

На правах рукописи



**МАРКИНА Юлия Дмитриевна**

**РАСЧЁТ ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ С УЧЕТОМ  
УПРУГОЙ ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВ ПРИМЫКАНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ К ЕЗДОВОМУ НИЖНЕМУ ПОЯСУ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пенза – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**ЛАМПСИ Борис Борисович**

Официальные оппоненты: **МИЩЕНКО Андрей Викторович**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГКВОУ ВО «Новосибирское высшее военное  
командное ордена Жукова училище»,  
кафедра общепрофессиональных дисциплин,  
заведующий кафедрой

**БУЗАЛО Нина Александровна**,  
кандидат технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ) имени  
М.И. Платова», кафедра «Градостроительство,  
проектирование зданий и сооружений», профессор  
кафедры

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»**

Защита диссертации состоится 17 апреля 2025 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/122-0124-markina-yulia-dmitrievna>.

Автореферат разослан « 17 » \_\_\_\_\_ февраля \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Снежкина Ольга Викторовна

**Актуальность темы исследования.** Накопленные с годами результаты наблюдений за техническим состоянием подкраново-подстропильных ферм (ППФ) позволяют судить об эффективности принятых при проектировании инженерных решений. Выявленные повреждения и дефекты свидетельствуют о том, что особенности работы пояса, по которому перемещается кран, недостаточно полно учены при расчете и проектировании конструкции. В связи с этим остро стоит вопрос точности методики расчёта ППФ.

ППФ – конструкция высокого уровня ответственности. Разрушение в процессе эксплуатации даже одного узла ППФ может вызвать прогрессирующее разрушение всей конструкции, что приведет к остановке производства и нанесёт экономический урон, может стать причиной гибели людей. Более того, на ферму опираются стропильные конструкции промышленного здания, поэтому её повреждение может привести к разрушению всего сооружения, что понесёт за собой социальные и экологические последствия.

Основные отличия ППФ от классических ферм заключаются в больших габаритах и развитом ездовом поясе коробчатого сечения, способном равноценно работать на изгиб в двух плоскостях и сопротивляться деформациям закручивания.

Наибольший вклад в создание и развитие ППФ внесли отечественные инженеры Н.П. Мельников, Н.С. Стрелецкий, Г.Д. Попов, А.И. Петраков, К.Г. Протасов, Н.Н. Стрелецкий, Н.И. Поливанов и др. Усовершенствованием методики расчета и конструктивных решений этих конструкций занимались Б.Б. Лампси, К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, К.И. Еремин, С.Н. Шульга, М.В. Романов, А.А. Кузьмишкин, А.А. Игошин, А.Д. Маслов и др.

Применение ППФ целесообразно при значительных пролетах (от 24 м) и нагрузках на конструкцию, тяжёлом режиме работы кранового оборудования. ППФ используются в металлургических цехах, на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, авиационных заводах, заводах судостроения и в других большепролетных зданиях с поперечным расположением кранов в уровне

покрытия. Тяжелые условия работы предприятий и большая грузоподъемность кранов обуславливают значительные размеры ППФ, особенно их ездовых поясов прямоугольного замкнутого сечения, ширина которых составляет 2–3 м.

С увеличением пролёта и нагрузок на подкрановую систему или кровлю эффективность применения ППФ возрастает. В этом случае совмещение в одной конструкции функций подкрановой балки и подстропильной системы дает значительный экономический эффект в сравнении с отдельными конструкциями. Благодаря меньшей высоте нижнего пояса ППФ по сравнению с высотой балки сплошного сечения заметно уменьшаются площади стен и высота здания. Это снижает приведенные затраты, особенно – для отапливаемых зданий. В то же время область применения ППФ ограничивается повышенной сложностью её изготовления, наибольшую трудность создают сварные монтажные стыки ездового пояса.

Особую сложность представляет и расчет ППФ. Стержневая модель ППФ представляет собой плоскую систему. При этом ППФ воспринимает большие нагрузки, действующие из плоскости, следовательно, является пространственной конструкцией. Узлы соединения решетки с нижним поясом обладают в плоскости системы большей изгибной жесткостью, чем сами элементы решетки. Поэтому, в отличие от классической фермы, все стержни ППФ испытывают изгиб в ее плоскости. При максимальном нагружении пролета ППФ наблюдается образование пластических деформаций именно в присоединяемых элементах (в стойке и раскосах), а не в самом узле. Таким образом, крепление системы решетки к ездовому поясу нельзя считать шарнирным. Элементы решетки вовлекаются и в пространственную работу ездового пояса, воспринимая изгиб из плоскости и кручение, оказывая поддерживающее влияние для ездового пояса.

Ездовой пояс находится в сложном напряженном состоянии, в том числе испытывает стесненное кручение, вызванное возможной односторонней крановой нагрузкой и силами поперечного торможения кранов. При этом само сечение пояса в виде призматического тонкостенного стержня закрытого профиля часто

оказывается несимметричным, имеет консоли (выпуски поясных листов за пределы стенок) и усиливается диафрагмами, ребрами жесткости и др. подкрепляющими элементами. Имеется острая необходимость в разработке методов учета концентрации напряжений в конструкциях данного вида, в первую очередь воспринимающих значительные локальные нагрузки. Ездовые пояса ППФ попадают под требования п. 8 СП 16.13330.2017, который предписывает учет местных напряжений, но на практике отсутствуют достаточно точные теоретические расчетные методы определения этих напряжений.

При проектировании большинства эксплуатируемых в настоящее время ППФ особенности работы узлов сопряжения элементов решетки с нижним поясом не учтены в полной мере. Об этом свидетельствует возникновение трещин в зоне сопряжения прорезных фасонки с верхним поясом и опорной диафрагмой по сварному шву и в околошовной зоне в первые же годы эксплуатации.

**Степень разработанности темы.** Рекомендации по расчету ППФ приведены в Руководстве по проектированию стальных подкрановых конструкций ЦНИИПСК им. Мельникова. Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Нормальные силы в элементах ППФ от крановой нагрузки определяются путём невыгодного загрузки линий влияния элементов расчетной схемы, представляющей собой ферму с шарнирными узлами и с центровкой раскосов по оси ездового пояса. От неподвижных нагрузок нормальные силы определяются по этой же расчетной схеме.

2. Изгибающие моменты учитываются только в ездовом поясе и состоят из трех компонентов:

- а) момент в неразрезной балке на жёстких опорах;
- б) момент от прогиба фермы, возникающий вследствие неразрезности ездового пояса;
- в) момент от внецентренного примыкания элементов решетки к ездовому поясу.

3. Горизонтальные нагрузки и несимметричное загрузеие ППФ вертикальными нагрузками, вызывающее не только изгиб, но и кручение, считаются воспринимаемыми только ездовым поясом. Прочие элементы фермы на эти виды воздействий не рассчитываются. Расчетная схема ППФ при расчете на горизонтальные и несимметричные вертикальные нагрузки – однопролетная балка с пролетом, равным пролету ППФ.

Основные недостатки данной методики расчета приведены ниже:

1. Не учитывается пространственная работа ППФ. В действительности горизонтальный изгиб и кручение ездового пояса вовлекает в работу все её элементы. Отсюда вытекают задачи уточнения расчётной схемы при данных воздействиях и разработки соответствующего метода расчета.

2. Не учитывается действительная жесткость узловых соединений, которая, как правило, существенно превышает жесткость присоединяемых элементов решетки.

3. Методика является проверочной и расчет может производиться только при назначенных геометрических характеристиках сечений элементов. Метод предварительного подбора сечений отсутствует.

Эти вопросы определяют выбор темы и составляют предмет диссертационного исследования.

### **Цель и задачи диссертационного исследования**

*Цель диссертационной работы* – разработка аналитической методики расчёта ездового нижнего пояса ППФ с учётом жесткости узловых соединений элементов решетки с ездовым поясом и составление методики предварительного расчёта ППФ.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. Оценка влияния жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе.

2. Выявление факторов, от которых зависит жесткость узловых сопряжений элементов решетки и нижнего пояса. Исследование их влияния на податливость ездового пояса ППФ.

3. Выявление закономерностей изменения линейных и угловой податливостей ездового пояса. Составление методики определения податливости узловых соединений.

4. Разработка методики определения усилий в нижнем поясе с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ и вовлечения решетки в пространственную работу пояса на кручение и горизонтальный изгиб.

5. Проверка полученных результатов натурно-численными исследованиями.

6. Составление методики предварительного расчёта ППФ.

*Объектами исследования* являются продольные ППФ с неразрезным ездовым нижним поясом прямоугольного замкнутого сечения.

*Предметом исследования* является влияние узлов сопряжения элементов решетки с нижним поясом на работу ППФ.

**Научная новизна исследования** состоит в разработке аналитических методик определения усилий в элементах ППФ с учетом упругой податливости решетки при вертикальном изгибе и кручении, позволяющих повысить точность расчёта ППФ. Доказана необходимость учёта жесткости узловых соединений элементов решетки с ездовым поясом и неразрезности ездового пояса на стадии предварительного расчёта ППФ. Предложены формулы определения податливости ездового пояса и жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки в плоскости ППФ. Выявлены закономерности изменения линейных и угловой податливостей ездового пояса в зависимости от геометрических характеристик ППФ. Доказано, что при проверке ППФ по второй группе предельных состояний по горизонтальным предельным прогибам необходимо учитывать в расчёте не только горизонтальные силы от торможения тележки

крана в соответствии с СП 20.13330.2016, но и несимметрично приложенные вертикальные нагрузки от его одностороннего расположения.

В рамках диссертационного исследования лично автором получены следующие *научные результаты*:

1. Разработана методика определения усилий в нижнем поясе с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ. Предложена уточнённая расчётная схема нижнего пояса при расчёте на вертикальный изгиб – балка на упругих опорах в узлах крепления элементов решетки. Представлен метод определения жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки.

2. Проведено исследование работы нижнего пояса при кручении. Выявлены параметры расчета, влияющие на точность определения внутренних усилий и напряжений в элементах ППФ при кручении. Предложены методы учета вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение. Принят аналитический метод определения внутренних усилий в нижнем поясе при кручении. Уточнена методика расчета нижнего пояса ППФ на кручение.

3. Численными исследованиями доказано, что расчётная схема однопролетной балки, рекомендованная Руководством ЦНИИПСК им. Мельникова, не соответствует поведению пояса при кручении. В балке происходит поворот сечений без смещения относительно нейтральной оси. В поясе происходит поворот и горизонтальное смещение сечений относительно нейтральной оси, сопровождаемое дополнительным поворотом. Упругая ось пояса превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, с различными углами закручивания.

4. Учет в работе нижнего пояса элементов решетки в различной степени влияет на податливость нижнего пояса в разных направлениях. Наибольшее влияние учет решетки оказывает на угловую податливость пояса, в меньшей степени влияет на линейную податливость в плоскости ППФ и не оказывает существенного влияния на линейную податливость из плоскости ППФ.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

### *Теоретическая значимость:*

Проведена модернизация существующей расчётной модели ездового пояса и аналитической методики расчёта ППФ. Изучены деформативно-жесткостные характеристики и напряженное состояние нижнего пояса при различных видах нагружения. Изучено влияние жесткости и расцентровки узлов на напряженно-деформированное состояние ППФ. Доказана применимость метода определения узловых моментов от расцентровки узла, используемого при расчёте лёгких ферм с жесткими узлами, для предварительного расчёта ППФ как однопролётной конструкции. Изучено влияние параметров расчётных схем ППФ на точность результатов расчёта.

### *Практическая значимость:*

Представлена методика предварительного расчета ППФ с учетом упругой податливости узлов примыкания элементов решетки к нижнему поясу и вовлечения в пространственную работу пояса на горизонтальный изгиб и кручение других элементов конструкции. Положения диссертации внедрены в проектную, научно-исследовательскую и учебную деятельность, использованы при написании монографии «Подкраново-подстропильные фермы. Особенности конструкции, работы и расчета».

## **Методология и методы исследования**

Методологической основой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых в области теории тонкостенных стержней и металлических подкрановых конструкций.

Методы исследования основываются на теории и практике исследований напряженно-деформированного состояния подкрановых конструкций, математической статистики и численном моделировании.

### **Положения, выносимые на защиту:**

– результаты расчетного исследования деформативно-жесткостных характеристик ППФ;

- разработанная аналитическая методика определения внутренних усилий в нижнем поясе при изгибе в плоскости ППФ;
- разработанный аналитический метод определения внутренних усилий в нижнем поясе при кручении;
- составленная методика предварительного расчета ППФ.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

*Достоверность результатов* подтверждается сопоставимостью полученных результатов аналитических, численных расчетов и натурного исследования.

*Внедрение результатов исследования.* Результаты исследований внедрены в ООО «Приволжский Центр диагностики строительных конструкций» при проведении экспертизы и подготовке проектной документации по ремонту подкрановых конструкций производственных зданий, ЗАО «Производственная компания Автокомпонент Нижний Новгород» при выполнении проектов усиления подкрановых балок производственного комплекса, применены при разработке систем мониторинга строительных конструкций в рамках проекта «Техноплатформа 2035» и введены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

*Апробация результатов.* Основные положения диссертации представлены на следующих конференциях:

- XIV академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. энергосбережение. надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 4–6 июля 2023 г. (НИИСФ РААСН, г. Москва);
- I международная научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Информационные технологии», 4–8 сентября 2023 г. (БГТУ им. В.Г. Шухова в г. Новороссийск, г. Новороссийск);
- II межрегиональная конференция развития строительной отрасли, 21–24 сентября 2023 г. (ВоГУ, г. Вологда);

- Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее», 18–20 октября 2023 г. (СФУ, г. Красноярск);
- Научно-практическая конференция XIII всероссийского фестиваля науки, 24–26 октября 2023 г. (ННГАСУ, г. Н. Новгород);
- IV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Наука и творчество: вклад молодежи», 8–9 ноября 2023 г. (ДГТУ, г. Дагестан);
- XIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского, 14–16 ноября 2023 г. (ИПРИМ РАН, г. Москва);
- Международная научно-практическая конференция «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика 2023», 22–23 ноября 2023 г. (СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург);
- VIII Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», 23–24 ноября 2023 г. (СибАДИ, г. Омск);
- XXVIII Нижегородская сессия молодых ученых, 5–8 декабря 2023 г. (р.п. Лукино);
- IV Национальная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования», 15 декабря 2023 г. (МГСУ, г. Москва);
- XXVI Международная научно-практическая конференция «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии», 29 марта 2024 г. (ПГАУ, г. Пенза);
- VIII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», 15 апреля 2024 г. (БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород);
- IV Международная научно-практическая конференция «Инженерно-техническое образование и наука», 22–26 апреля 2024 г. (БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийск, г. Новороссийск);

– XVII Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», 23–25 апреля 2024 г. (НГАСУ, г. Новосибирск);

– V Международная научно-техническая конференция “International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering” (MPCPE-2024), 23–25 апреля 2024 г. (г. Владимир);

– XV академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 2–4 июля 2024 г. (НИИСФ РААСН, г. Москва);

– II Международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития», 16–20 сентября 2024 г. (МГСУ, г. Москва);

– IX Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего — наука молодых», 29 октября – 1 ноября 2024 г. (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара);

– XXIX Нижегородская сессия молодых ученых, 12–15 ноября 2024 г. (р.п. Лукино).

Результаты исследований удостоены:

– диплома победителя IX Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов «Наука будущего – наука молодых», 1 место секции «Инженерные науки», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, г. Самара, 29 октября – 1 ноября 2024 г. (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации);

– диплома за победу в конкурсе грантов «Фундамент будущего» по направлению «Защита кандидатской диссертации», ННГАСУ, г. Нижний Новгород, 2024 г;

- специального поощрительного приза XV академических чтений, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 2–4 июля 2024 г. (НИИСФ РААСН, г. Москва);
- диплома победителя I степени Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ «К вершинам познания – 2023» в номинации: Лучшая научная статья, 25 декабря 2023 г. (НТО «Просвещение», г. Москва);
- диплома победителя II степени в секции «Строительство и архитектура» XXVIII Нижегородской сессии молодых ученых, г. Нижний Новгород, 2023 г.;
- диплома победителя II степени Международного конкурса научно-исследовательских работ «Призвание – изучать!» в номинации: Лучшая научная статья, 27 ноября 2023 г. (НТО «Эрудит», г. Москва).

### **Публикации**

Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в 20 научных публикациях, в том числе в семи работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; в одной монографии; в 12 статьях в сборниках научных трудов.

### **Состав и структура диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения; содержит 172 страницы машинного текста, включая 21 таблицу и 95 рисунков, список литературы содержит 141 наименование, два приложения изложены на 14 страницах.

**Содержание диссертации** соответствует Паспорту научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки), в частности пунктам «1. Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных

систем зданий и сооружений» и «3. Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

### Основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость темы диссертационного исследования, обозначены цель и задачи работы, объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обоснованию цели и задач исследования. Рассмотрены основные конструктивные и расчетные особенности ППФ (рисунок 1). Показана необходимость применения и отмечены сферы использования данного типа конструкций. Особое внимание уделено методике расчета ППФ: нагрузкам и воздействиям, назначению геометрических параметров, подбору поперечных сечений элементов и расчету напряженно-деформированного состояния коробчатого ездового пояса. На основе опубликованных исследований К.И. Еремина, К.К. Нежданова, А.Н. Шувалова, Г.А. Павловой, М.В. Романова и др. произведен анализ повреждаемости ППФ.

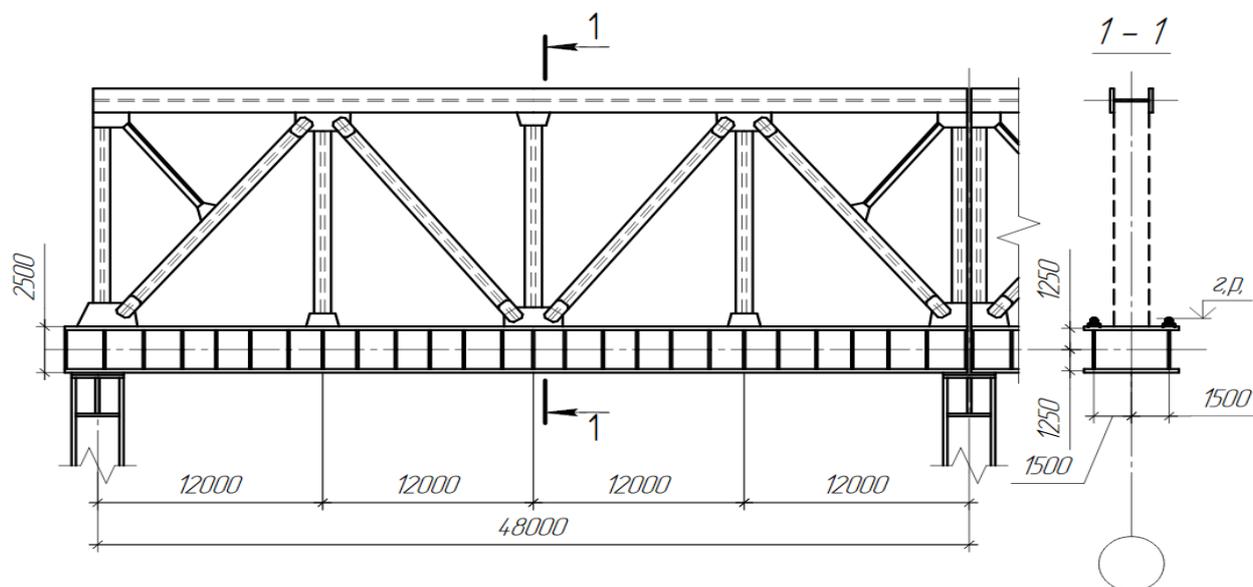


Рисунок 1 – Продольная ОПФ пролетом 48 м

Институт ЦНИИПСК им. Мельникова начал разработку проектов ППФ в конце 50-х – начале 60-х годов, типовые ППФ применялись на металлургических комбинатах. В 2000-2010-х гг. группой специалистов во главе с К.И. Ереминым проведена серия натурных испытаний ППФ Магнитогорского металлургического комбината, в ходе которой выявлены многочисленные дефекты в узлах конструкции. В 2000-2020-х гг. научным коллективом во главе с К.К. Неждановым разработана и запатентована серия конструктивных решений подкраново-подстропильных балок с поясами из круглых и овальных труб. В 2020-х гг. О.А. Тусниной, В.Ф. Такки и И.Ф. Егоровым проведено проектное сопровождение замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой ППФ.

В расчете ППФ наибольшую трудность представляет анализ НДС нижнего ездового пояса ППФ. Он находится в сложном напряженном состоянии (рисунок 2), в том числе испытывает стесненное кручение, вызванное односторонней крановой нагрузкой и силами поперечного торможения кранов. Отдельно от остальной конструкции нижний пояс представляет собой призматическую складчатую систему, исследованию работы которой на основе теории тонкостенных стержней посвящены труды В.З. Власова, А.А. Уманского и др.

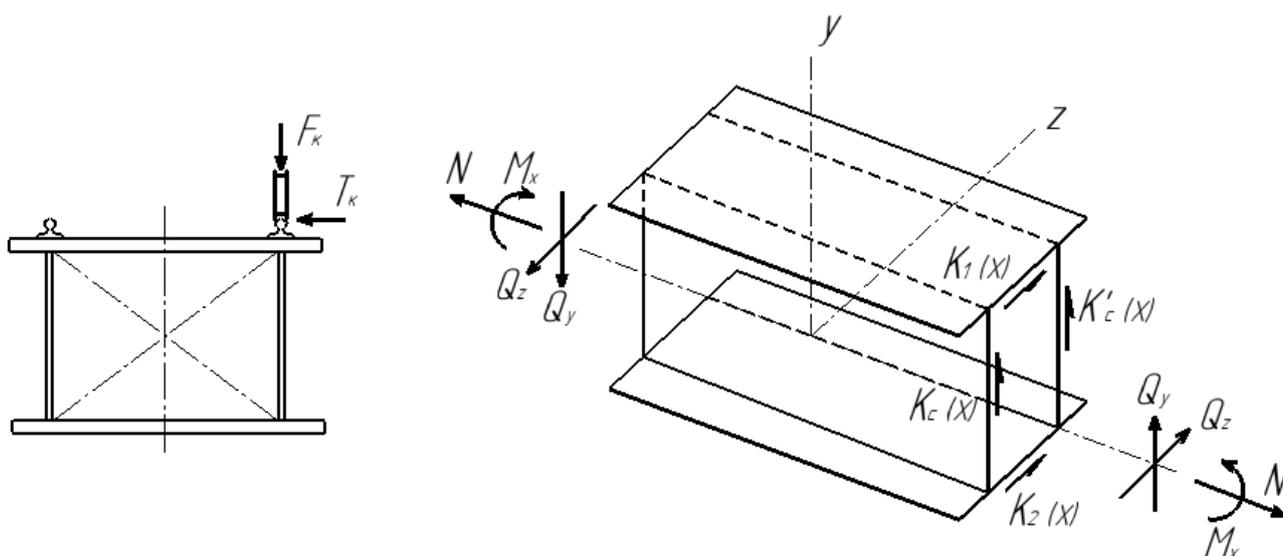


Рисунок 2 – Общая схема возникновения внутренних усилий в ездовом поясе ППФ от односторонне приложенной крановой нагрузки

На момент проектирования эксплуатируемых ППФ применяемый в настоящее время численный метод конечных элементов был недостаточно развит, что не позволяло должным образом учесть особенности работы ППФ. При выполнении расчётов вручную аналитическим методом это не представляется возможным. Это существенно усложнило разработку методики расчёт НДС ППФ и снизило её точность, что может являться одной из причин появления локальных зон повреждений в элементах и узлах этих конструкций.

Единственным источником, в котором даны рекомендации по расчету и проектированию классических ППФ, является Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций ЦНИИПСК им. Мельникова, изданное в 1976 году. Недостатки используемых методов расчёта в 1980-х гг. отметил в своих исследованиях Б.Б. Лампси. Необходима разработка современной нормативной и учебной литературы, регламентирующей конструктивные решения и расчёт ППФ.

Нагрузки на подкрановые конструкции назначаются в соответствии с СП 20.13330.2016. Рекомендации по сбору нагрузок, приведённые в Руководстве ЦНИИПСК, учитывают особенности работы ППФ, но не соответствуют СП 20.13330.2016. Натурные обследования исследуемых конструкций выявили такую нагрузку, как вес технологической пыли, которая оказывает существенное влияние на общее нагружение ППФ.

Численный расчет без предварительного подбора сечений для конструкций типа ППФ сложно реализуем, т.к. поперечное сечение пояса не является прокатным профилем и его корректный подбор методом итераций трудно реализуем. Распределение усилий в элементах ППФ сильно зависит от соотношения жесткостей ездового пояса и всей ППФ. Неразрезной пояс перетягивает на себя часть изгибающего момента со всей системы. Чем больше он развит, тем большую долю усилий воспринимает. При этом чрезмерная жёсткость пояса может неблагоприятно сказаться на распределении усилий в ППФ вплоть до того, что увеличение сечения может «не успевать» за возрастанием приходящейся на него доли изгибающего момента.

Необходима простая и достаточно точная для предварительного расчёта методика, учитывающая базовые отличия ППФ от классических ферм: пространственную работу, жесткость узловых соединений, соотношение жесткостей ездового пояса и всей ППФ.

**Во второй главе** изложены методика и результаты расчетного исследования деформативно-жесткостных характеристик и анализа упрощенных расчетных схем ППФ. Т.к. целью работы является увеличение точности методики расчета ППФ, объектами исследования являются ППФ с различными геометрическими характеристиками.

Первый этап исследования влияния геометрических параметров ППФ на податливость ездового пояса – выбор расчетной схемы. Проанализировано 10 вариантов расчетных схем ППФ пролётом 36 м. Для дальнейшего исследования выбрана расчетная схема, дающая минимальную погрешность 11 % при определении перемещений по сравнению с пространственной моделью и применимая для многократного построения – плоская расчетная схема с жестким соединением стержней в узлах и учетом эксцентриситета крепления решетки.

Для получения статистических данных с целью оценки влияния геометрических характеристик ППФ на податливость её ездового пояса рассмотрены 152 расчётные схемы ППФ. Для исследования влияния высоты ППФ на податливость ездового пояса высота каждой из четырёх ППФ последовательно изменялась в пять этапов таким образом, чтобы отношение высоты фермы к длине пролета  $h/l$  уменьшилось от 0,5 до 0,1. Для анализа влияния соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ для каждой ППФ последовательно в шесть этапов изменялась жесткость элементов решетки. Рассмотрены варианты приложения нагрузки в трех направлениях: линейная в плоскости ППФ, линейная из плоскости, крутящий момент. Для каждой схемы определялось перемещение точки приложения нагрузки в направлении ее приложения.

Предложена расчетная схема ездового пояса фермы – балка на упругих опорах, имитирующих работу решетки. Опоры моделируются в узлах крепления к поясу элементов решетки.

Для каждой расчётной схемы жесткость упругих опор определялась как разность жесткости ППФ и балки, сечением эквивалентной нижней поясу:

$$C_p = \frac{1}{\delta_{\text{ППФ}}} - \frac{1}{\delta_6}; \quad (1)$$

где  $\delta_{\text{ППФ}}$  – податливость ППФ, м (рисунок 3);

$\delta_6$  – податливость эквивалентной балки, м (рисунок 4).

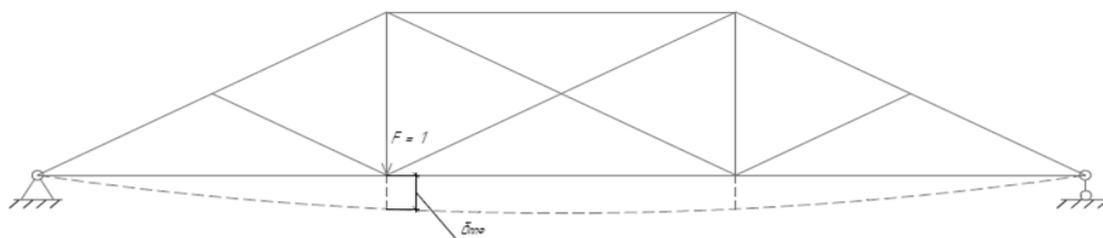


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения податливости ППФ



Рисунок 4 – Расчетная схема для определения податливости балки, пролётом равной пролёту ППФ

Основные результаты расчетного исследования деформативно-жесткостных характеристик ППФ:

1. Учет в работе нижнего пояса элементов решетки в различной степени влияет на податливость нижнего пояса в разных направлениях (рисунок 5). Наибольшее влияние учет решетки оказывает на угловую податливость пояса (отношение перемещений в поясе и эквивалентной балке от  $-2500\%$  до  $+50\%$ ), в меньшей степени влияет на линейную податливость в плоскости ППФ (отношение перемещений в поясе и эквивалентной балке от  $40\%$  до  $100\%$ ) и оказывает наименьшее влияние на линейную податливость из плоскости ППФ (отношение перемещений в поясе и эквивалентной балке до  $12\%$ ).

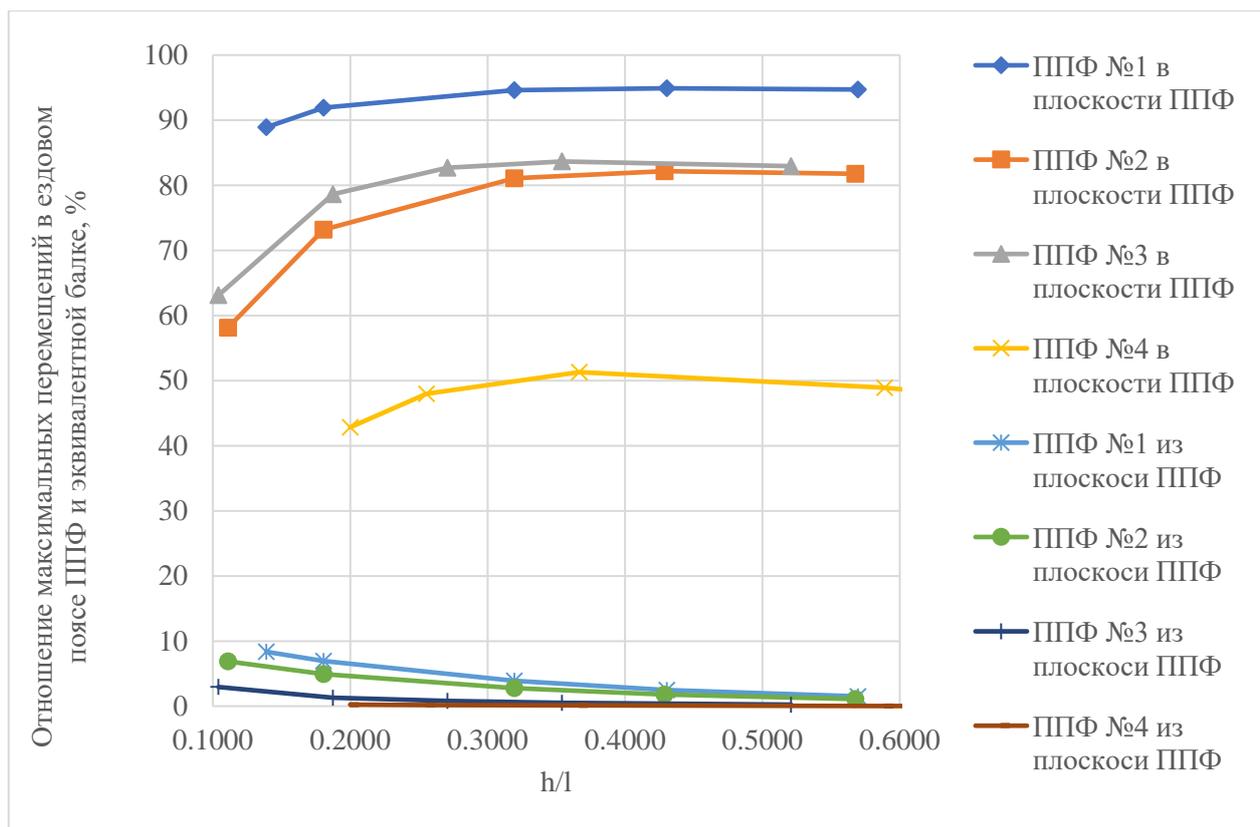


Рисунок 5 – Снижение отношения линейных перемещений в ездовом поясе ППФ и эквивалентной балке в зависимости от высоты ППФ

2. При увеличении отношения высоты к пролету  $h/l$  линейная податливость в плоскости снижается, из плоскости – возрастает.

3. Линейная податливость узлов ездого пояса в плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения продольной жесткости решетки и изгибной жесткости ездого пояса. Линейная податливость узлов ездого пояса из плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения сдвиговой жесткости решетки и изгибной жесткости ездого пояса.

5. Угловая податливость ездого пояса в большой степени зависит от соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездого пояса. Учет элементов решетки в работе пояса на кручение может не только снизить, но и увеличить угловую податливость пояса в зависимости от конфигурации ППФ и соотношения жесткостей элементов решетки и нижнего пояса (рисунок 6).

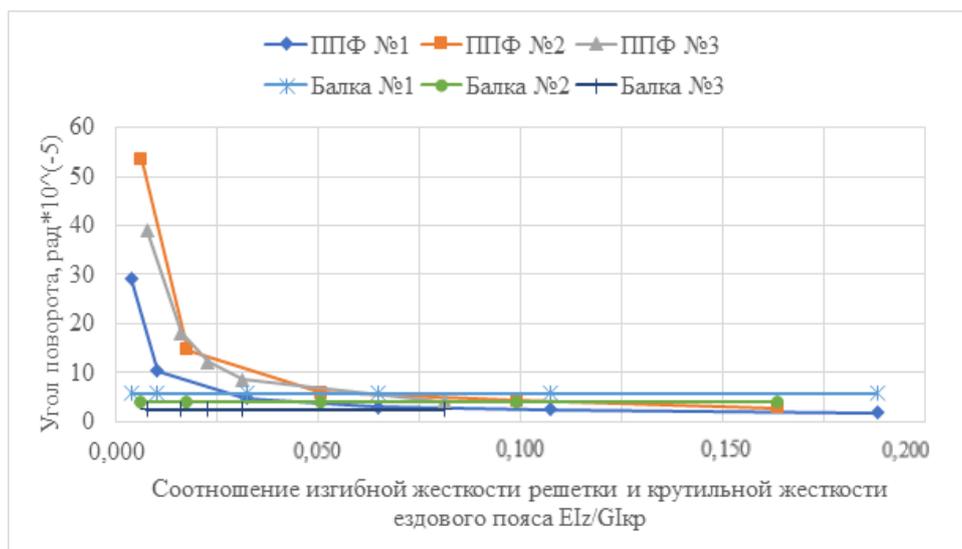


Рисунок 6 – Влияние жесткости решетки на угол поворота ездового пояса ППФ при кручении

После вычисления жесткостей решетки для ППФ построены модели балок на упругих опорах с соответствующими жёсткостями (рисунок 7). Определены погрешности перемещений и внутренних усилий данных расчетных схем в сравнении с моделями ППФ в зависимости от жесткости решетки при действии нагрузки в плоскости фермы.

**Третья глава** посвящена уточнению методики расчета нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы и сравнению результатов расчёта с результатами натурного исследования.

Проведена проверка действующей методики определения внутренних усилий в ППФ. Предложена уточнённая расчётная схема нижнего пояса – балка на упругих опорах в узлах крепления элементов решетки (рисунок 7). Жесткость упругих опор, имитирующих работу решетки ППФ, определяется по формуле (1).

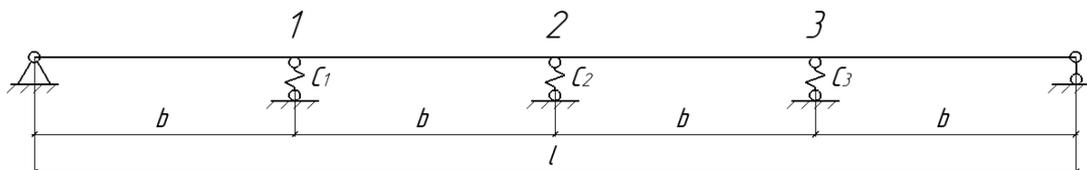


Рисунок 7 – Расчётная схема балки на упругих опорах

Прогиб эквивалентной балки  $f_б$  определён по формуле Мора-Максвелла. Прогиб ППФ  $f_{ППФ}$  определён шестью методами для разработки оптимальной

аналитической методики расчета. Проведено сравнение усилий и перемещений, полученных каждым из методов, выявлен наиболее точный метод определения  $f_{\text{ППФ}}$ . Произведена численная проверка действующего метода определения изгибающего момента в нижнем поясе ППФ от внецентренного примыкания элементов решетки. Разработана методика определения усилий в элементах ППФ с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ. Проведена проверка предложенной методики для ППФ с различными геометрическими параметрами. Проанализирован вклад перемещений от изгибающего момента и поперечных сил в нижнем поясе и других элементах фермы в общую податливость нижнего пояса в плоскости ППФ.

Исследована работа нижнего пояса при кручении. Выявлены отличия его работы от работы однопролетной балки с пролетом, равным пролету ППФ, являющейся расчетной схемой для определения внутренних усилий в нижнем поясе по действующей методике расчета. Предложены методы учета вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение. Выявлены параметры расчета, влияющие на точность определения внутренних усилий и напряжений в элементах ППФ при кручении. Принят аналитический метод определения внутренних усилий в нижнем поясе при кручении, применимый для предварительного расчета.

Расчетная схема рамы, вертикальные элементы которой по жесткости эквивалентны решетке, два раза внешне статически неопределима и пригодна для аналитического расчета. При кручении нижний пояс испытывает горизонтальный изгиб, его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, с различными углами закручивания. Метод №3, в отличие от других рассмотренных аналитических методов, позволяет учесть это и получить значения изгибающих моментов из плоскости фермы в нижнем поясе и элементах решетки.

Во время проведения авторского надзора специалистами ЦНИИпроектстальконструкции и Челябпроектстальконструкции было выполнено

обследование конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината, введенного в эксплуатацию в 1990 г., в котором используются продольные ППФ (рисунок 8). В процессе обследования выявлено большое количество дефектов в узлах крепления к ездовому поясу решетки и в узлах опирания пояса на колонны (рисунок 9). К.И. Ереминым, С.А. Ницетой, М.В. Нащёкиным, С.Н. Шульгой и др. проведена серия натурных испытаний с измерением НДС в наиболее часто повреждаемых узлах тензометрическим методом.

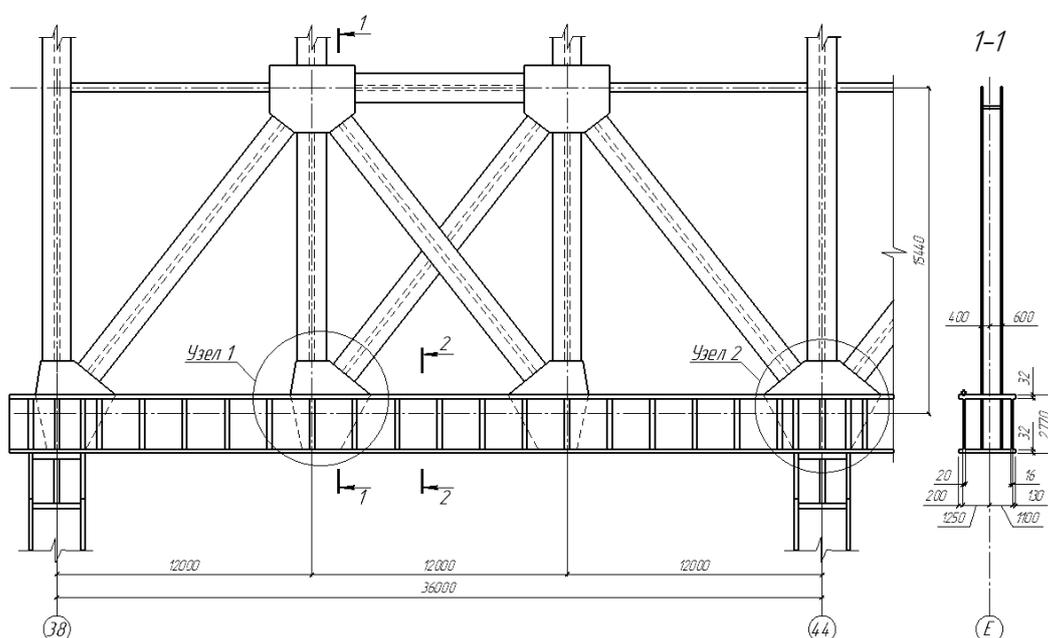


Рисунок 8 – ППФ конвертерного отделения ККЦ ММК

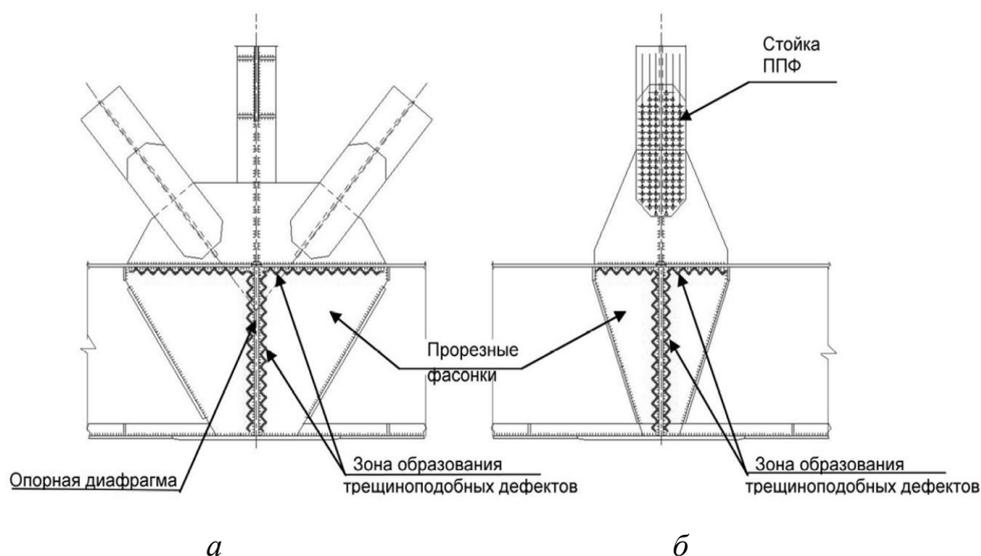


Рисунок 9 – Схема расположения зон образования трещиноподобных дефектов в узлах сопряжения ездового пояса с элементами решетки: а – на опоре; б – со стойкой

В рамках диссертационной работы проведены численное исследование НДС ППФ конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината (рисунок 8). Выполнено сравнение напряжений, полученных аналитическими и численными вычислениями, натурным экспериментом. Сравнение результатов численного расчета и натурального исследования приведено в таблице 1. Схема привязки точек определения напряжений показана на рисунке 10. Данные экспериментальных исследований НДС узла ППФ, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результатами численного за исключением отдельных точек. Несоответствие некоторых напряжений может объясняться влиянием сварочных напряжений и скоплением трещиноподобных дефектов в околошовных зонах.

Таблица 1 – Сравнение значений напряжений в узле «44-Е»

В кгс/см<sup>2</sup>

Точка на рисунке 10	Натурный эксперимент				Численный расчет			
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\sigma_e$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$	$\sigma_e$
1	-147	441	218	169	(-21,7)– (-52,1)	391,8– 432,8	126,2– 167,3	265– 334
2	-168	-840	-396	854	(-157,6)– (-173,2)	(-510,4)– (-547,3)	(-277,0)– (-311,8)	815– 1004
3	966	672	-32	1075	160,8– 208,5	620,71– 655,9	327,48– 356,32	976– 1140
4	714	945	97	1190	705,9– 733,4	101,3– 165,1	94,0– 132,8	906– 1016

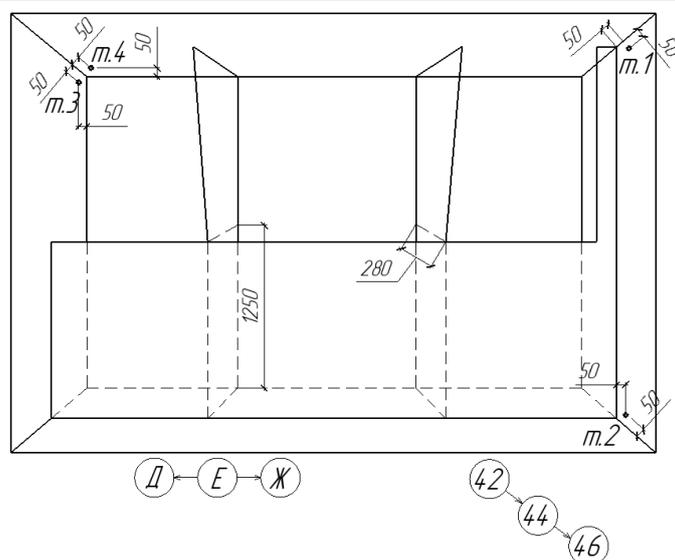


Рисунок 10 – Схема привязки точек определения напряжений в узле «44-Е»

В четвертой главе приведена уточнённая методика статического расчёта ППФ с учетом упругой податливости узлов примыкания элементов решетки к нижнему поясу и вовлечения в пространственную работу пояса на кручение других элементов конструкции. Составлена методика предварительного расчета ППФ. Даны рекомендации по проверочному расчёту ППФ. Приведены результаты расчёта ППФ по предложенной аналитической методике. Выполнен расчёт по предельным состояниям.

На этапе предварительного расчёта нормальные силы в элементах фермы рекомендуется рассчитывать по внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом (рисунок 11).

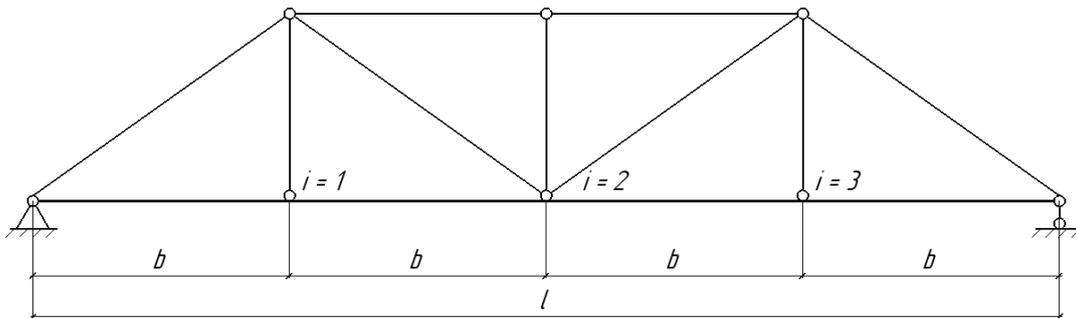


Рисунок 11 – Расчётная схема ППФ с неразрезным нижним поясом

Изгибающие моменты в ездовом поясе следует определять как в балке на упругих опорах (рисунок 7).

Для расчета податливости узлов ездового пояса ППФ, состоящей из четырех и более пролетов, необходимо использовать формулу:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \sum_1^m \int_0^l \frac{[\overline{M_{\text{НП}}^0}]^2}{EI_{y_{\text{НП}}}} ds + \frac{\sum_1^m l_{i_p} [N_{i_p}]^2}{EA_p}; \quad (2)$$

где  $i$  – номер узла сопряжения решетки с нижним поясом (без учета опорного) – рисунок 11.

Для ближайших к опорам узлов ( $i = 1; i = n - 1$ ) трех- и двухпанельной ППФ формулу (2) можно упростить:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \frac{2b \sum_1^m [M_{i_{\text{НП}}}]^2}{3EI_{y_{\text{НП}}}} + \frac{\sum_1^m l_{i_p} [N_{i_p}]^2}{EA_p}. \quad (3)$$

Общий вид формулы определения жесткости упругих опор, имитирующих работу узлов крепления решетки в плоскости ППФ:

$$C_i = \frac{EA_p}{\sum_1^m l_{i\ p} [N_{i\ p}]^2} + EI_{y\ \text{НП}} \left( \frac{1}{\int_0^l [M_{\text{НП}}^0]^2} - \frac{3n}{(n-i)^2 i^2 b^3} \right). \quad (4)$$

Для ближайших к опорам узлов сопряжения нижнего пояса с решеткой ( $i = 1; i = n - 1$ ) трех- и двухпанельной ППФ формула (4) упрощается до вида:

$$C_i = \frac{EA_p}{\sum_1^m l_{i\ p} [N_{i\ p}]^2} + \frac{3EI_{y\ \text{НП}}}{b} \left( \frac{1}{2 \sum_1^m [M_{i\ \text{НП}}]^2} - \frac{n}{(n-1)^2 b^2} \right); \quad (5)$$

где  $n$  – количество панелей ППФ;

$b$  – длина панели нижнего пояса;

$M_{i\ \text{НП}}$  – изгибающие моменты в  $i$ -м узле нижнего пояса ППФ;

$N_{i\ p}$  – продольные усилия в  $i$ -х элементах решетки и верхнего пояса;

$l_{i\ p}$  – длина  $i$ -го элемента решетки или верхнего пояса;

$I_{y\ \text{НП}}$  – момент инерции относительно оси у нижнего (ездового) пояса;

$A_p$  – площади элементов решетки и верхнего пояса.

Определение внутренних усилий  $M_{i\ \text{НП}}$  и  $N_{i\ p}$  производится для  $(n - 1)$  раз внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой расчётной схемы ППФ с неразрезным нижним поясом (рисунок 11).

При кручении предварительный расчет ездового пояса рекомендуется производить как в раме, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке (рисунок 12).

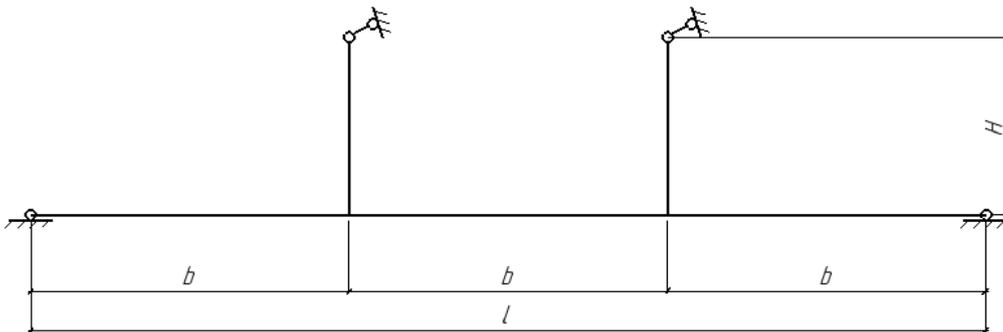


Рисунок 12 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета на горизонтальный изгиб и кручение ( $H$  – высота ППФ по осям пояса)

Момент инерции вертикальных элементов рамы определяется по формуле:

$$I_{\text{прив.}i} = \sum_{j=1}^{k_i} I_j \sin \alpha_j ; \quad (6)$$

где  $\alpha_j$  – угол наклона  $j$ -го элемента решетки к оси ездового пояса.

Приведено сравнение результатов расчёта продольной ППФ по принятой аналитической методике с результатами расчёта по аналитической методике Руководства по проектированию стальных подкрановых конструкций ЦНИИПСК им. Мельникова и результатами численных расчетов.

Рассмотрены следующие виды нагрузок и воздействий:

- а) нагрузки от собственного веса ППФ и веса поддерживаемых ею других элементов сооружения (стропильные фермы, конструкций покрытия и т.п.);
- г) вертикальное давление мостового крана;
- д) горизонтальное воздействие крана.

Методики расчёта:

1. Аналитическая в соответствии с рекомендациями Руководства ЦНИИПСК им. Мельникова;
2. Предложенная аналитическая методика;
3. Численный расчёт с использованием стержневой плоской расчетной схемы однопролётной ППФ с учетом эксцентриситета крепления решетки;
4. Численный расчёт с использованием стержневой плоской расчётной схемы неразрезной ППФ;
5. Численный расчёт с использованием пространственной расчётной схемы из оболочечных конечных элементов (рисунок 13).

Перечисленными методиками определены усилия и напряжения в середине пролёта (сечение 2–2 рисунка 14) для каждого из указанных выше видов нагрузки. Загружение осуществлялось одним краном грузоподъемностью 450 т. Вес груза – 396 т. Значение горизонтальной нагрузки от торможения тележки определено в соответствии с указаниями СП 20.13330.2016.

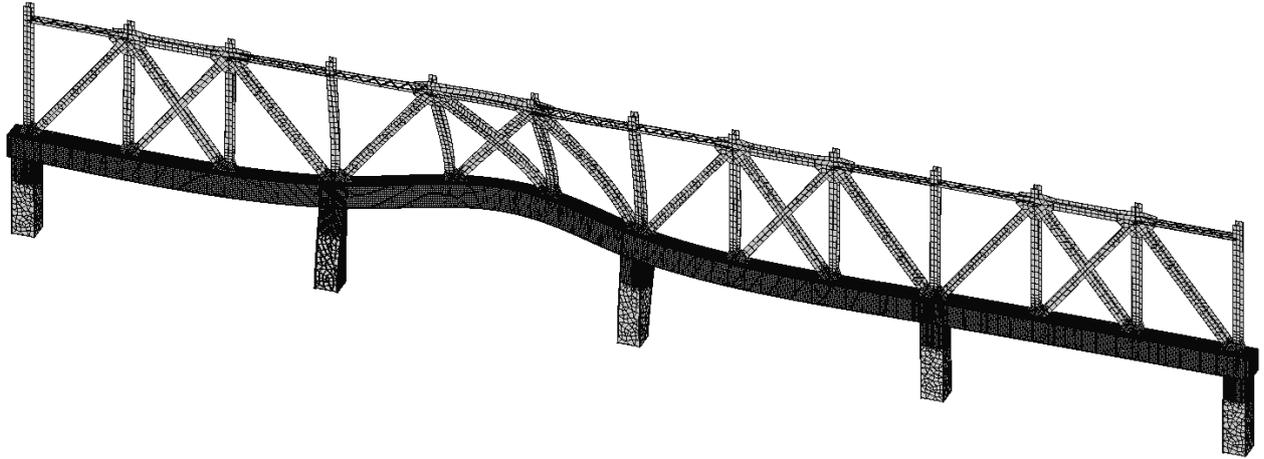


Рисунок 13 – Деформации пространственной расчётной схемы при горизонтальной нагрузке от торможения крана в середине пролёта

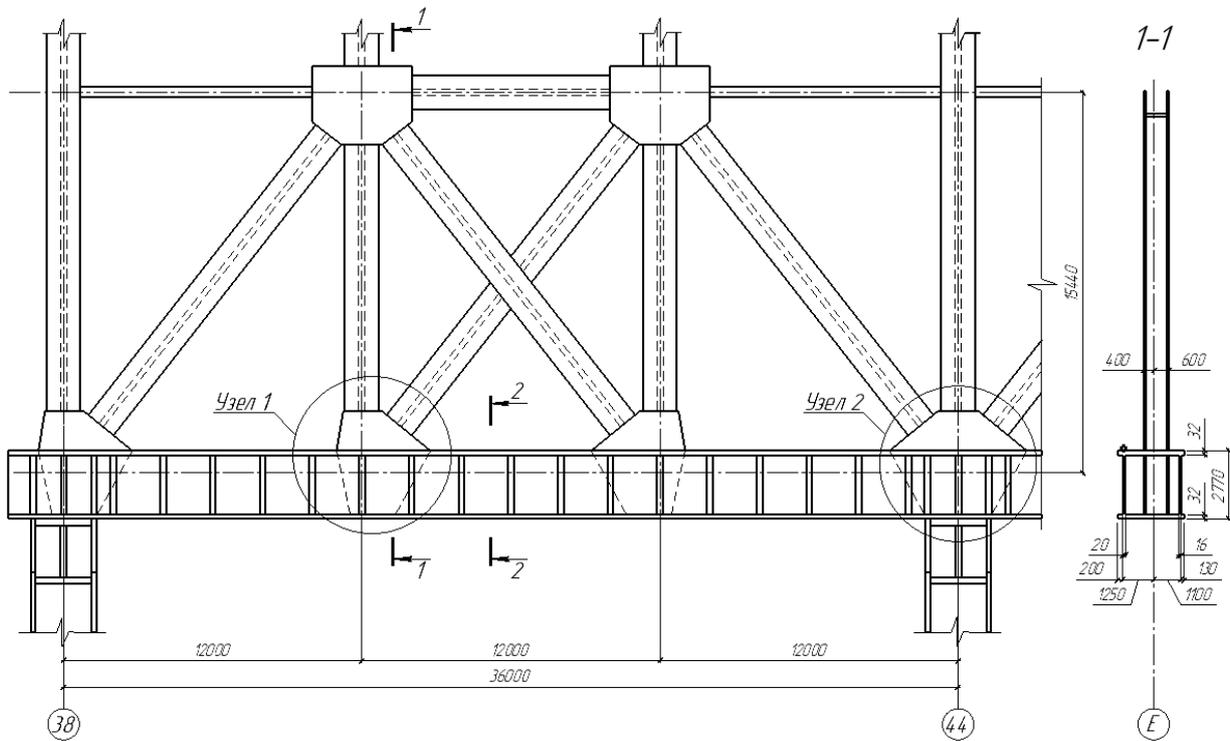


Рисунок 14 – ППФ конвертерного отделения ККЦ ММК

Эквивалентное напряжение вычислено в соответствии с указаниями СП 16.13330.2017 по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{loc,x})^2 - (\sigma_x + \sigma_{loc,x})\sigma_{loc,y} + \sigma_{loc,y}^2 + 3(\tau_{xy} + \tau_{loc,xy})^2}.$$

Результаты определения напряжений приведены на рисунках 15 и 16.

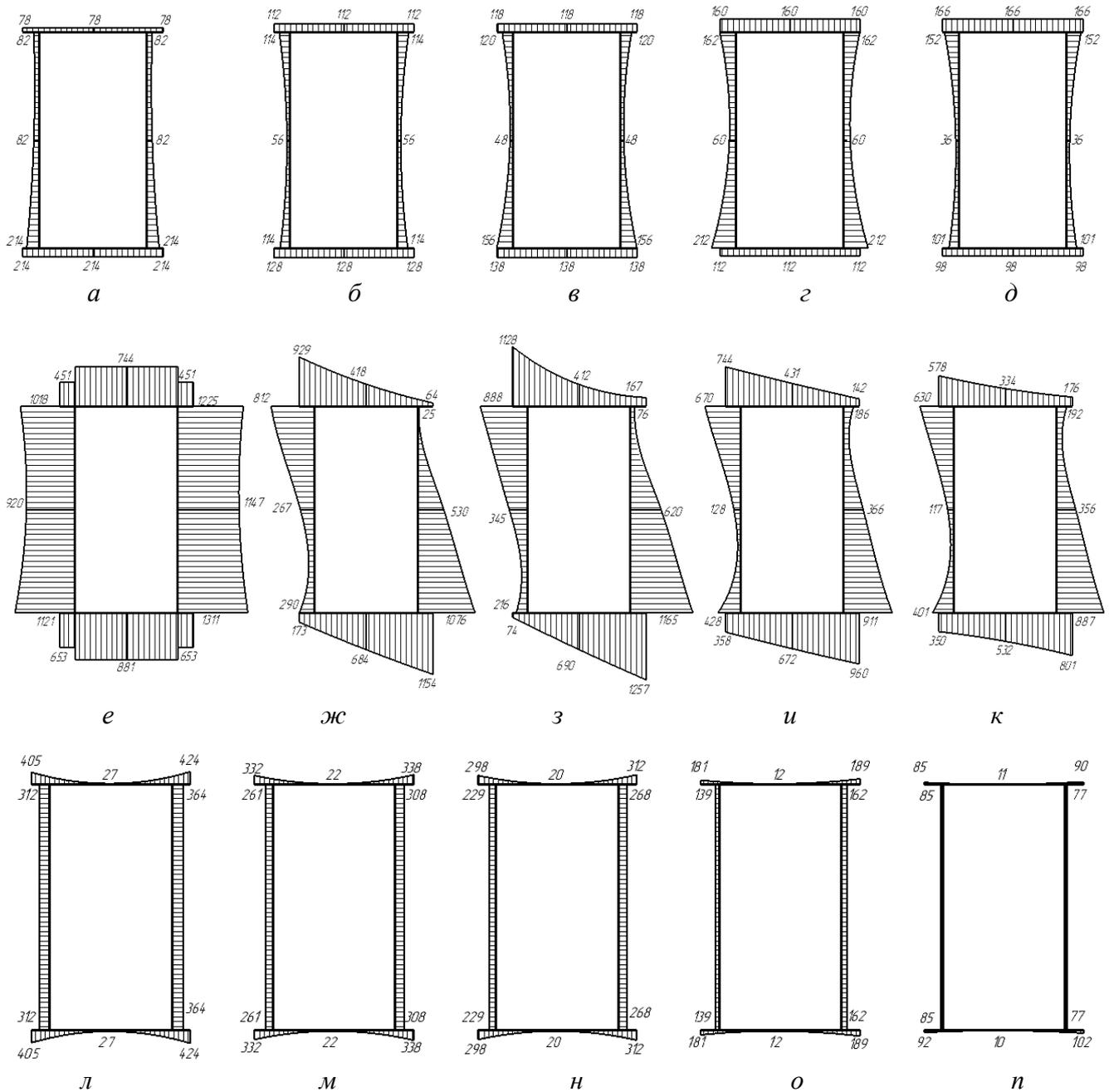


Рисунок 15 – Эпюры эквивалентных напряжений  $[\text{кгс}/\text{см}^2]$  ездового пояса в середине пролета (сечение 2–2 рисунка 14), полученные: а – по методике №1; б – по методике №2; в – по методике №3; г – по методике №4; д – по методике №5 (постоянная нагрузка); е – по методике №1; ж – по методике №2; з – по методике №3; и – по методике №4; к – по методике №5 (нагрузка от крана с одной стороны в середине пролёта); л – по методике №1; м – по методике №2; н – по методике №3; о – по методике №4; п – по методике №5 (нагрузка от торможения тележки крана в середине пролёта)

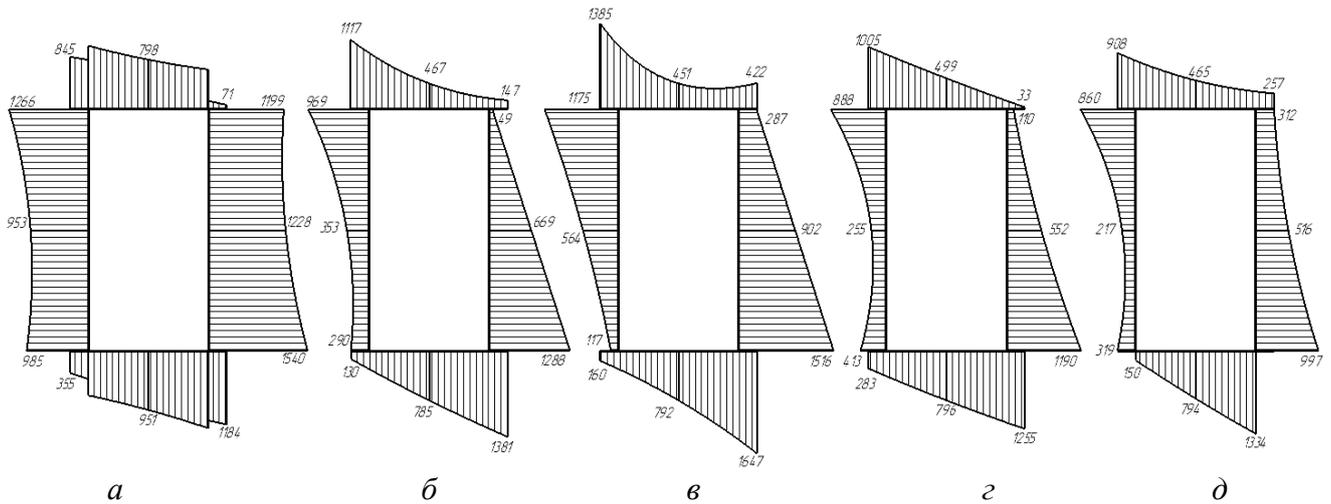


Рисунок 16 – Эпюры эквивалентных напряжений [кгс/см<sup>2</sup>] ездового пояса в середине пролета (сечение 2–2 рисунка 14), полученные: а – по методике №1; б – по методике №2; в – по методике №3; г – по методике №4; д – по методике №5 (постоянная и крановые нагрузки)

Погрешность в определении максимальных напряжений предложенной аналитической методикой относительно однопролётной плоской стержневой расчетной модели составляет:

- при вертикальном изгибе в стенках – 27 %, в полках – 5 %;
- при кручении в стенках и нижней полке – 8 %, в верхней полке – 18 %;
- при горизонтальном изгибе в стенках и полках – 12 %.

Погрешность в определении максимальных напряжений аналитической методикой Руководства ЦНИИПСК им. Мельникова относительно однопролётной плоской стержневой расчетной модели составляет:

- при вертикальном изгибе в стенках – 27 %, в верхней полке – 34 %, в нижней полке – 50 %;
- при кручении в стенках – 21 %, в верхней полке – 54 %, в нижней полке – 30 %;
- при горизонтальном изгибе в стенках и полках – 30 %.

Погрешность в определении максимальных напряжений численным расчетом по однопролётной плоской стержневой расчетной модели относительно пространственной неразрезной расчетной модели составляет:

- при вертикальном изгибе в стенках – 21 %, в полках – 29 %;

- при кручении в стенках – 29 %, в верхней полке – 49 %, в нижней полке – 56 %;

- при горизонтальном изгибе напряжения в плоской модели более чем в три раза выше напряжений в пространственной модели.

Погрешность в определении максимальных напряжений предложенной аналитической методикой относительно пространственной неразрезной расчетной модели составляет:

- при вертикальном изгибе в стенках и верхней полке – 31%, в нижней полке – 23 %;

- при кручении в стенках – 18 %, в верхней полке – 38 %, в нижней полке – 30 %;

- при горизонтальном изгибе напряжения, полученные аналитическим расчётом, также как и напряжения, полученные численным расчётом по плоской модели, более чем в три раза выше напряжений в пространственной модели.

Погрешность в определении максимальных напряжений аналитической методикой Руководства ЦНИИПСК им. Мельникова относительно пространственной неразрезной расчетной модели составляет:

- при вертикальном изгибе напряжения, полученные аналитическим расчётом, более чем в два раза выше напряжений в пространственной модели;

- при кручении в верхней полке – 23 %, в нижней полке – 9 %, в стенках напряжения, полученные аналитическим расчётом, в полтора раза выше напряжений в пространственной модели;

- при горизонтальном изгибе напряжения, полученные аналитическим расчётом, более чем в четыре раза выше напряжений в пространственной модели.

Существенное снижение точности результатов расчета происходит при переходе от неразрезной к разрезной расчетной схеме. Необходимо рассмотреть возможность разработки метода учета неразрезности расчетной схемы многопролетных ППФ на стадии предварительного расчета. Проверочный расчет многопролетных ППФ следует проводить по неразрезной расчетной схеме.

Формы эпюр эквивалентных напряжений от постоянной и тормозной крановых нагрузок, полученных различными методами, совпадают. При горизонтальном изгибе ездового пояса аналитические расчёты и численные расчёты с применением плоских стержневых расчётных схем дают значительную погрешность в определении напряжений относительно пространственной расчётной схемы. Вклад составляющей от горизонтального изгиба, вызванного торможением крановой тележки, в общее напряженное состояние не превышает 10 %. Минимальная погрешность в определении напряжений от горизонтального изгиба при аналитических и численных расчётах с использованием плоских стержневых систем – более 200 %. Требуется дополнительное исследование НДС ППФ при горизонтальном изгибе для оценки необходимости учета нагрузки от торможения тележки крана на стадии предварительного расчета и разработки более точных методов определения напряжений в ездовом поясе ППФ при горизонтальном изгибе. Проверочный расчет ППФ следует проводить по пространственной расчётной схеме с применением оболочечных конечных элементов.

Форма эпюры эквивалентных напряжений от односторонне приложенной вертикальной крановой нагрузки, полученная ранее используемой аналитической методикой, имеет искажённую форму относительно эпюр, полученных другими методами. С каждым шагом упрощения расчётной схемы точность определения напряжений снижается. Это подтверждает необходимость использования на стадии проверочного численного расчёта пространственной модели из оболочечных конечных элементов.

Предложенная аналитическая методика предварительного расчёта позволяет значительно увеличить точность определения напряжения в сравнении с ранее используемой аналитической методикой. Точность определения максимальных напряжений в рассматриваемом сечении (сечение 2–2 рисунка 3.16) в сравнении с методикой Руководства ЦНИИПСК им. Мельникова относительно результатов численного расчёта пространственной модели возрастает:

– при вертикальном изгибе в стенках – на 16 %, в верхней полке – на 20 %, в нижней полке – на 86 %;

– при кручении, вызванном одностороннее приложенной крановой нагрузкой – на 27 %;

– при горизонтальном изгибе, вызванном торможением тележки крана, в стенках – на 23 %, в верхней и нижней полках – на 96 %.

## **Заключение**

### **Итоги выполненного исследования**

Уточнена методика аналитического расчета ППФ с учётом влияния узлов сопряжения элементов решетки с ездовым поясом на его пространственную работу и составлена методика предварительного расчета ППФ.

1. Проведено расчетное исследование деформативно-жесткостных характеристик и напряженно-деформированного состояния нижнего пояса при кручении, изгибе в плоскости и из плоскости ППФ. Изучено влияние параметров расчётных схем ППФ на точность результатов расчёта. Учет в работе нижнего пояса элементов решетки в различной степени влияет на податливость нижнего пояса в разных направлениях. Наибольшее влияние учет решетки оказывает на угловую податливость пояса, в меньшей степени влияет на линейную податливость в плоскости ППФ и оказывает наименьшее влияние на линейную податливость из плоскости ППФ.

2. Изучено влияние жесткости и расцентровки узлов на напряженно-деформированное состояние ППФ. Доказана применимость метода определения узловых моментов от расцентровки узла, используемого при расчёте лёгких ферм с жесткими узлами, для предварительного расчёта ППФ как однопролётной конструкции.

3. Доказано, что при проверке ППФ по второй группе предельных состояний по горизонтальным предельным прогибам необходимо учитывать в расчёте не только горизонтальные силы от торможения тележки крана, но и несимметричные вертикальные нагрузки от его одностороннего расположения.

4. Разработана методика определения усилий с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ. Предложена уточнённая расчётная схема нижнего пояса при расчёте на вертикальный изгиб – балка на упругих опорах в узлах крепления элементов решетки. Представлен метод определения жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки. Уточнена методика расчета нижнего пояса ППФ на кручение. Предложены методы учета вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение. Принят аналитический метод определения внутренних усилий в нижнем поясе при кручении, применимый для предварительного расчета. Достоверность методик определения внутренних усилий в нижнем поясе ППФ подтверждена сопоставимостью результатов аналитических, численных расчетов и натурного исследования.

5. Составлена методика предварительного расчета ППФ с учетом упругой податливости узлов примыкания элементов решетки к нижнему поясу и вовлечения в пространственную работу пояса на кручение других элементов конструкции.

6. Даны рекомендации по предварительному и проверочному расчёту ППФ. Выполнение точного расчет ППФ аналитическим методом не представляется возможным в силу сложности конструкции и особенностей её функционирования. Проверочный анализ ППФ следует проводить численным методом конечных элементов с применением пластинчатых элементов. Рекомендуется выполнять расчёт ППФ в составе полного каркаса или части сооружения.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Расчёт ППФ сложен как на этапе подбора сечений, так и на этапе итоговой проверки. Современные программно-вычислительные комплексы предусматривают встроенные API-объекты, с помощью которых можно формировать программные коды, описывающие аналитические алгоритмы расчета, корректировать их, анализировать результаты расчетов. API позволяет пользователю создавать программные алгоритмы, встраивать в вычислительную

систему разработанные им методики расчета конструкций. Экспорт промежуточных и окончательных результатов расчета в MS Word и MS Excel, автоматическое построение графиков дает возможность получить более полную информацию об объекте, снижает количество ошибок и сокращает время расчета. Разработка программного алгоритма предварительного расчета ППФ позволит проанализировать возможные варианты геометрических параметров конструкции и выбрать наилучшее конструктивное решение. Встраивание предварительного расчета в структуру BIM-проектирования даст возможность использовать расчетную схему в дальнейшей проектной работе и вернуться к ней на этапе проверочного расчета.

Положения диссертации внедрены в проектную, научно-исследовательскую и учебную деятельность, использованы при написании монографии «Подкраново-подстропильные фермы. Особенности конструкции, работы и расчета». Математическая расчетная модель, реализуемая в диссертации, может быть внедрена в современные программно-вычислительные комплексы конечно-элементного анализа: SCAD Office, ПК ЛИРА-САПР, ПК ЛИРА и др. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, строительстве и модернизации предприятий оборонно-промышленного комплекса, металлургических цехов, заводов авиа-, судостроения и других большепролетных зданий с поперечным расположением кранов в уровне покрытия.

**Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях:**

*в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:*

1. Лампси Б.Б. Усиление стальных подкрановых балок при модернизации технологического процесса / Б.Б. Лампси, Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина // Приволжский научный журнал. 2022. – № 2 (62). – С. 24-28.

2. Влияние жесткости элементов решетки на податливость ездового пояса подкраново-подстропильной фермы (ППФ) / Б.Б. Лампси, П.А. Хазов, Ю.Д. Маркина, Д.М. Бриккель // Приволжский научный журнал. 2022. – № 2 (62). – С. 29-36.

3. Лампси Б.Б. Влияние высоты подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на податливость ездового пояса / Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина, П.А. Хазов // Приволжский научный журнал. 2023. – № 1 (65). – С. 28-34.
4. Маркина Ю.Д. Кручение нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. – № 11. – С. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36
5. Лампси Б.Б. Жесткость узлов подкраново-подстропильной фермы в её плоскости / Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина // Строительная механика и конструкции. 2023. – № 4 (39). – С. 51–63. DOI 10.36622/VSTU.2023.39.4.006
6. Markina Yu. D. Verification and refinement of the methodology for calculating the stiffness of joints of crane secondary truss in its plane / Yu.D. Markina // Privolzhsky Scientific Journal. 2024. – № 1 (69). – С. 11-21.
7. Маркина Ю.Д. Напряженное состояние нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы при стесненном кручении / Ю.Д. Маркина // Вестник гражданских инженеров. - 2024. - № 3 (104). – С. 36-43. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-3-36-43  
*в монографии:*
8. Лампси Б.Б. Подкраново-подстропильные фермы. Особенности конструкции, работы и расчёта: монография / Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – 169 с. ISBN 978-5-528-00557-7  
*в сборниках научных трудов:*
9. Маркина Ю.Д. Автоматизированный предварительный расчёт как начальный этап ВМ-моделирования на примере подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 18–20 октября 2023 года. – Красноярск: Издательство Инженерно-строительный институт ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 2023. – С. 323–326.
10. Маркина Ю.Д. Особенности статического расчёта подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 13-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 14–16 ноября 2023 года. – Москва: ИПРИМ РАН, Издательство Общество с ограниченной ответственностью «Сам Полиграфист», 2023. – С. 113-120.
11. Маркина Ю.Д. Расчётное исследование напряжений в нижнем поясе подкраново-подстропильной фермы при кручении / Ю.Д. Маркина // XIII Всероссийский Фестиваль науки: сборник тезисов, Нижний Новгород, 24–26 октября 2023 года. – Нижний Новгород: Издательство ННГАСУ, 2023. – С. 91-92.
12. Маркина Ю.Д. Уточнение нагрузок, действующих на подкраново-подстропильную ферму / Ю.Д. Маркина, Б.Б. Лампси // Наука и творчество: вклад молодежи: сборник материалов IV всероссийской молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Махачкала, 08–09 ноября 2023 года. – Махачкала: ДГТУ, Издательство Типография ФОРМАТ, 2023. – С. 104-108.
13. Маркина Ю.Д. Аналитический расчет местных напряжений от катков кранов в подкраново-подстропильной ферме / Ю.Д. Маркина // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023: сборник докладов IV Национальной научной конференции, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Издательство МГСУ, 2024. – С. 30-37.
14. Маркина Ю.Д. Особенности работы подкраново-подстропильной фермы на горизонтальный изгиб и кручение / Ю.Д. Маркина // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Омск, 23–24 ноября 2023 года. – Омск: Издательство СибАДИ, 2023. – С. 669-672.

15. Маркина Ю.Д. Уточнение методики расчёта ездового пояса подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Сборник докладов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 15 апреля 2024 года. – Белгород: Издательство БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 75-79.
16. Маркина Ю.Д. Влияние характера работы подкраново-подстропильной фермы на ее напряженно-деформированное состояние / Ю.Д. Маркина // Инженерно-техническое образование и наука: сборник трудов четвертой международной научно-практической конференции, Новороссийск, 22–26 апреля 2024 года. – Новороссийск: Издательство БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийск, 2024. – С. 3-4.
17. Маркина Ю.Д. Напряженно-деформированное состояние подкрановых конструкций / Ю.Д. Маркина // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сборник статей XXVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 28–29 марта 2024 года. – Пенза: Издательство ПГАУ, 2024. – С. 297-300.
18. Маркина Ю.Д. Угловая податливость узлов подкраново-подстропильных ферм / Ю.Д. Маркина // Труды I международной научно-практической конференции, Новороссийск, 04–08 сентября 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова в г. Новороссийск, 2023. – С. 5-7.
19. Маркина Ю.Д. Расчёт нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы на вертикальный изгиб / Ю.Д. Маркина // В сборнике: Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024), Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: Издательство АРКАИМ, 2024. – С. 115-122.
20. Маркина Ю.Д. Влияние геометрических характеристик подкраново-подстропильной фермы на податливость её ездового пояса / Ю.Д. Маркина // Развитие строительной отрасли: сборник материалов II Межрегиональной конференции, Вологда, 21–24 сентября 2023 года. – Вологда: ВоГУ, 2024. – С. 16-24.

**Маркина Юлия Дмитриевна**

**РАСЧЁТ ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ С УЧЕТОМ  
УПРУГОЙ ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВ ПРИМЫКАНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ К ЕЗДОВОМУ НИЖНЕМУ ПОЯСУ**

**2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 06.02.2025. Объем 1,41 п. л.

Тираж 100 экз. Заказ №12345

Отпечатано ИП Кузнецов Н.В.,  
Нижний Новгород, ул. Шорина, 13/13