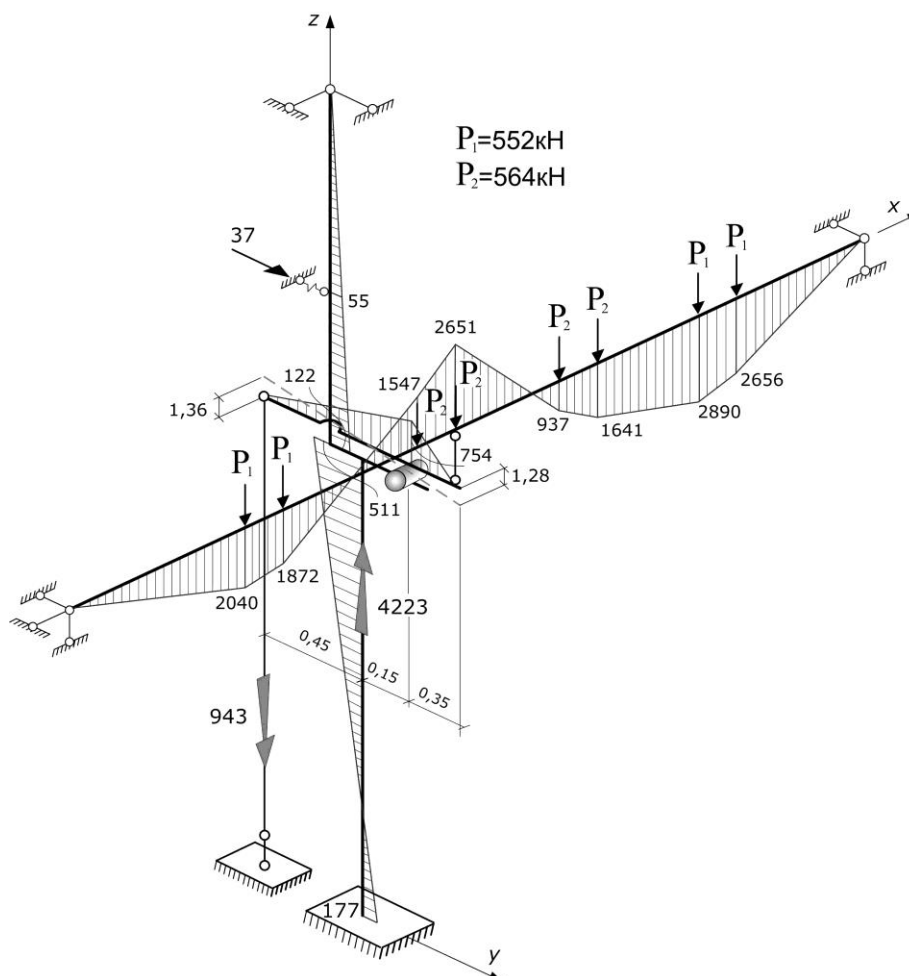
Рис. 13.  
Стальная  
колонна К2

3. Подкрановые балки – неразрезные двухпролетные. Средней опорой таких балок являются колонны К1. Расчетная осадка таких опор (ограничения упругими деформациями элементов усиления и нормированными допусками для подкрановых путей) позволяет рационально выравнивать максимальные изгибающие моменты на опорах и в пролетах балки.

4. Колонны К2, являясь крайними опорами неразрезных балок, будут менее нагруженными мостовыми кранами. С учетом, также, разгрузки от ветровых воздействий, можно подбирать конструкции стержней колонн К1 и К2 из одинаковых профилей.

Проведено сравнение новой конструктивной схемы каркаса с типовыми для 70-х годов конструкциями механосборочного цеха, оборудованного мостовыми кранами грузоподъемностью 100 тс.

Расчеты элементов нового каркаса выполнены на пространственной расчетной модели (рис. 14), достаточно точно учитывающей условия совместной работы неразрезной подкрановой балки с колонной, где установлена авторегулируемая обратная связь по отношению к крановой нагрузке.



Усилия – в кН, кН×м, размеры – в м, перемещения – в см

Рис. 14. Расчетная модель новой конструктивной схемы каркаса

Параметры этой системы – характеристики осевой и изгибной жесткости элементов и положение шарнирной опоры под консолью колонны - подобраны таким образом, чтобы распределение усилий отвечало указанным выше критериям рациональности: наибольшему эффекту разгрузки стержня колонны К1 и равенству максимальных изгибающих моментов на опоре и в пролете подкрановой балки.

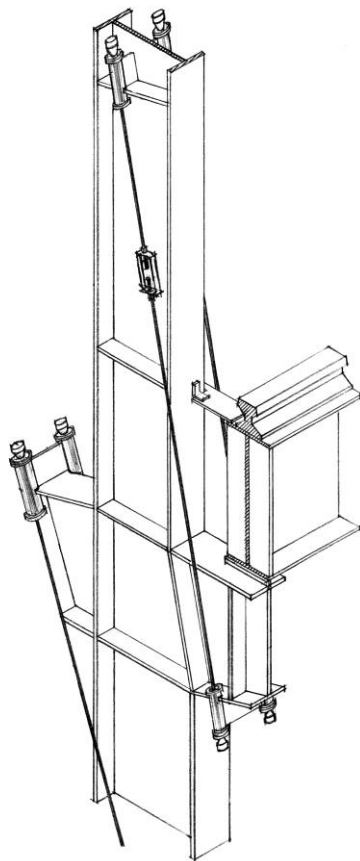
При выполнении этих условий новая конструктивная схема лучше традиционной по первоначальным затратам стали (табл. 2).

Важное значение имеют эксплуатационные преимущества нового каркаса. Кроме отмеченных выше, он учитывает возможность возрастания нагрузок при моральной амортизации цеха: большинство элементов каркаса являются сборно-разборными; элементы усиления в колонне К1 могут быть заменены на более мощные; колонну К2 можно усилить предварительным напряжением с помощью затяжек (рис. 15).

Таблица 2

№№	Элементы каркаса	Расход стали (т)
----	------------------	------------------

п/п		традиционная к.с.	новая к.с.
1.	Стропильные фермы	12,5	12,5
2.	Подстропильные фермы	5,6	-
3.	Подкрановые балки	25,6	19,4
4.	Колонны каркаса	59,8	55,3
5.	Стойки фахверка		72,0
	Всего на ячейку к.с.	103,5	94,4
	На 1 м <sup>2</sup>	0,144	0,131



Суть этого предложения – в создании начальными усилиями момента, обратного по знаку изгибающим усилиям от давления кранов на колонну с эксцентриситетом. Показано, что рационально направлять такие разгружающие усилия соответственно очертанию эпюры крановых изгибающих моментов и подбирать параметры затяжек (длину, положение точек крепления, усилия натяжения) из условий равенства максимальных напряжений в опасных сечениях колонны.

Рис. 15. Вариант усиления колонны К2 (фрагмент)

## ВЫВОДЫ

В результате исследований, представленных в данной диссертационной работе, решены актуальные задачи важной научно-технической проблемы обеспечения безотказной эксплуатации и продления ресурса промышленных зданий, оборудованных мостовыми кранами.

С учетом конструктивных особенностей таких зданий и причин характерных повреждений, разработаны: принципы формирования адекватных расчетных моделей для оценки технического состояния сооружений; методы экспериментальных исследований фактических условий их работы; методы усиления и совершенствования конструкций каркасов – для улучшения

эксплуатационных качеств и продления сроков безотказного функционирования.

1. Задача построения аппроксимирующих адекватных моделей работы каркаса промышленных зданий, рассмотрена как задача синтеза, по критерию точности расчетов, в отношении количества учитываемых элементов каркаса, схематизации этих элементов, схематизации и учета упругости соединений.

Для каркасов, конструктивная схема которых отвечает принципу концентрации материала (что характерно для большинства эксплуатируемых цехов) обоснована, как адекватная, расчетная модель поперечных конструкций каркаса в виде комбинированной системы, включающей все элементы и связи, уточняющие ее работу в своей плоскости. Для расчетов на локальные воздействия она дополняется упругими стержневыми связями - «внешними», учитывающими эффект ее пространственной работы в системе каркаса, и «внутренними» - для учета влияния упругой податливости элементов каркаса в узлах сопряжения и опирания.

2. Исследованы на таких моделях, с помощью численных экспериментов, вопросы:

- о влиянии различных «внешних» упругих связей на величины усилий и деформаций при локальных воздействиях, на моделируемые конструкции;
- о возможности усиления поперечных конструкций регулированием жесткости продольных элементов каркаса.

3. Разработаны методы определения расчетных параметров стержневых упругих связей: «внешних» - расчетным путем (или пользуясь табличными значениями для типовых конструктивных решений); «внутренних» - по результатам натуральных испытаний.

Разработаны теоретические и методические вопросы обеспечения достоверности данных таких испытаний.

4. Для предварительного назначения расчетных параметров изгибной жесткости элементов статически неопределимых моделей в процессе проектирования, поставлена и решена задача об оптимальном соотношении этих параметров. Получено, при учете работы «внешних» упругих связей, инвариантное, для различных условий проектирования, решение, позволяющее уточнить известные рекомендации.

5. Исследован «эффект опорного сечения» неразрезной подкрановой эстакады в эксплуатируемых производственных зданиях. При конструктивном оформлении опорных узлов, приближающих эстакаду к работе рамной системы, указанный эффект проявляется в виде сложных изгибно-крутильных деформаций и соответствующих напряжений неожиданно высокого уровня (в 2,5 раза выше расчетных).



С учетом анализа причин таких, неизвестных ранее, особенностей действительной работы элементов неразрезной эстакады, сделаны рекомендации для уточнения расчетной модели, принятия конструктивных мер и проведения экспериментов на натуре с оценкой влияния указанных факторов на эксплуатационную надежность сооружения.

6. Предложен метод повышения долговечности подкрановых и крановых конструкций ограничением перекосов мостовых кранов, что достигается установкой между этими конструкциями упругих противоположных устройств, правильной их настройкой и расчетным обеспечением.

Для реализации этого метода решены задачи:

- развития теории расчета составлением расчетной модели и уравнений движения крана;

- синтеза параметров настройки противоположных устройств (стабилизаторов);

- расчетной и экспериментальной проверки эффективности метода (устранение «упругих» перекосов, уменьшение боковых сил, улучшение динамических характеристик системы кран-каркас);

- внедрения, в условиях тяжелого режима работы крана и значительных отклонений подкрановых путей от идеальной трассы.

7. Разработан способ усиления стальных колонн каркаса «крановых» цехов созданием начальных усилий, разгружающих колонну от изгиба, посредством натяжения включенных в конструктивную схему каркаса гибких элементов высокой прочности.

Рассмотрены и решены вопросы оптимизации параметров предварительного напряжения, что позволяет обеспечить необходимый эффект усиления наиболее экономичными средствами.

8. Для проектирования производственных зданий с мостовыми кранами разработаны новые конструкции колонн каркаса, в соответствии с решением задач: упрощения конструктивной формы, рационального использования элементов из высокопрочной стали, активного регулирования и авторегулирования усилий, приспособленности к условиям технического содержания и долговременной эксплуатации.

9. На основе применения двух марок колонн нового типа и двухпролетных неразрезных балок, разработана новая конструктивная схема каркаса с проектируемым свойством адаптации наиболее нагруженных элементов к давлениям от кранового поезда и частичным разделением функций несущих конструкций.

10. Результаты диссертационной работы - методы экспериментальных исследований, методы усиления подкрановых и крановых конструкций,

расчетные модели - внедрены при решении задач обеспечения работоспособности конструкций эксплуатируемых промышленных зданий.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ТРУДОВ**

Основное содержание диссертационной работы изложено в таких публикациях:

1. Ермак Е.М. Действительная работа и расчетные модели стального каркаса промышленных зданий. - Макеевка: ДонГАСА, 2002. - 189 с.

2. Ермак Е.М. Усиление внецентренно-сжатых колонн с помощью предварительного напряжения // Аннотационный сборник работ в области строительных металлоконструкций. - М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1989. - С. 17-18.

3. Ермак Е.М. Уточнение расчетных предпосылок для оценки эксплуатационной надежности строительных конструкций // Межвузовский сб. науч. трудов «Повышение долговечности строительных конструкций ж.д. транспорта». Вып. 870. - М.: МИИТ, 1992. - С. 85-90.

4. Ермак Е.М. Уточнение жесткости опорных и узловых связей рамных конструкций на основе натуральных испытаний // Межвузовский сб. науч. трудов «Вопросы обеспечения экономичности и эксплуатационной надежности конструкций транспортных сооружений». Вып. 21. - Харьков: ХИИТ, 1993. - С. 3-13.

5. Ермак Е.М., Литвинов М.И., Новиков В.В. Особенности действительной работы большепролетных элементов стального каркаса промышленных зданий // Межвузовский сб. науч. трудов «Вопросы обеспечения экономичности и эксплуатационной надежности конструкций транспортных сооружений». Вып. 21. - Харьков: ХИИТ, 1993. - С. 36-53.

6. Ермак Е.М., Кириченко М.А., Семенец Г.Л. Анализ работы поперечных рам стального каркаса промышленных зданий при локальных воздействиях // Межвуз. сб. науч. тр. «Создание новых композиционных материалов, повышение эксплуатационной надежности и сроков службы конструкций и сооружений на ж.д. транспорте» Вып. 26. - Харьков: ХарГАЖТ, 1996. - С. 30-43.

7. Ермак Е.М., Ермак З.Е. Повышение надежности подкрановых конструкций // Зб. наук. праць «Експлуатація та ремонт будівель і споруд міського господарства». - К.: Інститут системних досліджень освіти, 1995. - С. 11-15.

8. Ермак Е.М. Оптимизация расчетной модели стального каркаса одноэтажных промышленных зданий // Сб. трудов Международной конференции «Металлостроительство - 96» т. 1. - Донецк-Макеевка, 1996. - С. 28-29.

9. Ермак К.М., Моренов К.С. О свойствах задачи оптимизации соотношения жесткостей элементов поперечных стальных рам ОПЗ // Межвуз. сб. науч. тр. «Совершенствование методов расчета и проектирования конструкций и сооружений». Вып. 27. - Харьков: ХарДАЗТ, 1996. - С. 57-66.

10. Ермак Е.М. К вопросу о рациональной конструкции колонн стального каркаса крановых цехов // Сб. трудов Международной конференции «Теория и практика металлических конструкций» т. 1. - Донецк-Макеевка, 1997. - С. 98-102.

11. Ермак Е.М. Про задачу уточнення величин кранових навантажень на конструкції промислових будівель // Зб. наукових праць «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». Вип. 37. - Харків: ХарДАЗТ, 2000. - С. 100-107.

12. Ермак Е.М. Об учете частичной неразрезности ригелей поперечных рам стального каркаса одноэтажных промышленных зданий // Научно-техн. сб.: Коммунальное хозяйство городов. Вып. 25. - К.: Техника, 2000. - С. 77-87.

13. Ермак Е.М. Про раціональну конструкцію сталевих колон, що несуть навантаження від мостових кранів // Зб. науч. праць «Питання підвищення надійності залізничної колії та інженерних споруд». Вип. 48. - Харків, 2001. - С. 37-41.

14. Ермак Е.М. Підвищення надійності кранових і підкранових конструкцій обмеженням перекосів мостових кранів / Металеві конструкції. т.3. УАМК. - 2000. - С. 21-26

15. Ермак Е.М. Усиление стальных колонн искусственным регулированием усилий // Науковий вісник будівництва. Вип. 18. - Харків: ХДТУБА, 2002. - С. 353-359.

16. Ермак Е.М. Экспериментальная проверка «жесткости» узлов сопряжения элементов стального каркаса промышленных зданий // Коммунальное хозяйство городов: Науч.- техн. сб. Вып. 42. - К.: Техніка, 2002. - С. 80-89.

17. Ермак Е.М. Методика уточнения характеристик жесткости узловых и опорных связей стального каркаса «крановых» цехов на основе динамических испытаний / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - № 3. - 2002. - С. 22-25.

18. Ермак Е.М. Экспериментальное изучение боковых сил и динамических характеристик системы «кран-каркас» при работе мостовых кранов с ограничителями перекосов // Вестник ДонГАСА «Строительные конструкции, здания и сооружения». - № 2 (33). - Макеевка, 2002. - С. 10-19.

19. Ермак Е.М., Калинин П.Н. Синтез параметров настройки противоперекосных стабилизаторов для мостовых кранов // Високі технології в

машинобудуванні: Зб. науков. праць НТУ «ХПІ». - Харків, 2002. - Вип. 1 (5). - С. 110-121.

20. Ермак Е.М. Совершенствование конструктивной формы стальных колонн и конструктивной схемы каркаса «крановых» цехов // Науковий вісник будівництва. Вип. 19. - Харків: ХДТУБА, 2002. - С. 218-224.

21. Ермак Є.М. Дійсна робота і працездатність неразрізних конструкцій тривалих промислових будівель / Будівництво України, № 6. - 2002. - С. 14-18.

22. Ермак Є.М. Розрахункові моделі щодо аналізу несівної спроможності конструкцій виробничих будівель в умовах локальних навантажень / Будівництво України, № 1. - 2003. - С.12-17

23. А.с. 1588693. СССР, Кл. В 66 С 9/16. Стабилизирующее устройство ходовой тележки мостового крана / Е.М.Ермак, И.М.Роговой (СССР). - № 4218876/27-11; Заявлено 01.04.87; Опубл. 30.08.90. Бюл. № 32. - 3 с.

24. А.с. 1507937. СССР, Кл. Е 04 С 3/10. Предварительно напряженная металлическая колонна / Е.М.Ермак, Я.П.Фельдман (СССР). - № 4364015/23-33; Заявлено 15.01.89; Опубл. 15.09.89. Бюл. № 34. - 4 с.

25. А.с. 1791585. СССР. Кл. Е 04 С 3/32. Металлическая колонна / Е.М.Ермак, В.В.Молчанов (СССР). - 4880500/33; Заявлено 11.11.90; Опубл. 30.01.93. Бюл. № 4. - 4 с.

26. А.с. 1744046. СССР. Кл. В 66 С 17/00. Мостовой кран / Е.М.Ермак, В.В.Молчанов, И.М.Роговой (СССР). - 4829518/11; Заявлено 28.05.90; Опубл. 20.06.92. Бюл. № 24. - 4 с.

27. А.с. 1766826. СССР. Кл. В 66 С 13/06. Грузовая тележка мостового крана / Е.М.Ермак, И.М.Роговой (СССР). - 4788749/11; Заявлено 11.02.90; Опубл. 07.10.92. Бюл. № 37. - 4 с.

Список трудов, дополнительно отражающих результаты диссертационной работы:

28. Ермак Е.М. О задаче оптимального проектирования стальных рамных конструкций с упруго-податливыми связями / Тезисы докладов научно-технической конференции «Вопросы оптимизации при расчете и проектировании металлических конструкций». - Свердловск, 1981. - С. 12-13.

29. Ермак Е.М., Литвинов М.И. Уточнение расчетной схемы неразрезных подкрановых конструкций / Тезисы докладов всесоюзного семинара «Индустриальные технические решения для реконструкции зданий и сооружений промышленных предприятий». - Макеевка, 1986. – С. 122.

30. Ермак Е.М. Усиление подкрановых конструкций промышленных зданий и эстакад / Тезисы докладов 5-й Украинской научно-технической конференции по металлическим конструкциям «Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле». – Киев, 1992. – С. 28.

31. Ермак Е.М., Кириченко М.А., Семенец Г.Л. Об участии фонарных надстроек в работе несущих конструкций шатра промышленных зданий. // Сборник трудов II научно-технической конференции России и Украины «Вопросы проектирования и эксплуатации фонарей промышленных зданий». - Магнитогорск, 1993. – С. 40-42.

32. Ермак Е.М. Расчетная модель для оценки надежности стального каркаса ОПЗ при локальных нагрузках / Тезисы докладов Международного симпозиума «Исследование и строительство в экстремальных условиях». - Москва, 1996. – С. 11.

33. Ермак Е.М. Оптимизация расчетных моделей и конструкций стального каркаса крановых цехов и эстакад. // Сборник докладов Международного симпозиума «Современные строительные конструкции из металла и древесины». – Одесса, 1997. – С. 159-163.

34. Ермак Е.М., Исмагилов А.О. Уточнение расчетных предпосылок для оценки надежности сооружений, построенных на просадочных грунтах / Тезисы докладов Международной конференции «Надежность и безопасность зданий и сооружений в условиях особых воздействий» - Санкт-Петербург, 2001. – С. 46.

35. А.с. 1735470. СССР. Кл. Е 01 В 9/66, В 66 С 7/08. Устройство для крепления рельса к подкрановой балке / Е.М.Ермак, И.М.Роговой (СССР). - 4765114/11; Заявлено 05.12.89; Оpubл. 23.05.92. Бюл. № 19. - 4 с.

36. А.с. 1791585. СССР. Кл. Е 04 С 3/32. Металлическая колонна / Е.М.Ермак, В.В.Молчанов (СССР). - 4880500/33; Заявлено 11.11.90; Оpubл. 30.01.93. Бюл. № 4. - 4 с.

## АННОТАЦИЯ

Ермак Е.М. Совершенствование расчетных моделей и конструкций для продления сроков эксплуатации промышленных зданий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 0523.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Донбасская государственная академия строительства и архитектуры, Макеевка, 2003.

Диссертация посвящена проблеме обеспечения безопасной эксплуатации и продления ресурса промышленных зданий, оборудованных мостовыми кранами.

Выполнен анализ конструктивных решений эксплуатируемых цехов, причин характерных повреждений, расчетных схем проектирования и особенностей крановых воздействий на конструкции таких зданий. Приведен

обзор научных трудов, оказавших влияние на развитие и совершенствование расчетных моделей и конструкций крановых цехов.

Изложены принципы формирования расчетных моделей, адекватных фактической работе конструкций промышленных зданий. С учетом особенности конструктивной схемы каркаса эксплуатируемых цехов, обоснована возможность и целесообразность решения этой задачи на основе уточнения традиционных предпосылок в отношении топологии расчетной системы, схематизации элементов и узлов, эффекта пространственной работы локально загруженных конструкций.

Предложено расчетную систему, обоснованно выделенную из полной схемы конструктивного комплекса, дополнять упругими стержневыми связями – для учета совместной работы этой системы с элементами каркаса, не включенными в ее состав («внешние» упругие связи) и учета упругой податливости сопряжений и креплений элементов («внутренние» упругие связи). Получены формулы и составлены таблицы для определения параметров «внешних» упругих связей, что упрощает работу на этапе подготовки исходных данных к расчетному анализу усилий и деформаций.

Подтверждена достаточная точность и достоверность результатов расчетов на предлагаемом варианте адекватной расчетной модели путем сравнения этих результатов с данными натурных испытаний.

Численными экспериментами на различных вариантах расчетных моделей, производных от предлагаемого базового варианта, показаны возможности усиления поперечных конструкций каркаса рациональным изменением жесткости и количества продольных элементов.

Уточнены, на основе решения задачи оптимизации, рекомендуемые соотношения параметров системы для расчета статически неопределимых конструкций каркаса на первом этапе проектирования.

Разработаны методы экспериментально-теоретического исследования упругой податливости узловых и опорных связей каркаса и моделирования их на расчетной системе «внутренними» упругими связями. Учитывается вероятность случайной изменчивости характеристик упругого защемления колонн каркаса в «верхних» и «нижних» узлах, поэтому определение этих параметров проводится с применением статистического анализа результатов натурных испытаний.

Исследован «эффект опорного сечения» неразрезной подкрановой эстакады с выявлением изгибно-крутильных деформаций и максимальных напряжений в зоне узла сопряжения основных элементов. Сделаны рекомендации для учета такого напряженно-деформированного состояния при оценки работоспособного состояния подкрановых конструкций.

Разработаны методы усиления подкрановых и крановых конструкций промышленных зданий – введением в систему «кран-каркас» упругих противоперекосных устройств и гибких высокопрочных элементов с начальными усилиями. Решены задачи о подборе рациональных параметров указанных элементов усиления для устранения причин преждевременного износа, минимизации боковых сил, улучшения динамических характеристик системы «кран-каркас» и увеличения грузоподъемности колонн.

Разработана новая конструктивная схема каркаса с разделением функций несущих элементов, упрощением их конструктивной формы, использованием высокопрочных сталей и конструктивным обеспечением рационального управления напряженно-деформированным состоянием.

Приведены данные, позволяющие судить о преимуществах новых конструкций и модернизированной конструктивной схемы каркаса по показателям экономичности и эксплуатационным качествам.

Результаты исследований, приведенных в диссертации, внедрены: при разработке информационно-экспертной системы для технической эксплуатации ответственных промышленных зданий, при решении задач продления технического ресурса конструкций ряда цехов в городах Украины и России, при подготовке Государственного стандарта Украины ДСТУ Б В.2.6-10-96 «Конструкции стальные строительные. Методы испытаний нагружением».

Ключевые слова: промышленные здания, сроки эксплуатации, каркас, мостовые краны, адекватные расчетные модели, упругие связи, крановые нагрузки, боковые силы, натурные испытания, численные эксперименты, регулирование усилий, элементы усиления.

## АНОТАЦІЯ

Єрмак Є.М. Вдосконалення розрахункових моделей та конструкцій для подовження строків експлуатації промислових будівель. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Донбаська державна академія будівництва та архітектури, Макіївка, 2003.

Дисертацію присвячено проблемі забезпечення безпечної експлуатації та подовження технічного ресурсу промислових будівель, обладнаних мостовими кранами.

Розроблено принципи формування варіантів адекватних розрахункових моделей для оцінки технічного стану конструкцій каркаса.

Зроблено рекомендації для моделювання основних конструкцій каркаса (поперечних та поздовжніх) плоскими та просторовими підсистемами з пружними зв'язками.

Розроблено методи експериментальних досліджень фактичної роботи елементів, вузлових та опорних зв'язків каркаса, для уточнення та визначення параметрів розрахункових моделей.

Розроблено методи підсилення підкранових та кранових конструкцій промислових будівель – введенням в систему «кран-каркас» пружних протиперекісних пристроїв та гнучких високоміцних елементів з початковими зусиллями.

Розроблено конструкції та конструктивну схему каркаса з пристроями для авторегулювання зусиль та напружень від кранових навантажень.

Ключові слова: промислові будівлі, строки експлуатації, каркас, мостові крани, адекватні розрахункові моделі, пружні зв'язки, кранові навантаження, бічні сили, натурні випробування, чисельні експерименти, регулювання зусиль, елементи підсилення.

## ABSTRACT

Yermak E.M. Improvement of accounted models and constructions to prolong the terms of industrial buildings maintenance. – Manuscript

Thesis for obtaining the scientific degree of a Doctor of Technical Sciences in specialty 05.23.01 – Building Constructions, buildings and structures. Donbass State Academy of Construction and Architecture, Makeevka, 2003.

The thesis is devoted to the problem of providing the safe maintenance and prolonging technical resources of industrial building which are equipped with bridge cranes.

The principles to form versions of adequate accounted models for appreciating the technical conditions of framework design are developed.

References for shaping the main framework design (transverse and longitudinal) by means of plane and spatial subsystems with elastic junctions are performed.

Experimental research methods of practical element, junction and supporting framework design are developed; they are used for making more precise and defining the accounted model parameters.

Methods of strengthening the subcrane and crane design of industrial buildings by introducing the elastic and anti-bending devices and flexible high durable elements with initial stresses into the «crane - framework system» are developed.

Design and construction project of the framework with devices for autoregulation the stresses from crane loadings are worked out.

Key words: industrial building, maintenance terms, framework, bridge cranes, adequate accounted models, elastic junctions, crane loading, natural tests, numeral experiments, stress regulation, stress elements.