Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
канд. техн. наук, доцент
Лампси Борис Борисович

Нижний Новгород – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 2

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. Основные конструктивные и расчетные особенности систем типа подкраново-подстропильных ферм. Состояние вопроса 16

1.1. Назначение и конструктивные особенности подкрановых конструкций 16

1.1.1. Подкрановые балки открытого и замкнутого сечения 16

1.1.2. Подкраново-подстропильные фермы 25

1.2. Анализ повреждаемости подкраново-подстропильных ферм 36

1.3. Нагрузки и воздействия на подкраново-подстропильные фермы и современные расчетные положения 41

1.4. Выводы по главе 1 48

ГЛАВА 2. Расчетное исследование деформативно-жесткостных характеристик и анализ упрощенных расчетных схем подкраново-подстропильных ферм 50

2.1. Влияние жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе . 50

2.2. Выбор расчетной схемы для исследования влияния геометрических параметров подкраново-подстропильной фермы на податливость ездового пояса 60

2.3. Влияние геометрических параметров подкраново-подстропильной фермы на податливость ездового пояса 63

2.4. Выводы по главе 2 81

ГЛАВА 3. Уточнение методики расчета нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы 83

3.1. Расчет нижнего пояса на вертикальный изгиб 83

3.2. Расчет нижнего пояса на кручение 99

3.3. Сравнение результатов расчета с результатами натурного исследования 110

3.4. Выводы по главе 3 117

ГЛАВА 4. Методика предварительного расчета подкраново-подстропильной фермы 119

4.1. Нагрузки 119

4.2. Статический расчет системы 122

4.3. Расчет напряжений 130

4.4. Результаты расчёта подкраново-подстропильной фермы по предложенной аналитической методике 131

4.5. Выводы по главе 4 138

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 140

Список литературы 143

Приложение 1. Акты внедрения 159

Приложение 2. Дипломы и сертификаты 163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Накопленные с годами результаты наблюдений за техническим состоянием подкраново-подстропильных ферм (ППФ) позволяют судить об эффективности принятых при проектировании инженерных решений [29, 33, 37, 95, 120]. Выявленные повреждения и дефекты свидетельствуют о том, что особенности работа пояса, по которому перемещается кран, недостаточно учтены при расчете и проектировании конструкции [35, 37]. 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 [120], 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 [36, 60, 75].

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 [75]. В этом случае совмещение в одной конструкции функций подкрановой балки и подстропильной системы дает значительный экономический эффект в сравнении с раздельными 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 [38, 43, 89].

Особую сложность представляет и расчет ППФ. Стержневая модель ППФ представляет собой плоскую систему [47, 51, 61]. 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 загружении пролета ППФ наблюдается образование пластических деформаций именно в присоединяемых элементах (в стойке и раскосах), а не в самом узле. Таким образом, крепление системы решётки к ездовому поясу нельзя считать шарнирным [37, 51, 52]. Элементы решетки вовлекаются и в пространственную работу ездового пояса, воспринимая изгиб из плоскости и кручение, оказывая поддерживающее влияние для ездового пояса [60, 61].

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 фасонок с верхним поясом и опорной диафрагмой по сварному шву и в околошовной зоне в первые же годы эксплуатации [36-38, 75, 120].

Степень разработанности темы. Рекомендации по расчету ППФ приведены в Руководстве по проектированию стальных подкрановых конструкций [97]. Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Нормальные силы в элементах ППФ от крановой нагрузки определяются путём невыгодного загружения 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 загружение 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.

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, но и несимметричные 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 балки 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.

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

Апробация результатов.

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». Подтверждающие документы представлены в приложении 1.

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-Перербург);

– 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).

Подтверждающие документы представлены в приложении 2.

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».

ГЛАВА 1. Основные конструктивные и расчетные особенности систем типа подкраново-подстропильных ферм. Состояние вопроса

1.1. Назначение и конструктивные особенности подкрановых конструкций

1.1.1. Подкрановые балки открытого и замкнутого сечения

Современные технологические процессы, присутствующие в промышленности, зачастую нуждаются в надежных грузоподъемных механизмах большой мощности. В зависимости от выполняемого на предприятии технологического процесса могут быть использованы краны различной грузоподъемности, что накладывает заметный отпечаток на выбор крановых конструкций.

Для обеспечения мобильности крана в пределах его рабочего пространства необходимо использование подкрановых балок. Подкрановые балки с установленными на них крановыми рельсами укладываются по колоннам производственных зданий. В результате этого кран может свободно перемещаться для транспортирования грузов, находящихся в рабочей зоне.

Как конструкции, воспринимающие значительные изгибающие моменты, подкрановые балки чаще всего представляют собой массивные двутавровые сварные конструкции. Для восприятия локальных напряжений и обеспечения общей устойчивости в подкрановых балках устанавливаются поперечные ребра жесткости (рисунок 1.1) [59]. Крановая нагрузка воспринимается подкрановыми балками, а затем через систему колонна-фундамент передается на основание. Помимо продольной силы, крановая нагрузка создает значительный изгибающий момент в колонне.

Подкрановые балки могут быть как разрезными, так и неразрезными, что учитывается при выполнении расчета прочности и жесткости.

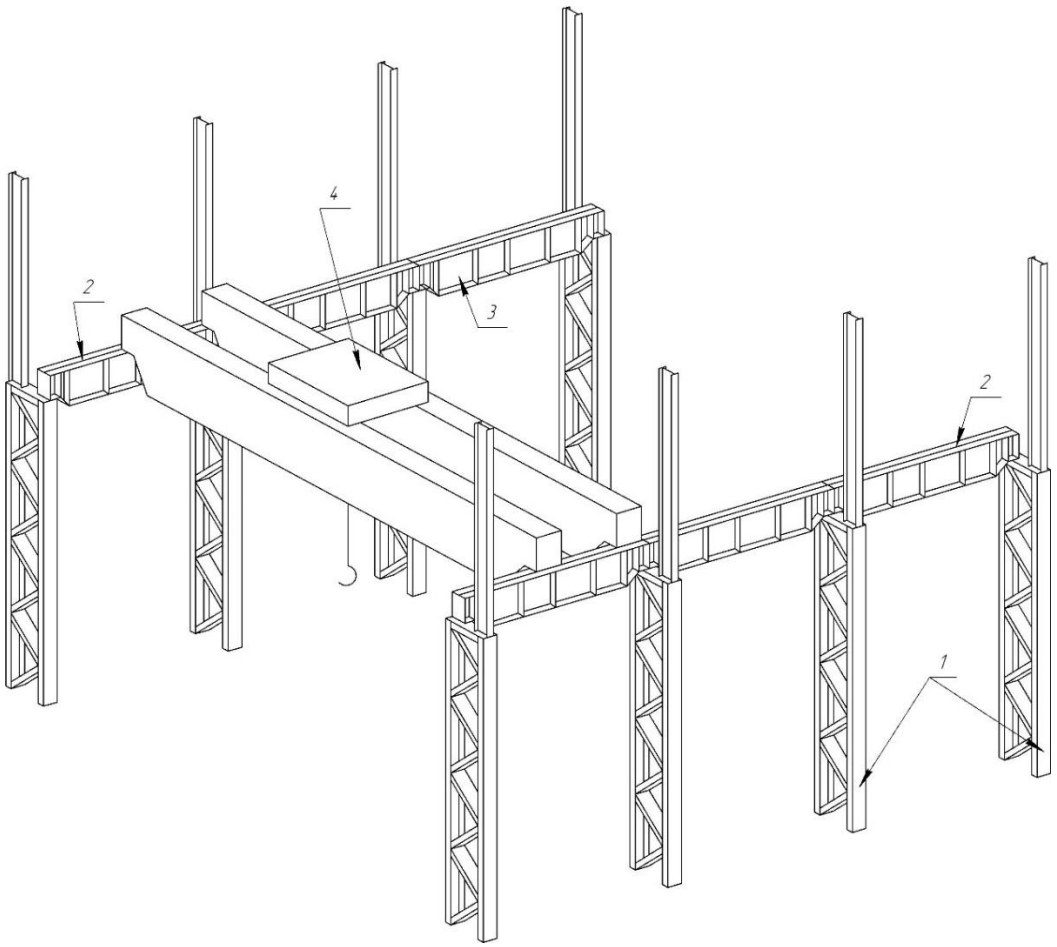


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема расположения несущих и подкрановых конструкций промышленного здания: 1 – колонны, 2 – крановый рельс, 3 – подкрановая балка, 4 – мостовой кран

Основное отличие подкрановых балок от обычных изгибаемых массивных конструкций состоит в необходимости восприятия динамических нагрузок, заметно изменяющихся во времени. Подкрановые конструкции работают в условиях, сильно отличающихся от работы обычных балочных конструкций покрытий и перекрытий. Подвижный динамический характер воздействий, высокий уровень местных напряжений в стенке под катком крана, наличие не только вертикальных, но и горизонтальных нагрузок, а также многократность их приложения определяют особенности расчета и конструирования подкрановых балок.

Помимо изгибающего момента, в сечении подкрановой балки возникают внецентренные продольные внутренние усилия, вызываемые разгоном и торможением мостового крана. Кроме этого, в силу различных факторов, зачастую

имеет место смещение кранового рельса, в результате чего в сечении балки возникает крутящий момент. Также при продольном торможении крановой тележки возникает горизонтальная сила, вызывающая кручение подкрановой балки.

Подкрановые балки работают с переменным или знакопеременным циклом напряжений, что способствует проявлению усталости материала. Подвижная сосредоточенная нагрузка действует последовательно по длине всей балки, в результате чего необходимо обеспечение надежности верхней части балки. Динамическая нагрузка на подкрановую балку часто сопровождается рывками и ударами, что вызывает расшатывание всей конструкции в целом, а также ее локальных участков и соединений [55, 81].

В ряде цехов черной металлургии, оборудованных кранами с тяжелым режимом работы, наблюдаются частые расстройства подкрановых путей. Имеют место случаи преждевременного выхода из строя подкрановых балок. В стенах подкрановых балок (в местах прикрепления стенки к верхнему поясу) появляются трещины, причем трещины проходят как по шву, так и по основному металлу вблизи шва.

Наиболее распространенный вид повреждения подкрановых балок – возникновение продольных трещин в сварных швах верхнего пояса и в прилегающих к ним участках (рисунок 1.2).

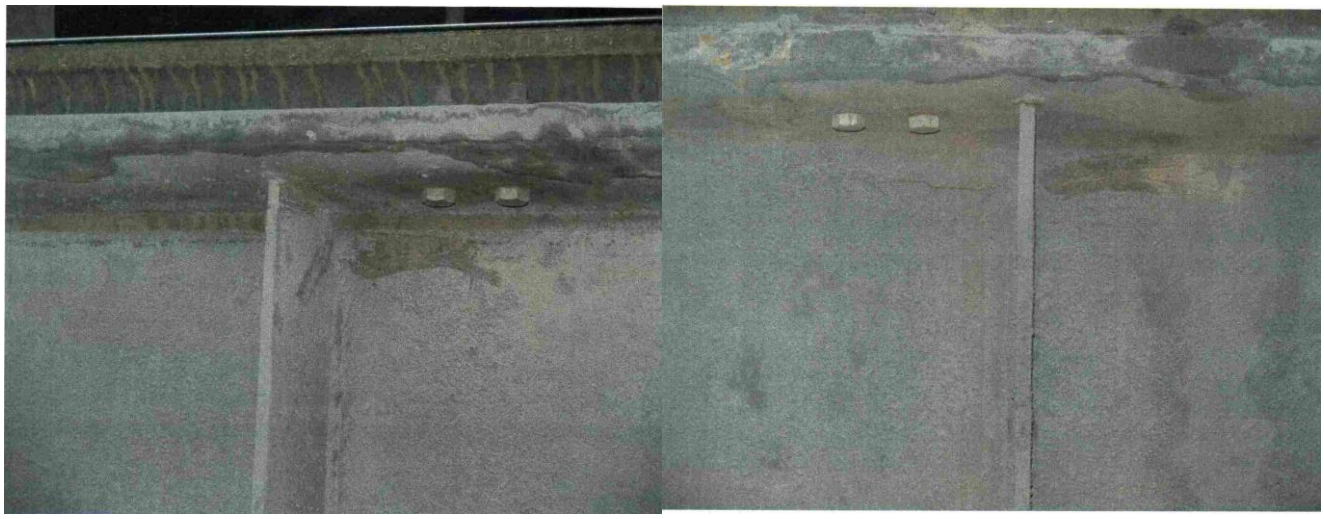


Рисунок 1.2 – Продольные трещины в сварном шве, соединяющем верхний пояс и стенку сварной подкрановой балки, установленной в цеху [55]

При расчетах подкрановых балок принимают схему, согласно которой к головке рельса прикладывается вертикальное давление катка крана *P* и боковая сила *T* (рисунок 1.3). Измерение действительных величин показывает, что эти силы могут значительно отличаться от расчетных значений.

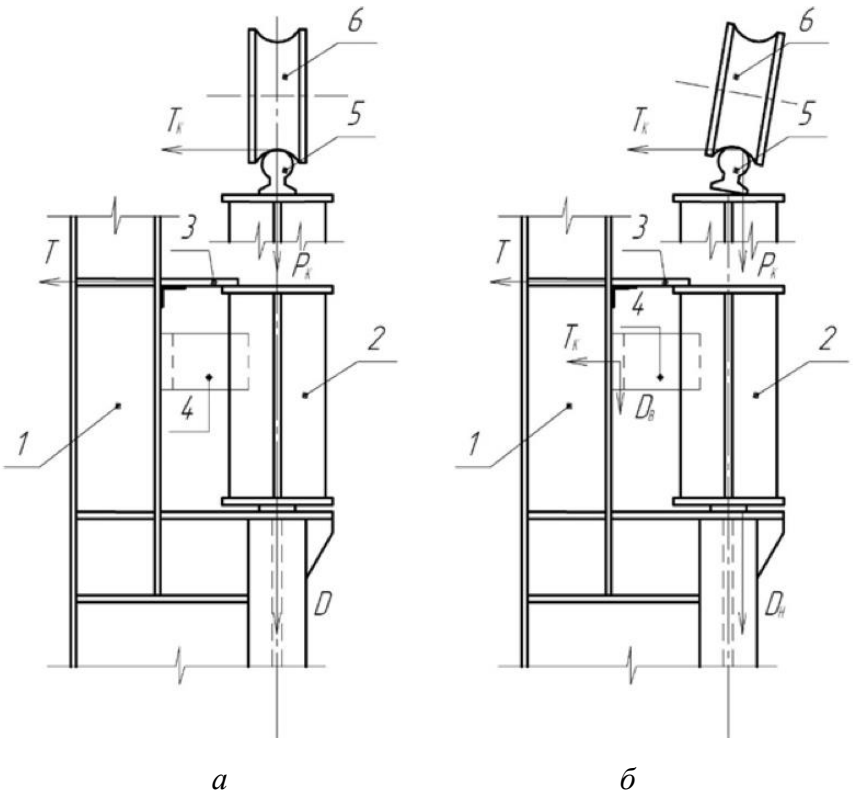


Рисунок 1.3 – Расчетная схема подкрановых балок. Передача крановых усилий с колеса на рельс и с балки на колонну: *а* — принимаемая по расчету; *б* — действительная; 1 — колонна; 2 — подкрановая балка; 3 — соединительная планка; 4 — диафрагма; 5 — подкрановый рельс; 6 —колесо крана

Зачастую при проектировании подкрановых балок остается неучтенным тот факт, что крепление кранового рельса, по которому происходят перемещения грузоподъемной конструкции, невозможно осуществить по всей длине. Крановый рельс крепится к верхней полке балки с помощью болтов с определенным шагом. При этом в промежутках между болтами не всегда обеспечивается плотное прилегание конструкций [93]. Тем не менее, во время расчета передача усилий на балку принимается по длине рельса, то есть не учитывается возможность возникновения значительных локальных напряжений.

Разрушение подкрановой балки может происходить в результате возникновения неучтенных расчетом внутренних усилий, возникающих из-за неточностей изготовления и монтажа. При расчете принимается, что линии действия внешних нагрузок, воспринимаемых балкой, совпадают с вертикальной геометрической осью ее поперечного сечения. Случайные эксцентриситеты, возникающие при монтаже как самой балки, так и подкранового рельса, не должны превышать 15 мм. Тем не менее, по данным многочисленных обследований, эти эксцентриситеты нередко достигают 40–45 мм. Любые отклонения и эксцентриситеты, возникающие в реальной конструкции, вызывают значительные крутящие моменты в верхней полке и в балке в целом (рисунок 1.3) [55, 81].

Наличие в реальных конструкциях неучтенных при расчете крутящих моментов приводит к увеличению касательных напряжений, возникающих в сечениях балки.

При возникновении кручения верхней полки возникают значительные напряжения в сварном шве соединения верхнего пояса и стенки. В результате циклического действия подобных нагрузок в этом шве появляются макроскопические трещины, причиной образования которых является раскрытие микротрещин и дефектов материала (явление усталости металла).

Для обеспечения устойчивости стенок подкрановых балок при проектировании предусматривается установка ребер жесткости. Ребро жесткости является концентратором напряжений, причем значения возникающих локальных напряжений могут значительно превосходить значения расчетных сопротивлений материала. Это может привести к преждевременному образованию и раскрытию трещин в металле. При переезде кранового колеса над ребром жесткости в сечениях верхней полки возникает значительный скачок нормальных напряжений, что, при многократном повторении подобного нагружения, может приводить к раскрытию трещин и выходу подкрановой балки из строя.

Анализ действительной работы подкрановых балок показывает, что причинами, вызывающими преждевременные повреждения подкрановых балок и

снижение их долговечности, наряду с использованием низкоресурсных сварных соединений [80, 81, 89], являются недостаточная изученность силовых воздействий от крановых нагрузок и несоответствие расчетных схем реальным конструкциям [84, 98, 109].

Изучением напряженно-деформированного состояния (НДС) стенок подкрановых балок занимались Б.М. Броуде, Б.Ю. Уваров, Б.Б. Лампси, Г.А. Шапиро, А.А. Апалько, Н.С Москалев, О.Ф. Иванков, Ю.И. Кудишин, И.Н. Малышкина, Е.А. Митюгова, Э.А. Рывкин, К.А. Шишов, В.И. Камбарова, В.Ф. Сабуров, Ю.И. Ларькин, В.П. Федосеев, А.С. Лазарян, Б.Н. Васюта и др. [2, 7, 10, 44, 46, 112, 117]

На верхнюю зону стенки двутавровой подкрановой балки действуют общие для пролёта загружения, вызывающие косой изгиб, свободное и стеснённое кручение и локально приложенные с эксцентриситетом сосредоточенные сил от колёс крана $P, T, M_{\text{кр}}$, вызывающие местное сжатие и кручение верхней полки и изгиб стенки из плоскости. На рисунке 1.4 показано многокомпонентное НДС подрельсовой зоны стенки, где $\sigma_{x,0}, \tau_{xy,0}$ – напряжения от общего изгиба балки; $\sigma_{loc,x}, \sigma_{loc,y}, \tau_{loc,xy}$ – напряжения от сосредоточенного давления колес крана; $\sigma_{fx}, \sigma_{fy}, \tau_{fxy}$ – напряжения от местного изгиба стенки, вызванного местным кручением верхнего пояса; $\sigma_{dop,x}, \sigma_{dop,y}, \tau_{dop,xy}$ – дополнительные нормальные и касательные напряжения, возникающие вследствие сварочных напряжений, различия расчётной схемы и реальных условий эксплуатации. По результатам исследований И.Н. Малышкиной, Б.Ю. Уварова и Ю.И. Кудишина [11, 45], напряжениями от общего стесненного и свободного кручения подкранового бруса, возникающими в верхней зоне стенки подкрановой балки, можно пренебречь.

Основа для определения напряжений в подкрановой зоне стенки заложена исследованием местного НДС балок при действии сосредоточенных нагрузок Б.М. Броуде [8] и развита в работах Б.Б. Лампси, Э.А. Рывкина, В.П. Федосеева, Ю.И. Кудишина [44, 46, 47] и др.

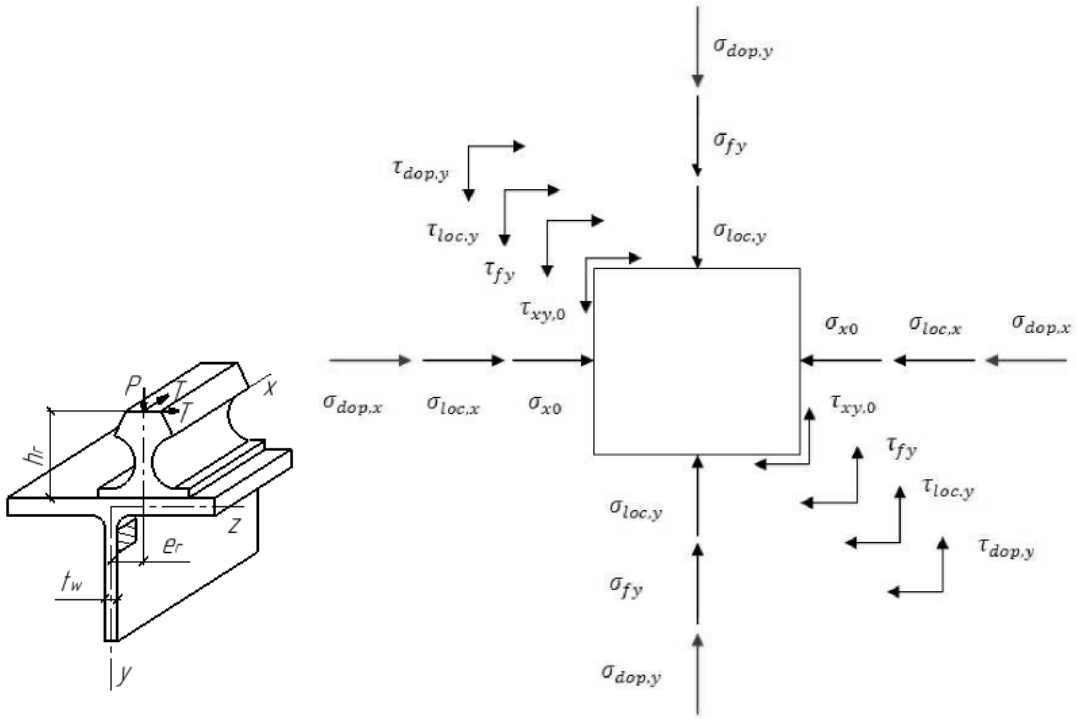


Рисунок 1.4 – НДС в плоскости поверхности верхней зоны стенки подкрановой балки со стороны эксцентриситета рельса

В реальных условиях эксплуатации подкрановых конструкций невозможен полный контакт между поверхностью рельса и верхним поясом, нагрузка передается через пятна контакта. Поэтому полученные теоретическим исследованием Б.М. Броуде [7] результаты нуждались в экспериментальной проверке, которая была выполнена К.А. Шишовым и В.Ф. Сабуровым [114]. Произведенные натурные испытания подтвердили соответствие рассчитанных напряжений местного смятия $\sigma_{loc,y}$ по формуле Б.М. Броуде действующим напряжениям в реальной конструкции:

$$\sigma_{loc,y} = \frac{\gamma_{f1} F_n}{t_w l_{ef}}; \tag{1.1}$$

где γ_{f1} - коэффициент увеличения сосредоточенной вертикальной нагрузки от одного колеса крана, принимаемый согласно дополнительному коэффициенту по СП 16.13330.2017;

F_n - полное нормативное значение сосредоточенной вертикальной нагрузки от одного колеса крана;

t_w - толщина стенки;

l_{ef} - условная длина, определяемая согласно 8.2.2 СП 16.13330.2017.

Позднее в выражение был введен коэффициент надежности по нагрузке для крановых нагрузок γ_f, принимаемый согласно СП 20.13330.2016.

Влияние ребер жёсткости на НДС подкрановой балки изучалось Б.М. Броуде [8], А.А. Апалько [2], Ю.И. Кудишиным [45], Е.А. Митюговым [78]. По результатам проведенных А.А. Апалько экспериментов, изменение расстояния между ребрами жесткости (если оно не менее 0,75 высоты стенки), тормозные балки, соседние грузы (приложенные на расстоянии не менее 1,2 м друг от друга) не оказывают значительного влияния на величину и характер распределения напряжений $\sigma_{loc,y}$. Ю.И. Кудишин и Е.А. Митюгов [44] занимались оценкой влияния конструктивных факторов (рёбер жёсткости, форм стенки и пр.) на НДС подкрановой стенки балки. На основании их исследования выведены уравнения, вошедшие в строительные нормы, которые с достаточной точностью позволяют находить компоненты локального напряжённого состояния.

В.П. Федосеевым [109] предложена зависимость нормального $\sigma_{loc,x}$ и касательного $\tau_{loc,xy}$ напряжений от сосредоточенного давления колес крана от $\sigma_{loc,y}$:

$$\sigma_{loc,x} = 0{,}25\sigma_{loc,y};$$

$$\tau_{loc,xy} = 0{,}325\sigma_{loc,y}. \qquad (1.2)$$

А.А. Апалько, Ю.И. Кудишиным, Е.А. Митюговым [2, 44, 74] были произведены лабораторные исследования распределения напряжения σ_{fy} от местного изгиба стенки, вызванного местным кручением верхнего пояса подкрановой балки. Г.В. Чалковым [112] проведен сравнительный анализ зависимостей напряжений от размера стенки, вычисленных по 20 различным методикам расчета. По результатам установлено, что для традиционного диапазона соотношения сторон отсека стенки от 0,5 до 1,5, наиболее близким к экспериментальному является решение Е.А. Митюгова [74]:

$$\sigma_{fy} = \frac{1{,}333 M_t a t_w}{(I_t + 0{,}333 t_f^2 b_f + 0{,}059 t_w^2 h_w) h_w}; \quad (1.3)$$

a - расстояние между вертикальными ребрами стенки балки;

b_f и t_f - соответственно ширина и толщина верхнего пояса балки;

I_t - моментов инерции при кручении рельса;

h_w - полная высота стенки;

M_t - местный крутящий момент, определяемый по формуле, полученной Э.А. Ревякиным:

$$M_t = \gamma_f \gamma_{f1} F_n e + 0{,}75 Q_T h_T; \quad (1.4)$$

где e = 0,2b, (здесь b - ширина подошвы рельса);

Q_T - расчетная горизонтальная нагрузка, направленная поперек кранового пути, вызываемая перекосами мостовых кранов и непараллельностью крановых путей и принимаемая согласно СП 20.13330.2016;

h_T - высота кранового рельса.

Перечисленные исследования местного НДС подкрановых балок базируются на лабораторных испытаниях балок двутаврового сечения длиной не более 18 м при грузоподъемности мостовых кранов не более 200 т. Прямое использование полученных результатов при исследовании работы ездовых поясов ППФ без учета масштабного фактора, замкнутости ездового пояса и особенностей работы самой ППФ является спорным и нуждается в дополнительной проверке.

На долговечность и надежность подкрановой балки напрямую влияет её конструктивная форма. В настоящее время большая часть эксплуатируемых подкрановых балок имеет двутавровое сечение. Усовершенствованием и разработкой новых конструктивных решений подкрановых конструкций занимались Н.С. Стрелецкий, Е.И. Беленя [12], И.И. Ведяков, К.К. Нежданов [77-81], А.С. Довженко, А.И. Кикин, И.В. Попченков и др. К.К. Неждановым [81] был создан новый тип подкрановых конструкций, в котором за счёт включения рельса в работу балки увеличивается общая жесткость конструкции – рельсобалочный (рисунок 1.5).

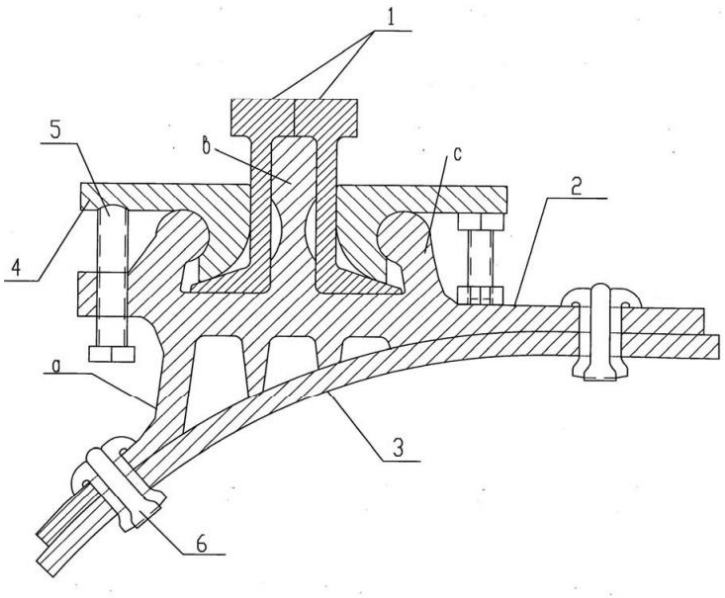


Рисунок 1.5 – Соединение рельса с подкраново-подстропильной балкой [81]. 1 – пара рельсов односторонними подошвами; 2 – подрельсовая подкладка; 3 – трубчатый пояс подкраново-подстропильной балки; 4 – Г-образные клеммы; 5 – домкратный болт; 6 – полые заклёпки с внедряемыми сердечниками; а – подошва подрельсовой подкладки; в и с –центральный и боковой гребни подрельсовой подкладки

Применение рельсобалочных конструкций увеличивает долговечность и ремонтопригодность подкрановых конструкций, снижает их материалоёмкость.

1.1.2. Подкраново-подстропильные фермы

ППФ отличаются от классических ферм, в первую очередь, большими габаритами и развитым ездовым поясом коробчатого сечения, сваренным из стальных пластин.

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. [72]

Усовершенствованием методики расчета и конструктивных решений этих конструкций занимаются 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. [30, 33,34, 44, 49, 81]

Родоначальницей ППФ можно считать подкрановую систему мартеновского цеха завода им. Ф.Э. Дзержинского 1936–1945 гг., представляющую собой подкрановую балку плоского типа, связанную с нижним поясом основной фермы. Первая ППФ была спроектирована в конце 1950-х – начале 1960-х годов институтом ЦНИИПСК для главного здания мартеновского цеха пролетом 48 м под краны грузоподъемностью до 640 т. Данная конструкция (рисунок 1.6) является продольной ППФ, используемой при перемещении мостовых кранов вдоль здания.

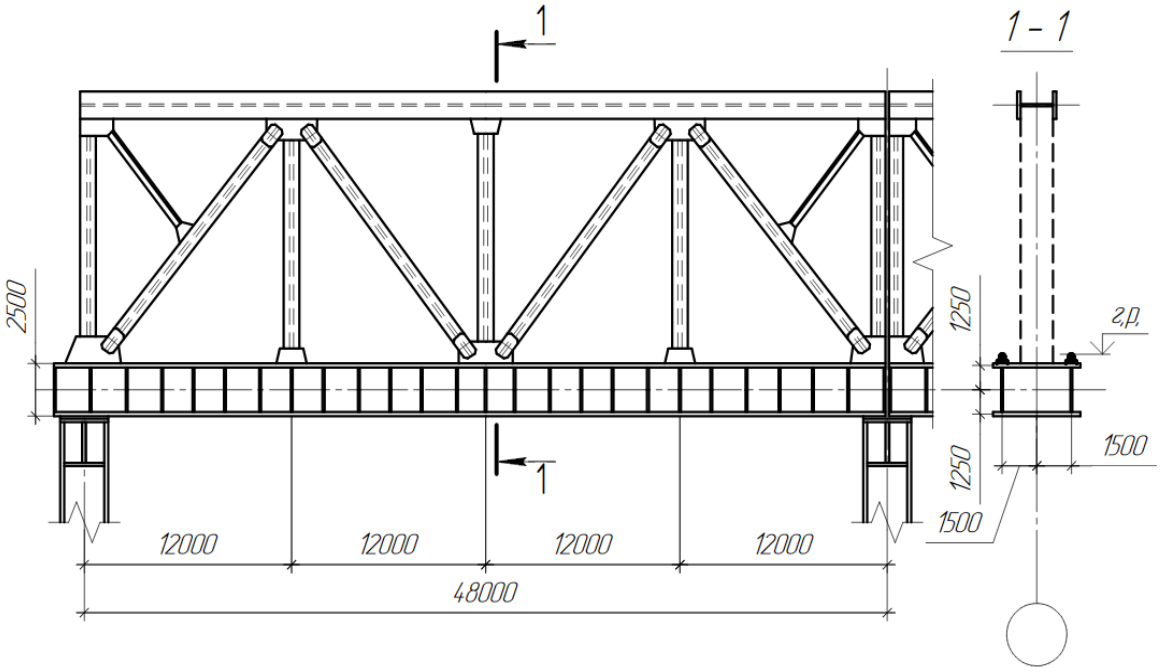


Рисунок 1.6 – Продольная ППФ пролетом 48 м

После успешного применения продольных ППФ, для решения трудных задач по эксплуатации кранов тяжелых режимов работы в большепролетных промышленных зданиях, на их основе были созданы еще более сложные системы – поперечные ППФ. Показанная на рисунке 1.7 120-метровая конструкция разработана ЦНИИПСК, она эксплуатируется при шаге основных рам 36 м и четырёх мостовых кранах (по два с каждой стороны) грузоподъемностью 30 т.

В обеих представленных на рисунках 1.6 и 1.7 конструкциях движение мостового крана осуществляется по нижнему поясу. Такое конструктивное решение является наиболее распространенным. Также были разработаны ППФ с верхним ездовым поясом и с двумя ездовыми поясами.

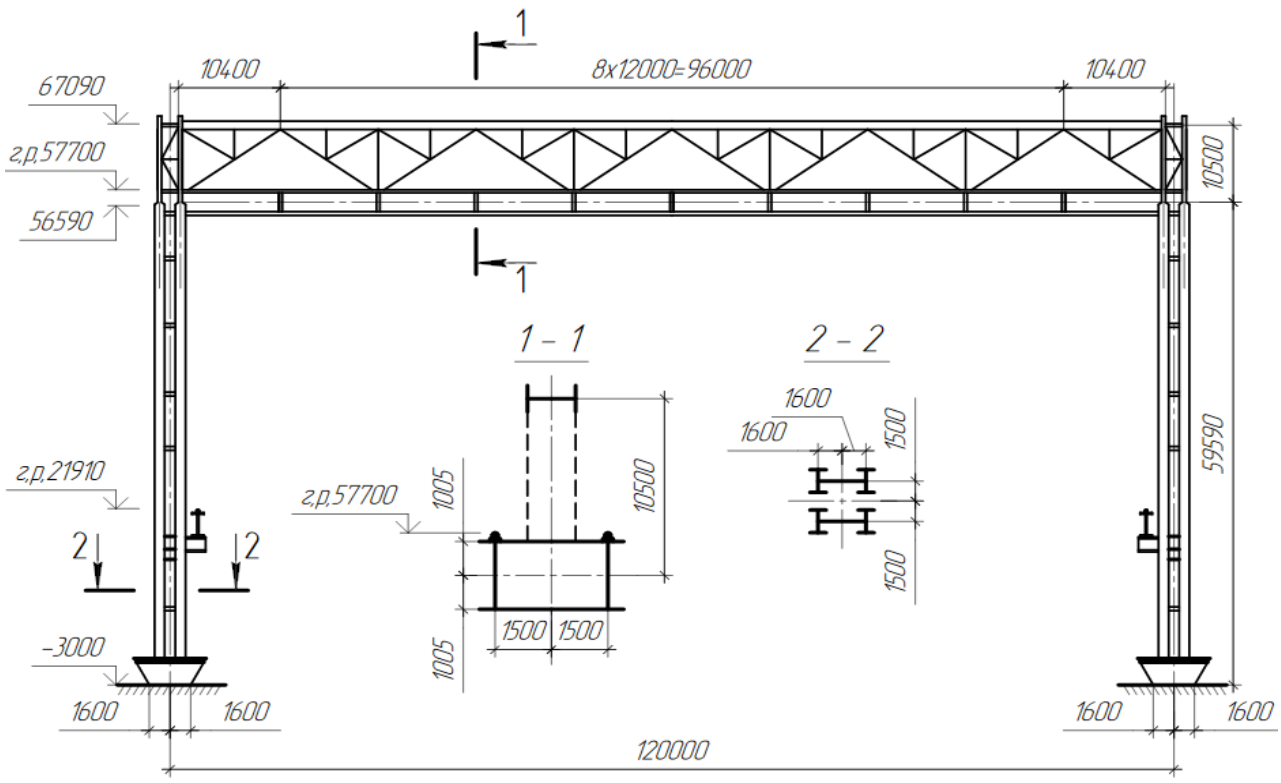


Рисунок 1.7 – Поперечная ППФ пролетом 120 м

Большие габариты ППФ определяются областью её применения. Объединение подкрановой конструкции и подстропильной фермы в одну систему целесообразно при больших пролетах и нагрузках на конструкцию, тяжелом режиме работы предприятия. ППФ получили наибольшее распространение в металлургических цехах (рисунок 1.8), на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, авиационных заводах, заводах судостроения и в других большепролетных зданиях с поперечным расположением кранов в уровне покрытия [29, 31, 32, 48, 49, 74, 77].

Величина одного пролета в таких сооружениях достигает 24–36 м и более. При устройстве подкрановых балок пролетом более 36 м высотой более 3,9 м в их стенках необходимо выполнять монтажный стык, что усложняет монтажные работы. Кроме того, подкрановые конструкции работают в крайне тяжелых условиях: необходимо использование кранов режимов 7К и 8К весом до 750 т грузоподъемностью до 640 т; цикл производства часто должен быть непрерывным.

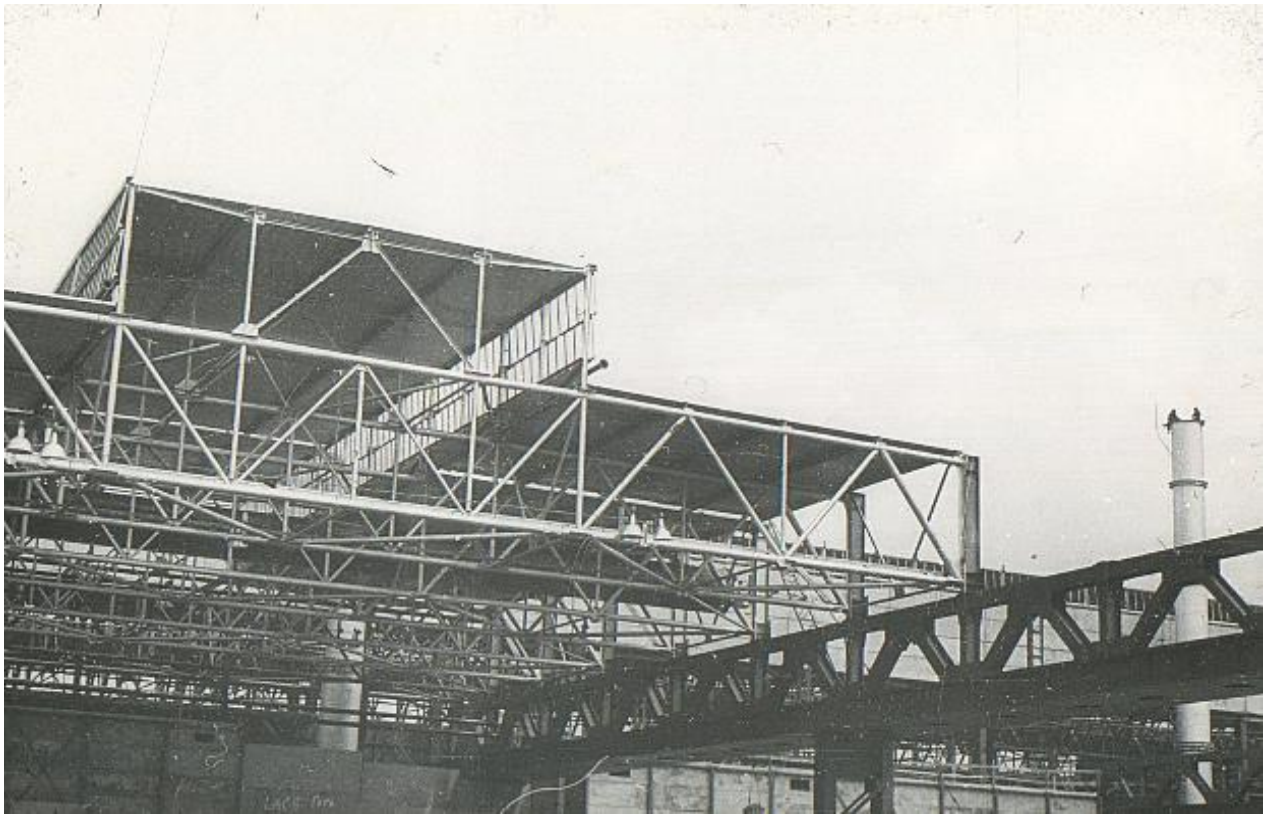


Рисунок 1.8 – ППФ ОАО «Челябинский металлургический комбинат», г. Челябинск [117]

Технико-экономический анализ конструктивной формы ППФ приведен М.В. Романовым [90]. На рисунке 1.9 представлена диаграмма экономии стали при использовании ППФ вместо выполненных раздельно подкрановой балки и подстропильной фермы для пролетов 24 и 36 м. С увеличением пролёта и нагрузок на подкрановую систему или кровлю эффективность применения ППФ возрастает.

Для удобства опирания вышележащих конструкций верхний пояс ППФ располагается горизонтально, параллельно нижнему. Стропильные фермы опираются на верхний пояс в узлах. Верхний пояс и элементы стержневой системы решетки ППФ изготавливаются из сварных Н-образных двутавров. Стандартно применяются треугольный (рисунки 1.6, 1.7) или раскосный типы решётки, решетку часто усиливают шпренгельной системой (рисунок 1.7) или панелями с крестовой решёткой (рисунок 1.10). Длину одной панели принимают 12 или 6 м. Количество панелей зависит от длины пролёта.

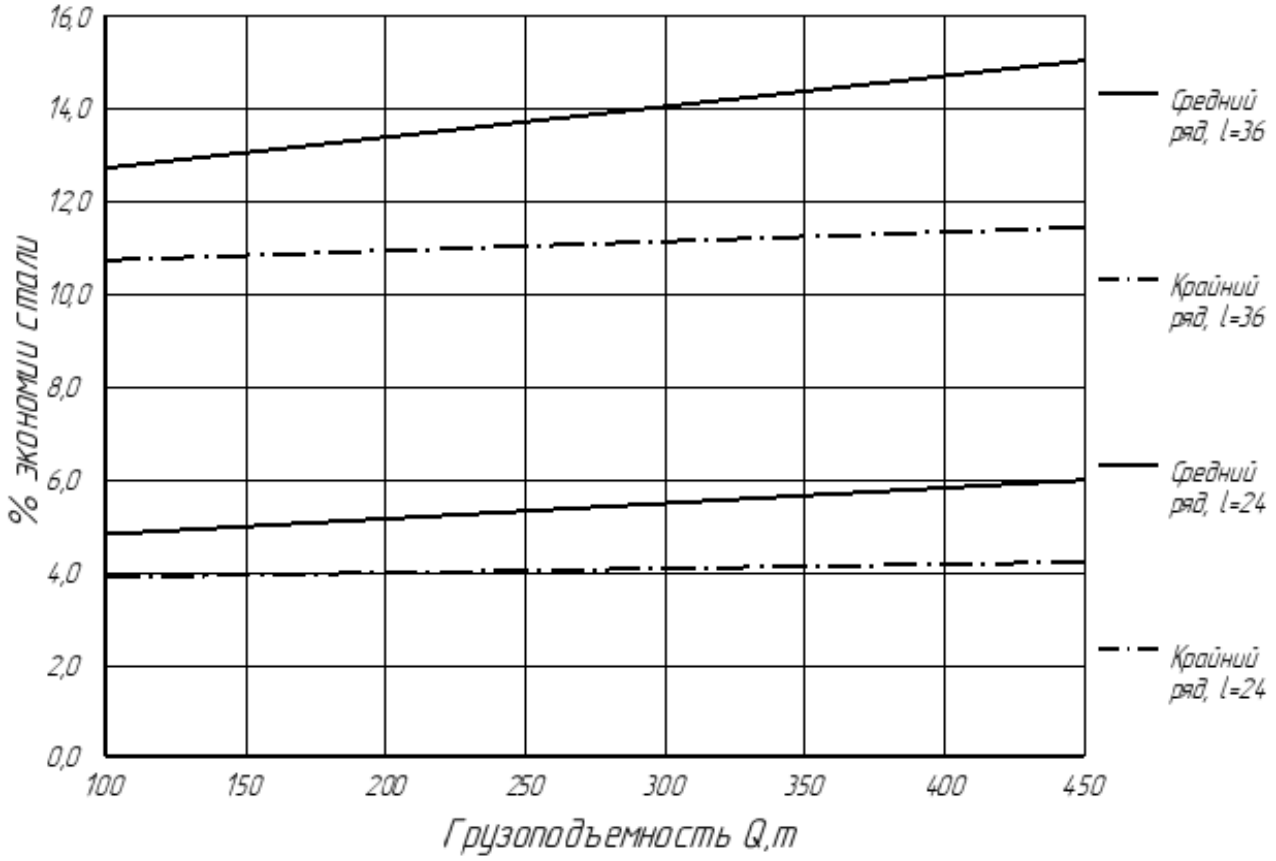


Рисунок 1.9 – Диаграмма экономии стали при использовании ППФ вместо выполненных раздельно подкрановой балки и подстропильной фермы для пролетов 24 и 36 м [90]

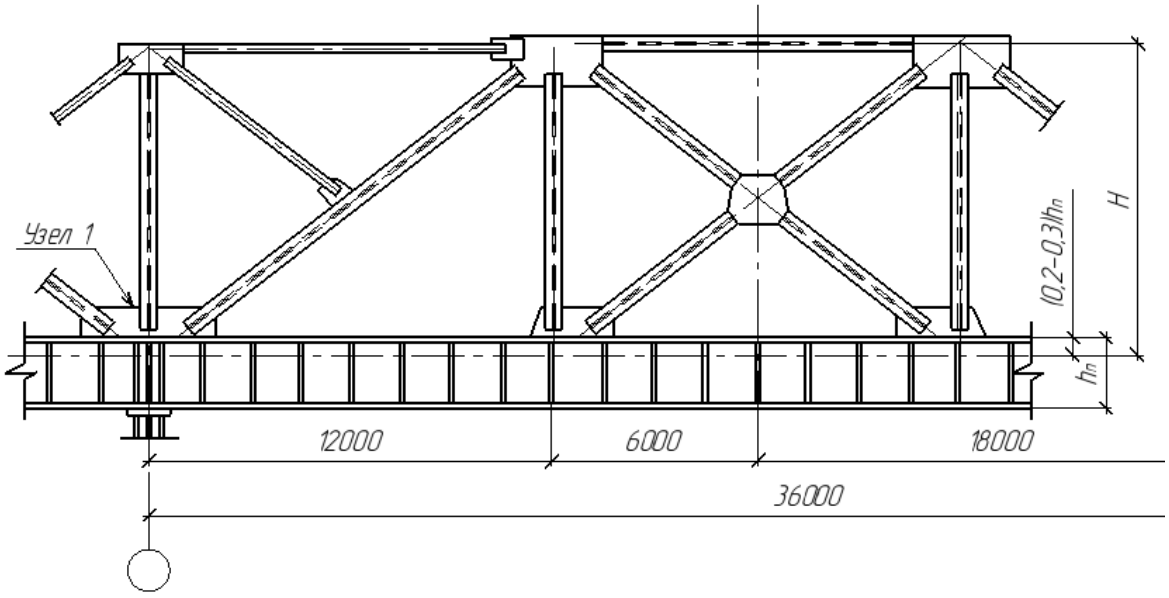


Рисунок 1.10 – Конструктивная схема неразрезной ППФ с пролётом 36 м

Нижний пояс ППФ выполняется сварным прямоугольным замкнутого сечения. Ширина нижнего пояса составляет 2–3 м. Это обуславливается

конструктивными требованиями: большими габаритами крановых мостов на опоре и необходимостью организации проходов по поясу вдоль крановых рельсов. Ездовой коробчатый пояс выполняется разрезным или неразрезным, это позволяет придать ему большую жёсткость и обеспечить плавность его оси при деформациях.

Все крепления элементов решётки к поясам осуществляются на высокопрочных болтах. Примыкание элементов решётки к нижнему поясу выполняется посредством прорезных фасонок. Узлы примыкания системы решетки к ездовому коробчатому поясу являются габаритными и сложными в исполнении (рисунок 1.11), для большей компактности элементы решётки центрируют не на ось пояса, а с эксцентриситетом. В узлах крепления решётки к нижнему поясу, а также в сечениях между узлами, с шагом 1,2–1,5 высоты пояса, но не более 4 м, устанавливаются диафрагмы жёсткости.

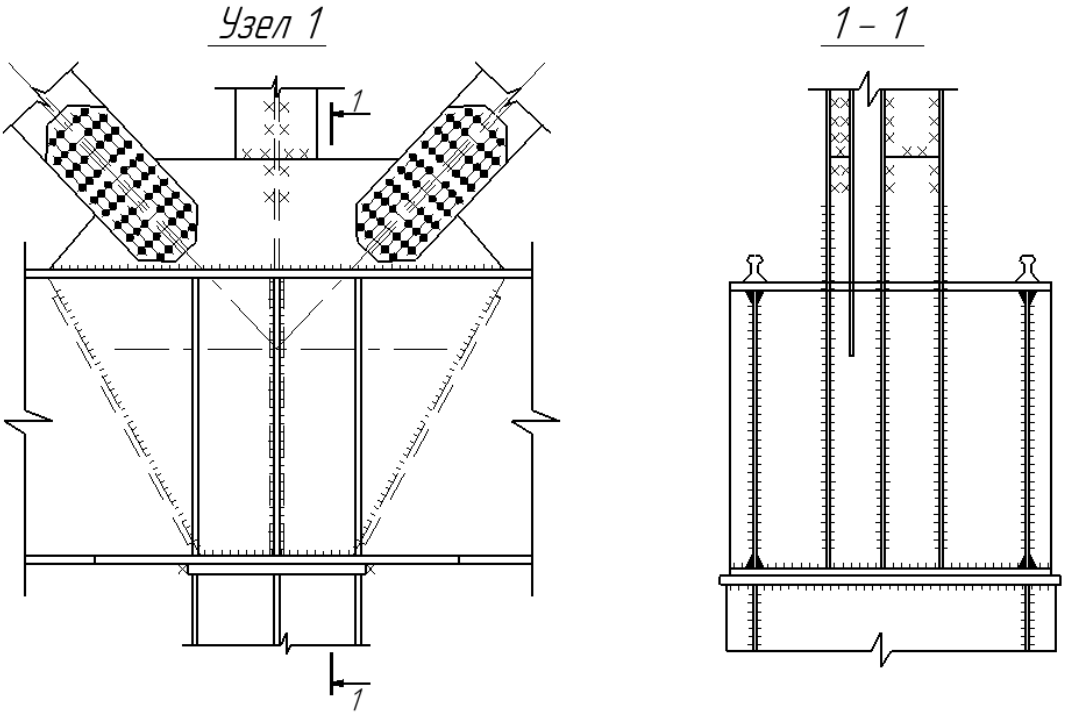


Рисунок 1.11 –Узел примыкания системы решетки к ездовому коробчатому поясу

ППФ можно разделить на две категории: продольные (рисунок 1.6) и поперечные (рисунок 1.7). Основные различия этих конструкции сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики продольных и поперечных ППФ

Сравнительный критерий	Продольные ППФ	Поперечные ППФ
Направление движения кранов	Вдоль знания	Поперёк здания
Сфера применения	Цехи черной металлургии	Заводы авиа- и судостроения
Основной критерий определения высоты	Габариты мостовых кранов (выполнение требований жёсткости обеспечивается с запасом)	Требования вертикальной жёсткости
Длина перекрываемого пролёта	Максимальный пролёт в настоящее время - 48 м. Чаще используется при 24 (рисунок 1.9) и 36 м (рисунок 1.11)	Максимальный пролёт в настоящее время - 120 м
Конструктивные особенности	Разрезная или неразрезная многопролетная конструкция, длиной достигает длины температурного блока сооружения. Устанавливается на месте стандартной подкрановой балки	Большепролетная конструкция. Устанавливается на месте ригеля поперечной рамы
Степень статической неопределимости	Для упрощения считается внешне и внутренне статически определимой. Для этого принимается разрезной на опорах, нижний пояс считается разрезным в местах примыкания решётки.	Число узлов нижнего пояса (включая жёсткие узлы примыкания к колонне) + число лишних связей в опорных закреплениях

В 1980 г. Г.М. Толстобровым было запатентовано конструктивное решение ППФ с ездовым нижним поясом из двух двутавров, соединенных между собой горизонтальными связями и поперечными диафрагмами [86], к которым прикрепляются стойки и раскосы (рисунок 1.12). Выполнение нижнего пояса ППФ из двутавров позволяло более рационально распределить материал в сечении нижнего пояса, способствовало сокращению расхода стали, примерно на 10 % удешевляло и упрощало изготовление ППФ [86].

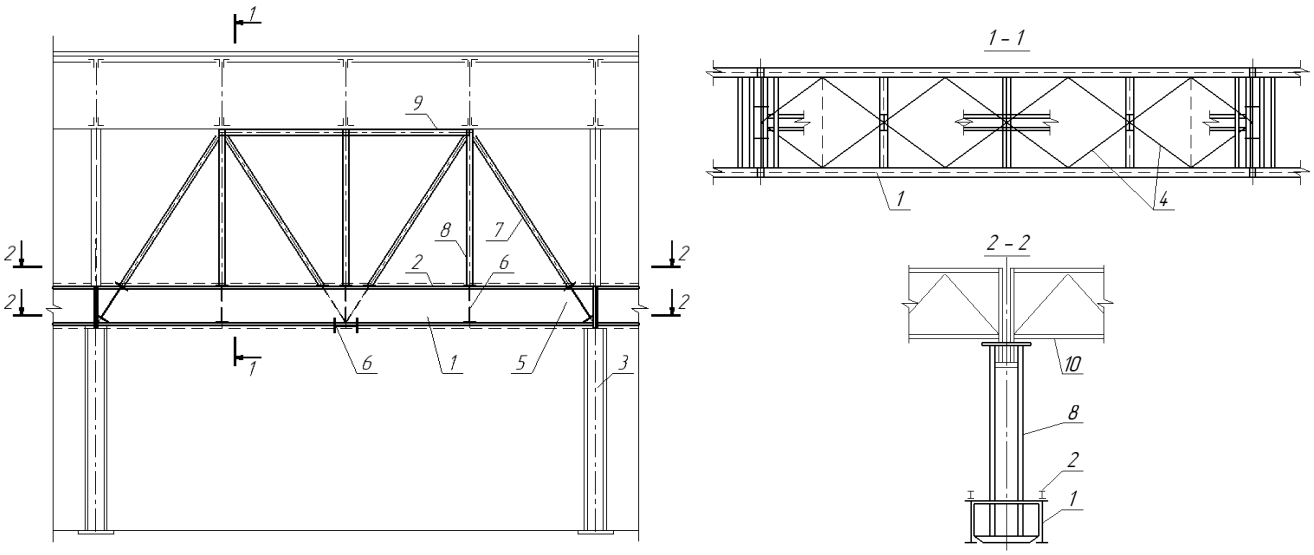


Рисунок 1.12 – ППФ Г.А. Толстоброва. 1 – нижний пояс из двух сварных двутавров; 2 – рельс; 3 – колонна; 4 – горизонтальные связи по двутаврам нижнего пояса; 5 и 6 – поперечные диафрагмы; 7 – раскосы; 8 – стойки; 9 – верхний пояс; 10 – стропильная ферма

Первые типовые ППФ пролетом 24–36 м, предназначенные для монтажа по средним рядам колонн металлургических комбинатов над конверторами и мартеновскими печами выполнялись однопролётными [90], т.е. с минимальной нулевой живучестью [80]. Позднее, для обеспечения плавности оси ездового пояса при деформациях и повышения его жесткости, пояс ППФ стал выполняться неразрезным [95] (рисунок 1.13).

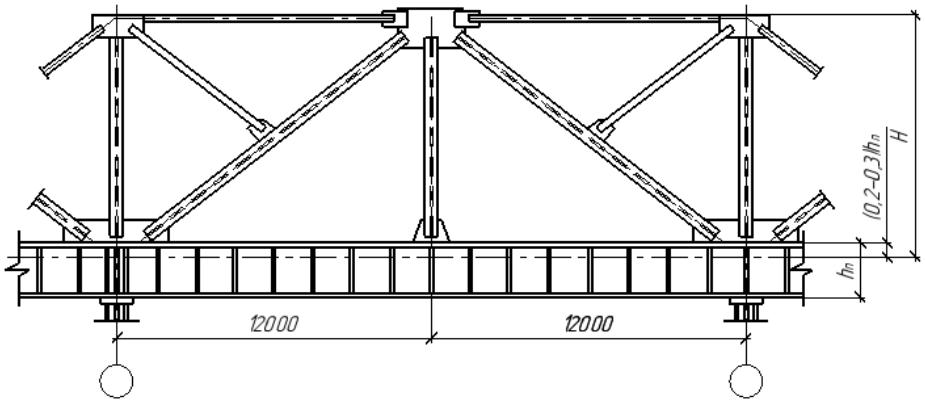


Рисунок 1.13 – Конструктивная схема неразрезной ППФ с пролётом 24 м

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 труб, соединенных друг с другом через прокатный двутавр (рисунки 1.14, 1.15) [87-89].

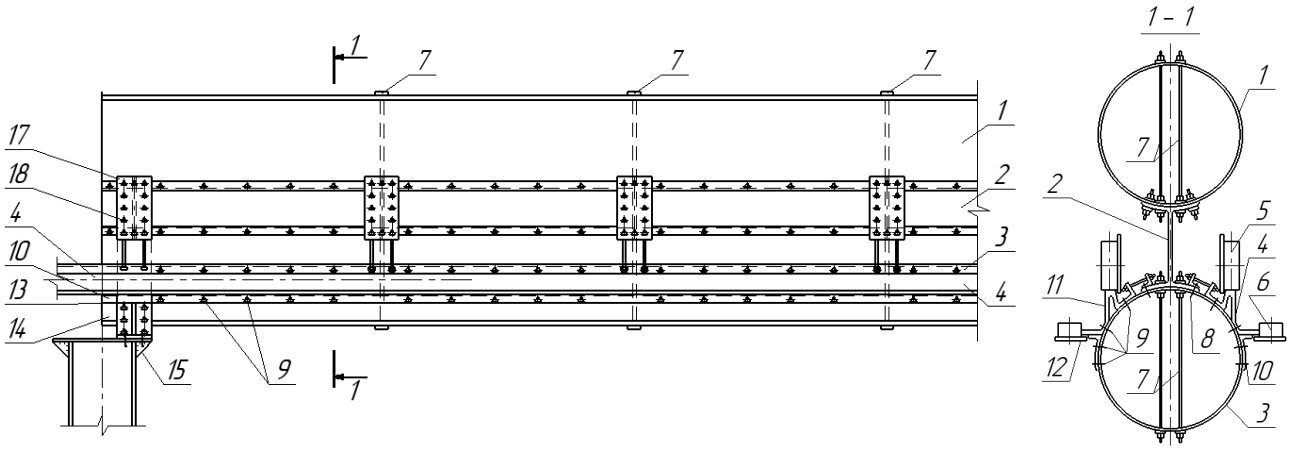


Рисунок 1.14 – Подкраново-подстропильная балка К.К. Нежданова, А.К. Нежданова, В.А. Туманова [87]. 1 – верхняя труба; 2 – прокатный двутавр; 3 – нижняя труба; 4 – арочный рельс; 5 – основные колёса крана; 6 – направляющий ролик крана; 7 – тяги-регуляторы; 8 – болт с гарантированным натягом; 9 – полые заклёпки; 10 – столик; 11 – боковая глава арочного рельса; 12 – гребень направляющего ролика крана; 13 – нижний торец полки опорного тавра 14; 15 – анкерный болт

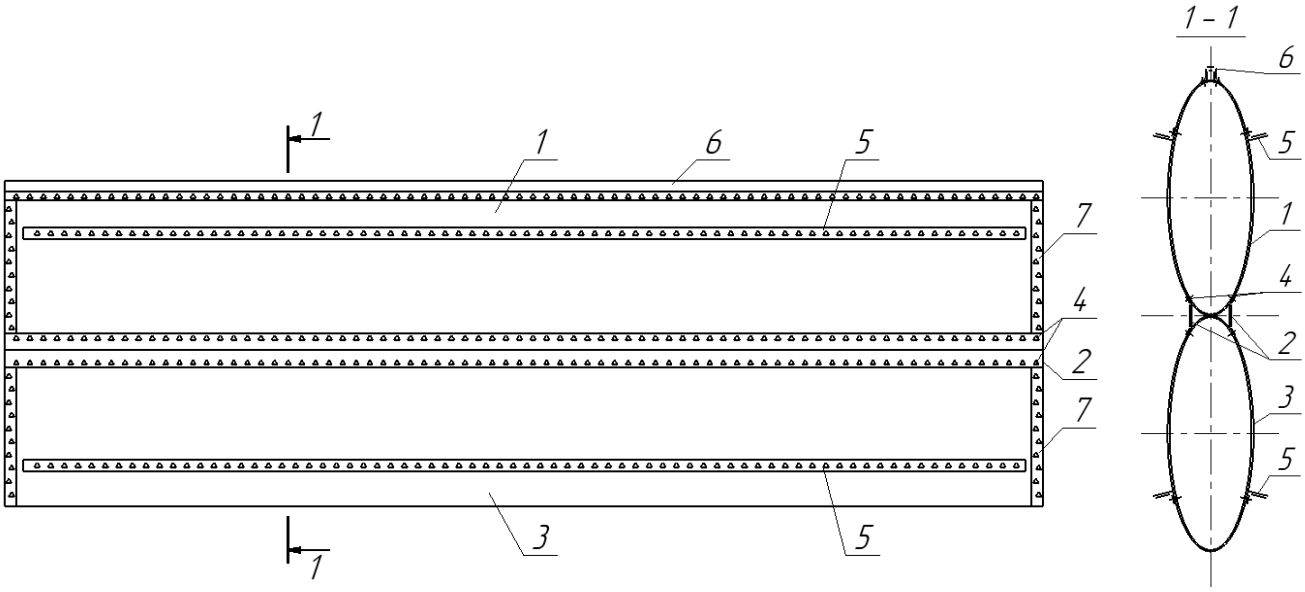


Рисунок 1.15 – Подкраново-подстропильная балка К.К. Нежданова, А.К. Нежданова, А.Д. Маслова, А.А. Игошина [89]. 1 – верхний овальный профиль; 2 – продольные листовые накладки; 3 – нижний овальный профиль; 4 высокоресурсные фрикционные шпильки; 5 – продольные ребра жесткости из уголков; 6 – портальный рельс; 7 – свальцованное по профилю овала уголки

Единственным источником, в котором даны рекомендации по расчету и проектированию ППФ, является Руководство [92], изданное в 1976 г. Таким

образом, в настоящее время необходима разработка современной нормативной и учебной литературы, регламентирующей конструктивные решения и расчёт ППФ.

Особенности функционирования ППФ влияют на её напряжённо-деформированное состояние (НДС) и обуславливают необходимость корректировки существующей методики расчета.

Стержневая модель ППФ представляет собой плоскую систему. При этом ППФ воспринимает большие нагрузки, действующие из плоскости, следовательно, является пространственной конструкцией. Пространственная работа ППФ обеспечивается мощным ездовым поясом замкнутого сечения, способным равноценно работать на изгиб в двух плоскостях и сопротивляться деформациям закручивания. Характер работы ППФ определяется следующими факторами:

1) работа конструкций зависит от соотношения жёсткостей ездового пояса и всей ППФ. Неразрезной пояс “снимает” часть изгибающего момента со всей системы. Чем больше развит пояс, тем большую долю усилий он воспринимает. При этом чрезмерная жёсткость пояса может неблагоприятно сказаться на распределение усилий в ППФ вплоть до того, что увеличение сечения может "не успевать" за возрастанием приходящейся на него доли изгибающего момента [54];

2) вертикальные нагрузки, действующие из плоскости, помимо общего изгиба, вызывают закручивание ездового пояса [70];

3) горизонтальные нагрузки приводят к горизонтальному изгибу и закручиванию пояса;

4) внеузловые подвижные нагрузки, вызванные давлением колёс кранов, служат причиной появления местного изгиба ездовых поясов;

5) подкрепляющие элементы и система решётки, центрированная с эксцентриситетом относительно оси ездового пояса, вызывают в нем дополнительный изгиб;

6) узлы соединения решетки с нижним поясом обладают в плоскости системы большей изгибной жесткостью, чем сами элементы решетки. Поэтому в действительности все стержни конструкции испытывают изгиб в ее плоскости. При

максимальном загружении пролета ППФ наблюдается образование пластических деформаций именно в присоединяемых элементах (в стойках и раскосах), а не в самом узле [30, 38]. Таким образом, крепление системы решётки к ездовому поясу нельзя считать шарнирным. Элементы решетки вовлекаются и в пространственную работу ездового пояса, испытывая изгиб из плоскости и кручение, оказывая при этом поддерживающее влияние ездовому поясу.

Общая схема приложения нагрузки и возникновения внутренних усилий в ездовом поясе ППФ показана на рисунке 1.16.

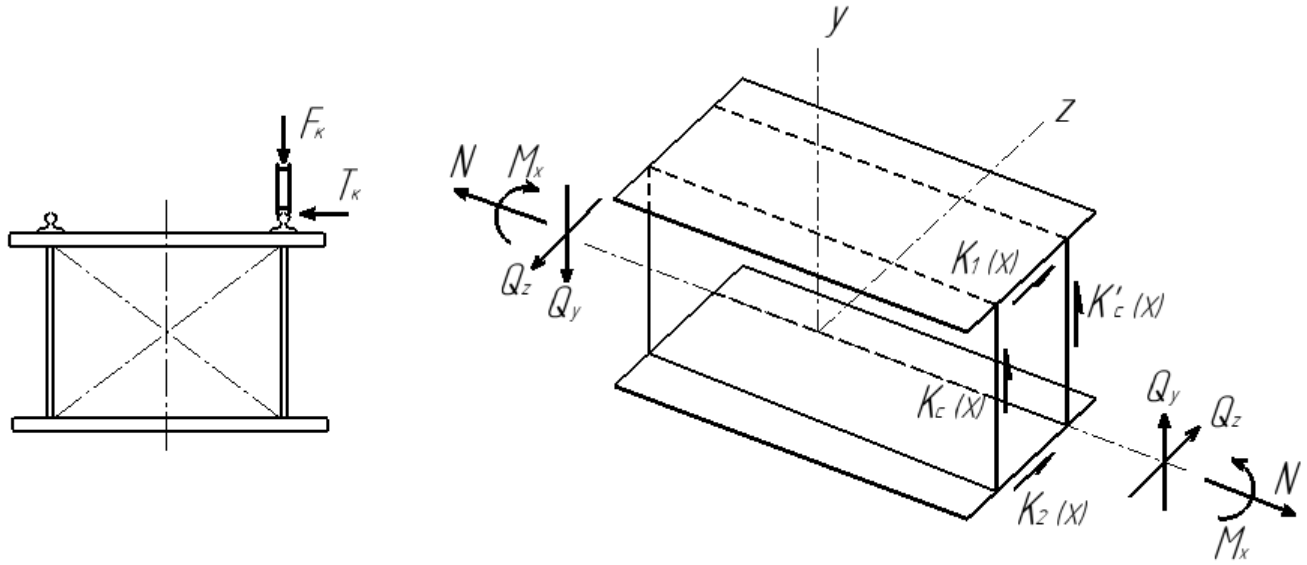


Рисунок 1.16 – Общая схема возникновения внутренних усилий в ездовом поясе ППФ от односторонне приложенной крановой нагрузки

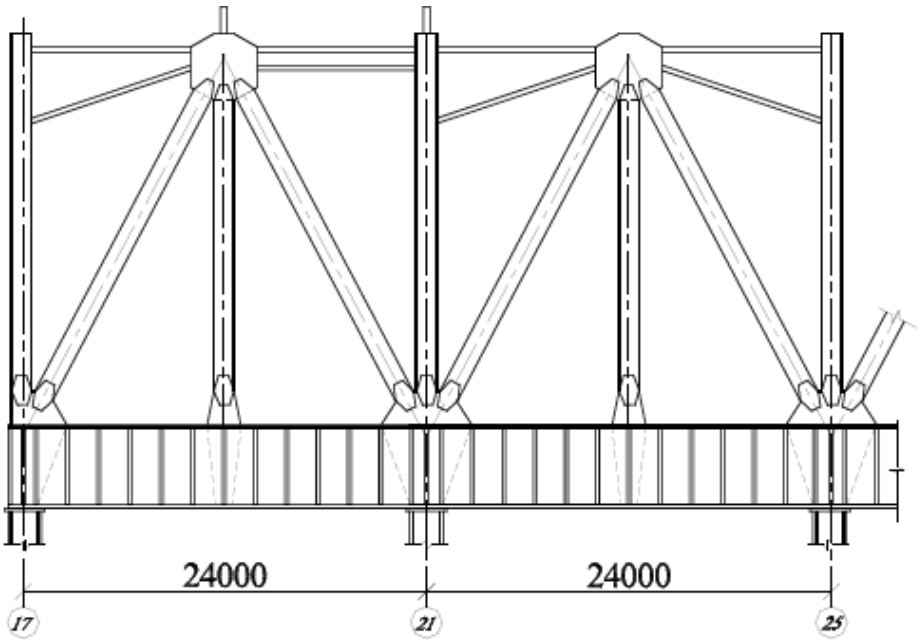
На момент проектирования эксплуатируемых ППФ применяемый в настоящее время численный метод конечных элементов (МКЭ) был недостаточно развит, что не позволяло должным образом учесть большую часть перечисленных особенностей работы ППФ. При выполнении расчётов вручную аналитическим методом это не представляется 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 [30, 36, 37, 90, 101, 104, 115, 117]. Необходимо уточнение аналитической методики расчета ППФ, применимой для предварительного расчёта.

1.2. Анализ повреждаемости подкраново-подстропильных ферм

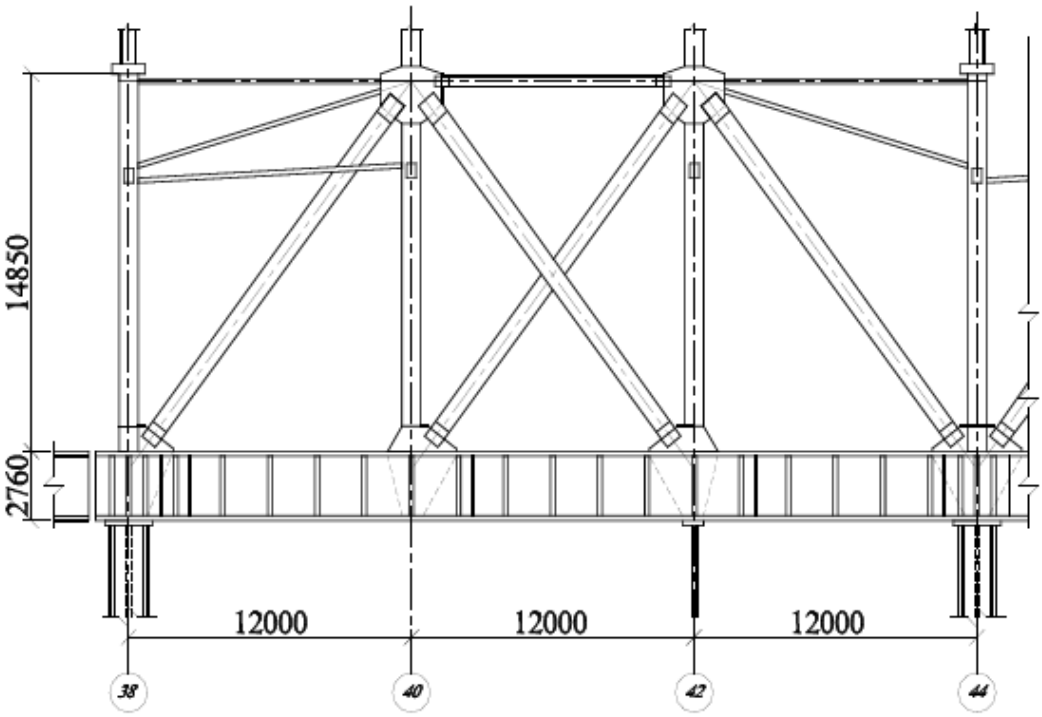
В 1998-2000 гг. ведущими специалистами ЦНИИПСК им. Мельникова В.М. Горицким, Е.А. Щербаковым, В.Н. Артюховым и Г.Р. Шнейдеровым было проведено комплексное обследование 36-метровой ППФ на ОАО «Северсталь» [88]. По его результатам выявлены усталостные повреждения ездового пояса ППФ в зонах сопряжения верхней полки со стенкой у опорных ребер и ребер жесткости. Ремонтные работы по устранению трещиноподобных дефектов показали свою неэффективность: в 70 % накладок образовывались трещины по истечению года эксплуатации, в местах заварки трещины появлялись по ремонтному шву или около него.

Специалистами ЦННИпроектстальконструкции и Челябпроектстальконструкции было проведено обследование конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината [30, 34], введенного в эксплуатацию в 1990 г., в котором используются продольные ППФ пролётом 24 и 36 м (рисунок 1.17). В процессе обследования выявлено большое количество дефектов в узлах крепления к ездовому поясу решетки и в узлах опирания пояса на колонны. Помимо дефектов изготовления, транспортировки и монтажа присутствуют усталостные трещины, вызванное высокой динамической нагрузкой от мостовых кранов и её внецентренным положением относительно стенки ездового пояса. Проведено натурное испытание с измерением НДС в наиболее часто повреждаемых узлах тензометрическим методом. По результатам исследования выявлено, что:

– при загружении двумя мостовыми кранами наблюдается рост напряжений в 2–2,5 раза по сравнению с односторонним загружением;



а



б

Рисунок 1.17 – ППФ конвертерного цеха ММК: *а* – продольная 24-хпролетная отделения непрерывной разливки стали; *б* – продольная 36-пролетная конвертерного отделения

– наиболее опасными являются положения крана непосредственно на опорном узле и в середине пролета;

– наибольшее напряжение возникает в ездовом поясе в зоне примыкания к верхней полке стенки и опорной диафрагмы и зоне стыка ребер жесткости с поясами и стенкой (рисунок 1.18);

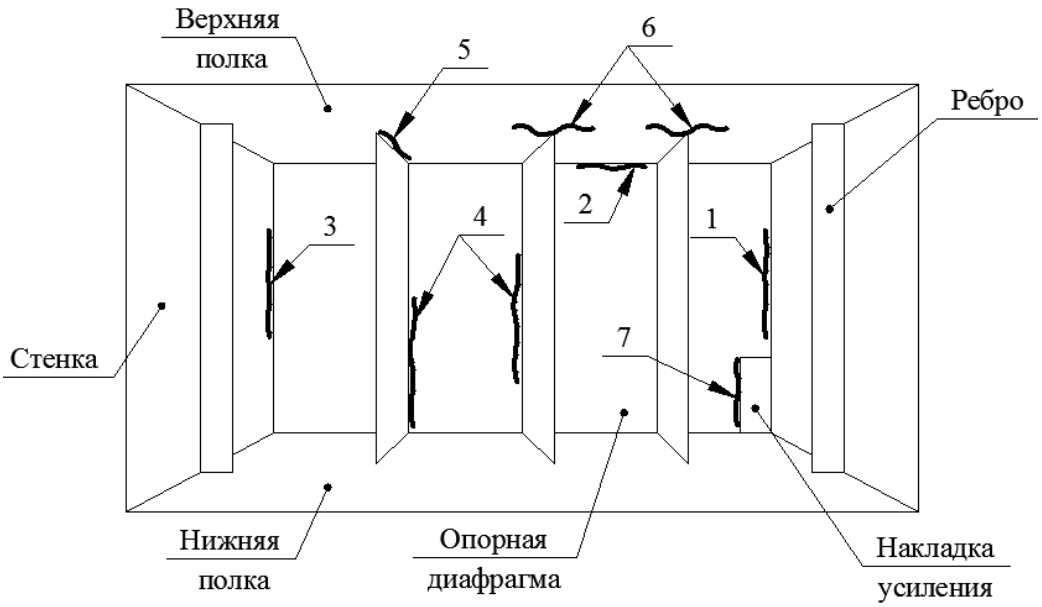


Рисунок 1.18 – Наиболее вероятные места возникновения трещин в опорных частях ППФ

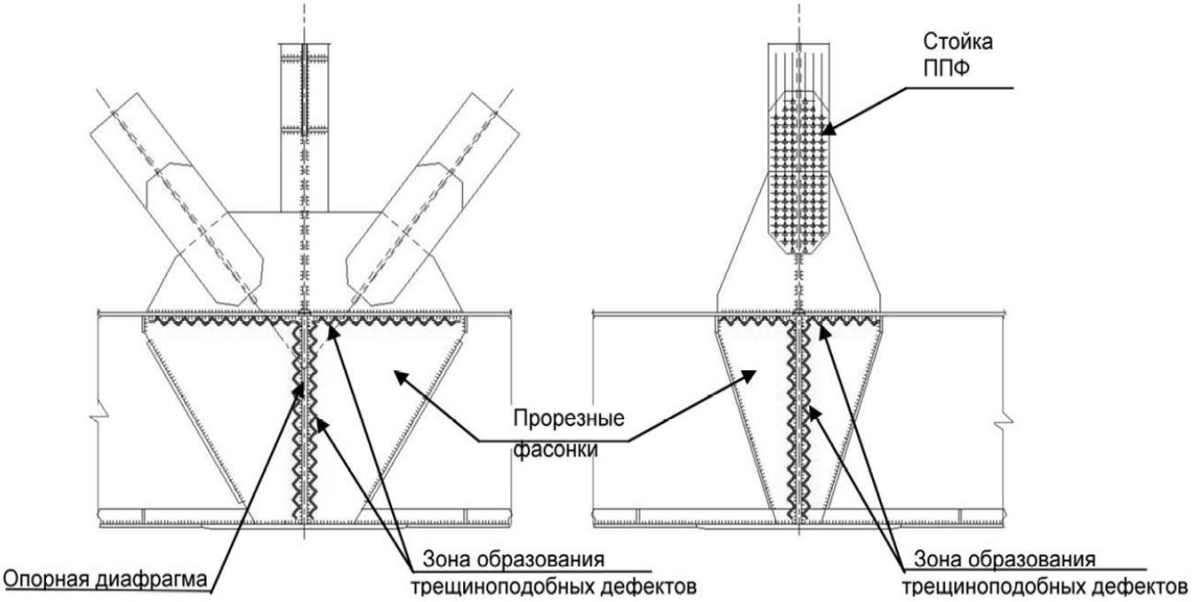
– при максимальной нагрузке материал в большинстве зон работает в упругой стадии, в отдельных точках, в которых уже отмечались повреждения, наблюдается деформация в упругопластической стадии;

– в упругой стадии работы направления осей главных деформаций и напряжений не совпадают с направлениями основных геометрических осей и меняются в зависимости от положения мостового крана;

– в пределах одного узла коэффициент асимметрии цикла нагружения в различных точках может отличаться по величине и знаку.

Обследование 24-метровых ППФ ККЦ ОАО «ММК» проводилось в три этапа: с 1989 по 1993 гг., в 2003 г. и в 2010 г. [39, 116, 117]. Это позволило посмотреть на картину возникновения и развития дефектов конструкции в динамике.

Наиболее подверженными появлению трещин по результатам обследования 2003 г. оказались узлы сопряжения ездового пояса с элементами решетки в зонах соединения прорезных фасонок с верхней полкой и опорной диафрагмой (рисунок 1.19).



а *б*

Рисунок 1.19 – Схема расположения зон образования трещиноподобных дефектов в узлах сопряжения ездового пояса с элементами решетки: *а* – на опоре; *б* – со стойкой [38]

Во время обследований, проведенных в 2010 г., наибольшее количество трещин было образовано в зонах расположения диафрагм в местах примыкания к верхней полке ездового пояса стенки и местах примыкания к стенке опорных диафрагм. Наблюдается существенная зависимость степени повреждений ездового пояса ППФ от интенсивности работы мостовых кранов.

Появление усталостных продольных трещин по сварным швам и в околошовной зоне сопряжения стенки и верхней полки нижнего пояса в местах расположения диафрагм наблюдается уже спустя 5–10 лет эксплуатации ППФ.

Первопричинами появления трещин в основном являются области окончания вертикальных и горизонтальных сварных швов, кратеры, непровары, подрезы сварного шва. Трещины, вызванные этими причинами, появляются одномоментно и распространяются от поперечных диафрагм и рёбер жёсткости вдоль сварного шва соединения стенки с верхней полкой навстречу друг другу (рисунок 1.20). Их длина составляет в среднем от 10 до 100 мм. Локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения возникают под действием остаточных сварочных напряжений.

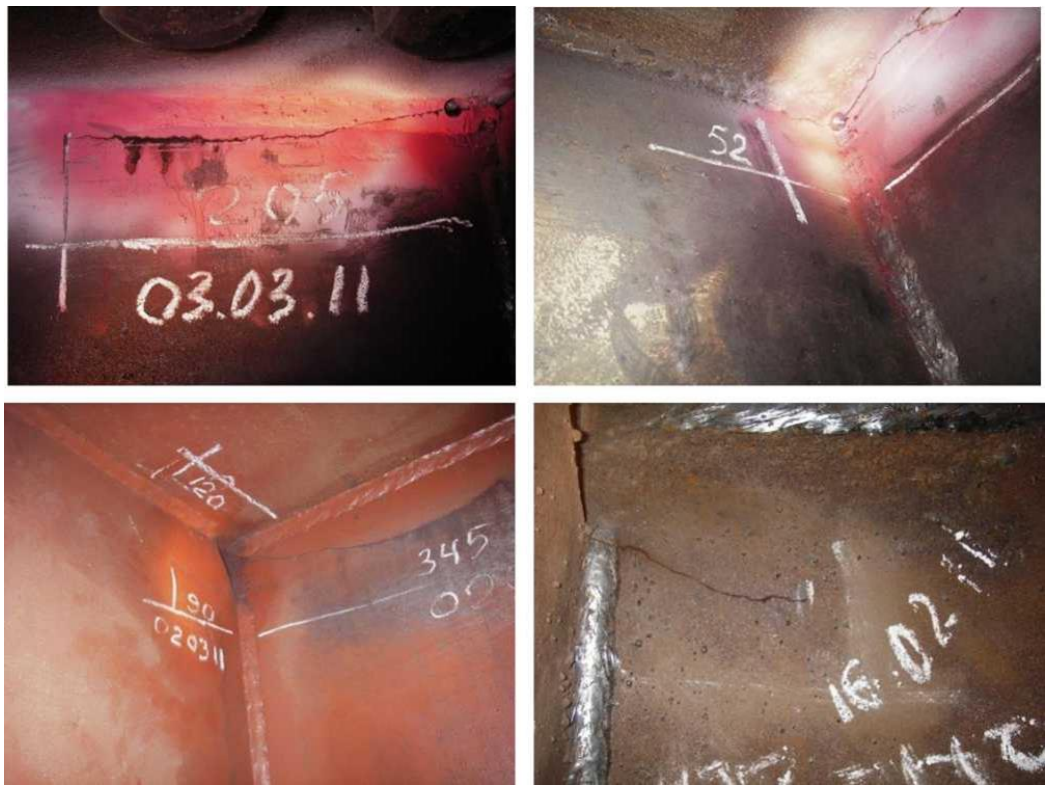


Рисунок 1.20 – Фото трещин в зоне сопряжения стенки с верхним поясом ППФ в месте расположения диафрагм и рёбер жёсткости [37]

Особенностью развития трещин в неразрезном нижнем поясе ППФ является образование дискретных продольных трещин по всей длине пролёта и их возможное объединение в одну трещину на протяжении всего пролёта. Наибольшая длина трещины доходила до 2 м. После каждого этапа обследования проводились ремонтные работы по устранению трещиноподобных дефектов путем заварки сварных швов или установкой накладок на высокопрочных болтах (рисунок 1.21).

Рисунок 1.21 – Усиление накладками на высокопрочных болтах зоны примыкания к верхней полке ездового пояса стенки 24-метровой ППФ ККЦ ОАО «ММК» [115]

М.М. Гохбергом и К.К. Неждановым [77, 79, 89] доказано, что сварные шва в подрельсовых зонах стенок подкрановых балок имеют в четыре раза более низкий технический ресурс в сравнении фрикционными соединениями и прокатными профилями. Классическое конструктивное решение ППФ [47, 95, 97] подразумевает использование низкоресурсных сварных соединений по всей длине нижнего пояса, высокоресурсные фрикционные соединения используются только в узлах стыковки элементов решетки с поясом. Поэтому в сварных швах подрельсовой зоны ездового пояса неизбежно появляются усталостные трещины, недопустимые в соответствии с ГОСТ 23118-2019, что свидетельствует об исчерпании технического ресурса ППФ [87, 89].

1.3. Нагрузки и воздействия на подкраново-подстропильные фермы и современные расчетные положения

Нагрузки на подкрановые конструкции назначаются в соответствии с СП 20.13330.2016. СП 20.13330.2016 не выделяет ППФ среди других подкрановых конструкций. Рекомендации по сбору нагрузок на ППФ даны в [92]. В таблице 1.2. указаны различия в определении расчётных параметров для подкрановой конструкции по СП 20.13330.2016 и для ППФ по [92].

Как показали обследования эксплуатируемых ППФ [30, 34, 33, 39, 90, 102, 104], при длительном использовании на нижних полках внутри отсеков и на верхних полках коробчатого нижнего пояса ППФ скапливается большое количество производственной пыли: от 0,2 м (внутри и снаружи) до 1,5 м (в отсеках с открытым входным люком). При средней плотности пыли ≈0,8 кН/м^3 распределённая нормативная нагрузка может достигать 1,6 МПа, что эквивалентно нормативной технологической нагрузке от веса людей и ремонтных материалов. Следовательно, нагрузка от производственной пыли может влиять на НДС ППФ и должна быть учтена в расчете.

Таблица 1.2 – Отличия в определении расчётных параметров для ППФ

Сравнительный критерий	СП 20.13330.16 Нагрузки и воздействия	"Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций" ЦНИИПСК им. Мельникова
Значение технологической нагрузки от веса людей и ремонтных материалов	1.5 кПа (таблица 8.3 п. 11)	По технологическим заданиям, а при их отсутствии 2 кПа (п. 4.13)
Коэффициент надежности технологической нагрузки	γ_f = 1,3 (п. 8.2.2)	γ_f = 1,4 (п. 4.13)
Количество кранов, от которых учитывается вертикальная нагрузка при расчете на прочность и устойчивость	Не более 2, при учете совмещения в одном створе кранов разных пролетов – не более 4 (п. 9.12)	Не менее 4 при расчете на вертикальную нагрузку, не менее 2 –на горизонтальную (п. 2 прил. 3)
Количество кранов, от которых учитывается вертикальная нагрузка при расчете на прогибы	1 (п. 9.17)	2 в вертикальной плоскости, 1 в горизонтальной (таблица 5)

Т.к. ППФ предназначены для использования в промышленных зданиях с кранами большой грузоподъёмности и тяжелых режимов работы, особое внимание следует уделить сбору крановых нагрузок. Ещё одной причиной для того, чтобы приложить крановую нагрузку максимально близко к реальным условиям, является высокий уровень ответственности ППФ. 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. В соответствии с EUROCODE 1 при расчете следует учитывать не только постоянные и переменные составляющие крановой нагрузки, но и возможные аварийные воздействия. Аварийные ситуации при работе крана могут возникать при ударе крана о тупиковые упоры, его наезде с грузозахватным устройством на препятствие, разгибе крюка или разрыве стропа, приводящих к падению груза во время движении крана. В последнем случае вертикальная нагрузка на колесо крана имеет вид импульсных сил, амплитуда которых

вследствие динамического характера воздействия может превышать статический эффект в 2–3 раза [86]. Современное программное обеспечение с использованием МКЭ позволяет смоделировать подобные аварийные ситуации, а также учесть динамическую составляющую крановой нагрузки.

При расчете ППФ руководствуются методикой, разработанной ЦНИИПСК им. Мельникова [92], а также СП 16.13330.2017. Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Нормальные силы в элементах ППФ от крановой нагрузки определяются путём невыгодного загружения 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 загружение 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.

Недостатки используемых методов расчета отмечены в [34, 48, 52, 81, 90, 117]. Некоторые из них приведены ниже:

1. Не учитывается пространственная работа ППФ. В действительности при горизонтальном изгибе и кручении ездового пояса в работу вовлекаются все

элементы ППФ. 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 [37].

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

Б.Б. Лампси были внесены корректировки, касающиеся как расчёта ездового пояса замкнутого сечения, так и уточнения расчетной схемы и метода статического расчета всей ППФ [48]. Для предварительного назначения геометрических параметров ППФ и размеров поперечных сечений элементов используется континуальная расчетная схема. Для окончательной проверки рекомендуется использование точных методов расчета с применением дискретной расчетной модели.

Исходным геометрическим параметром при проектировании ППФ является величина перекрываемого пролёта. Если она не установлена техническим заданием, её определяют на основании технико-экономического анализа. Затем, после предварительного сбора нагрузок устанавливаются минимальная и оптимальная высоты ППФ. Минимальная высота должна удовлетворять конструктивными требованиям и требованиям жесткости, оптимальная высота определяется по формуле Н.С. Стрелецкого:

$$h_{\text{опт}} = \frac{L}{n}\sqrt{\frac{1}{\nu}(0{,}7n + 1)}; \qquad (1.5)$$

где L – пролет ППФ;

n – число панелей;

ν – коэффициент, зависящий от формы решетки, при треугольной решетке $\nu = 2$, при раскосной $\nu = 3$.

Высота ППФ назначается максимально близкой к оптимальной, но не менее минимальной.

Усилия в элементах ППФ определяют как в комбинированной системе - ферме с жёстким нижним поясом. В первую очередь определяется приближенное значение расчетного изгибающего момента при установке на ППФ катков по правилу Винклера:

$$M_z = \alpha_1 \alpha_2 \left[0{,}125 q_{\text{в}} L^2 + \frac{\psi_t}{L} \sum F\, y_k (L - y_k) \right] \; ; \qquad (1.6)$$

где α_1 – коэффициент, учитывающий влияние собственного веса ППФ и равный 1,08–1,10;

α_2 – коэффициент, для разрезных ППФ $\alpha_2 = 1$, для ППФ в виде ригеля рамы $\alpha_2 = 0{,}8 - 0{,}9$;

$q_{\text{в}} -$ вертикальные погонные нагрузки на ППФ;

ψ_t – коэффициент сочетаний, принимаемый п. 9.18 СП 20.13330.2016 в зависимости от числа учитываемых кранов;

y_k – расстояния колес кранов от левой опоры ППФ;

$F -$ расчетное давление катков мостового крана.

После определения изгибающего момента подсчитываются продольные силы в нижнем $N_{\text{Н}}$ и верхнем $N_{\text{В}}$ поясах:

$$N_{\text{Н}} = -N_{\text{В}} = 0{,}98 \frac{M_z}{h} \; ; \qquad (1.7)$$

где h – высота ППФ по осям поясов.

Далее, исходя из проверки на устойчивость подбирается сечение верхнего неездового пояса.

Ездовой пояс ППФ выполняет функцию не только нижнего пояса фермы, но и подкрановой балки. Поэтому сечение нижнего ездового пояса подбирается по продольной силе и изгибающему моменту, который складывается из изгибающих моментов от прогиба пояса в составе ППФ и от местного изгиба, вызванного собственным весом, технологическими и вертикальными крановыми нагрузками.

После установки поперечных сечений элементов вычисляются моменты инерции нижнего пояса и всей фермы, а для поперечных ППФ ещё и отношение момента инерции фермы к моменту инерции колонны. Далее устанавливается предварительный вес ППФ и её ездового пояса.

После этого выполняется более детальный перерасчет ППФ с учетом уточненных нагрузок. Также рекомендуется учесть изгиб ездового пояса от эксцентричности центровки раскосов и жесткость узлов крепления элементов решетки.

После назначения размеров поперечных сечений основных элементов следует произвести проверочный точный расчет с помощью ЭВМ. Максимальные усилия в элементах ППФ от воздействия кранов определяются по линиям влияния.

Проверочный расчет рекомендуется производить численным методом, при этом следует учесть:

1) все виды воздействий, испытываемые ППФ;

2) жесткость узлов системы;

3) эксцентричность крепления решетки к ездовому поясу;

4) влияние решетки при расчете ездового пояса на горизонтальный изгиб и кручение с учетом дополнительных усилий, возникающих при этом в решетке.

В расчете ППФ наибольшую трудность представляет анализ НДС нижнего ездового пояса. Он находится в сложном напряженном состоянии (рисунок 1.12), в том числе испытывает стесненное кручение, вызванное односторонней крановой нагрузкой и силами поперечного торможения кранов. При этом само сечение в виде призматического тонкостенного стержня закрытого профиля часто является несимметричным, имеет консоли и усиливается диафрагмами, ребрами жесткости и др. подкрепляющими элементами, что еще больше усложняет расчет.

Отдельно от остальной конструкции ездовой пояс представляет собой призматическую складчатую систему, исследованию работы которой на основе теории тонкостенных стержней посвящены труды В.З. Власова, А.А. Уманского, В.И. Беляева, Г.Ю. Джанелидзе, Я.Г. Пановко, Д.В. Бычкова, А.П. Кещенко,

О.В. Лужина, И.Е. Милейковского, И.Ф. Образцова и др. [5, 10, 14, 25, 58, 79]. В работах А.В. Александрова, Р.А. Ададурова, В.А. Карташова, Б.Б. Лампси, А.К. Мрощинского, П.Ф. Папковича и др. [48, 49, 99] были использованы континуальные расчетные схемы, составление систем дифференциальных уравнений осуществлялось через решения соответствующих частных задач теории упругости.

Для решения подобных задач в настоящее время используются способы, основанные на дискретизации расчётной системы, такие, как метод конечных элементов.

Наравне с вышеизложенными методами анализа применяют способы, использующие дискретно-континуальные расчетные схемы: смешанный и вариационный методы В.З. Власова [14, 15], метод перемещений и метод исходных уравнений И.К. Милейковского [79], метод перемещений для расчёта плитно-балочных конструкций А.В. Александрова [99], методы И.С. Слизеягера, Ю.Г. Одинакова и др.

Тонкостенные балки замкнутого профиля при кручении находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии, в них возникают дополнительные нормальные напряжения и деформации [15]. Классическая теория расчета на кручение тонкостенных балок с замкнутым профилем была разработана А.А. Уманским [107]. Исследования НДС тонкостенных балок замкнутого профиля и различные методы анализа предложены в работах [119, 124, 130, 137, 141]. В статьях [134, 135] анализируется влияние сдвиговых деформаций на поведение замкнутого профиля при кручении.

При расчете на кручение и горизонтальный изгиб по действующей методике [92] нижний пояс считается нераскреплённым из плоскости ППФ. Усилия в нем от горизонтальных нагрузок и кручения определяются как для однопролетной балки, пролетом равной пролету ППФ. В действительности механизм кручения пояса ППФ отличается от балочного. Горизонтальные линейные смещения и угловые смещения пояса вовлекают в работу элементы решетки. Элементы решетки

испытывают изгиб из плоскости ППФ и кручение, при этом оказывают поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшают его смещение, усилия и напряжения [62, 63].

1.4. Выводы по главе 1

1. Исследования местного НДС подкрановых балок базируются на лабораторных испытаниях балок двутаврового сечения длиной не более 18 м при грузоподъемности мостовых кранов не более 200 т. Прямое использование полученных результатов при исследовании работы ездовых поясов ППФ без учета масштабного фактора, замкнутости ездового пояса и особенностей работы самой ППФ является спорным и нуждается в дополнительной проверке.

2. Единственным руководством, в котором даны рекомендации по расчету и проектированию ППФ, является [92], изданное в 1976 г. Необходима разработка современной нормативной и учебной литературы, регламентирующей конструктивные решения ППФ.

3. Основные недостатки действующей методики:

- Не учитывается действительная жесткость узловых соединений, которая существенно превышает жесткость присоединяемых элементов решетки.

- При расчете на кручение и горизонтальный изгиб нижний пояс считается нераскреплённым из плоскости ППФ. Усилия в нем от горизонтальных нагрузок и кручения определяются как для однопролетной балки, пролетом равной пролету ППФ. В действительности механизм кручения пояса ППФ отличается от балочного. Горизонтальные линейные смещения и угловые смещения пояса вовлекают в работу элементы решетки. Элементы решетки испытывают изгиб из плоскости ППФ и кручение, при этом оказывают поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшают его смещение, усилия и напряжения.

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

4. Нагрузки на подкрановые конструкции назначаются в соответствии с СП 20.13330.2016. Рекомендации по сбору нагрузок, приведённые в [92], учитывают особенности работы ППФ, но не соответствуют СП 20.13330.2016. Натурное обследование исследуемых конструкций выявило такую нагрузку, как вес технологической пыли, которая оказывает существенное влияние на общее нагружение ППФ.

5. Численный расчет без предварительного подбора сечений для конструкций типа ППФ сложно реализуем, т.к. поперечное сечение пояса не является прокатным профилем и корректный подбор его сечения методом итераций труднореализуем. 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 распределение 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 расчет методика, учитывающая базовые отличия ППФ от классических ферм: пространственная работа, жесткость узловых соединений, соотношение жесткостей ездового пояса и всей ППФ.

ГЛАВА 2. Расчетное исследование деформативно-жесткостных характеристик и анализ упрощенных расчетных схем подкраново-подстропильных ферм

2.1. Влияние жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе

Объектом численного исследования влияния жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе является ППФ с неразрезным многопролётным нижним поясом коробчатого сечения. Пролёт между опорными конструкциями – 36 метров (рисунок 2.1).

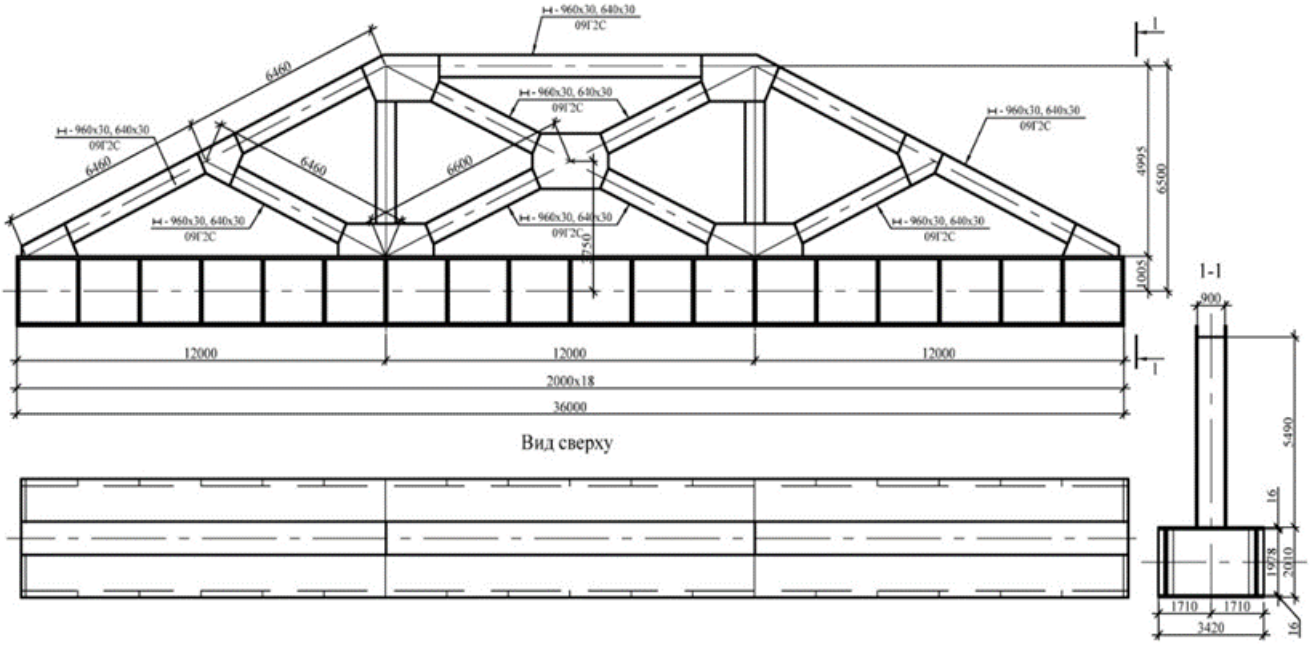


Рисунок 2.1 – Схема ППФ пролётом 36 м

По исходным данным ППФ расположена в здании производственного назначения – литейном цехе металлургического предприятия.

Рассмотренная конструкция представляет собой пространственную систему с тормозными элементами при нагружении вертикальной нагрузкой без эксцентриситета. При расчёте задаётся нагрузка от двухбалочного мостового крана – кран литейный 180+63/20–33,5–36–3–220, выполняющего функцию заливки и

разливки жидкой стали в изложницы. Данному крану соответствует тяжёлый режим работы 7К согласно ГОСТ 25546–82.

Нижний пояс ППФ выполняется сварным в виде тонкостенной оболочки прямоугольного сечения с размерами 3×2,01 м, которая воспринимает местные вертикальные и горизонтальные воздействия от крановой нагрузки между узлами фермы, крутящие моменты от внецентренного приложения нагрузок по отношению к центру кручения нижнего пояса. Толщина стенок нижнего пояса – 25 мм, толщина верхней и нижней полок 16 мм, толщина поперечных диафрагм жёсткости пояса составляет 20 мм (рисунок 2.2).

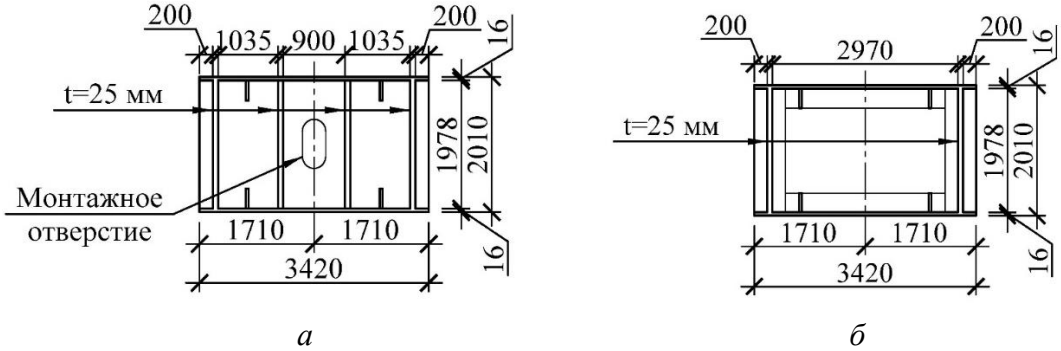


Рисунок 2.2 – Конструктивная схема нижнего пояса ППФ: *а* – в опорной части со сплошной диафрагмой; *б* – в пролетной части со сквозной диафрагмой

В узлах ферм коробчатый жесткий пояс усиливают диафрагмами из листа; в сечениях между узлами для обеспечения неизменяемости контура коробки диафрагмы могут быть сквозными (в межопорных пролётах) или сплошными с монтажными отверстиями (на опорах).

Раскосы и стойки стержневой решётки предлагается выполнять из сварных Н-образных двутавров, воспринимающих нагрузку от стропильных ферм и передающих её на нижний (ездовой) пояс. Стенки двутавров выполнены из листовой стали 960×30 мм, полки – из листовой стали 640×30 мм. Узлы крепления стержней решётки между собой осуществляются на высокопрочных болтах. Крепления элементов решётки к нижнему поясу выполняется на высокопрочных болтах к прорезным фасонкам, закреплённым на сварке к нижнему поясу фермы.

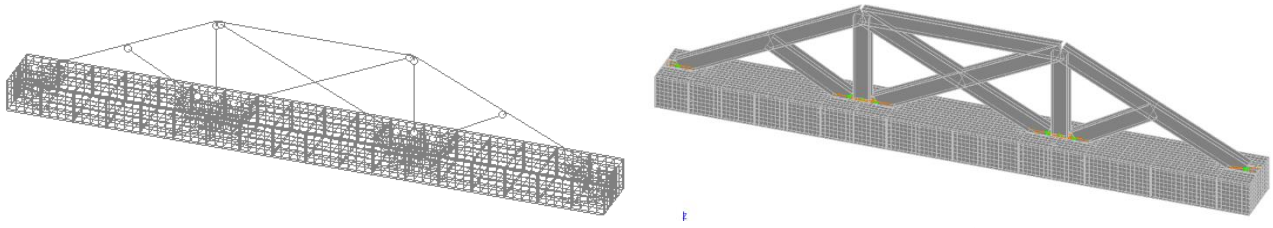
В таблице 2.1 представлены все пластинные элементы, использованные для создания расчётной схемы ППФ.

Таблица 2.1 – Пластинчатые элементы ППФ

Толщина в миллиметрах

Наименование	Толщина	Материал
Стенки нижнего пояса ППФ	25	09Г2С δ=20-32 мм ГОСТ 19281-2014
Верхняя полка ППФ	16	09Г2С δ=10-20 мм ГОСТ 19281-2014
Нижняя полка ППФ	16	09Г2С δ=10-20 мм ГОСТ 19281-2014
Поперечные ребра жёсткости ППФ	20	09Г2С δ=20-32 мм ГОСТ 19281-2014
Стенки сварных двутавров решётки ППФ	20	09Г2С δ=20-32 мм ГОСТ 19281-2014
Полки сварных двутавров решётки ППФ	30	09Г2С δ=20-32 мм ГОСТ 19281-2014
Фасонные, соединительные и несущие элементы	30	09Г2С δ=20-32 мм ГОСТ 19281-2014
Полка швеллера	11	09Г2С δ=10-20 мм ГОСТ 19281-2014
Тормозной лист	10	09Г2С δ=10-20 мм ГОСТ 19281-2014
Рельс КР120	117	09Г2С δ=10-20 мм ГОСТ 19281-2014

Для исследования влияния жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе выбраны две пространственные расчетные схемы ППФ (рисунок 2.1) с пластинчатым ездовым поясом с учетом подкрепляющих и соединительных узловых элементов. Размер сетки конечных элементов определен методом итераций и принят 0,25 м. В первой расчётной схеме стержневые элементы решетки примыкают к нижнему поясу ППФ шарнирно (рисунок 2.3а), во второй – жестко (рисунок 2.3б).



а *б*

Рисунок 2.3 – Расчетные схемы ППФ: *а* – с шарнирным примыканием элементов решетки к нижнему поясу ППФ; *б* – с жестким примыканием элементов решетки к нижнему поясу ППФ

Жесткое крепление решетки к поясу выполнено с помощью абсолютно твердых тел. Их использование обусловлено особенностью стыковки конечных элементов различной размерности. Если сетка конечных элементов выбирается

лишь с условием, что стержневые элементы попадают в узлы сетчатого разбиения пластинчатого элемента, и при этом не предпринимаются никакие дополнительные меры (жесткие тела, подкрепляющие элементы и пр.), обеспечивается совместность как вертикальных перемещений пластины и стержня, так и соответствующих углов поворота. Когда же сетка пластины сгущается, начиная с некоторой сеточной разбивки, дальнейшее дробление сетки приводит к уменьшению значений изгибающих моментов в стержнях в местах их соединения с пластиной. В пределе, при стремлении к нулю размеров сеточной ячейки, изгибающие моменты также стремятся к нулю, это означает, что данная расчетная схема обеспечивает шарнирное присоединение стержневых элементов к пластине. За счет одномерности стержневого элемента изгибающий момент в нем передается на пластину как сосредоточенный в узле сетки, вне зависимости от размеров сетки. При этом пластина под действием сосредоточенного изгибающего момента получает бесконечный угол поворота в плоскости действия момента в месте его приложения. Таким образом, пластина не оказывает сопротивления на сосредоточенный поворот, а, следовательно, не защемляет стержневые элементы. Значит, полученные в данной расчетной схеме изгибающие моменты в сечениях стержней, примыкающих к пластине, являются неверными, что, в свою очередь, сказывается и на распределении внутренних усилий в остальных элементах конструкции и приводит к неправильному расчету в целом. Таким образом, стержни упруго защемлены пластинчатыми элементами, как внешними связями, препятствующими повороту сечений стержней, а коэффициент жесткости этих связей находится в прямо пропорциональной зависимости от шага конечноэлементной сетки пластины, т.е. стремится к нулю при минимальном размере конечных элементов. В расчетной схеме с жестким примыканием решетки ППФ к ездовому поясу дискретные абсолютно твердые тела на участках пересечения стержневых и пластинчатых элементов моделируют жесткое сопряжение элементов.

Все нагрузки заданы в соответствии с СП 20.13330.2016. Местоположение промышленного здания соответствует I ветровому и IV снеговому районам по СП 20.13330.2016, строительно-климатической зоне II_5 по ГОСТ 16350-80. Отрицательная расчётная температура наиболее холодных суток с обеспеченностью 0,98 составляет –38 °С согласно СП 131.13330.2018.

Нагрузки и воздействия, действующие на исследуемую ППФ:

- собственный вес фермы;
- нагрузка от веса покрытия здания (таблица 2.2);

Таблица 2.2 – Нагрузка от веса покрытия

В кг/м^2

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка	Коэффициент надежности γ_f	Расчетная нагрузка
1	Профнастил НС44-1000-0,7	7,4	1,05	7,77
2	Утеплитель – минераловатные плиты t = 200 мм	9	1,2	10,8
3	Пароизоляция из полиэтиленовой плёнки t = 0,25 мм	0,23	1,2	0,276
4	Профнастил Н75-750-0,8	11,2	1,05	11,76
5	Сплошные прогоны *l* = 12 м I№16Б2по ГОСТ 26020-83	30,58	1,05	32,11
	Итого:	58,41		62,72

- снеговая нагрузка ($S_{расч} = 236\ кг/м^2$);
- нагрузка от веса кранового рельса (прикладывается как распределённая по площади опирания рельса на верхнюю полку нижнего пояса фермы $P_{расч} = 744{,}65\ кг/м^2$);
- нагрузка от двух мостовых кранов.

Крановая нагрузка задана от двух двухбалочных мостовых кранов режима работы 7К. Грузоподъемность кранов в четыре шага увеличена от 100 до 225 т. Значения крановой нагрузки приведены в таблице 2.3. Схема приложения крановой нагрузки на ППФ показана на рисунке 2.4.

Таблица 2.3 – Крановая нагрузка

В килоньютонах

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка	Коэффициент надежности γ_f	Расчетная нагрузка
1	Нагрузка от 1 крана грузоподъемностью 100 т: F1 F2 T1 T2	323,00 335,67 32,30 33,57	1,2	387,60 402,80 38,76 40,28
2	Нагрузка от 1 крана грузоподъемностью 140 т: F1 F2 T1 T2	452,20 469,93 45,22 46,99	1,2	542,64 563,92 54,26 56,39
3	Нагрузка от 1 крана грузоподъемностью 180 т: F1 F2 T1 T2	581,40 604,20 58,14 60,42	1,2	697,68 725,04 69,77 72,50
4	Нагрузка от 1 крана грузоподъемностью 225 т: F1 F2 T1 T2	726,75 755,25 72,68 75,53	1,2	872,10 906,30 87,21 90,63

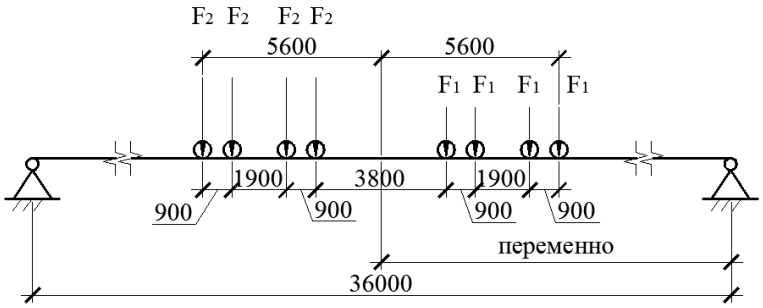


Рисунок 2.4 – Схема приложения крановой нагрузки на ППФ

Расчет выполняется в программно-вычислительном комплексе Structure CAD методом конечных элементов. Так как в некоторых зонах ездового пояса напряжение превышает предел упругости, произведен нелинейный расчет.

Жесткость узловых соединений элементов решетки и ездового пояса ППФ в значительной степени влияет на напряженно-деформированное состояние пояса. При жестком примыкании решетки к поясу, в сравнении с шарнирным примыканием, происходит значительное перераспределение внутренних усилий в верхней полке пояса в самом узле, снижается напряжение в верхней полке и стенках пояса по всей длине пояса, в зонах сопряжения стенки с верхней (в большей степени) и нижней (в незначительной степени) полками, возрастает жесткость ППФ. Результаты анализа влияния жесткости узловых соединений на напряжения в ездовом поясе приведены в таблице 2.4 и на рисунках 2.5–2.6.

Таблица 2.4 – Напряжение в нижнем поясе ППФ при жестком и шарнирном примыкании элементов решетки

В кН/см^2

Грузо-подъем-ность кранов, т	Эквивалентное напряжение $\sigma_{E4}=\sigma_{S4}$ средний слой					
	верхняя полка в узле у стойки		верхняя полка в узле у раскоса		верхняя полка стык со стенкой у узла	
	жесткое примыка-ние решетки	шарнирное при-мыкание решетки	жесткое примыка-ние решетки	шарнир-ное при-мыкание решетки	жесткое примыка-ние решетки	шарнир-ное при-мыкание решетки
2×100	10	28	35	23	17,5	29,8
2×140	13,8	34,8	42	28,7	20,2	34,4
2×180	16	38,4	49,4	33,3	23,5	41,4
2×225	18,9	44,1	58,3	39,7	27,8	45,4
	верхняя полка в середине пролета		стенка стык с верхней полкой у узла		стык стенки с верхним поясом в середине пролета	
	жесткое примыка-ние решетки	шарнирное при-мыкание решетки	жесткое примыка-ние решетки	шарнир-ное при-мыкание решетки	жесткое примыка-ние решетки	шарнир-ное при-мыкание решетки
2×100	28,4	33,7	13,9	24,2	22,8	28,1
2×140	34,1	40,4	16,7	29	27,4	33,7
2×180	39,6	46,9	19,4	33,7	31,8	39
2×225	46,8	56,1	24,9	40,1	37,6	46,5

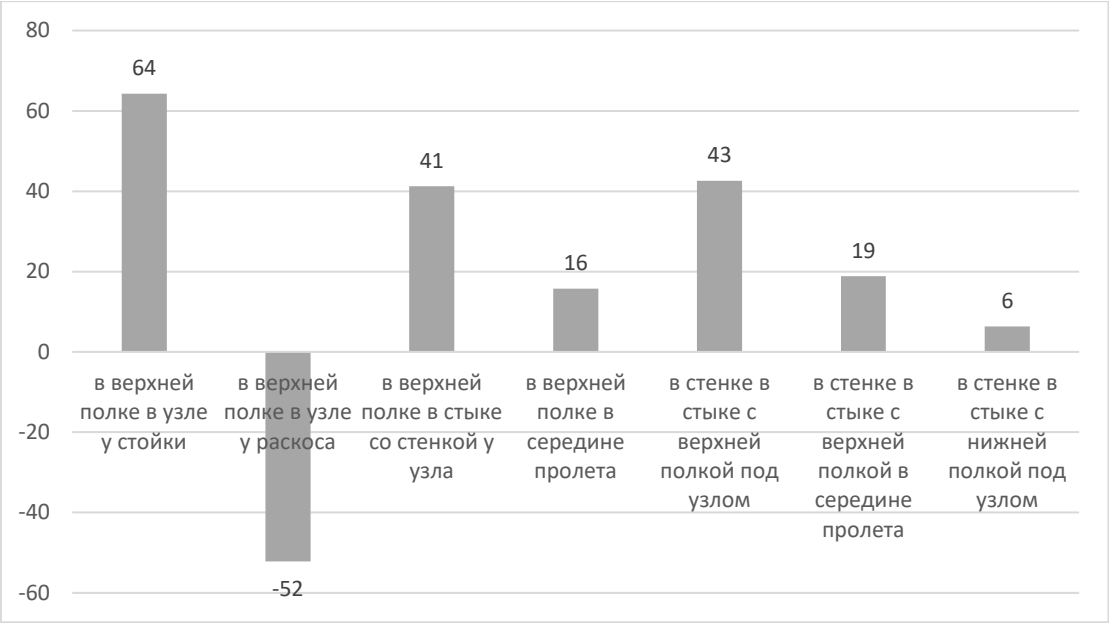


Рисунок 2.5 – Снижение уровня напряжений в ездовом поясе ППФ при учете жесткости крепления решетки, %

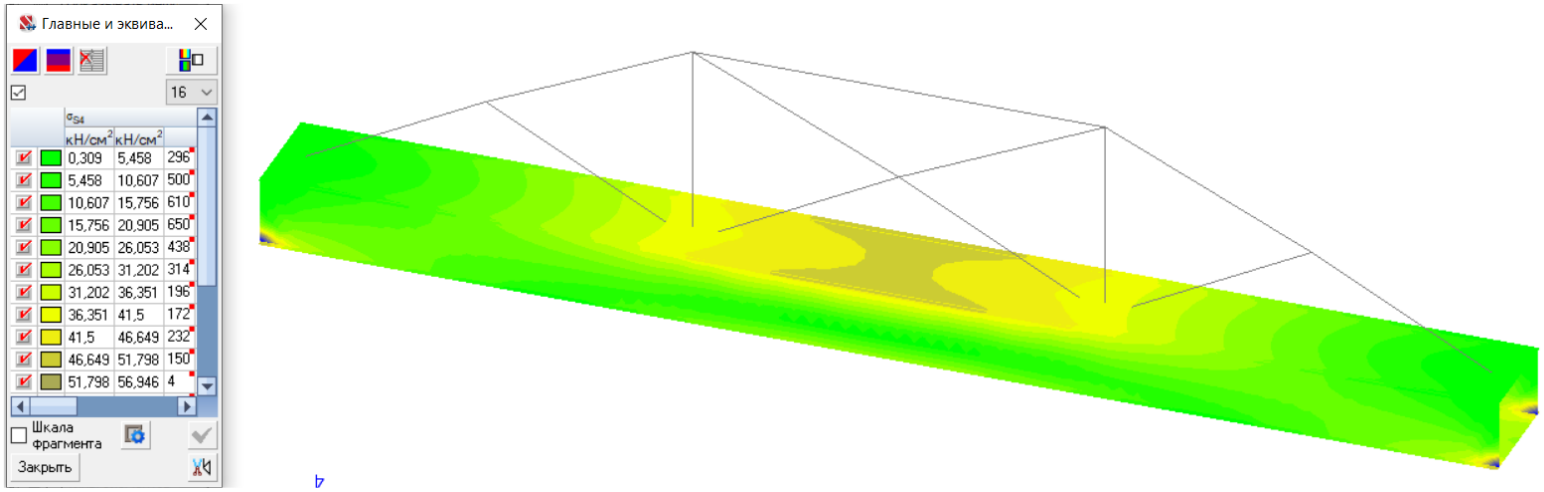
Снижение уровня напряжений в зонах ездового пояса ППФ определялось по формуле:

$$\Delta\sigma_{\text{E4}} = \left(1 - \frac{\sigma_{\text{E4}}^{\text{Ж}}}{\sigma_{\text{E4}}^{\text{Ш}}}\right) \cdot 100\ [\%]; \qquad (2.1)$$

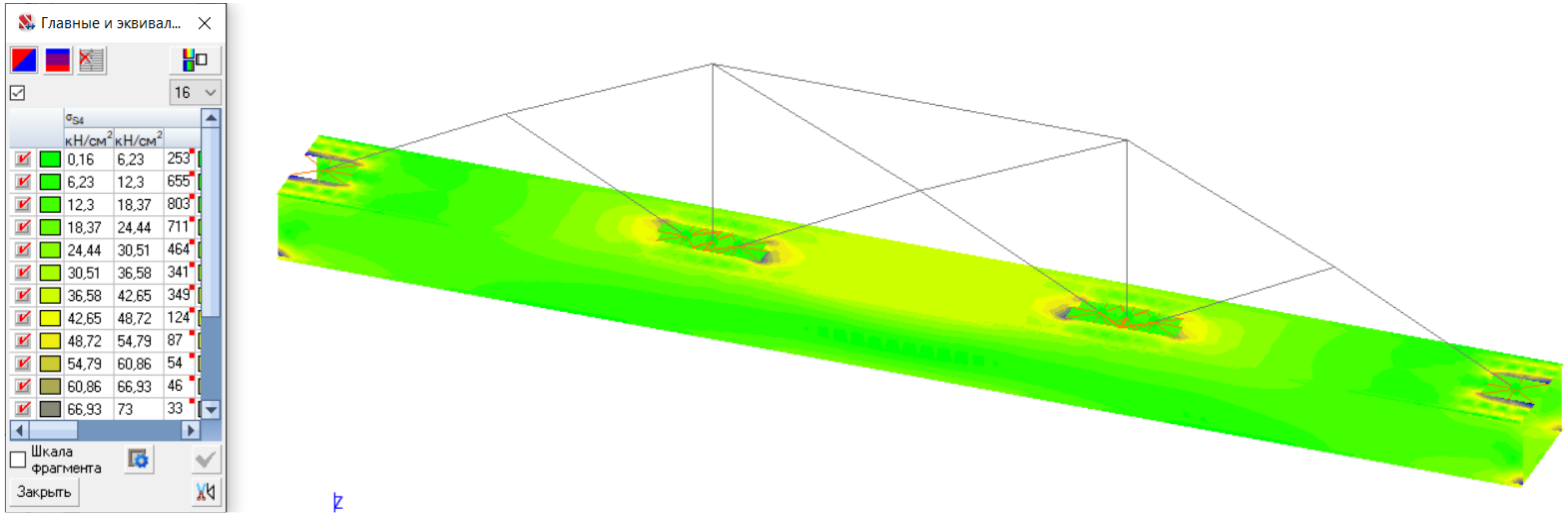
где $\sigma_{\text{E4}}^{\text{Ж}}$ – эквивалентное напряжение σ_{E4} при жестком примыкании элементов решетки, кН/см^2;

$\sigma_{\text{E4}}^{\text{Ш}}$ – эквивалентное напряжение σ_{E4} при шарнирном примыкании элементов решетки, кН/см^2.

Для обоснования отказа от использования нелинейного расчета в дальнейшей работе по исследованию податливости произведено сравнение перемещений ППФ от различной нагрузки с учетом нелинейной работы. Результаты исследования зависимости максимального прогиба ППФ от крановой нагрузки при нелинейном расчете приведены в таблице 2.5 и на рисунке 2.7.



а



б

Рисунок 2.6 – Эквивалентное напряжение нижнего пояса ППФ (2 крана180+63/20–33,5–36–3–220 7К):
а – при шарнирном; *б* – при жестком креплении элементов решетки

Таблица 2.5 – Прогиб ППФ при жестком и шарнирном примыкании элементов решетки

Грузоподъемность кранов, т	Максимальный прогиб ППФ, мм		Снижение прогибов, %
	при жестком примыкании решетки	при шарнирном примыкании решетки	
2x100	37,7	47,0	20
2x140	45,3	56,3	20
2x180	52,7	65,3	19
2x225	62,3	78,0	20

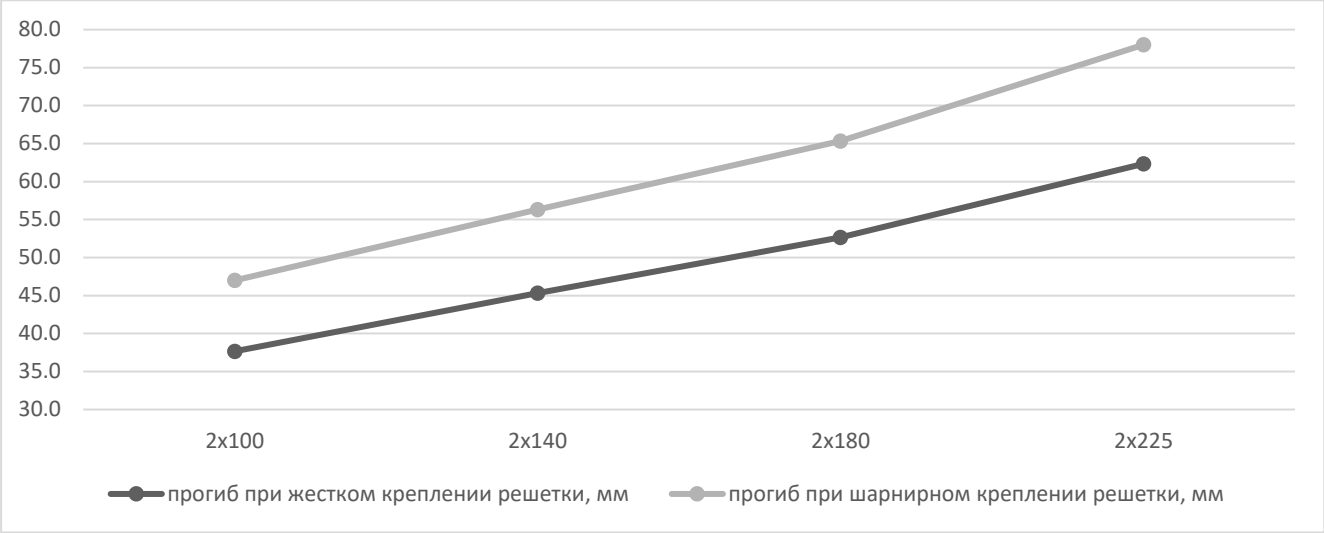


Рисунок 2.7 – График зависимости максимального прогиба ППФ от крановой нагрузки при нелинейном расчете

Снижение прогибов ППФ при жестком примыкании элементов решетки определялось по формуле:

$$\Delta f = \left(1 - \frac{f^{Ж}}{f^{Ш}}\right) \cdot 100\ [\%]; \qquad (2.2)$$

где $f^{Ж}$ – максимальный прогиб ППФ при жестком примыкании элементов решетки, кН/см^2;

$f^{Ш}$ – максимальный прогиб ППФ при шарнирном примыкании элементов решетки, кН/см^2.

График зависимости максимального прогиба ППФ от крановой нагрузки при нелинейном расчете (рисунок 2.7) представляет собой линейную функцию и совпадает с графиком зависимости максимального прогиба ППФ от крановой нагрузки при линейном расчете. Таким образом нелинейная работа отдельных зон нижнего пояса ППФ не оказывает влияния на податливость конструкции в целом.

Исследование наглядно показывает необходимость корректного учета работы решетки для обеспечения точности расчета ездового пояса. Учет жесткости сопряжения элементов решетки с ездовым поясом в рассмотренном случае приводит к:

– снижению максимального прогиба ППФ до 20 %;

– снижению напряжений в верхней полке ездового пояса в зоне сопряжения со стенкой до 41 %;

– снижению напряжений в верхней полке ездового пояса в середине пролета до 16 %;

– снижению напряжений в стенке ездового пояса в узле в зоне сопряжения с верхней полкой до 42 %, с нижней полкой – до 6 %;

– снижению напряжений в стенке ездового пояса в середине пролета на 19 %;

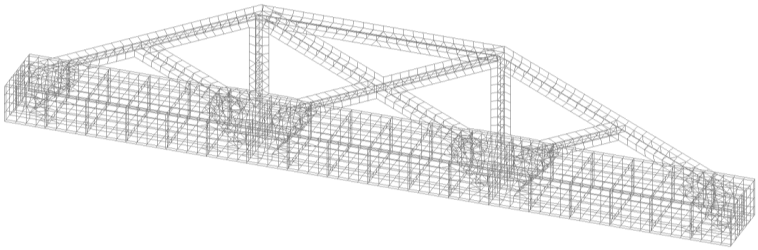
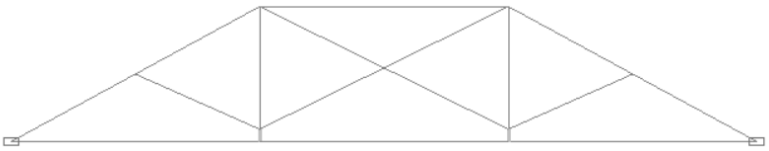
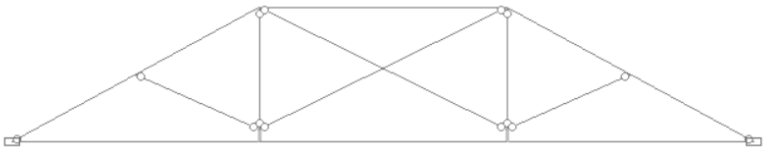
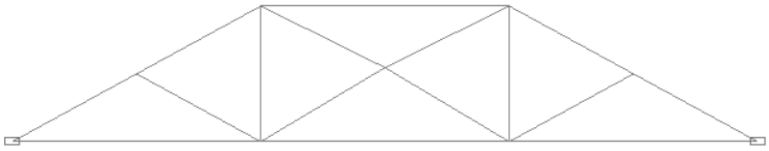
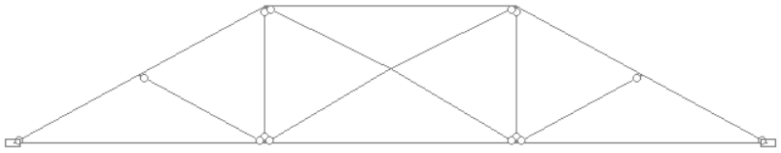
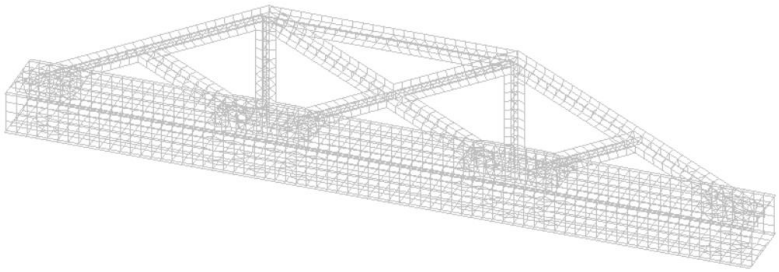
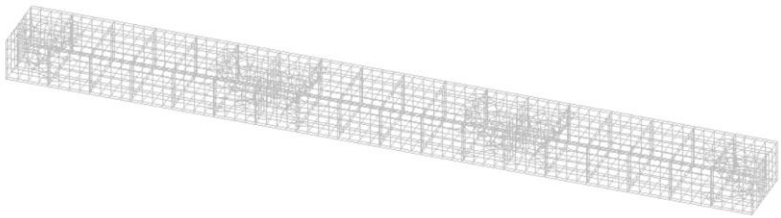
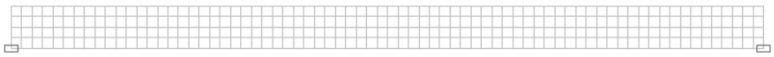
– значительному перераспределению усилий в верхней полке ездового пояса в узле примыкания элементов решетки.

2.2. Выбор расчетной схемы для исследования влияния геометрических параметров подкраново-подстропильной фермы на податливость ездового пояса

Первым этапом исследования влияния геометрических параметров ППФ на податливость ездового пояса является выбор расчетной схемы. Для получения статистических данных необходима упрощенная расчетная схема, обеспечивающая достаточную точность расчета.

С помощью ПК SCAD проанализировано несколько вариантов расчетных схем (таблица 2.6) ППФ пролётом 36 м (рисунок 2.1). За эталонную расчетную схему принята полная пространственная модель с пластинчатыми элементами поясов, решетки, ребрами жесткости и фасонками.

Таблица 2.6 – Типы расчетных схем

№	Описание	Общий вид
1	Плоская многопролетная балка	
2	Пространственная с ребрами жесткости и фасонками (эталонная)	
3	Плоская с жесткими узлами с учетом эксцентриситета крепления решетки	
4	Плоская с шарнирными узлами с учетом эксцентриситета крепления решетки	
5	Плоская с жесткими узлами без учета эксцентриситета крепления решетки	
6	Плоская с шарнирными узлами без учета эксцентриситета крепления решетки	
7	Пространственная без подкрепляющих элементов пояса	
8	Пластинчатый ездовой пояс с подкрепляющими элементами	
9	Пластинчатый ездовой пояс без подкрепляющих элементов	
10	Плоская балка пролетом 36 м	

Результаты подбора расчетной схемы приведены в таблице 2.7 и на рисунке 2.8. Плоские расчетные схемы дают достаточно точный результат. Все плоские схемы с жестким и шарнирным креплением решетки, с учетом и без учета эксцентриситета дают погрешность в пределах 15 %.

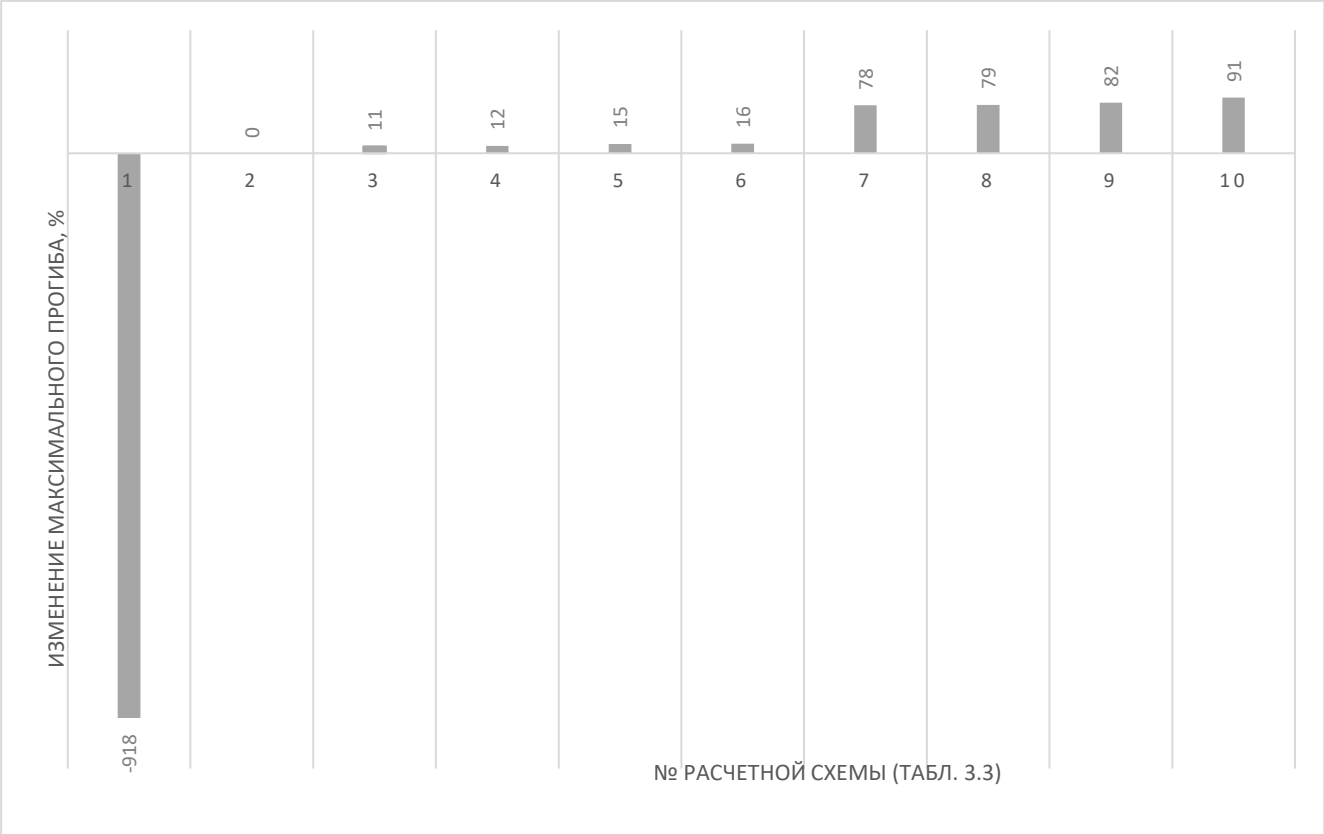


Рисунок 2.8 – Изменение максимального прогиба ППФ в зависимости от типа расчетной схемы

Таблица 2.7 – Результаты подбора расчетной схемы

№	Максимальный прогиб, мм	Изменение максимального прогиба, %
1	3,52	-918
2	35,82	0
3	40,35	11
4	40,78	12
5	42,18	15
6	42,57	16
7	163,9	78
8	188,64	79
9	201,09	82
10	384,22	91

При использовании полностью пространственной расчетной схемы необходимо учитывать подкрепляющие и соединительные элементы, отсутствие

их в модели дает погрешность 78 %. Перемещения в пространственной ППФ без подкрепляющих элементов пояса соответствуют перемещениям отдельного ездового пояса, т.е. не без подкрепляющих элементов не обеспечивается совместная работа пояса и решетки.

Для дальнейшего исследования выбрана плоская расчетная схема с жестким соединением стержней в узлах и учетом эксцентриситета крепления решетки, т. к. она дает минимальную погрешность 11 % при определении перемещений по сравнению с полностью пространственной моделью и является значительно менее трудоемкой в построении. Погрешность 11 % соответствует погрешности 10–15 %, присутствующей при переходе от пространственной к плоской модели для большинства систем.

2.3. Влияние геометрических параметров подкраново-подстропильной фермы на податливость ездового пояса

Так как целями работы являются увеличение точности и упрощение методики расчета конструкций типа ППФ, объектами исследования являются различные ППФ с отличающимися конструктивными характеристиками.

Объекты численного исследования влияния геометрических параметров ППФ на податливость ездового пояса - четыре ППФ:

1. Пролетом 36 м, высотой 6,5 м, ездовой пояс 3×2 м, элементы решетки 0,64×0,96×0,03 м (рисунок 2.9);
2. Пролетом 36 м, высотой 15,44 м, ездовой пояс 2,35×2,7 м, элементы решетки 0,96×0,96×0,02 м (рисунок 2.10);
3. Пролетом 48 м, высотой 13 м, ездовой пояс 2,75×2,7 м, элементы решетки 0,75×0,03×0,63×0,02 м (рисунок 2.11);
4. Пролетом 9 м, высотой 3,3 м, ездовой пояс 0,9×0,7 м, элементы решетки 0,12×0,18×0,006 м (рисунок 2.12).

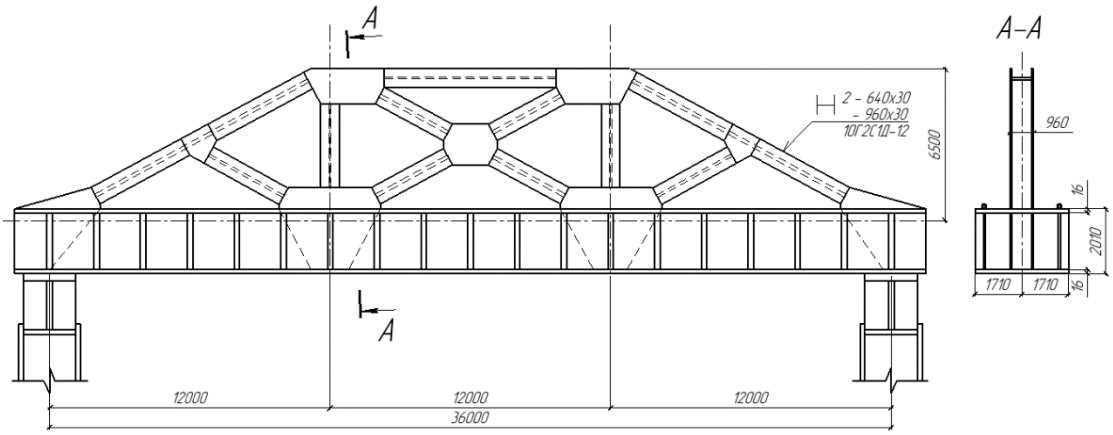


Рисунок 2.9 – ППФ пролетом 36 м, высотой 6,5 м

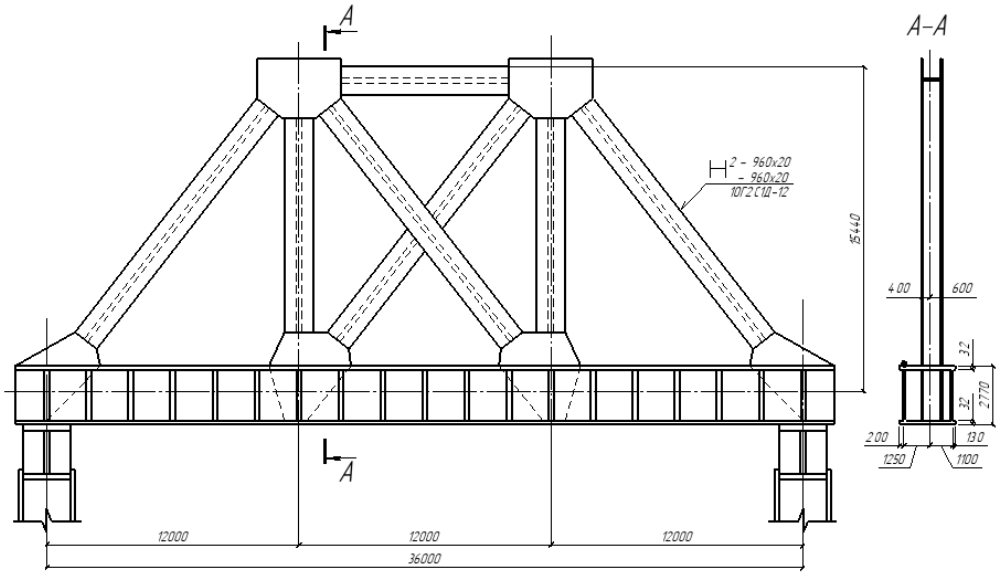


Рисунок 2.10 – ППФ пролетом 36 м, высотой 15,44 м

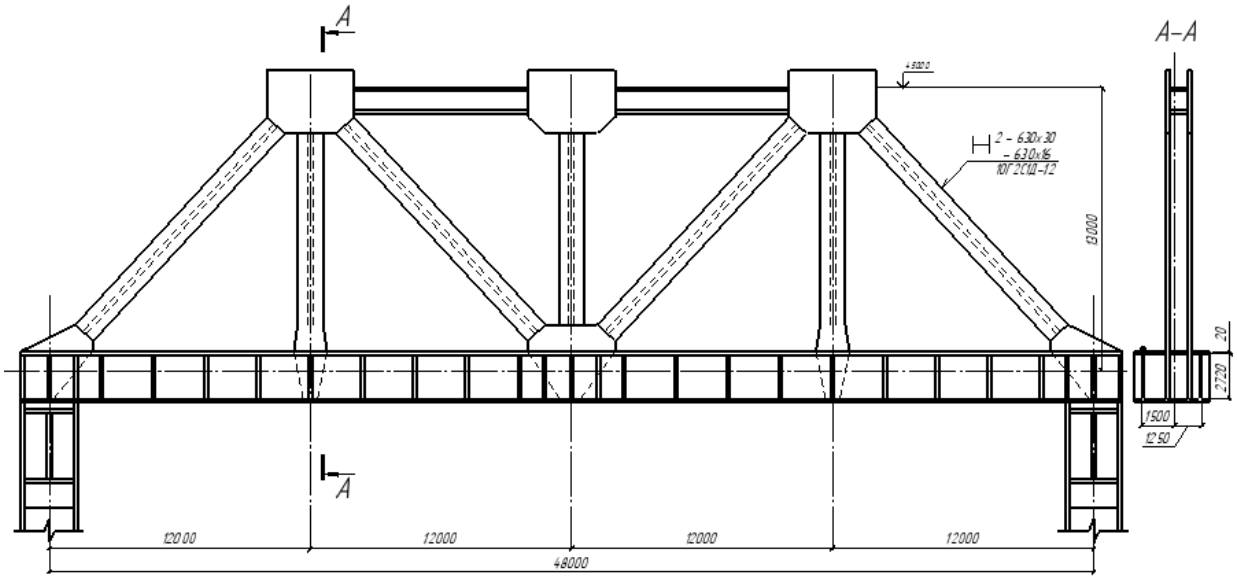


Рисунок 2.11 – ППФ пролетом 48 м, высотой 13 м

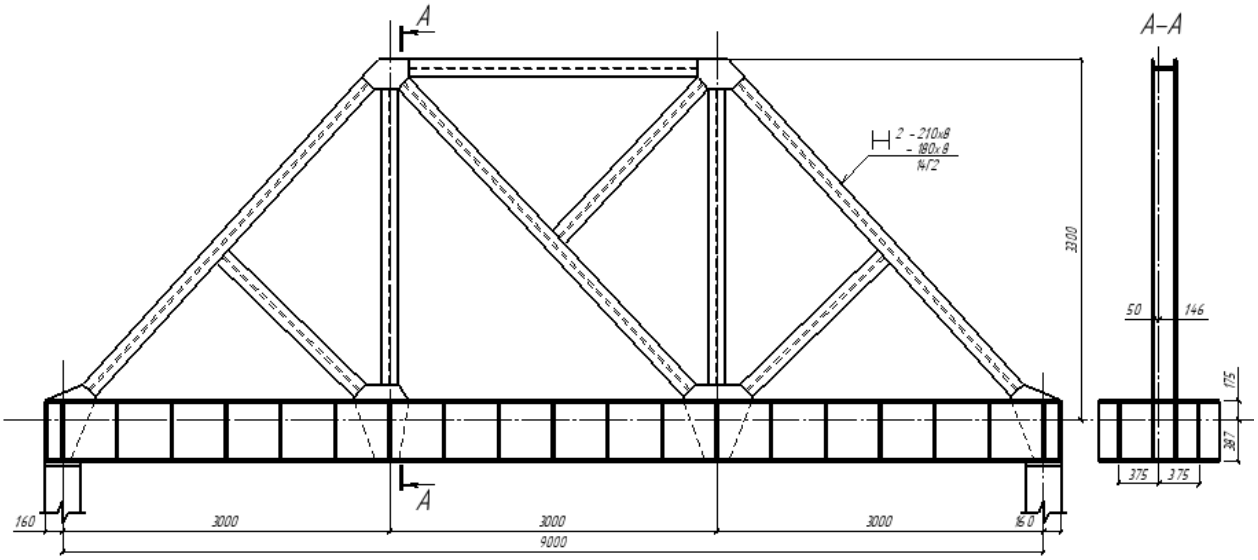


Рисунок 2.12 – ППФ пролетом 9 м, высотой 3,3 м

Для исследования влияния высоты ППФ на податливость ездового пояса высота каждой из четырёх ППФ последовательно снижалась в пять этапов таким образом, чтобы отношение высоты фермы к длине пролета h/l уменьшилось от 0,5 до 0,1. В каждом случае в исследуемый узел ездового пояса прикладывалась единичная нагрузка для получения перемещения. Рассмотрены варианты приложения нагрузки в трех направлениях: линейная в плоскости ППФ (рисунок 2.13а), линейная из плоскости (рисунок 2.13б), крутящий момент (рисунок 2.13в). По итогу изучено по 15 расчетных схем для каждой из четырёх ППФ. Также для вычленения жесткости решетки из общей жесткости ППФ определены перемещения от единичных нагрузок в трех направлениях четырёх балок сечением и пролетом, идентичными ездовым поясам соответствующих ППФ.

Для анализа влияния на угловую и линейную податливость ездового пояса ППФ соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ для каждой ППФ последовательно в шесть этапов изменялась жесткость элементов решетки. В каждом случае в исследуемый узел прикладывалась единичная нагрузка для получения перемещения. Рассмотрены варианты приложения нагрузки в трех направлениях: линейная в плоскости, линейная из плоскости, крутящий момент. По итогу изучено по 18 расчетных схем для каждой из четырёх ППФ. Также для вычленения жесткости решетки из общей жесткости ППФ определены

перемещения от единичных нагрузок в трех направлениях четырёх балок сечением и пролетом, идентичными ездовым поясам соответствующих ППФ.

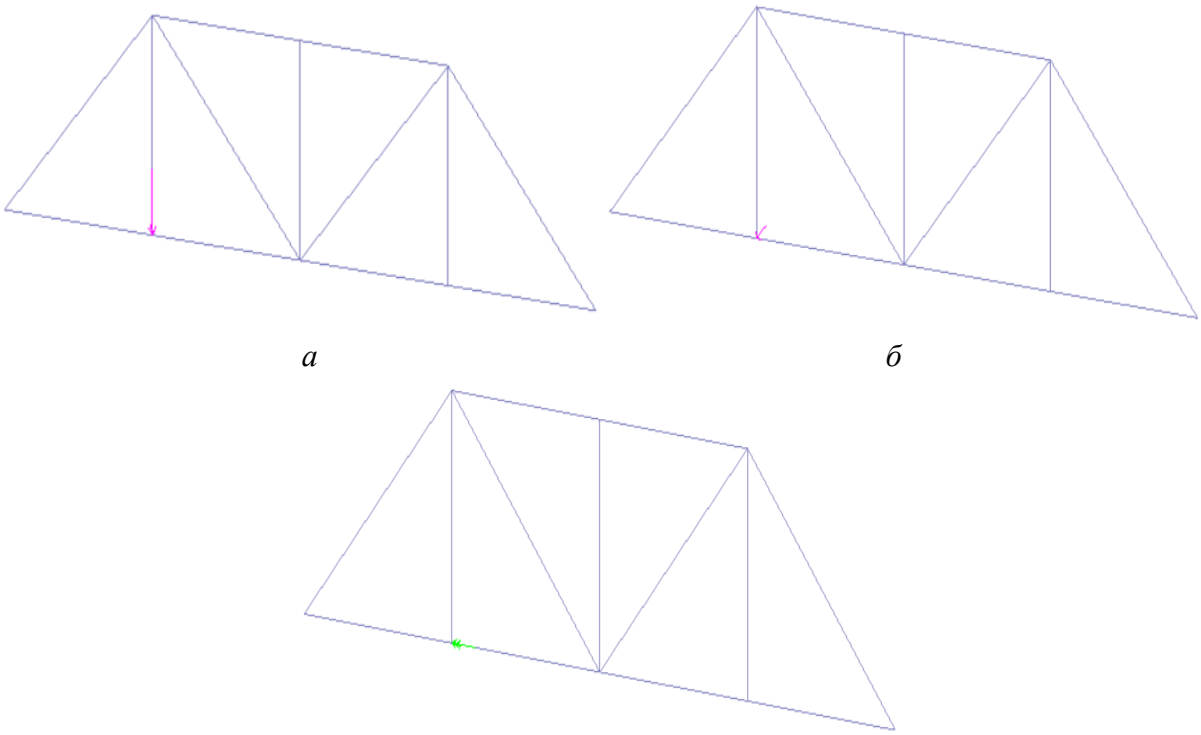


Рисунок 2.13 – Варианты приложения нагрузки: *а* - линейная в плоскости ППФ; *б* - линейная из плоскости; *в* - крутящий момент

Жесткость упругих опор, имитирующих работу решетки, определена по формуле:

$$C = \frac{1}{\delta_{ППФ}} - \frac{1}{\delta_б} \left[\frac{кН}{м}\right]; \quad (2.3)$$

где $\delta_{ППФ}$ –податливость ППФ (рисунок 2.14*а*) определяемая по формуле:

$$\delta_{ППФ} = \frac{f_{ППФ}}{F} \left[\frac{м}{кН}\right]; \quad (2.4)$$

где $f_{ППФ}$ – прогиб ППФ в точке приложения силы F.

$\delta_б$ –податливость эквивалентной балки, сечением соответствующей ездовому поясу ППФ (рисунок 2.14*б*), определяемая по формуле:

$$\delta_б = \frac{f_б}{F} \left[\frac{м}{кН}\right]; \quad (2.5)$$

где $f_б$ – прогиб эквивалентной балки в точке приложения силы F.

Результаты анализа влияния на податливость ездового пояса высоты ППФ приведены на рисунках 2.15–2.22.

Снижение максимальных перемещений в ездовом поясе ППФ относительно эквивалентной балки определено по формуле:

$$\Delta\delta \quad = \left(1 - \frac{\delta_{\text{ППФ}}}{\delta_{\text{б}}}\right) \cdot 100\ [\%]. \tag{2.6}$$

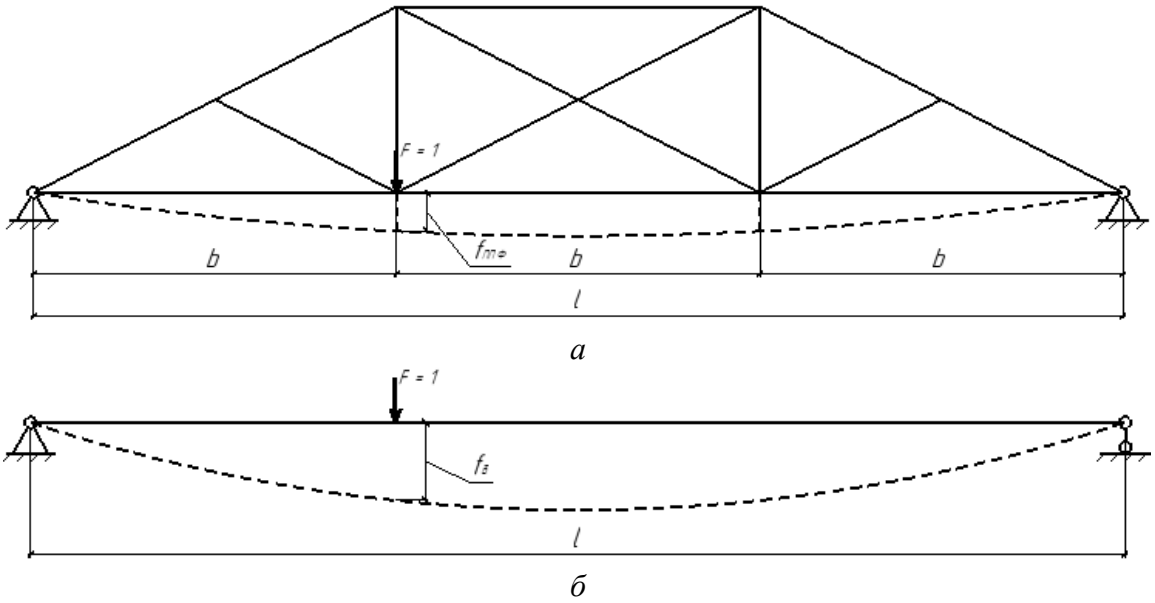


Рисунок 2.14 – Расчётная схема для определения податливости: *а* – ППФ; *б* – балки сечением эквивалентной ездовому поясу ППФ

Снижение соотношения пролета и высоты ППФ определено по формуле:

$$\Delta\frac{h}{l} = \left(1 - \frac{h}{l}\right) \cdot 100\ [\%]; \tag{2.7}$$

где h – высота ППФ, м;

l – пролет ППФ, м.

Относительный рост жесткости решетки определен по формуле:

$$\Delta C \quad = \left(1 - \frac{\mathrm{C}_1}{\mathrm{C}_i}\right) \cdot 100\ [\%]; \tag{2.8}$$

где C_1 – жесткость упругих опор, имитирующих решетки работу первой (наиболее высокой) ППФ из ряда исследуемых;

C_i – жесткость упругих опор исследуемой ППФ.

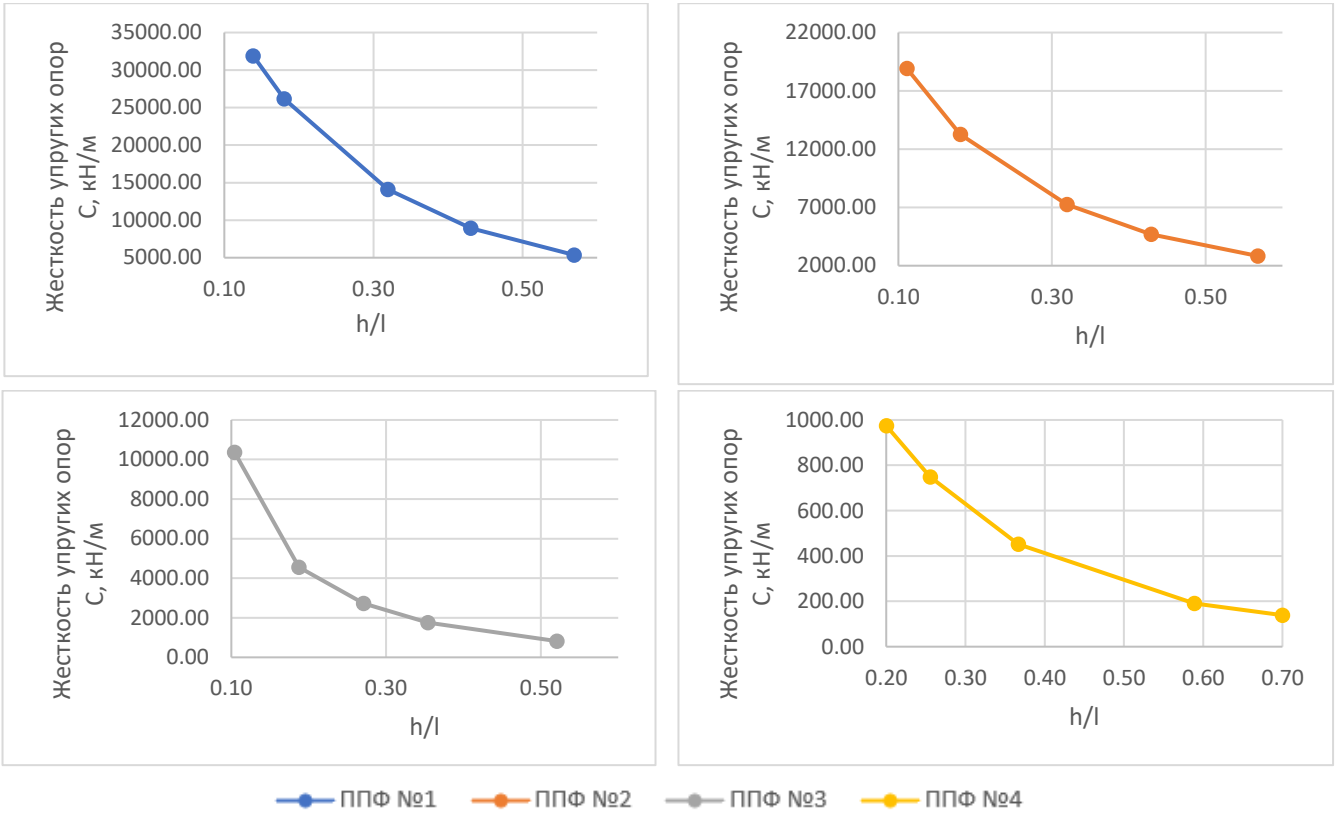


Рисунок 2.15 – Влияние высоты ППФ на линейную податливость ездового пояса из плоскости ППФ

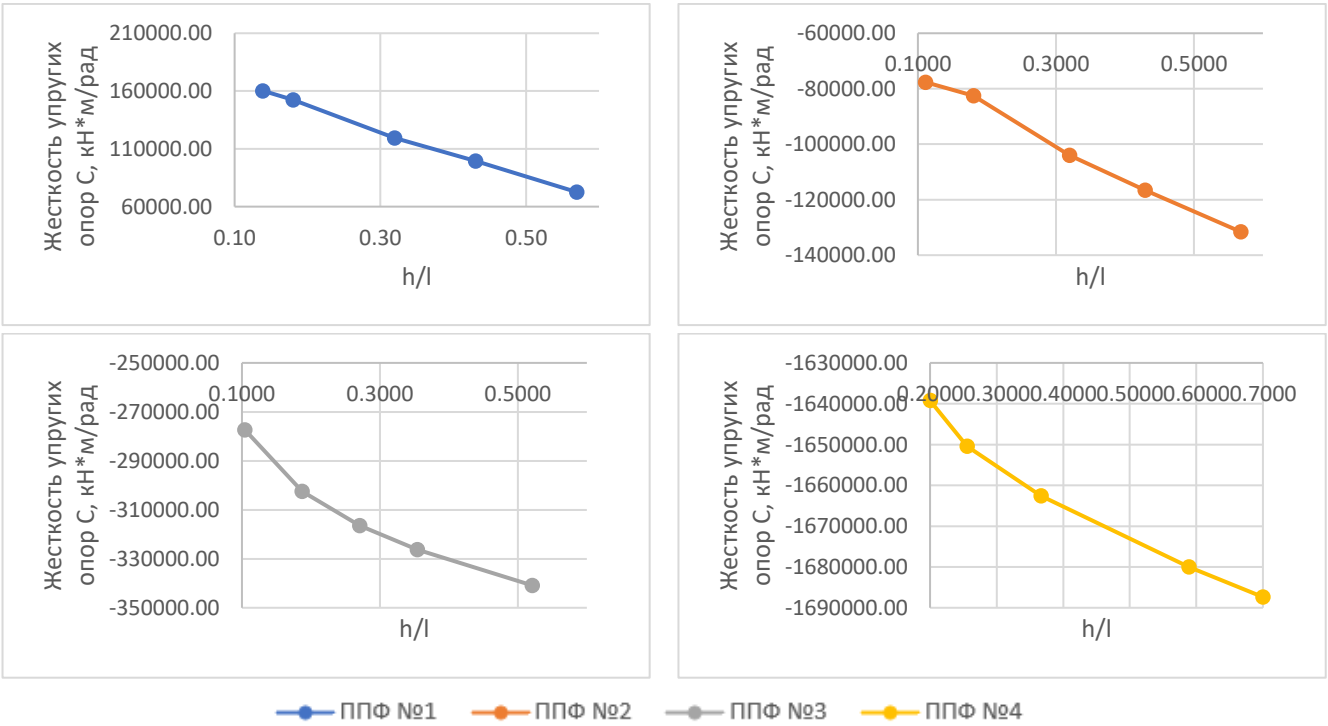


Рисунок 2.16 – Влияние высоты ППФ на угловую податливость ездового пояса

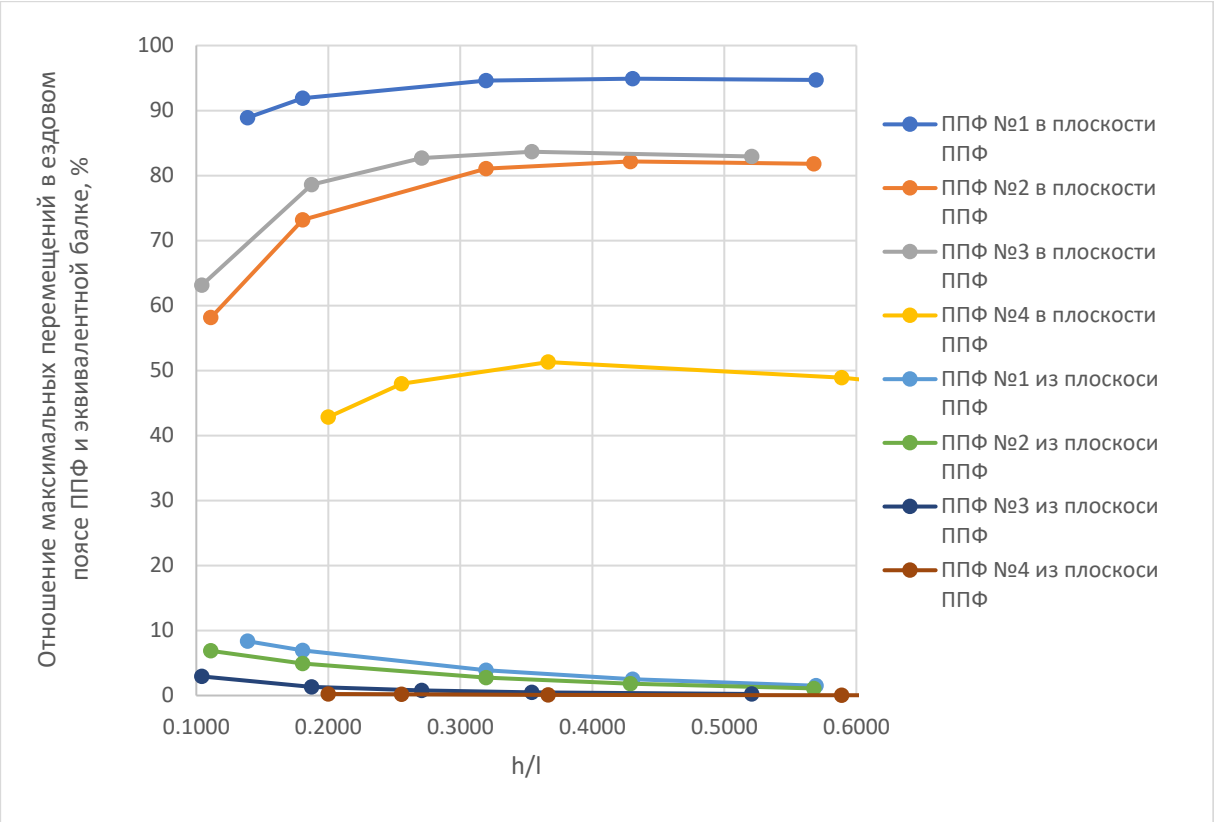


Рисунок 2.17 – Снижение отношения линейных перемещений в ездовом поясе ППФ и эквивалентной балке в зависимости от высоты ППФ

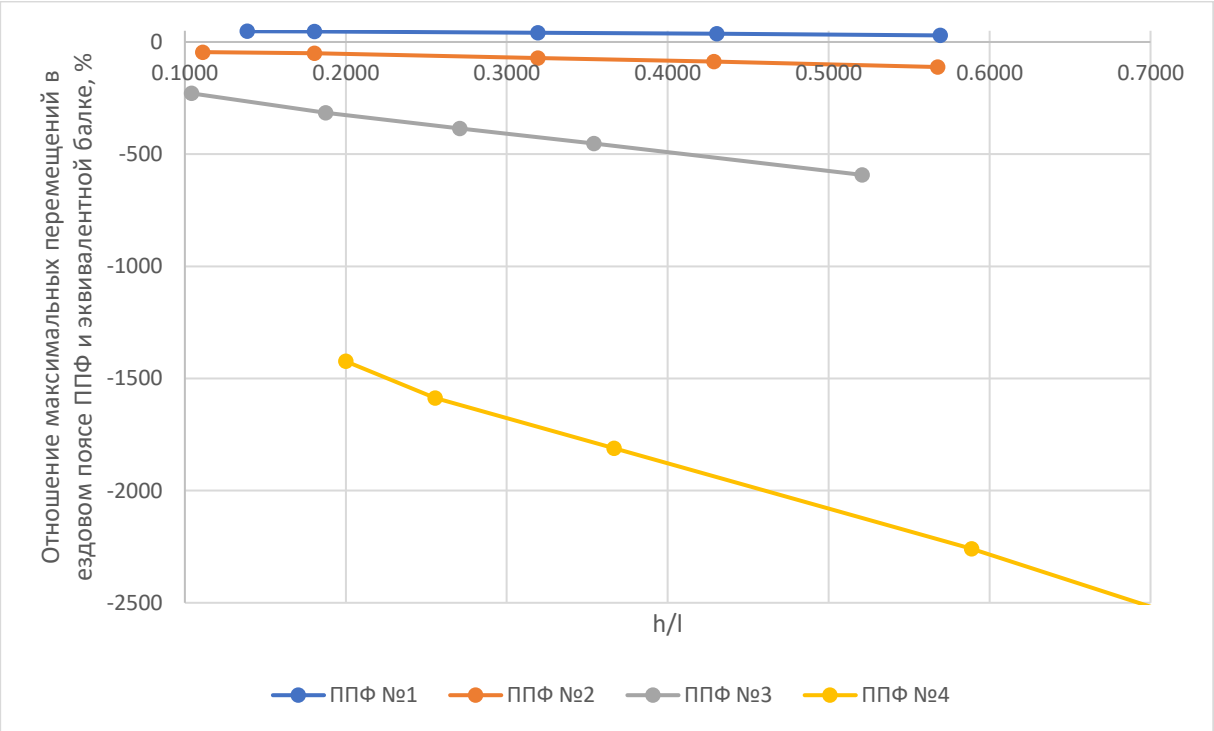


Рисунок 2.18 – Снижение отношения угловых перемещений в ездовом поясе ППФ и эквивалентной балке в зависимости от высоты ППФ

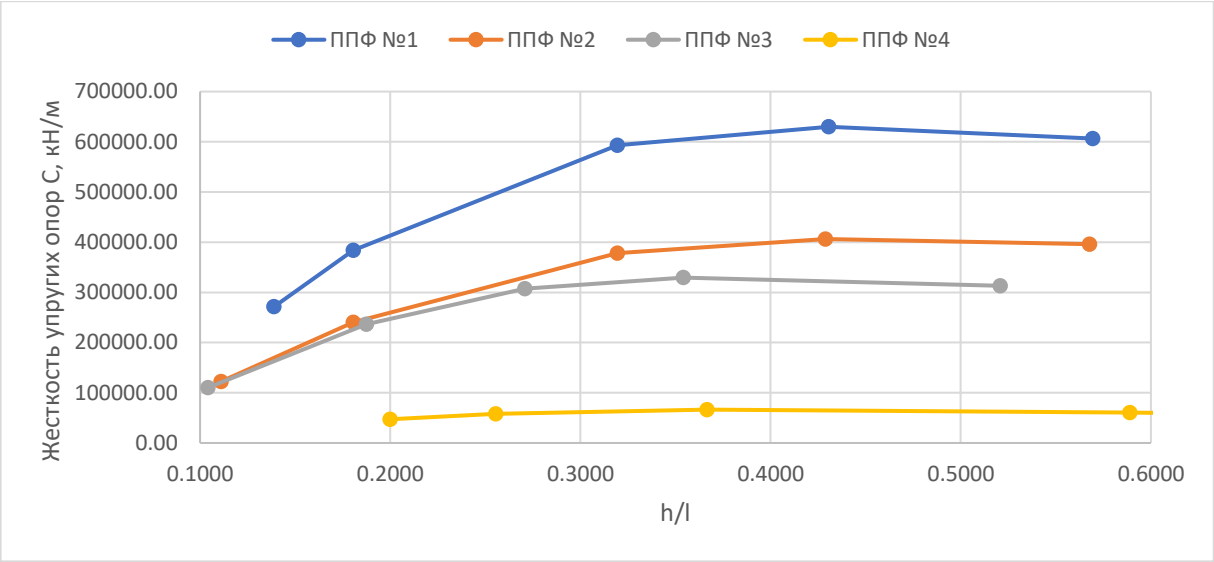


Рисунок 2.19 – Влияние высоты ППФ на линейную податливость ездового пояса в плоскости ППФ

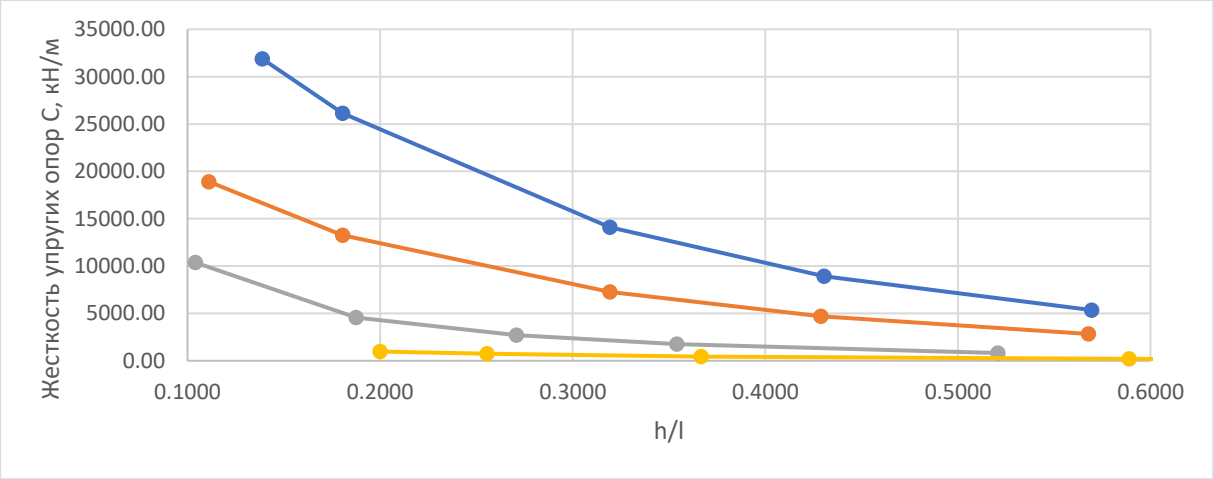


Рисунок 2.20 – Влияние высоты ППФ на линейную податливость ездового пояса из плоскости ППФ

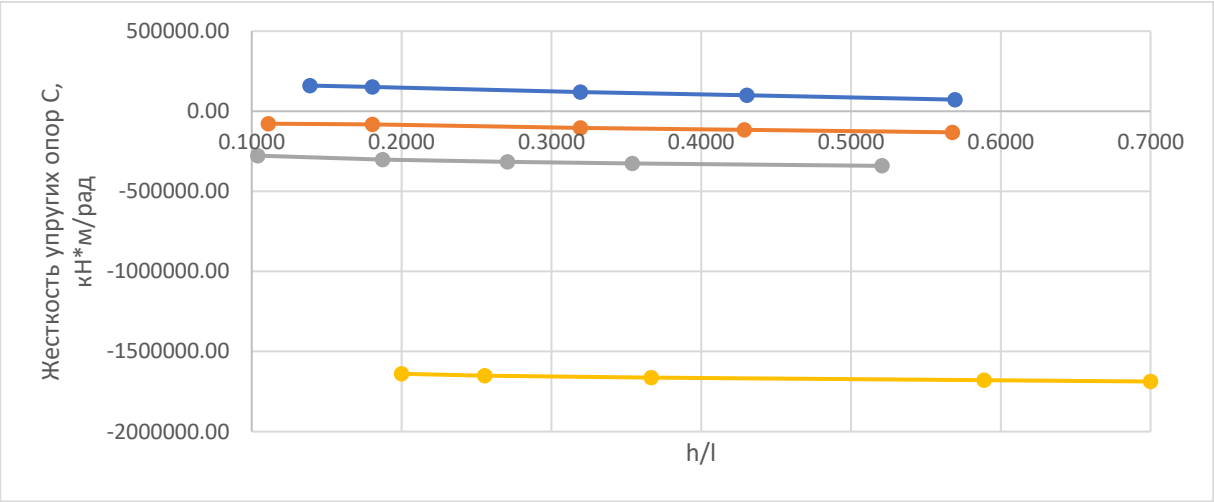


Рисунок 2.21 – Влияние высоты ППФ на угловую податливость ездового пояса

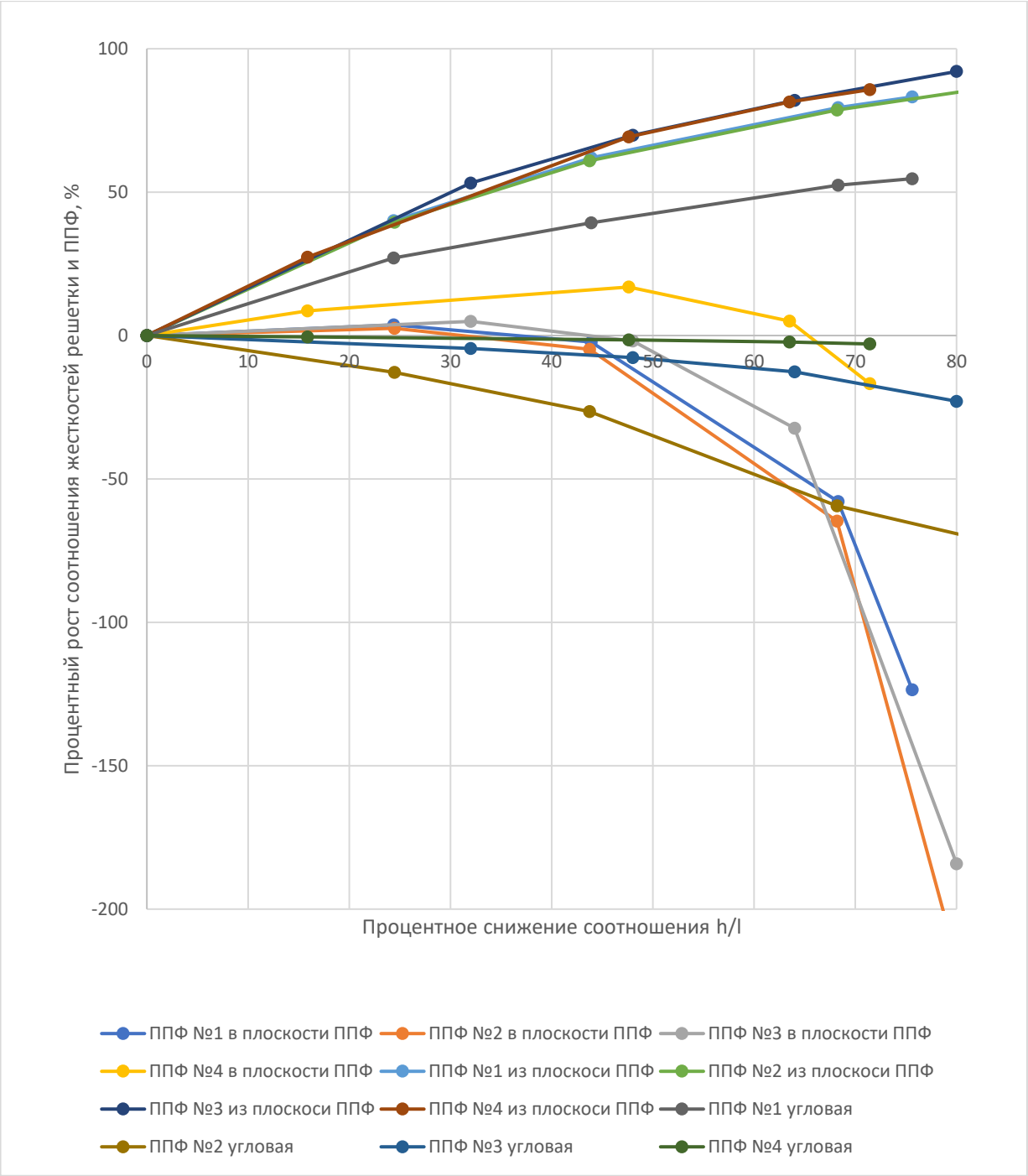


Рисунок 2.22 – Зависимость жесткости решетки от высоты ППФ

Результаты анализа влияния на податливость ездового пояса ППФ соотношений жесткостей элементов решетки и ППФ приведены на рисунках 2.23–2.27 и в таблице 2.8. Рассмотренные сечения элементов решетки приведены на рис. 2.28–2.31.

Приведённая изгибная жесткость в плоскости ППФ определена по формуле [77]:

$$\mathrm{EI}_{\mathrm{z}}^{\mathrm{пр}} = E\left(A_{f1}z_1^2 + A_{f2}z_2^2\right); \tag{2.9}$$

где A_{f1} и A_{f2} − площади сечения нижнего и верхнего поясов ППФ;

z_1 и z_2 −расстояния от центра тяжести поясов до нейтральной оси фермы в сечении посредине пролета.

Соотношение жесткостей решетки и ездового пояса в плоскости ППФ определено как отношение продольной жесткости сечения решетки EF [кН] к изгибной жесткости сечения ездового пояса EIz [кН·м^2]. Соотношение жесткостей решетки и ППФ в плоскости ППФ определено как отношение продольной жесткости сечения решетки EF [кН] к приведенной изгибной жесткости ППФ $\mathrm{EIz}^{\mathrm{пр}}$ [кН·м^2].

Соотношение жесткостей решетки и ездового пояса из плоскости ППФ определено как отношение сдвиговой жесткости сечения решетки GFz [кН] к изгибной жесткости сечения ездового пояса EIy [кН·м^2]. К рассматриваемому узлу из плоскости ППФ прикладывается сосредоточенная сила 100кН.

При определении угловой податливости соотношение жесткостей решетки и ездового пояса вычислено как отношение изгибной жесткости сечения решетки EIz [кН·м^2] к крутильной жесткости сечения ездового пояса GIкр [кН·м^2]. К рассматриваемому узлу прикладывается сосредоточенный крутящий момент 100 кНм.

Жесткость упругих опор, имитирующих работу решетки, определена по формуле (2.3). Относительный рост жесткости решетки определен по формуле (2.8). Снижение максимальных перемещений в ездовом поясе определено по формуле (2.6).

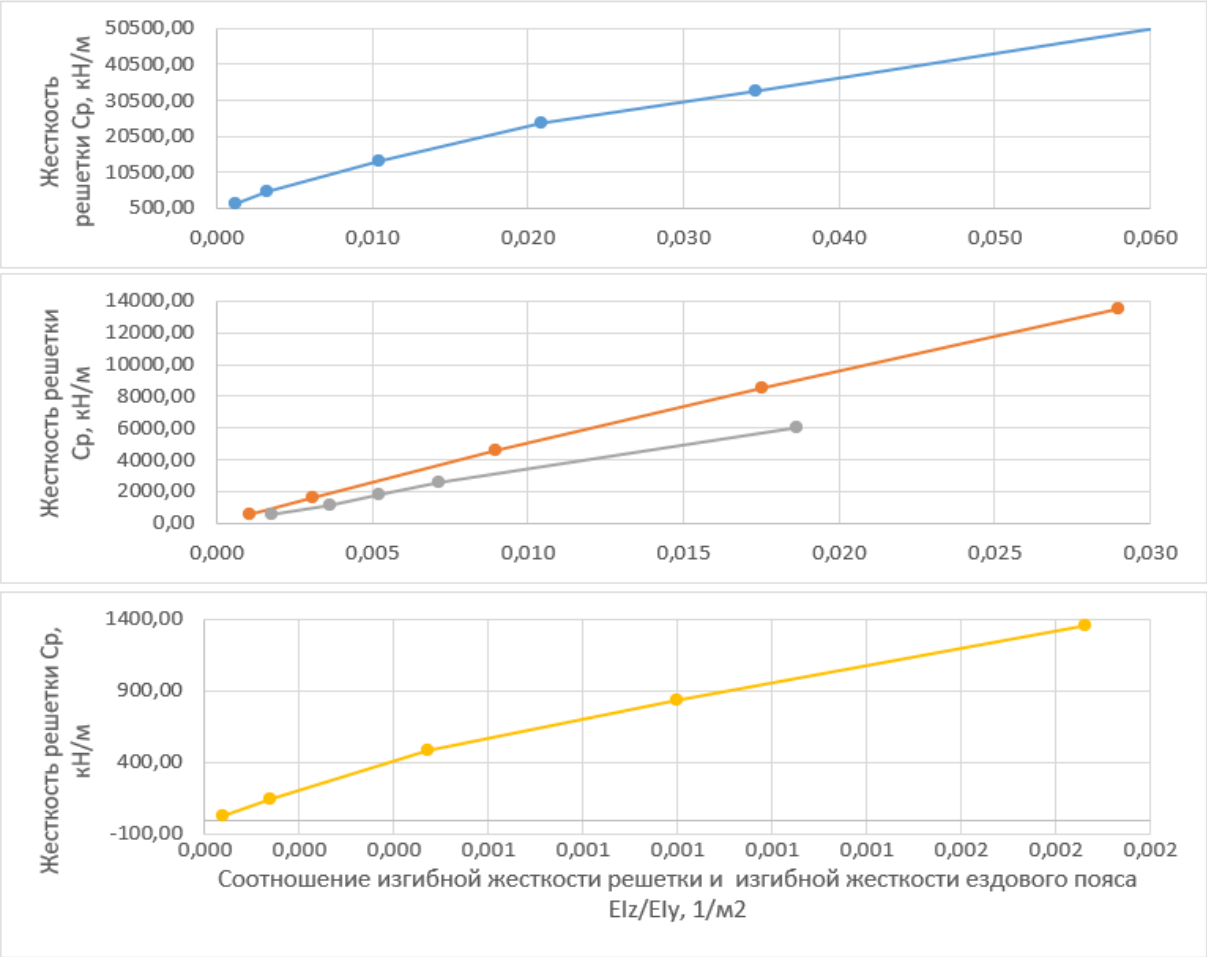


Рисунок 2.23 – Влияние жесткости решетки на линейную податливость ездового пояса из плоскости ППФ

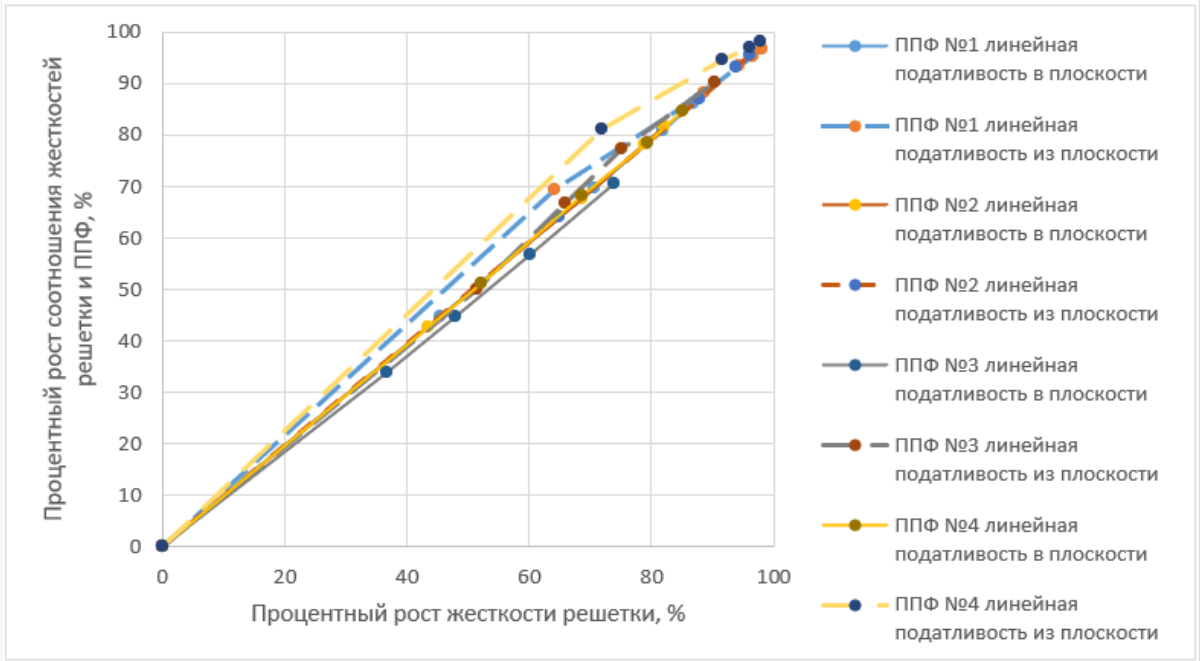


Рисунок 2.24 – Относительный рост жесткости решетки

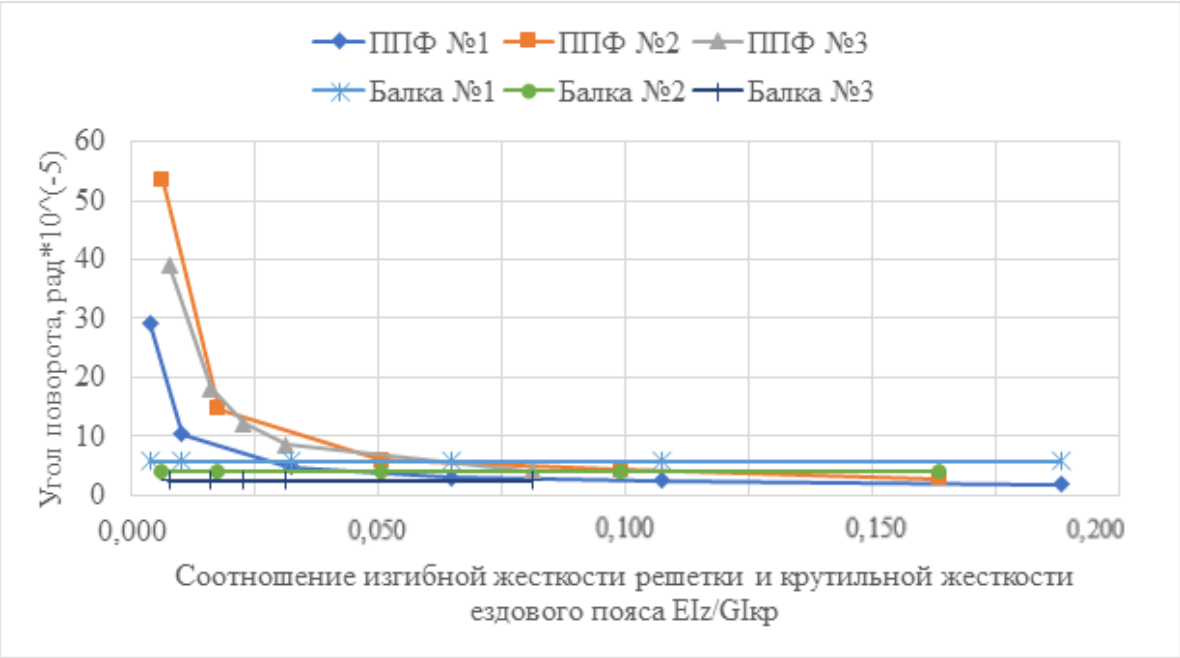


Рисунок 2.25 – Влияние жесткости решетки на угол поворота ездового пояса ППФ при кручении

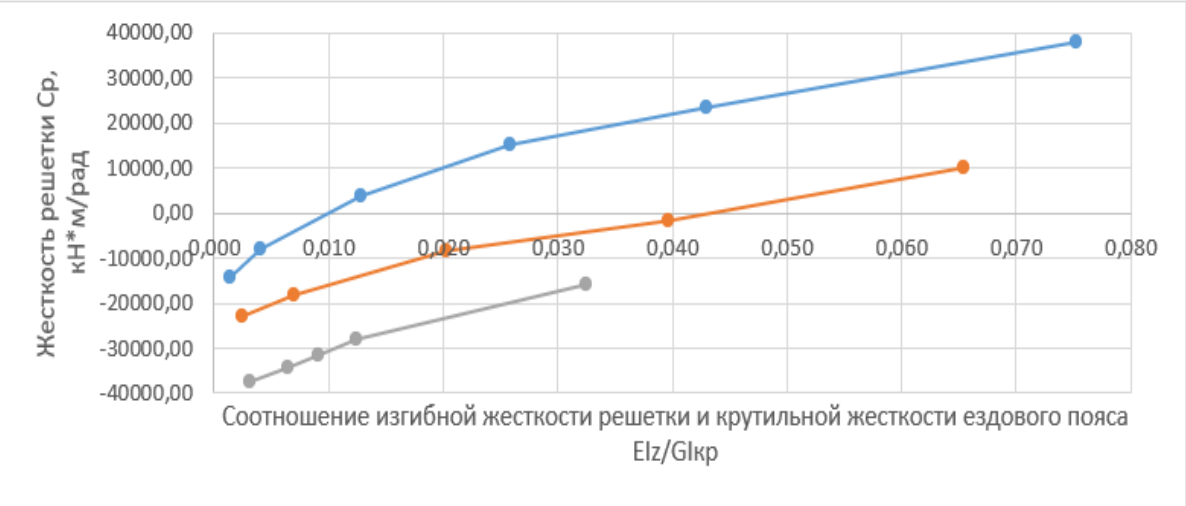


Рисунок 2.26 – Влияние жесткости решетки на угловую податливость ездового пояса

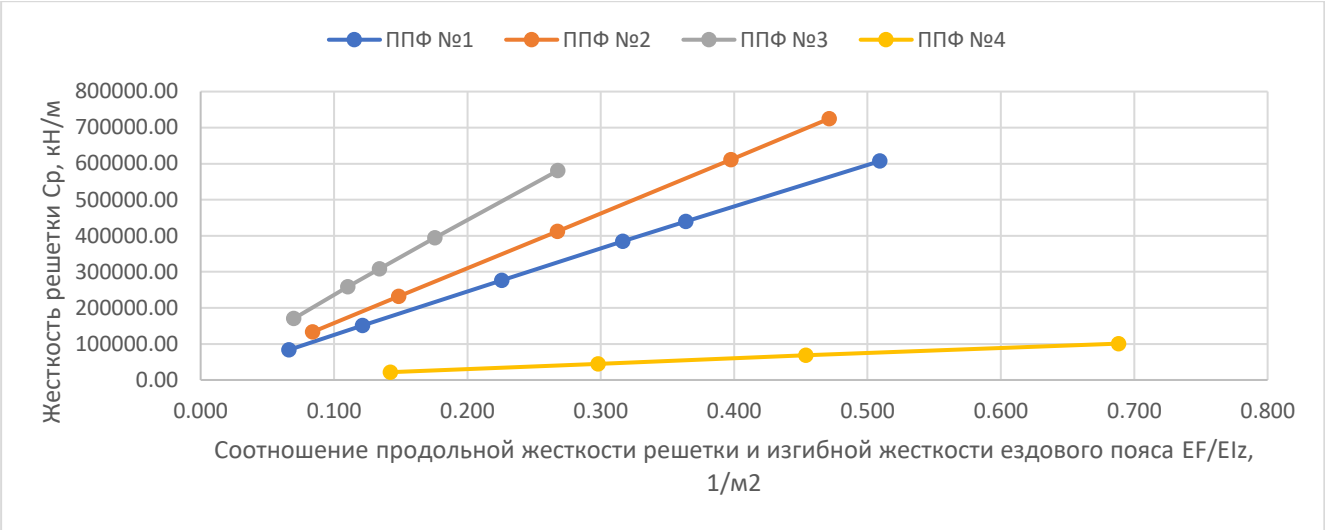


Рисунок 2.27 – Влияние жесткости решетки на линейную податливость ездового пояса в плоскости ППФ

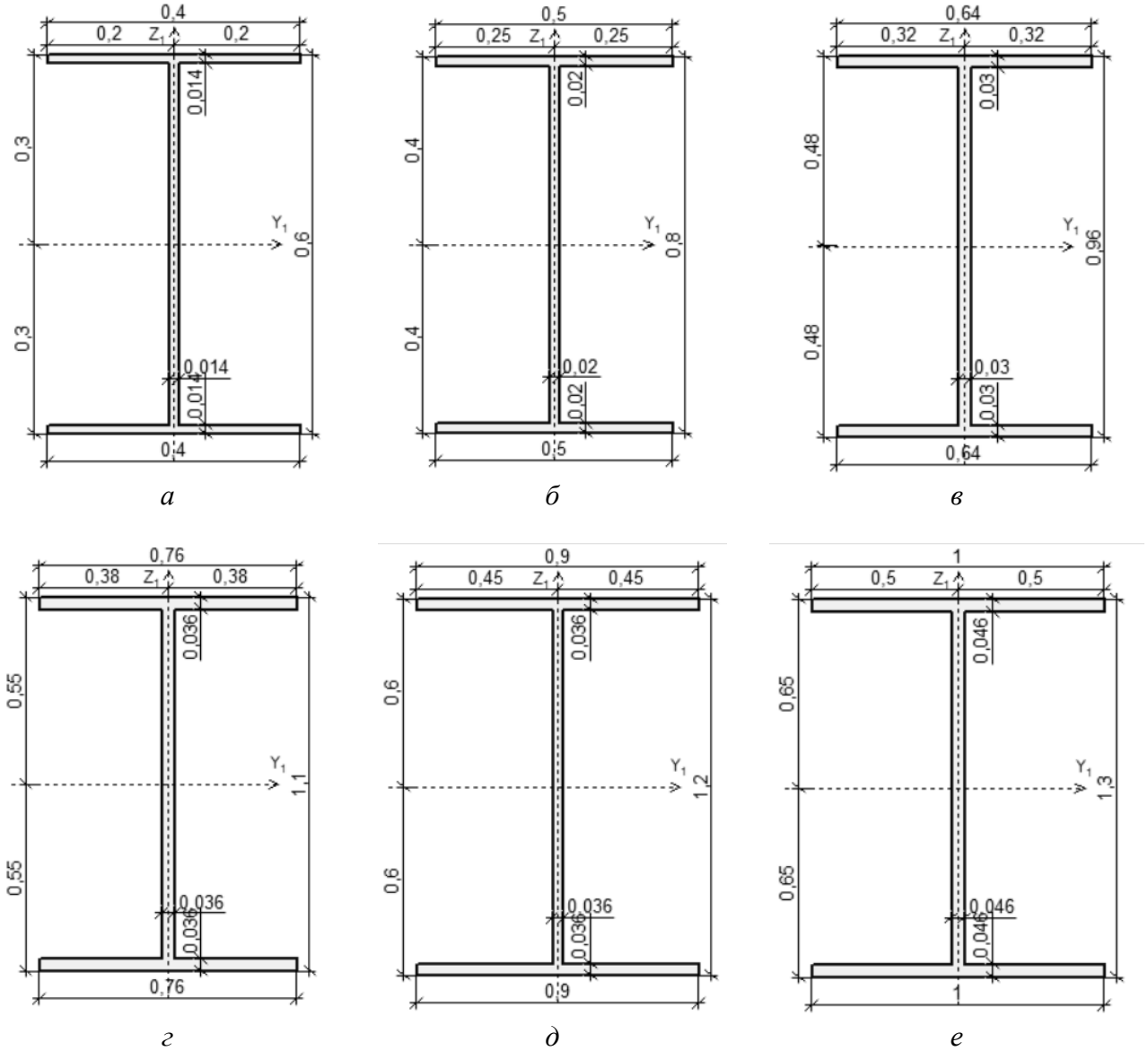


Рисунок 2.28 – Сечения элементов решетки ППФ№1 (рисунок 2.9)

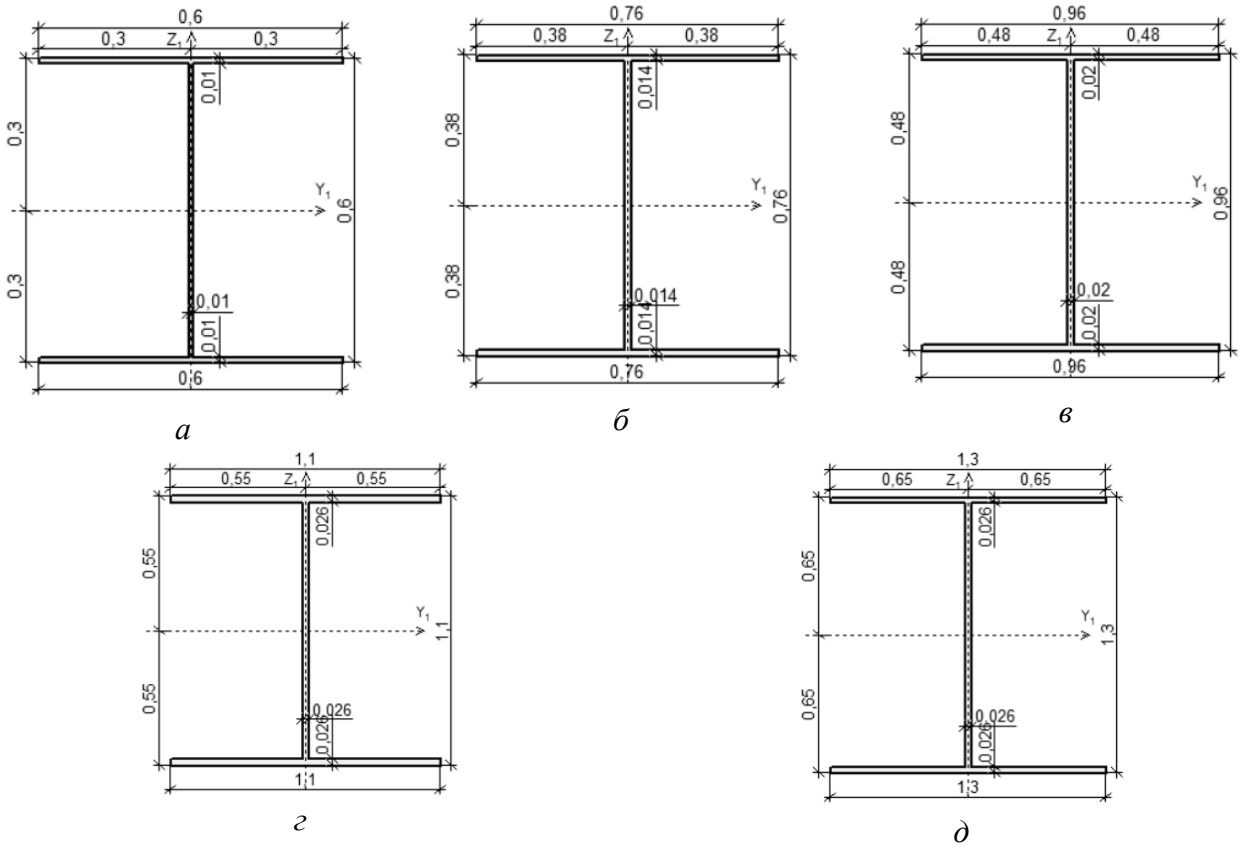


Рисунок 2.29 – Сечения элементов решетки ППФ№2 (рисунок 2.10)

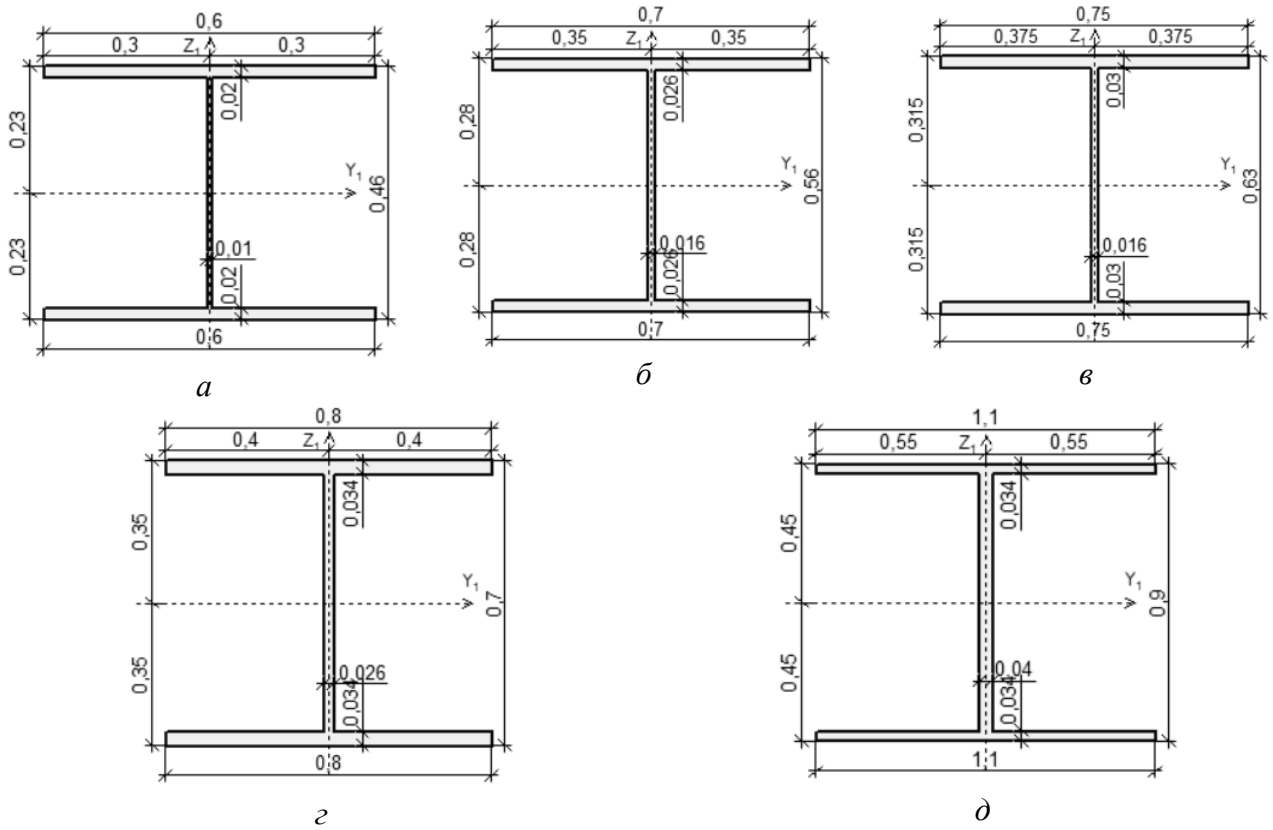


Рисунок 2.30 – Сечения элементов решетки ППФ№3 (рисунок 2.11)

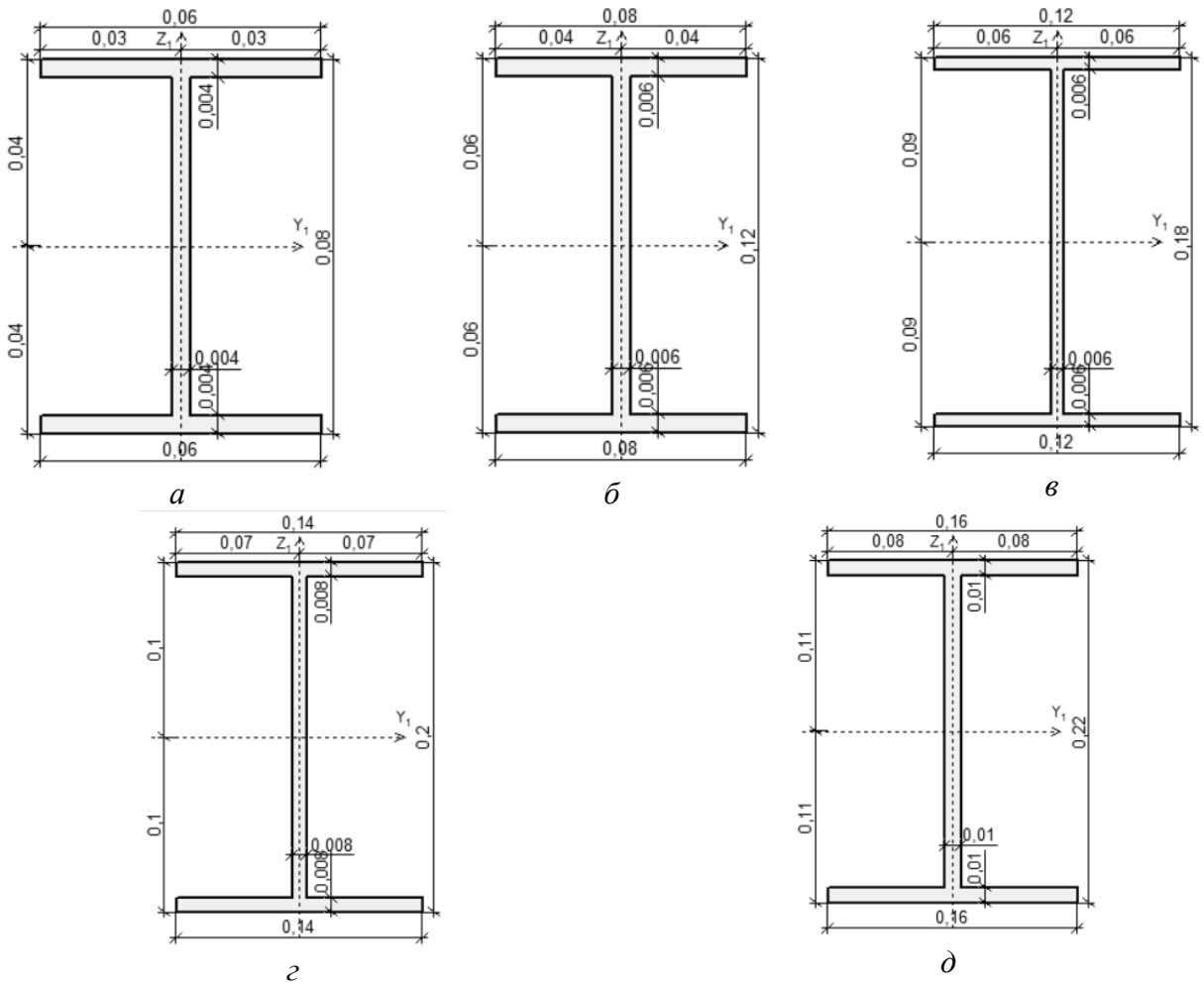


Рисунок 2.31 – Сечения элементов решетки ППФ№4 (рисунок 2.12)

Таблица 2.8 – Снижение максимальных перемещений в ездовом поясе ППФ№1

Сечения элементов решетки, м	Снижение линейных перемещений в плоскости ППФ %	Снижение линейных перемещений из плоскости ППФ, %	Снижение угловых перемещений, %
Рисунок 2.28а	71,18	0,45	-411,03
Рисунок 2.28б	81,72	1,47	-80,56
Рисунок 2.28в	89,10	3,74	17,34
Рисунок 2.28г	91,91	6,51	46,58
Рисунок 2.28д	92,86	8,64	57,09
Рисунок 2.28е	94,72	12,70	68,48

Из анализа графиков, приведенных на рисунках 2.15–2.27, сделаны следующие выводы:

- Соотношения высоты ППФ и ее пролета h/l и соотношение жесткостей решетки и ездового пояса влияют на его угловую и линейную податливость в плоскости и из плоскости ППФ.

- Включение в работу ездового пояса элементов решетки оказывает наименьшее влияние на линейную податливость ездового пояса из плоскости ППФ. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от 0,2 % до 12 % в зависимости от характеристик ППФ.

- Учет в работе ездового пояса элементов решетки значительно влияет на линейную податливость ездового пояса в плоскости ППФ. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от 40% до 100% в зависимости от характеристик ППФ.

- На угловую податливость ездового пояса учет элементов решетки оказывает наибольшее, чаще отрицательное влияние. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от -2500 % до +50% в зависимости от характеристик ППФ.

- При увеличении отношения высоты ППФ к ее пролету h/l линейная податливость ездового пояса в плоскости ППФ снижается, линейная податливость ездового пояса из плоскости ППФ возрастает. На тип зависимости угловой податливости влияют геометрические характеристики ППФ. Линейной зависимости между отношения высоты ППФ к ее пролету h/l и податливостью ездового пояса не наблюдается.

- Линейная податливость узлов ездового пояса в плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения продольной жесткости решетки и изгибной жесткости ездового пояса.

- Учет сопротивления элементов решетки при работе ездового пояса из плоскости ППФ снижает в нем уровень напряжений. Линейная податливость узлов ездового пояса из плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения сдвиговой жесткости решетки и изгибной жесткости ездового пояса.

- Угловая податливость ездового пояса в большой степени зависит от соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового

пояса. Учет элементов решетки в работе пояса на кручение может не только разгрузить, но и увеличить нагрузку на него в зависимости от конфигурации ППФ и соотношения жесткостей элементов решетки и нижнего пояса. При соотношении изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса $EI_Z/GIкр < 0{,}05/м^2$ угловая податливость резко возрастает, жесткость угловых упругих опор отрицательна.

- Изменение соотношения жесткости решетки и ездового пояса оказывает на податливость ездового пояса большее влияние, чем изменение высоты ППФ. Для ППФ№1 (рисунок 2.3.) снижение максимальных линейных перемещений в плоскости ППФ составляет от 95 % до 89 % при снижении соотношения высоты ППФ к ее пролету h/l до 76 %; от 95 % до 71 % при снижении соотношения жесткости решетки и ездового пояса до 86 %. Снижение максимальных линейных перемещений из плоскости ППФ составляет от 2 % до 8 % при снижении соотношения высоты ППФ к ее пролету h/l до 76 %; от 12,7 % до 1 % при снижении соотношения жесткости решетки и ездового пояса до 98 %. Снижение максимальных угловых перемещений составляет от 29 % до 49 % при снижении соотношения высоты ППФ к ее пролету h/l до 76 %; от 68 % до -441 % при снижении соотношения жесткости решетки и ездового пояса до 98 %.

После вычисления жесткостей решетки для ППФ пролетом 36 м высотой 6,5 м (рисунок 2.1) построены модели балок на упругих опорах с соответствующими жёсткостями (рисунок 2.32). Определена погрешность перемещений и внутренних усилий данных расчетных схем в сравнении с моделями ППФ в зависимости от жесткости решетки при действии нагрузки в плоскости фермы.

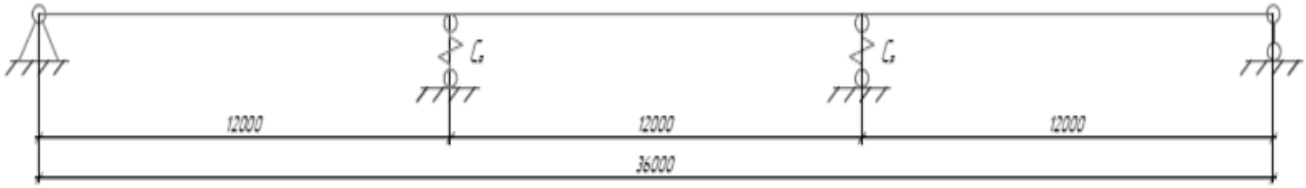
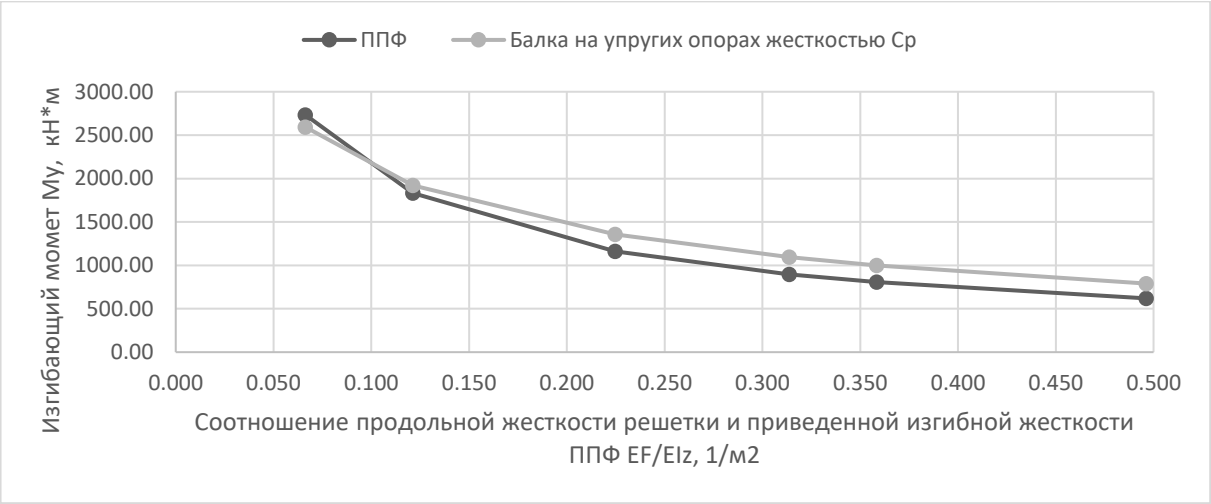
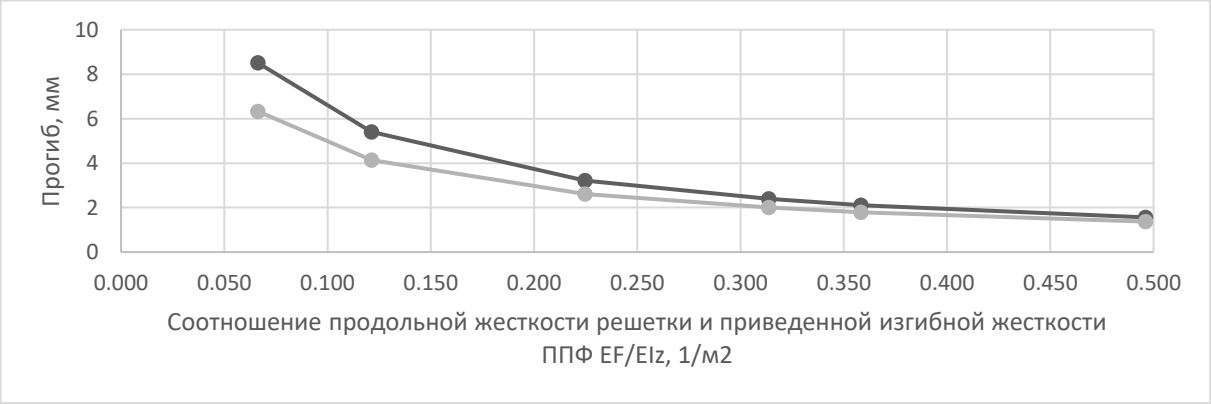


Рисунок 2.32 – Расчетная схема балки на упругих опорах

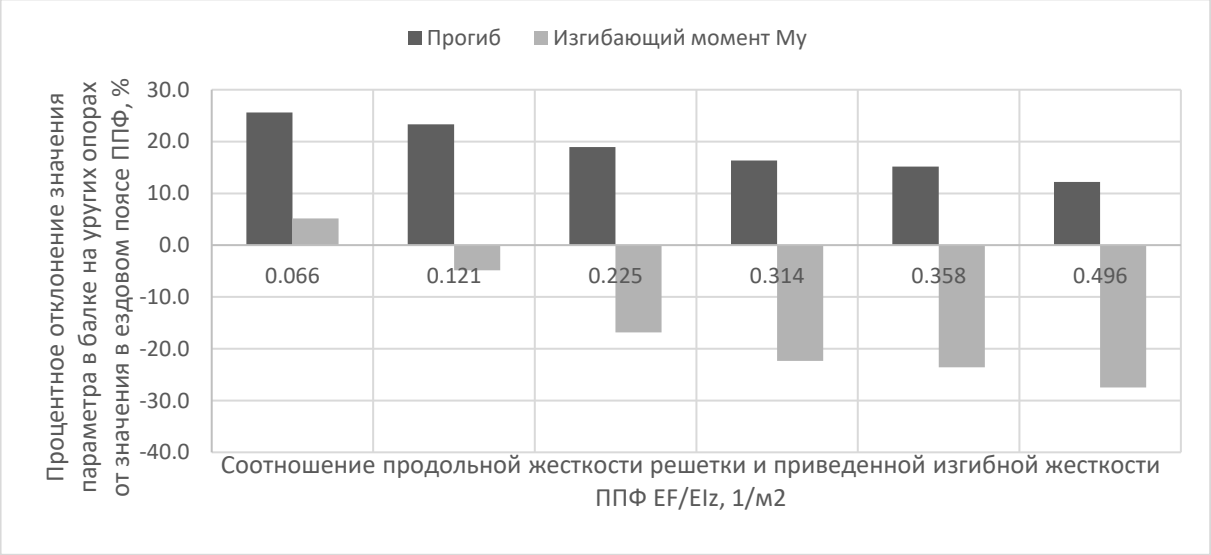
Результаты определения погрешностей перемещений и внутренних усилий балки на упругих опорах в сравнении с моделью ППФ приведены на рисунке 2.33.



а



б



в

Рисунок 2.33 – Погрешность определения перемещений и внутренних усилий: *а* – влияние жесткости решетки на изгибающий момент My ездового пояса ППФ; *б* – влияние жесткости решетки на прогиб ездового пояса ППФ; *в* – оценка точности замены решетки ППФ упругими опорами

Погрешности определения перемещений и внутренних усилий в зависимости от соотношения жесткостей решетки и ППФ могут превышать 20%. Аналитическая методика расчёта, предложенная в главе 3, дает более точные результаты.

2.4. Выводы по главе 2

1. Жесткость узловых соединений элементов решетки и ездового пояса ППФ в значительной степени влияет на напряженно-деформированное состояние пояса. При жестком примыкании решетки к поясу, в сравнении с шарнирным примыканием, происходит значительное перераспределение внутренних усилий в верхней полке пояса в самом узле, снижается напряжение в верхней полке и стенках пояса по всей длине пояса, в зонах сопряжения стенки с полками, возрастает жесткость ППФ.

2. Учет в работе ездового пояса элементов решетки значительно влияет на линейную податливость ездового пояса в плоскости ППФ. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от 40 % до 100 % в зависимости от характеристик ППФ.

Включение в работу ездового пояса элементов решетки оказывает меньшее влияние на линейную податливость ездового пояса из плоскости ППФ. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от 0,2 % до 8 % в зависимости от характеристик ППФ.

На угловую податливость ездового пояса учет элементов решетки оказывает наибольшее, чаще отрицательное влияние. Снижение отношения максимальных перемещений в ездовом поясе и эквивалентной балке составляет от -2500 % до +50 % в зависимости от характеристик ППФ.

3. При увеличении отношения высоты ППФ к ее пролету h/l линейная податливость ездового пояса в плоскости ППФ снижается, линейная податливость

ездового пояса из плоскости ППФ возрастает. На тип зависимости угловой податливости влияют геометрические характеристики ППФ.

4. Линейная податливость узлов ездового пояса в плоскости ППФ находится в обратно пропорциональной линейной зависимости от соотношения продольной жесткости решетки и изгибной жесткости ездового пояса.

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

Угловая податливость ездового пояса в большой степени зависит от соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса. Учет элементов решетки в работе пояса на кручение может не только разгрузить, но и увеличить нагрузку на него в зависимости от конфигурации ППФ и соотношения жесткостей элементов решетки и нижнего пояса. При соотношении изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса $EI_Z/GIкр < 0{,}05/м^2$ угловая податливость резко возрастает, жесткость угловых упругих опор отрицательна.

ГЛАВА 3. Уточнение методики расчета нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы

3.1. Расчет нижнего пояса на вертикальный изгиб

В соответствии с рекомендациями по расчету ППФ, приведенными в [92]:

- нормальные силы в элементах ППФ определяются по расчетной схеме, представляющей собой ферму с шарнирными узлами и с центровкой раскосов по оси ездового пояса;

- изгибающие моменты в ездовом поясе состоят из трех компонентов: моментов в неразрезной балке на жёстких опорах; моментов от прогиба фермы, возникающих вследствие неразрезности ездового пояса; моментов от внецентренного примыкания элементов решетки к ездовому поясу;

- жесткость узловых соединений ездового пояса с элементами решетки ППФ в расчете не учитывается.

В данной главе предложена уточнённая расчётная схема ездового пояса с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ. Представлен метод определения жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки ППФ и результаты аналитической методики подбора сечения и определения жесткости упругих опор нижнего пояса ППФ в её плоскости. Приведены результаты проверки предложенной методики на ППФ с различными геометрическими параметрами.

Объектом исследования является ППФ с неразрезным нижним поясом коробчатого сечения (рисунок 2.1). Предлагаемая расчётная схема (РС) ездового пояса с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ - балка на упругих опорах, имитирующих работу элементов решетки (рисунок 2.32).

Жесткость упругих опор, имитирующих работу решетки ППФ, определяется по формуле (2.3).

Прогиб эквивалентной балки $f_б$ определяется по формуле Мора-Максвелла [99]:

$$f_б = \int_0^l \frac{[\overline{M_б^0}]^2}{EI_{у\,б}} \text{ [м]}; \tag{3.1}$$

где $\overline{M_б^0}$ – изгибающий момент в балке, вызванный действием единичной силы *F=1*, приложенной по направлению искомого перемещения (рисунок 3.1);

l – длина эквивалентной балки;

$EI_{у\,б}$ – жесткость балки (ездового пояса ППФ) на изгиб в её плоскости.

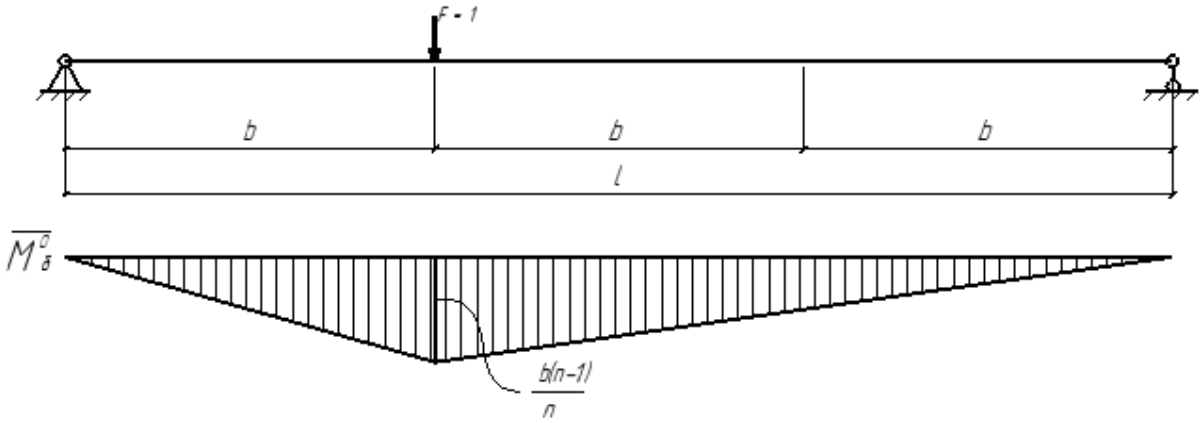


Рисунок 3.1 – К определению прогиба эквивалентной балки $f_б$

Упрощая формулу (3.1) по правилу Верещагина, приводим её к виду:

$$f_б = \frac{(n-1)^2 b^3}{3nEI_{у\,б}} \text{ [м]}; \tag{3.2}$$

где n – количество панелей ездового пояса ППФ;

b – длина панели ППФ.

Прогиб ППФ $f_{ППФ}$ определен шестью методами для выбора оптимального аналитического метода расчета:

1. Аналитическим с определением внутренних усилий по методике [92].

2. Аналитическим с определением внутренних усилий по внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом (рисунок 3.2).

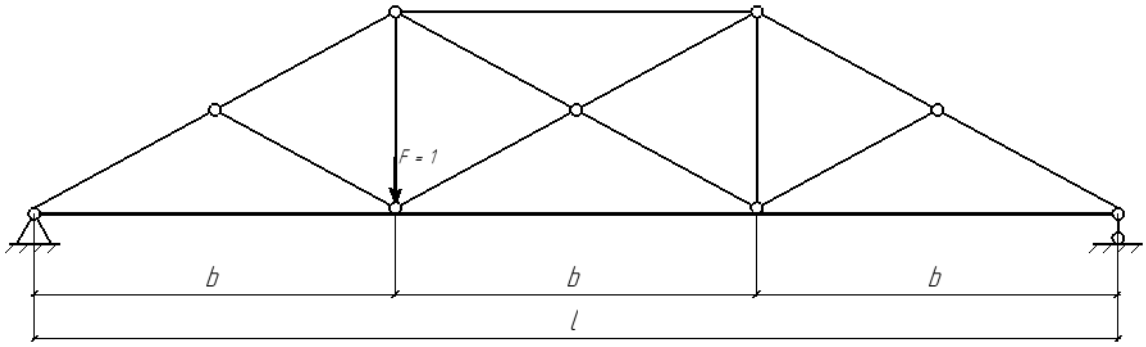


Рисунок 3.2 – РС с неразрезным нижним поясом

3. Аналитическим с определением внутренних усилий по внешне и внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом и двумя шарнирно-неподвижными опорами (рисунок 3.3).

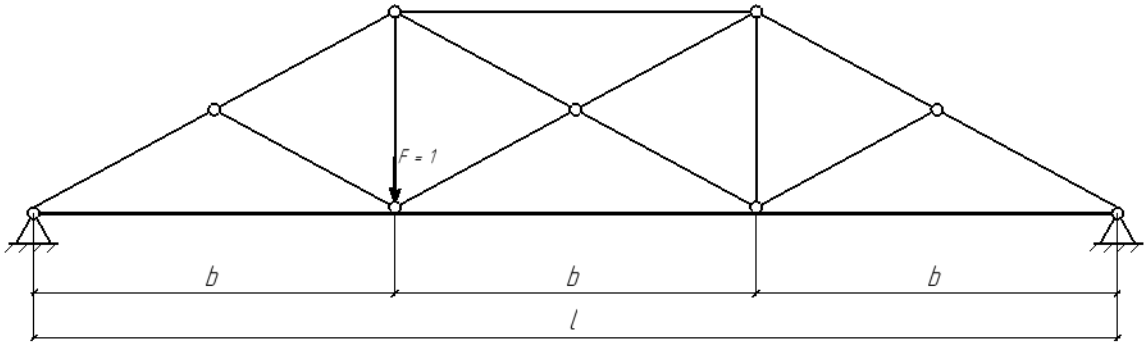


Рисунок 3.3 – РС с неразрезным нижним поясом и шарнирно-неподвижными опорами

4. Аналитическим с определением внутренних усилий по статически неопределимой модели с жесткими узлами сопряжения всех элементов.

5. Численным с использованием пространственной РС с пластинчатыми элементами поясов, решетки, ребрами жесткости и фасонками (рисунок 3.4) в ПК SCAD.

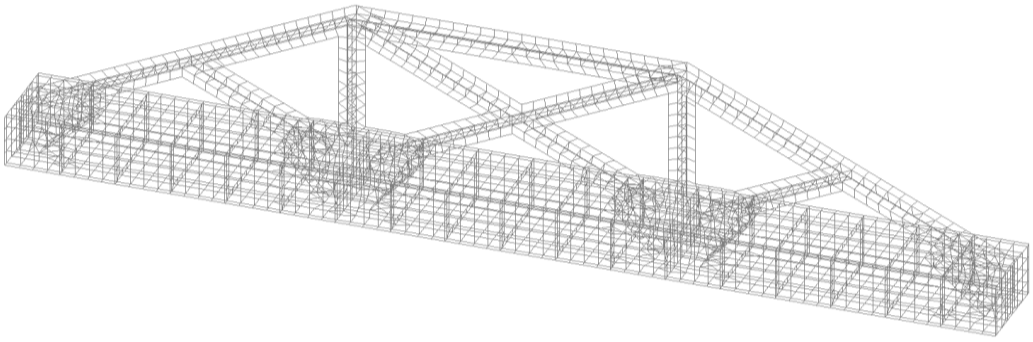


Рисунок 3.4 – Пространственная РС ППФ

6. Численным с использованием плоской РС с жесткими узлами с учетом эксцентриситета крепления решетки (рисунок 3.5) в ПК SCAD (дает минимальную погрешность при определении перемещений по сравнению с пространственной РС).

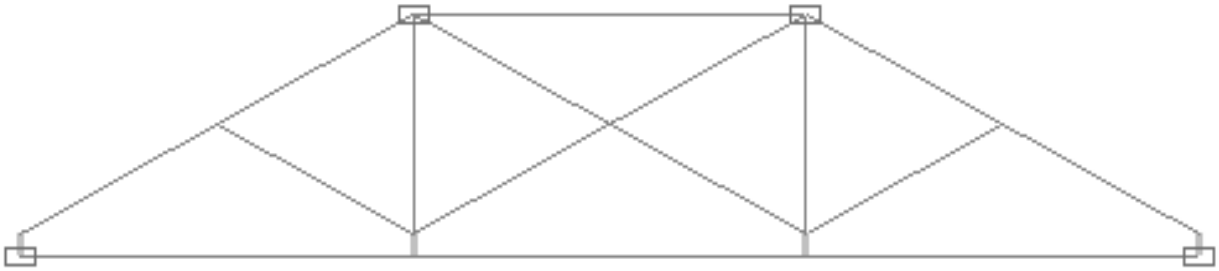


Рисунок 3.5 – Плоская РС ППФ

Во всех аналитических методах прогиб ППФ $f_{\text{ППФ}}$ определяется по формуле Мора-Максвелла:

$$f_{\text{ППФ}} = \sum_{1}^{m} \int_{0}^{l} \frac{[\overline{\mathrm{M}_{\text{НП}}^{0}}]^2}{EI_{\text{у НП}}} ds + \sum_{1}^{m} \int_{0}^{l} \frac{[\overline{N_i^0}]^2}{EA} ds \text{ [м]}; \quad (3.3)$$

где $\overline{\mathrm{M}_{\text{НП}}^{0}}$ и $\overline{N_i^0}$ – изгибающий момент в элементах нижнего пояса и продольные усилия в стержнях ППФ, вызванные действием единичной силы *P*, приложенной по направлению искомого перемещения;

l – длина стержня фермы, а суммирование выполняется по всем стержням.

По первой аналитической методике изгибающий момент в нижнем поясе определяется как алгебраическая сумма трех составляющих:

а) M'_{zn} – момента, возникающего вследствие неразрезности нижнего пояса;

б) M''_z – момента в неразрезной балке на жестких опорах;

в) M'''_z – момента от внецентренного примыкания элементов решетки к нижнему поясу.

$$M'_{zn} = \frac{\overline{M_б^0} I_{\text{у НП}}}{0{,}6 I_{\text{у ППФ}}} \text{ [кН} \cdot \text{м]}; \quad (3.4)$$

где $I_{\text{у ППФ}}$ – приведённая изгибная жесткость в плоскости ППФ, определяемая в соответствии с [14]:

$$I_{\text{у ППФ}} = A_{f1} z_1^2 + A_{f2} z_2^2 \text{ [м}^4\text{]}; \quad (3.5)$$

где A_{f1} и A_{f2} – площади сечения нижнего и верхнего поясов ППФ;

z_1 и z_2 –расстояния от центра тяжести поясов до нейтральной оси фермы в сечении посредине пролета.

Момент в неразрезной многопролетной балке $M_z'' = 0$ при узловой нагрузке.

Момент от внецентренного примыкания элементов решетки M_z''' определяется по формуле:

$$M_z''' = e(N_{\text{п}} - N_{\text{л}})\ [\text{кН} \cdot \text{м}]; \qquad (3.6)$$

где e – эксцентриситет центровки решетки по отношению к геометрической оси пояса;

$N_{\text{п}}$ и $N_{\text{л}}$ – нормальные силы в ездовом поясе справа и слева от узла.

Произведена численная проверка данной методики. Рассчитаны две стержневые модели ППФ с жестким соединением узлов. В первой РС эксцентриситет учтен с помощью жестких вставок (рисунок 3.4), во второй – не учтен. Эпюра $M_{z\,\text{ч}}'''$ построена как разность эпюр первой и второй РС.

Нормальные силы в элементах ППФ определяются по РС фермы с шарнирными узлами и с центровкой раскосов по оси ездового пояса (рисунок 3.6).

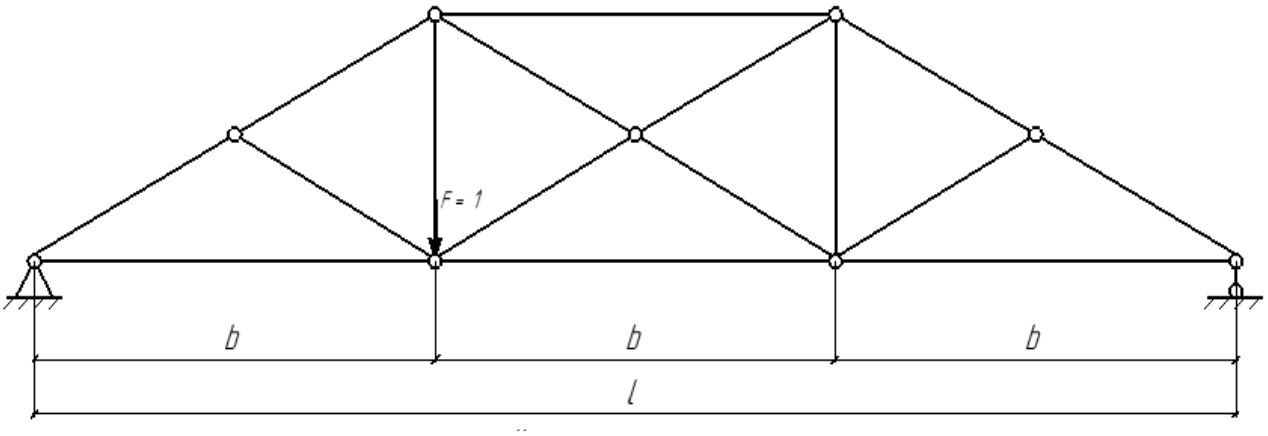


Рисунок 3.6 – К определению продольных усилий по методу расчета №1

При расчете по первой аналитической методике формула (3.3) после упрощения принимает вид:

$$f_{\text{ППФ}} = \frac{(n-1)^2 b^3 I_{\text{у НП}}}{1{,}8 n E I_{\text{у ППФ}}} + \frac{\sum_1^m l_{i\,\text{р}}[N_{i\,\text{р}}]^2}{E A_{\text{р}}} + \frac{b \sum_1^m [N_{i\,\text{НП}}]^2}{E A_{\text{НП}}}\ [\text{мм}]. \qquad (3.7)$$

По второй и третьей методикам внутренние усилия определяются из расчета методом сил. РС на рисунке 3.2 внутренне статически неопределима (n – 1) раз. РС на рисунке 3.3 внутренне статически неопределима (n – 1) раз и внешне статически неопределима один раз.

Упрощая формулу (3.3), приводим её к виду:

$$f_{\text{ППФ}} = \frac{2b\sum_1^m [M_{i\,\text{НП}}]^2}{3EI_{\text{у НП}}} + \frac{\sum_1^m l_{i\,\text{р}}[N_{i\,\text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}} + \frac{b\sum_1^m [N_{i\,\text{НП}}]^2}{EA_{\text{НП}}}\ [\text{мм}]; \qquad (3.8)$$

где $M_{i\,\text{НП}}$ и $N_{i\,\text{НП}}$ – изгибающие моменты и продольные усилия в i-ом узле нижнего пояса ППФ;

$N_{i\,\text{р}}$ – продольные усилия в i-ых элементах решетки и верхнего пояса;

$l_{i\,\text{р}}$ – длина i-ого элемента решетки или верхнего пояса;

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

$A_{\text{р}}$ и $A_{\text{НП}}$ – площади элементов решетки и нижнего пояса.

По четвёртому методу аналитическое определение внутренних усилий трудоемко, эпюры построены численным методом. Перемещение определено по формуле (3.3).

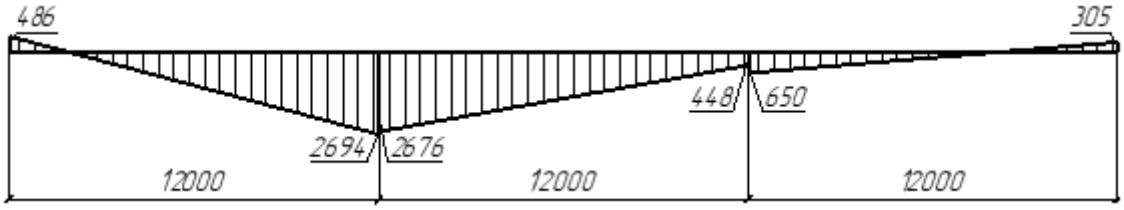
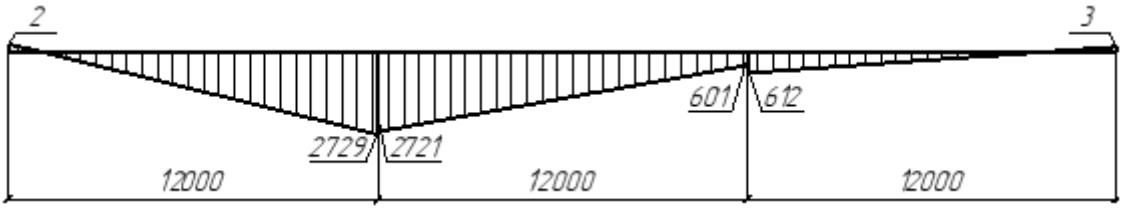
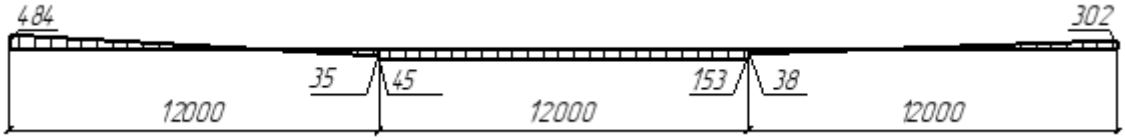
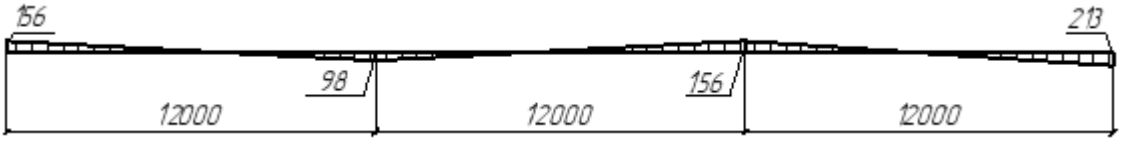
Результаты оценки влияния эксцентриситета крепления решетки на податливость ездового пояса приведены в таблице 3.1.

Эпюры $M'''_{z\,\text{ч}}$ и M'''_z не совпадают. Продольные усилия $N_{\text{п}}$ и $N_{\text{л}}$, для определения M'''_z рассчитаны по методике [92] по РС фермы с шарнирными узлами и с центровкой раскосов по оси ездового пояса. Далее доказано, что определение продольных усилий данным методом дает высокую погрешность и не может использоваться для расчета ППФ. На расчет податливости нижнего пояса ППФ эксцентриситет центровки решетки не оказывает существенного влияния. Для определения жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки ППФ, им пренебрегаем.

Внутренние усилия, определенные по различным методам расчета от узловой нагрузки F=1000 кН, приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.1 –Момент от внецентренного примыкания элементов решетки

В кН·м

Эпюры изгибающих моментов в нижнем поясе ППФ от узловой нагрузки F=1000 кН
для РС с жестким соединением узлов с учетом эксцентриситета

для РС с жестким соединением узлов без учета эксцентриситета

$M_{z\,\text{ч}}'''$, полученная численными расчетами

M_z''', полученная аналитическим расчетом


Сравнение перемещений ППФ при различных методах расчета приведены в таблице 3.4 и на рисунках 3.7–3.10. Перемещение от изгиба нижнего пояса достаточно точно определяется всеми аналитическими методами. Перемещение от продольных сил, рассчитанных по статически-определимой шарнирно-стержневой РС методом №1, дает значительное отклонение. Данный метод неприменим для определения податливости ППФ, т. к. перемещения ППФ от узловой нагрузки в наибольшей степени зависят от продольных усилий в решетке и верхнем поясе. Из

трех оставшихся методов наименее трудоемким является метод №2, по которому внутренние усилия определяются по дважды статически-неопределимой РС. В сравнении с более точными и сложными методами №3 и №4, он дает большую погрешность только в определении продольных усилий в нижнем поясе ППФ. Т. к. вклад в перемещение ППФ перемещений от продольных усилий в нижнем поясе близок к 0%, исключаем эту составляющую из формулы определения податливости ППФ.

Таблица 3.2 – Момент в нижнем поясе ППФ при разных методах расчета

В кН·м

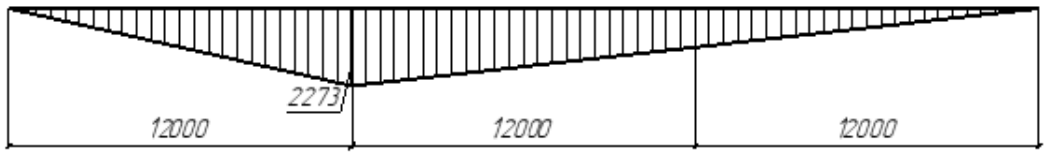
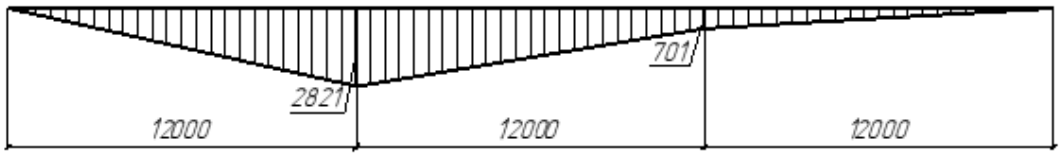
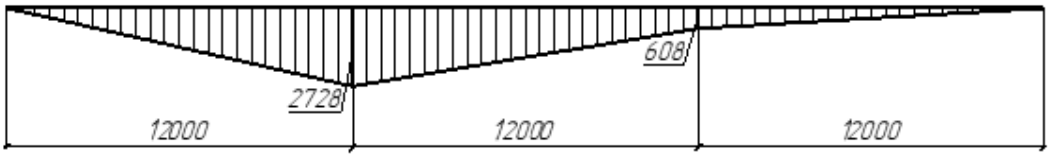
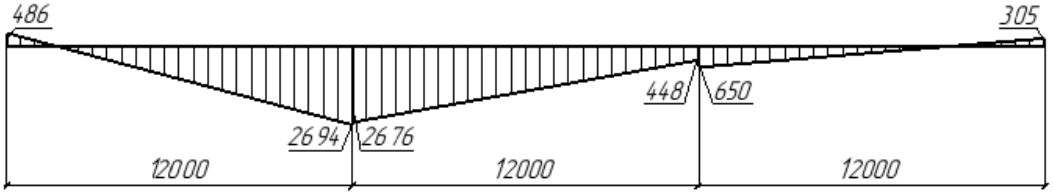
№ метода расчета	Эпюры изгибающих моментов в нижнем поясе ППФ
1	
2	
3	
4, 6	

Таблица 3.3 – Продольные силы ППФ при разных методах расчета

В килоньютонах

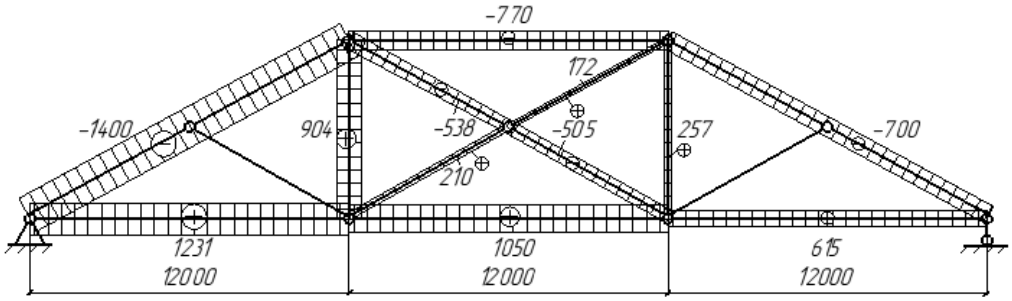
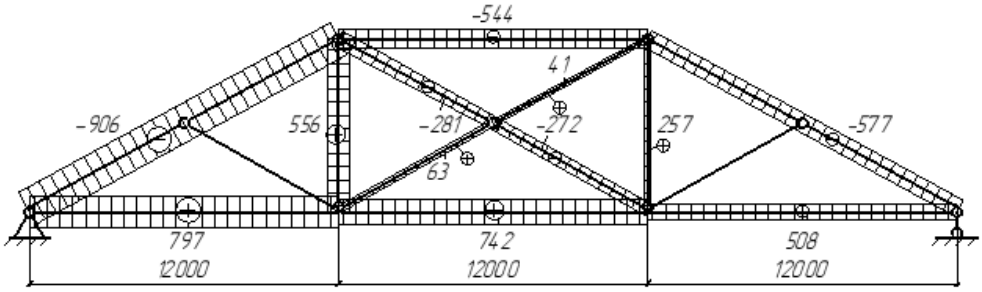
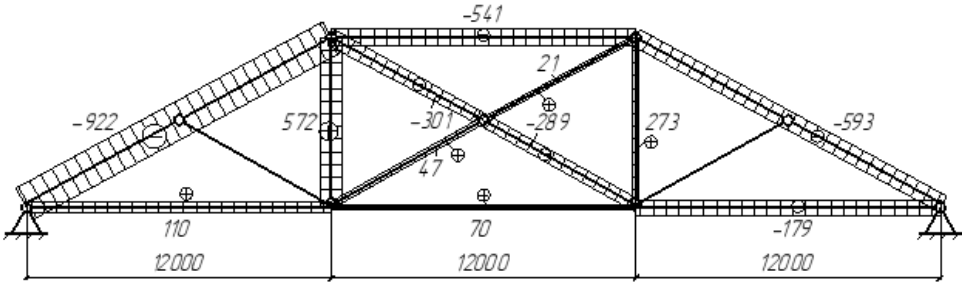
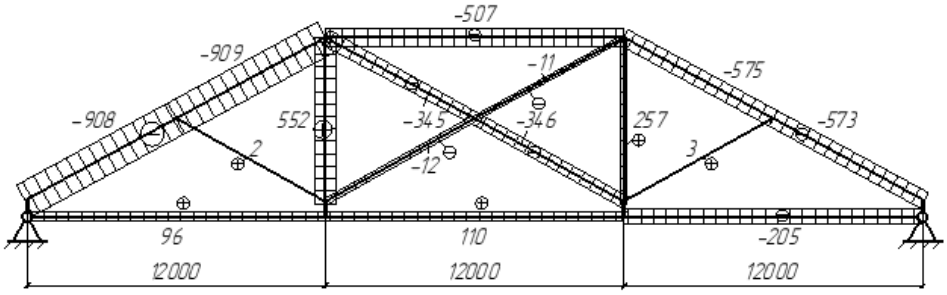
№ метода расчета	Эпюры продольных сил в ППФ
1	
2	
3	
4, 6	

Таблица 3.4 – Перемещения ППФ при разных методах расчета

Перемещения в миллиметрах

№ метода расчета	Перемещение от M нижнего пояса	Перемещение от N решетки и верхнего пояса	Перемещение от N нижнего пояса	Перемещение ППФ	Отклонение от наиболее точного аналитического метода, %	Отклонение от пространственной РС
1	2,39	12,84	0,06	15,29	45,45	53,50
2	2,60	5,85	0,43	8,89	6,20	20,04
3	2,41	6,10	0,01	8,52	2,15	16,60
4	2,44	5,88	0,02	8,34	-	14,76
5				7,11		-
6				7,99		11,00
Принятый	2,60	5,85	-	8,46	1,39	15,95

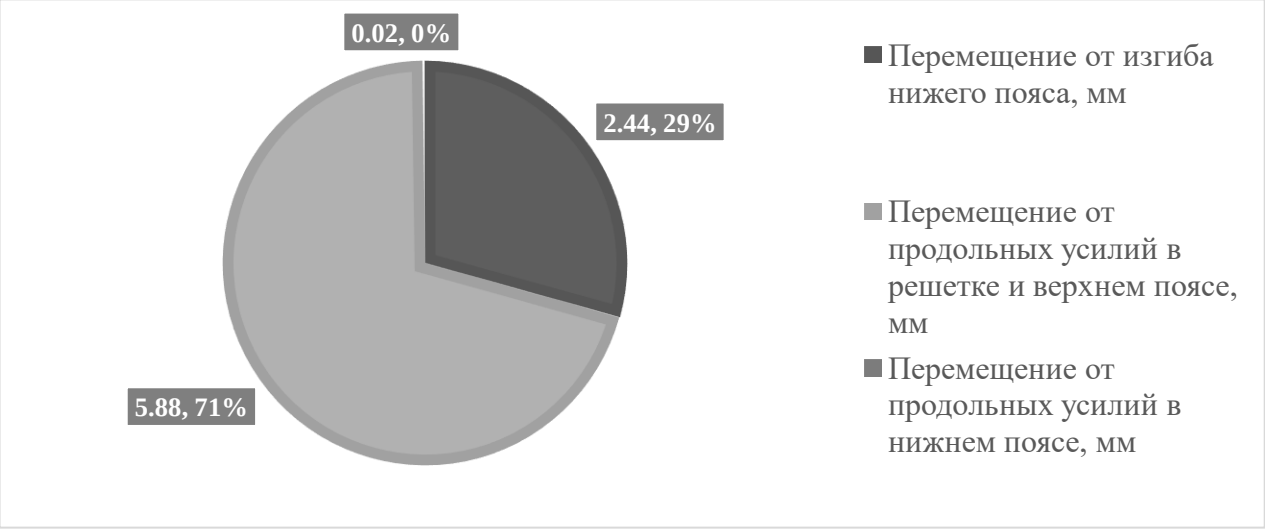


Рисунок 3.7 – Составляющие перемещения ППФ по методу расчета №4

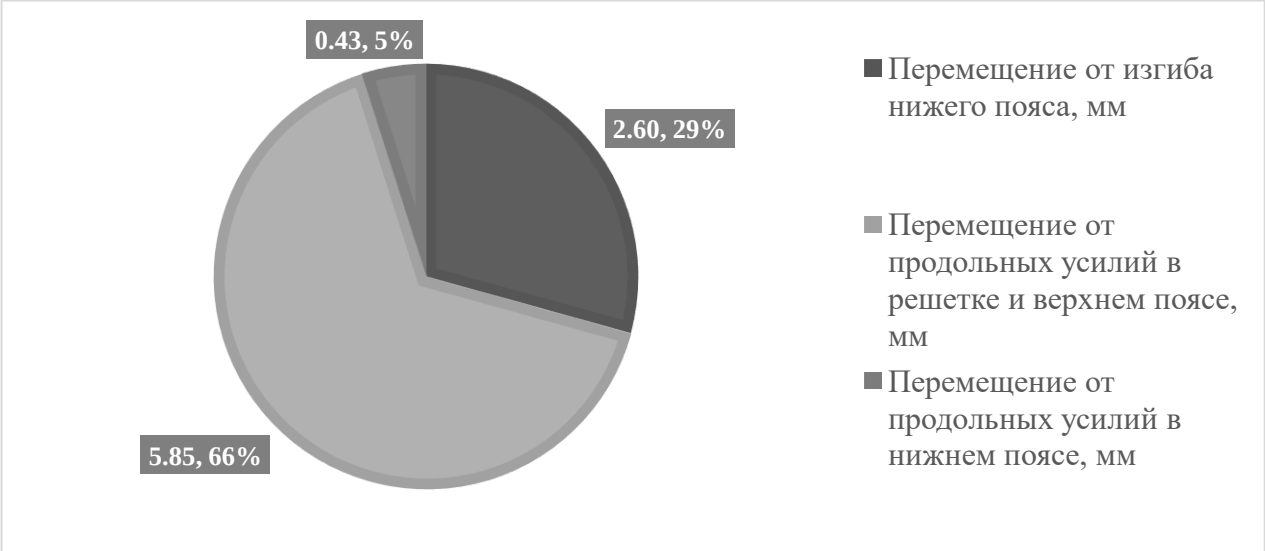


Рисунок 3.8 – Составляющие перемещения ППФ по методу расчета №2

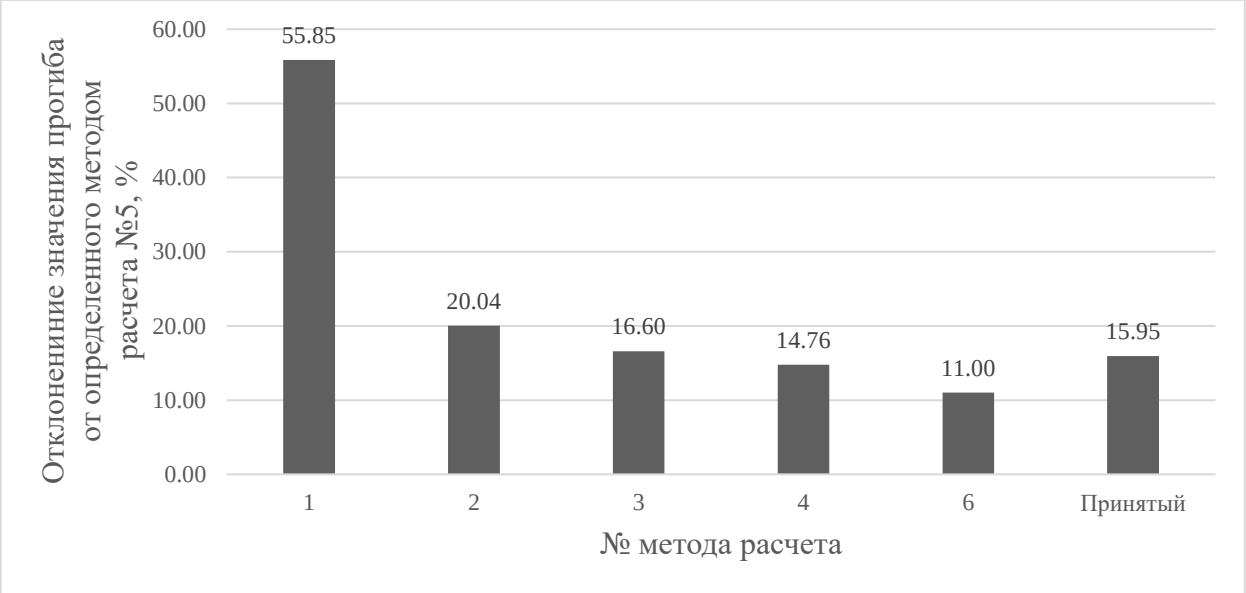


Рисунок 3.9 – Точность определения перемещения ППФ

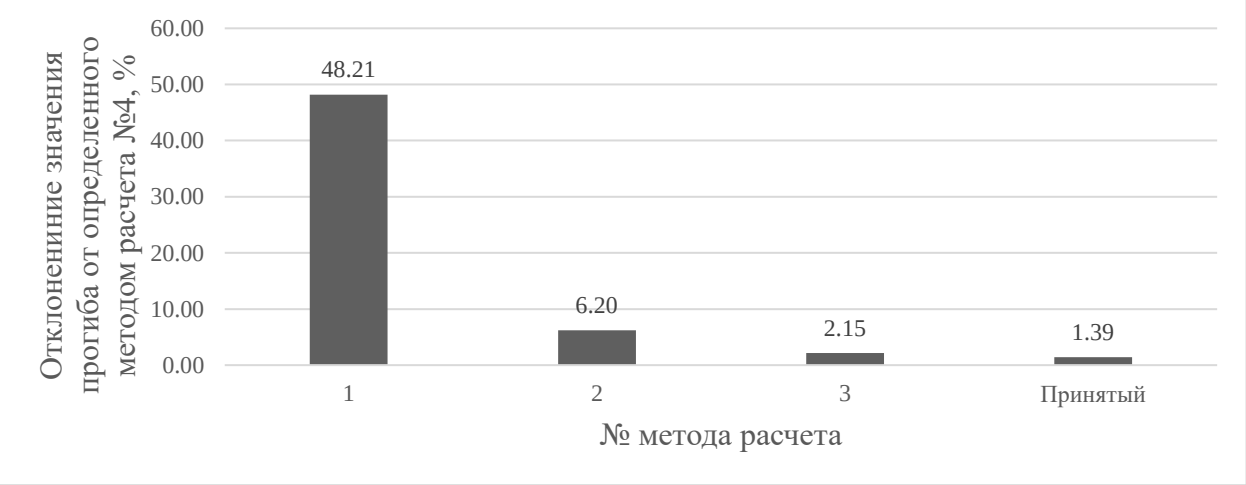


Рисунок 3.10 – Точность аналитического расчета перемещения ППФ

По результатам исследования для расчета податливости ППФ принимаем формулу:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \frac{2b\sum_1^m [M_{i\,\text{НП}}]^2}{3EI_{\text{у НП}}} + \frac{\sum_1^m l_{i\,\text{р}}[N_{i\,\text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}}\ [\text{мм}]. \quad (3.9)$$

С учетом формулы (3.9) жесткость упругих опор, имитирующих работу решетки в плоскости ППФ, будем определять по формуле:

$$\text{C}_{\text{р}} = \frac{EA_{\text{р}}}{\sum_1^m l_{i\,\text{р}}[N_{i\,\text{р}}]^2} + \frac{3EI_{\text{у НП}}}{b}\left(\frac{1}{2\sum_1^m [M_{i\,\text{НП}}]^2} - \frac{n}{(n-1)^2 b^2}\right)\left[\frac{\text{кН}}{\text{мм}}\right]. \quad (3.10)$$

Определение внутренних усилий $M_{i\,\text{НП}}$ и $N_{i\,\text{р}}$ производится для $(n-1)$ раз внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой РС ППФ с неразрезным нижним поясом (рисунок 3.3), где n – количество панелей ППФ.

Далее проведена проверка предложенной методики на ППФ с различными геометрическими параметрами:

1. ППФ №1 пролетом 36 м, расположенная в литейном цехе металлургического предприятия (рисунок 2.9);
2. ППФ №2 пролетом 36 м, выполненная ЦНИИПСК для Череповецкого металлургического завода (рисунок 2.10);
3. ППФ №3 пролетом 48 м, спроектированная для того же завода (рисунок 2.11);
4. ППФ №4 – 9-метровая ППФ, разработанная ЦНИИПСК с целью проведения эксперимента (рисунок 2.12).

Для каждой ППФ аналитическим и численным методами определялась линейная податливость узлов примыкания элементов решетки к ездовому поясу в плоскости ППФ и жесткость упругих опор, имитирующих работу этих узлов. Расчет численным методом выполнялся в ПК SCAD для плоской РС с жесткими узлами и учетом эксцентриситета крепления решетки жесткими вставками. Расчет аналитическим методом производился по формулам (3.9) и (3.10)

Для ППФ №3 расчёт податливости узлов и жесткости упругих опор производился для узлов №1 и №2 (рисунок 3.11*а*).

После получения большой погрешности результатов расчёта податливости узла №2 с целью уточнения методики расчета произведено дополнительное исследование её составляющих. Аналитическим методом по внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом (рисунок 3.11*б*) определены прогибы и внутренние усилия ППФ №3. Прогибы $f_{\text{ППФ}}$ вычислены по формуле Мора-Максвелла (3.3).

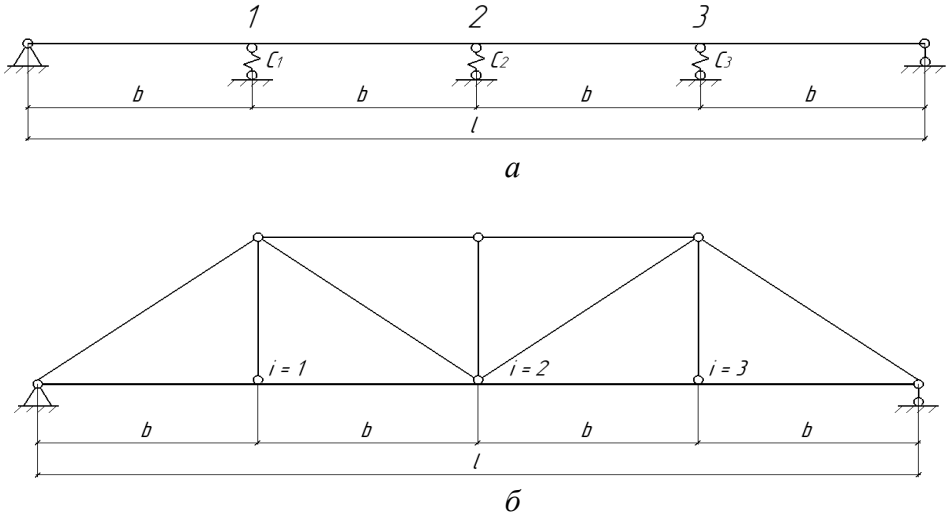


Рисунок 3.11 – РС ППФ №3 для аналитического расчёта: *а* – эквивалентной ездовому поясу балки на упругих опорах; *б* – с неразрезным нижним поясом

Проведено сравнение внутренних усилий в ППФ №3, полученных аналитическим и численным методами расчета, проанализирована точность определения компонентов перемещения.

Сравнение результатов предложенной методики и численного определения податливости узлов и жесткости упругих опор для исследуемых ППФ приведены в таблице 3.5 и на рисунках 3.12–3.14.

Погрешность методики для определения податливости узлов и жесткость упругих опор ППФ№1, №2 и №4 не превышает 2 %. Для ППФ №3 погрешность определения жесткости упругих опор для узлов №1 и №3 составляет 4 %, для узла №2–17 %. Можно спрогнозировать, что с увеличением количества панелей ППФ отклонение результатов методики от численного исследования будет возрастать.

Таблица 3.5 – Сравнение результатов предложенной методики и численного определения податливости узлов и жесткости упругих опор нижнего пояса в плоскости ППФ

№ ППФ	Перемещение ППФ, мм		Погрешность в определении перемещений, %	Жесткость упругих опор, кН/мм		Погрешность в определении жесткости упругих опор, %
	принятая методика	численный расчет		принятая методика	численный расчет	
1	3,273	3,22	1,63	272	277	-1,86
2	2,003	1,98	1,14	411	417	-1,41
3 узел 1	2,683	2,6	3,08	308	320	-3,85
3 узел 2	4,295	3,755	12,57	197	230	-17,03
4	0,765	0,76	0,67	676	685	-1,31

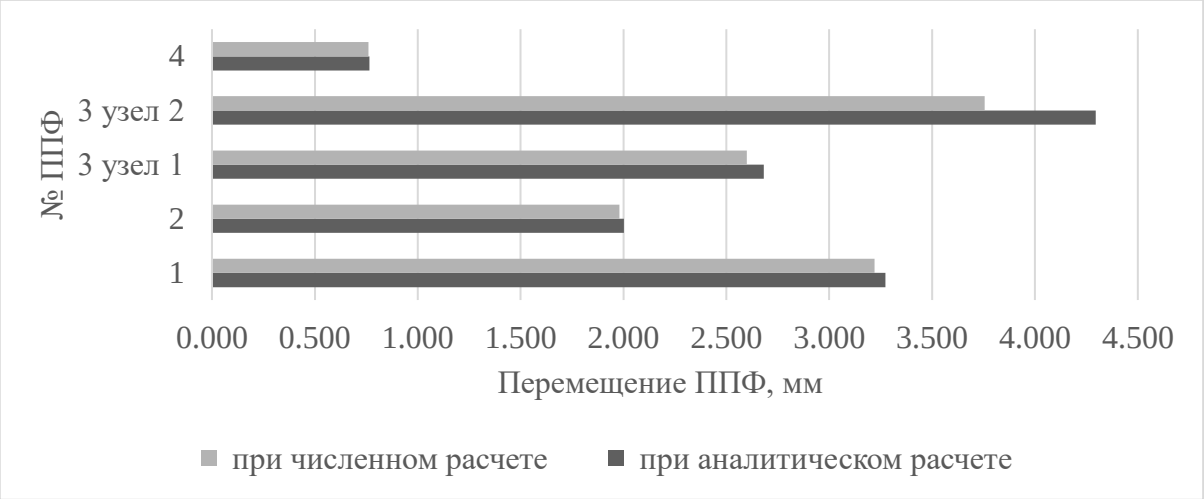


Рисунок 3.12 – Перемещения ППФ

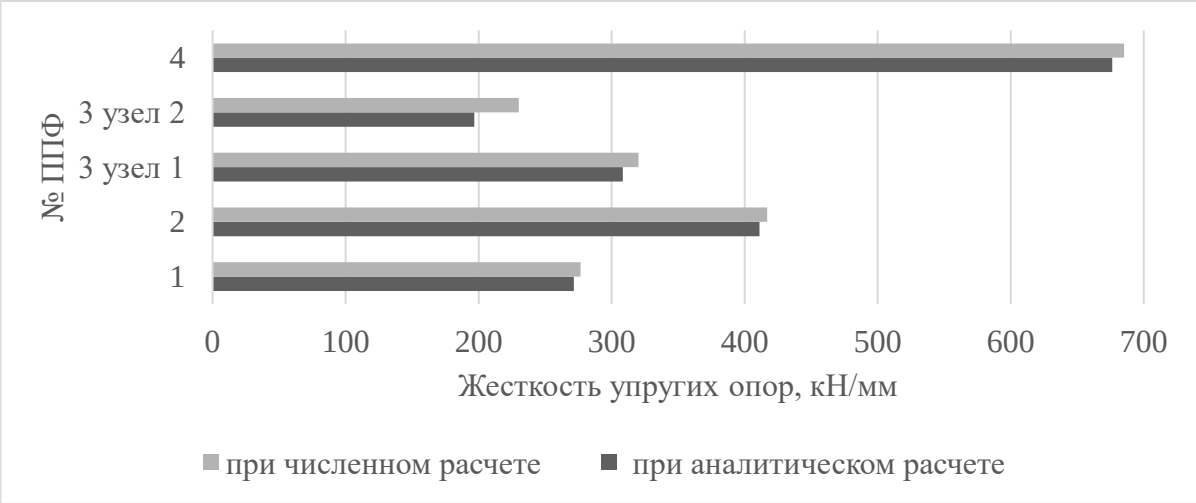


Рисунок 3.13 – Жесткость упругих опор нижнего пояса ППФ

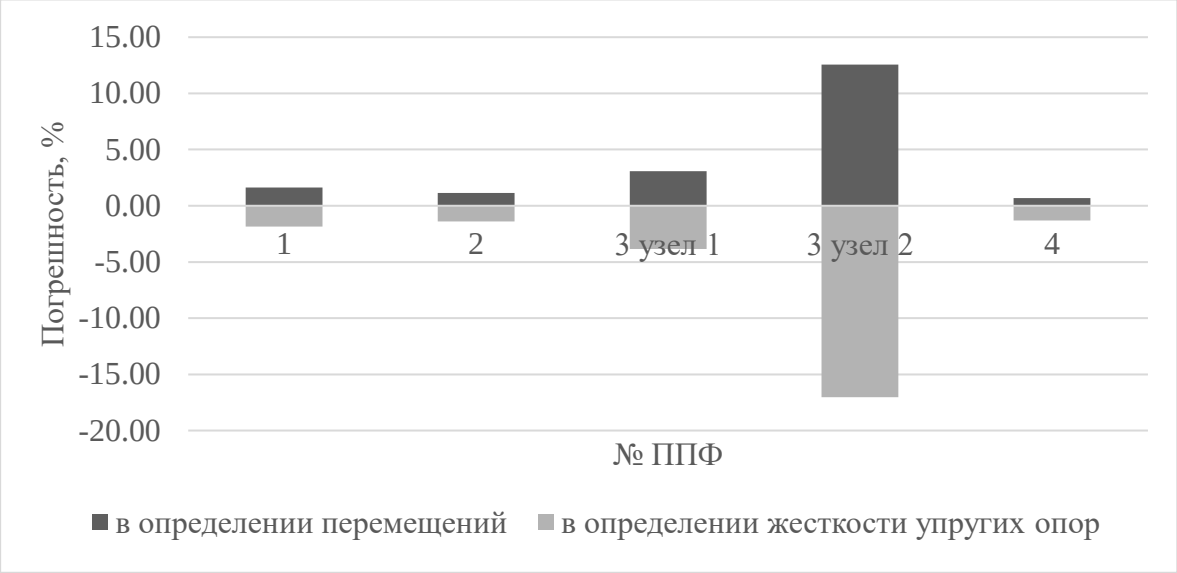
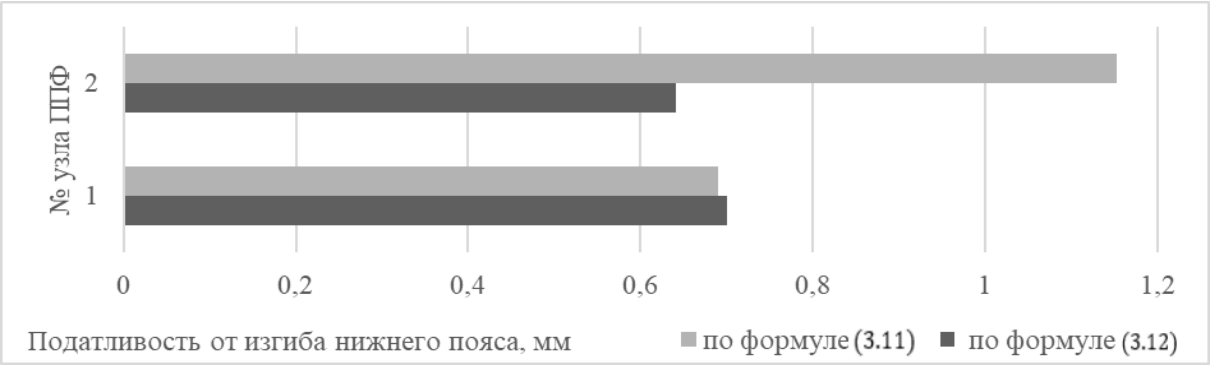


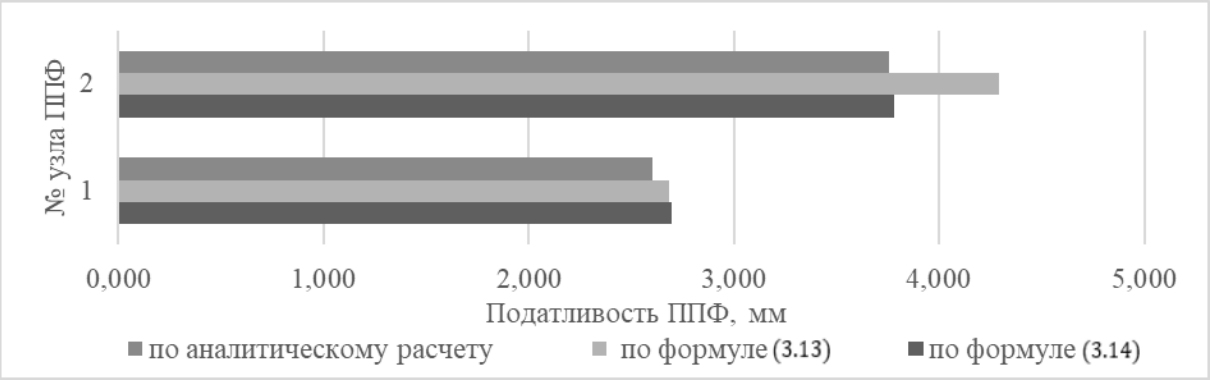
Рисунок 3.14 – Точность определения перемещений
и жесткости упругих опор нижнего пояса ППФ

Для уточнения методики расчета проведено сравнение эпюр продольных усилий в элементах решетки и верхнего пояса $N_{i\,\text{р}}$ и изгибающих моментов в элементах нижнего пояса $M_{i\,\text{НП}}$, полученных численным и аналитическим методами. Аналитическим методом прогиб и внутренние усилия определены по внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом (рисунок 3.11*б*).

Результаты определения податливости узлов нижнего пояса ППФ №3 приведены на рисунке 3.15 и в таблице 3.6.



а



б

Рисунок 3.15 – Податливость ППФ №3: *а* – от изгиба нижнего пояса; *б* – суммарная

Таблица 3.6 – Сравнение результатов аналитического и численного методов определения податливости узлов нижнего пояса в плоскости ППФ

В миллиметрах

Номер узла, *i*	Податливость от изгиба нижнего пояса		Податливость ППФ		
	по формуле (3.11)	по формуле (3.12)	по формуле (3.13)	по формуле (3.14)	по численному расчету
1	0,700	0,690	2,693	2,683	2,6
2	0,641	1,153	3,783	4,295	3,755

Проанализирована точность определения компонентов перемещения. Выявлено, что погрешность в определении податливости узлов и жесткость упругих опор в плоскости ППФ возникает в связи с упрощением определения перемещения от изгиба нижнего пояса

$$\delta_{\text{ППФ от } M_{\text{НП}}} = \sum_{1}^{m} \int_{0}^{l} \frac{[\overline{M_{\text{НП}}^{0}}]^2}{EI_{\text{у НП}}} ds \ [\text{мм}] \tag{3.11}$$

до вида

$$\delta_{\text{ППФ от } M_{\text{НП}}} = \frac{2b \sum_{1}^{m} [M_{i\ \text{НП}}]^2}{3EI_{\text{у НП}}} \ [\text{мм}]. \tag{3.12}$$

Для ППФ №3 при расчете по формуле (3.13) погрешность в определении суммарной податливости относительно численного метода расчета для узла №2 составляет 0,7 %, для узла №1–3,5 %.

Таким образом, для расчета податливости узлов ездового пояса ППФ, состоящей из четырёх и более пролетов, необходимо использовать формулу:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \sum_{1}^{m} \int_{0}^{l} \frac{[\overline{M_{\text{НП}}^{0}}]^2}{EI_{\text{у НП}}} ds + \frac{\sum_{1}^{m} l_{i\ \text{р}} [N_{i\ \text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}} \ [\text{мм}]; \tag{3.13}$$

где $i -$ номер узла сопряжения решетки с нижним поясом (без учета опорного) – рисунок 3.12.

Для ближайших к опорам узлов ($i = 1; i = n - 1$) трех- и двухпанельной ППФ формулу (3.13) можно упростить:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \frac{2b \sum_{1}^{m} [M_{i\ \text{НП}}]^2}{3EI_{\text{у НП}}} + \frac{\sum_{1}^{m} l_{i\ \text{р}} [N_{i\ \text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}} \ [\text{мм}]. \tag{3.14}$$

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

$$\text{C}_i = \frac{EA_{\text{р}}}{\sum_{1}^{m} l_{i\ \text{р}} [N_{i\ \text{р}}]^2} + EI_{\text{у НП}} \left(\frac{1}{\int_{0}^{l} [\overline{M_{\text{НП}}^{0}}]^2} - \frac{3n}{(n-i)^2 i^2 b^3} \right) \left[\frac{\text{кН}}{\text{мм}}\right]. \tag{3.15}$$

Для ближайших к опорам узлов сопряжения нижнего пояса с решеткой ($i = 1; i = n - 1$) трех- и двухпанельной ППФ формула (3.15) упрощается до вида:

$$C_i = \frac{EA_{\text{р}}}{\sum_1^m l_{i\,\text{р}}[N_{i\,\text{р}}]^2} + \frac{3EI_{\text{у НП}}}{b}\left(\frac{1}{2\sum_1^m [M_{i\,\text{НП}}]^2} - \frac{n}{(n-1)^2 b^2}\right)\left[\frac{\text{кН}}{\text{мм}}\right]. \quad (3.16)$$

3.2. Расчет нижнего пояса на кручение

При расчете на кручение и горизонтальный изгиб по действующей методике [92] нижний пояс считается нераскреплённым из плоскости ППФ. Усилия в нем от горизонтальных нагрузок и кручения определяются как для однопролетной балки, пролетом равной пролету ППФ. В действительности механизм кручения пояса ППФ отличается от балочного. Горизонтальные линейные смещения и угловые смещения пояса вовлекают в работу элементы решетки. Элементы решетки испытывают изгиб из плоскости ППФ и кручение, при этом оказывают поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшают его смещение, усилия и напряжения. При приложении к нижнему поясу крутящего момента угол поворота ездового пояса в сравнении с эквивалентной балкой может не только снижаться, но и, чаще, значительно возрастать.

В данном разделе приведены результаты исследования влияния конструктивных элементов ППФ на работу нижнего пояса при кручении и уточнённая методика его расчета с учетом вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение.

В качестве объекта исследования выбрана ППФ конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Тип конструкции – продольная ППФ, пролет – 36 м, высота – 15,44 м (рисунок 3.16).

Для изучения работы нижнего пояса при кручении, выявления отличий его работы от работы балки, оценки влияния на работу пояса соотношения жесткостей нижнего пояса и всей ППФ рассмотрены пять вариантов исследуемой ППФ с различными сечениями элементов решетки. Для каждой РС определялись угловая податливость и крутящий момент в нижнем поясе от нагружения крутящим

моментом M_{KP} = 100 кНм, приложенным в узел сопряжения элементов решетки с нижним поясом (узел 1 рисунка 3.16). Проведено сравнение этих параметров с результатами расчета балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу. Расчеты выполнены численным методом конечных элементов с применением стержневых элементов.

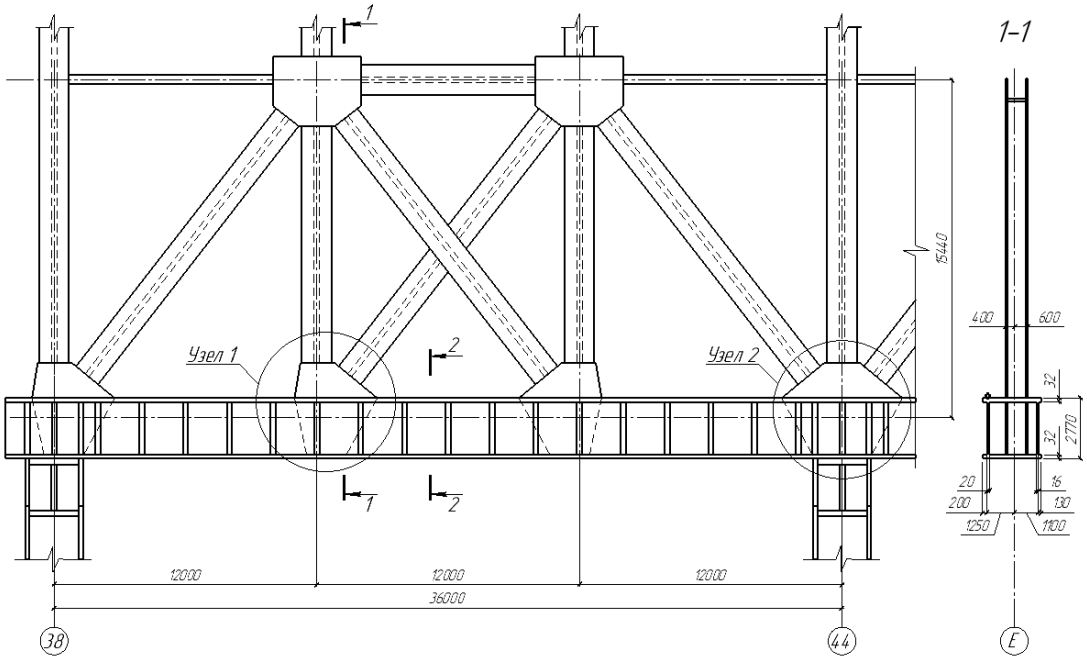


Рисунок 3.16 – ППФ конвертерного отделения ККЦ ММК

Предложен аналитический метод расчета нижнего пояса на кручение. Проведено сравнение результатов расчета податливости и крутящего момента нижнего пояса при аналитическом и численном расчетах для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ.

Для проверки правильности определения напряжений по аналитической методике построена пространственная модель ППФ с применением оболочечных конечных элементов, позволяющих учесть упругую податливость в соединениях, влияние подкрепляющих элементов и конструктивного решения соединения на работу конструкции (рисунок 3.17). Приняты четырёхузловые оболочечные конечные элементы с шестью степенями свободы в каждом узле – тип 44. Размеры конечных элементов нижнего пояса не превышают 0,2 м [126, 128]. В основном используются четырехугольные элементы с соотношением сторон, близким к

единице. Граничные условия заданы из условия опирания на верхний пояс ППФ стропильных ферм и жесткого закрепления оснований колонн. В узлах опирания стропильных ферм на верхний пояс установлены связи, препятствующие смещению в направлении оси Y, в нижних узлах колонны установлены связи, препятствующие смещению и повороту во всех направлениях.

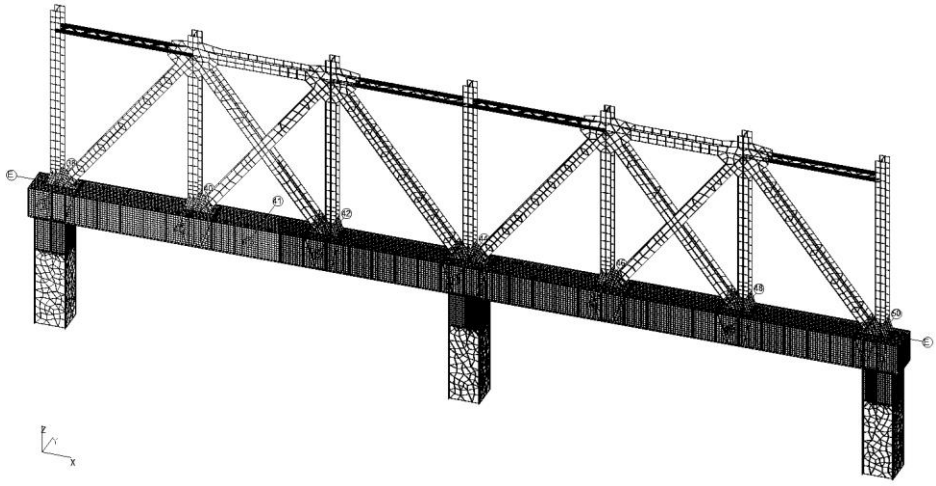


Рисунок 3.17 – Конечно-элементная модель ППФ

Численные расчеты выполнены с помощью ПК SCAD.

Для сопоставления результатов аналитического и численного расчетов с результатами натурного исследования, которые приведены в монографии [30], произведен расчет на нагрузку от одного крана, расположенного в середине пролета ППФ в осях 38–44. Вес груза Q = 396 т. Приближение грузовой тележки определено из условия максимально возможного – 2 м.

Поведение пояса ППФ при кручении отличается от поведения балки. При кручении балки происходит поворот её сечений без смещения относительно нейтральной оси. При кручении пояса происходит поворот и горизонтальное смещение его сечения относительно нейтральной оси, сопровождаемое дополнительным поворотом. Поэтому податливость нижнего пояса может превышать податливость эквивалентной балки, при этом крутящий момент в поясе всегда будет меньше. На рисунках 3.18, 3.19 приведены результаты численного расчета угловой податливости и изгибающего момента нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса. При расчете стержневой РС всей ППФ значения крутящих моментов в

нижнем поясе более, чем в два раза ниже, чем при расчете по РС балки, пролетом равной пролету ППФ.

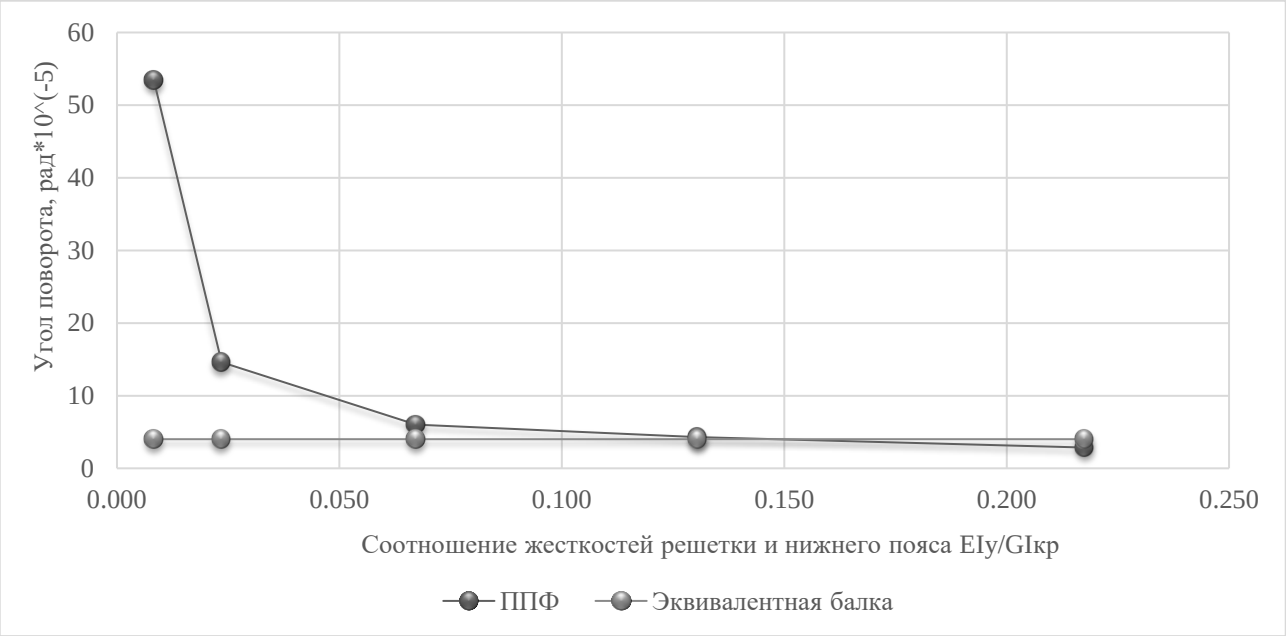


Рисунок 3.18 – Угловая податливость нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

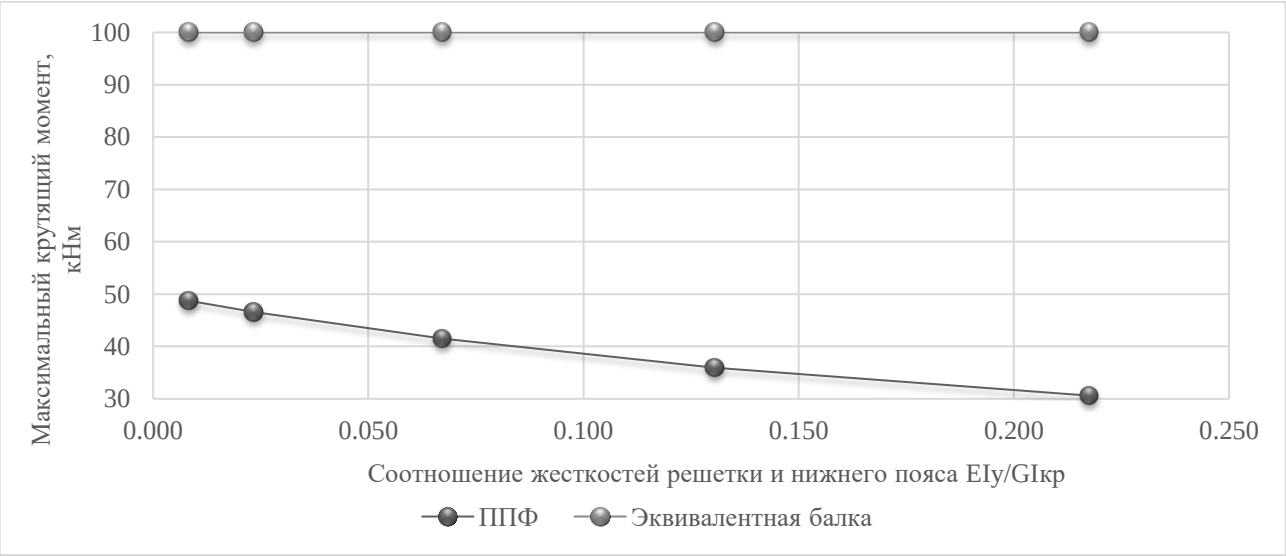


Рисунок 3.19 – Крутящий момент нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

С целью приближения РС нижнего пояса к реальной конструкции необходимо учитывать включение решетки в работу ППФ на кручение. Для этого принимаем в качестве РС пояса балку с угловыми упругими опорами в местах присоединения решетки. Упругие опоры оказывают сопротивление повороту балки вокруг продольной оси (рисунок 3.20).

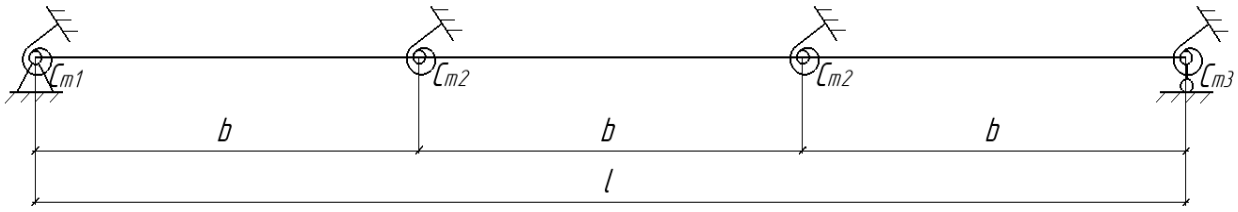


Рисунок 3.20 – РС нижнего пояса – балка на угловых упругих опорах:
l – пролет ППФ, b – длина панели

В ППФ, верхние пояса которых соединены со стропильными фермами и связями, в противодействии смещений которых участвуют и элементы кровли, соответствующие концы решетки работают как защемлённые. Тогда жесткость упругих опор, имитирующих решетку, можно определить по формуле:

$$C_{mi} = \frac{4EI_{\text{пр}.yi}}{h}; \tag{3.17}$$

где h – высота ППФ по осям пояса;

$I_{\text{пр}.yi}$ – приведенный момент инерции элементов решетки, определяемый как сумма проекций моментов инерции всех элементов решетки, сходящихся в i–ом узле, на вертикальную ось:

$$I_{\text{пр}.yi} = \sum_{j=1}^{k_i} I_{yj} \sin \alpha_j \; ; \tag{3.18}$$

α_j – угол наклона j–ого элемента решетки к вертикальной оси.

Для вычисления матрицы удельных перемещений уравнений пяти бимоментов B_i используются относительные жесткости упругих опор:

$$\overline{C_{mi}} = \frac{C_{mi}}{EI_\omega} \quad ; \tag{3.19}$$

I_ω – секториальный момент инерции сечения нижнего пояса.

Сравнение результатов расчета податливости и крутящего момента нижнего пояса при аналитическим и численном расчете для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ приведено на рисунке 3.21. Особенность деформации нижнего пояса при учете решетки заключается в том, что, когда при кручении он испытывает горизонтальный изгиб, его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а следовательно, и с различными углами закручивания. Несмотря на

большую погрешность в определении податливости (10 – 26 %), результаты определения крутящего момента сходятся (погрешность 0,3 – 1,9 %).

При несимметричной вертикальной нагрузке от крана схема работы системы была разложена на изгиб в вертикальной плоскости и кручение пояса, сопровождаемое изгибом и кручением решетки.

Эквивалентное напряжение вычислено в соответствии с СП 16.13330.2017 по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\sigma_x + \sigma_{loc,x}\right)^2 - \left(\sigma_x + \sigma_{loc,x}\right)\sigma_{loc,y} + \sigma_{loc,y}{}^2 + 3\left(\tau_{xy} + \tau_{loc,xy}\right)^2}\,. \quad (3.20)$$

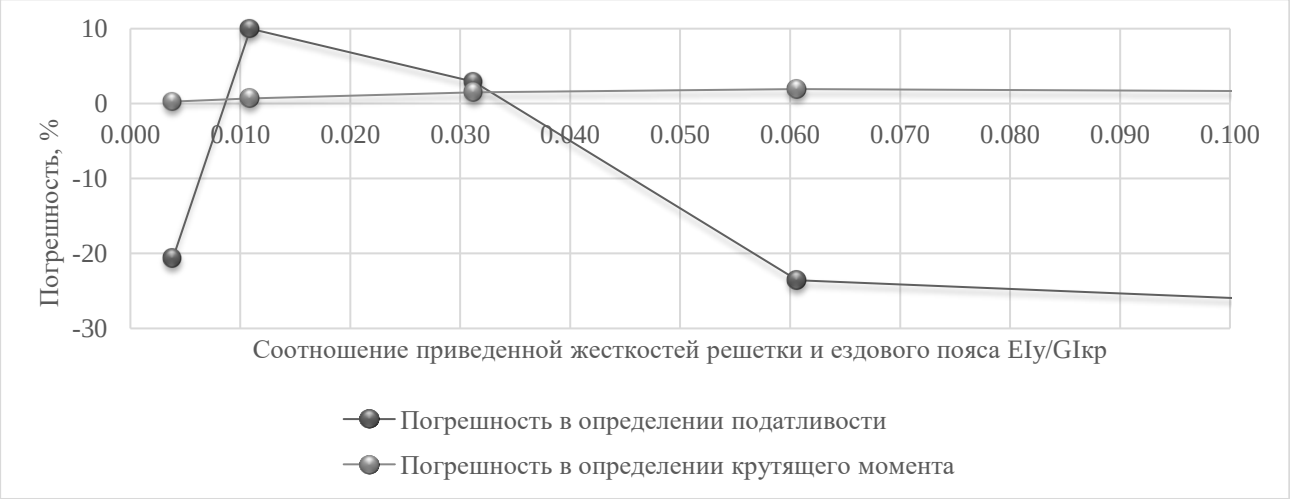


Рисунок 3.21 – Точность аналитического расчёта нижнего пояса

Входящие в (3.20) выражения элементарных напряжений определены с учетом всех составляющих:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \sigma_{xz} + \sigma_{xy} + \frac{B_\omega \omega}{I_\omega}\ ; \quad (3.21)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\Delta K_3(0) S_{э1}}{s_1 I_{zц}}\ ; \quad (3.22)$$

где σ_{xz} и σ_{xy} – изгибные напряжения, определяемые для кромки стенки;

$\Delta K_3(0) -$ полусумма равнодействующих касательных напряжений в стенке под силой.

Результаты вычисления эквивалентных и касательных напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–44 приведены на рисунке 3.22.

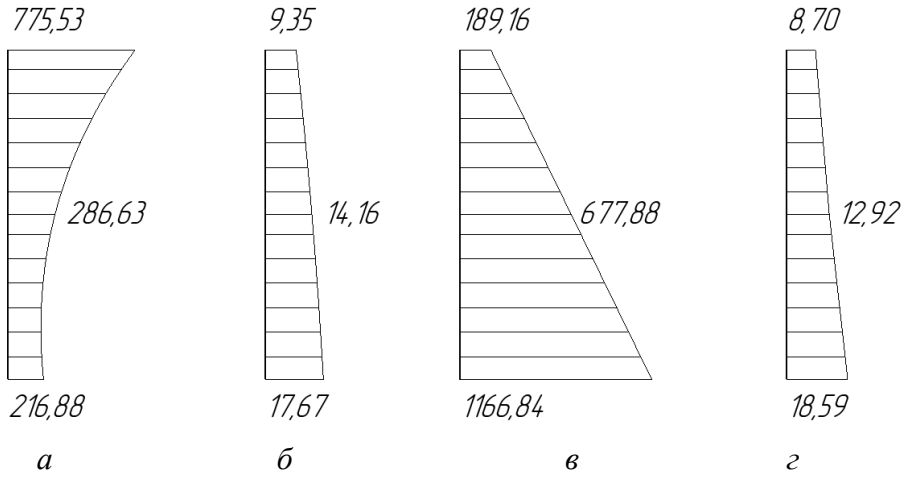


Рисунок 3.22 – Поля напряжений в стенках нижнего пояса в середине пролета, кг/см^2: *а* – σ_e в стенке под крановым рельсом; *б* – τ_{xy} в стенке под крановым рельсом; *в* – σ_e в правой стенке; *г* – τ_{xy} в правой стенке (по рисунку 3.16)

Сравнение напряжений, полученных аналитическим и численным методами, приведено в таблице 3.7. Результаты аналитического расчета напряжения в нижнем поясе с учетом составляющей от кручения имеют расхождение с результатами расчета пространственной модели ППФ на ЭВМ в некоторых зонах. Необходимо дополнительное изучение методов вычисления внутренних усилий и напряжений в нижнем поясе.

Таблица 3.7 – Сравнение значений напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–42

В кгс/см^2

Элемент	Точка	Аналитический расчет		Численный расчет	
		σ_e	τ_{xy}	σ_e	τ_{xy}
Левая стенка (рисунок 3.17)	Верх	775,53	9,35	714,09	2,10
	Центр	286,63	14,16	270,64	13,64
	Низ	216,88	17,67	478,72	17,60
Правая стенка (рисунок 3.17)	Верх	189,16	8,70	298,15	17,90
	Центр	677,88	12,92	425,94	21,22
	Низ	1166,84	18,59	799,44	19,26

Для выявления наиболее точного аналитического метода, усилия и напряжения в нижнем поясе определялись следующими методами:

1. Аналитическим в соответствии с рекомендациями [92] (рисунок 3.23).

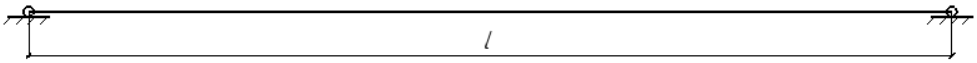


Рисунок 3.23 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу №1 (*l* – пролет ППФ)

2. Аналитическим с определением внутренних усилий в нижнем поясе как в балке на угловых упругих опорах, имитирующих работу элементов решетки (рисунок 3.20). Жесткость упругих опор определяется по формуле (3.18).

3. Аналитическим с определением внутренних усилий как в раме, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке (рисунок 3.24). Момент инерции вертикальных элементов рамы определяется по формуле (3.19).

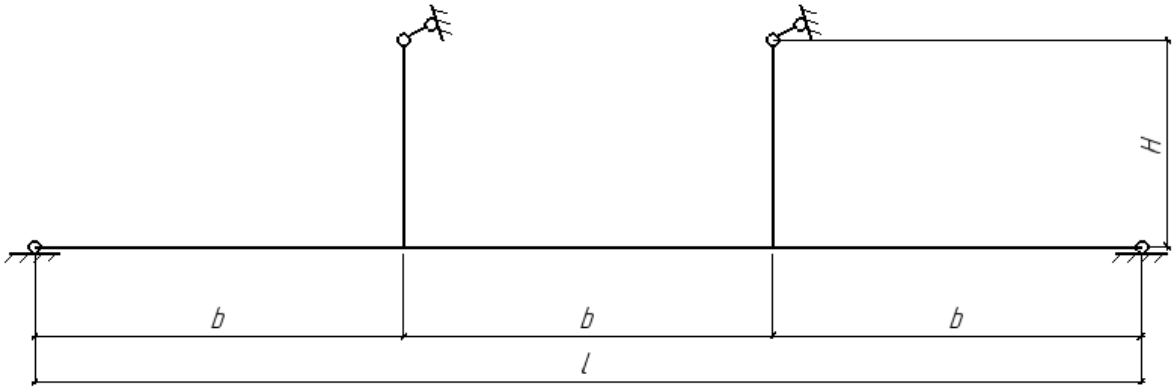


Рисунок 3.24 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу №3

4. Численным с использованием стержневой плоской расчетной схемы (РС) с учетом эксцентриситета крепления решетки [52] (рисунок 3.25).

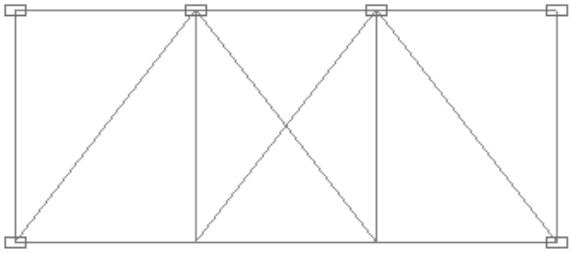


Рисунок 3.25 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу №4

5. Численным с использованием стержневой плоской РС двух пролетов ППФ (рисунок 3.26).

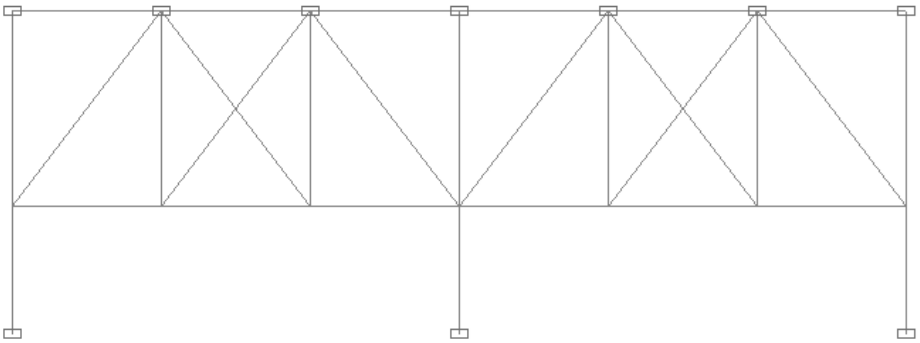


Рисунок 3.26 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета по методу №5

6. Численным с использованием пространственной РС из пластинчатых конечных элементов (рисунок 3.17).

Расчеты выполнены на нагрузку от одного крана, расположенного в середине пролета с грузом 396 т. Приближение грузовой тележки – 2 м.

Геометрические характеристики сечения нижнего пояса определены по единой теории тонкостенных стержней [3].

Численные расчеты произведены в ПК SCAD.

Результаты вычисления внутренних усилий в середине пролета 38–44 (сечение 2–2 на рисунке 3.16) сведены в таблице 3.8, напряжений – в таблице 3.9 и на рисунках 3.27 и 3.28.

Таблица 3.8 – Результаты вычисления внутренних усилий

Усилие	№ метода вычисления				
	1	2	3	4	5
M_K, тм	-768	8	9,37	8,39	17,43
M_Z, тм	0	0	407	491	250
Q_Y, т	0	0	0,18	0,39	3,41
N*, т	208				
M_Y*, тм	1047				
Q_Z*, т	-1,83				
Примечание: усилия со * определены по методу 5					

Таблица 3.9 – Результаты вычисления напряжений

Точка определения напряжения (рисунок 3.27)	№ метода вычисления					
	1	2	3	4	5	6
	σ_e, кгс/см^2					
1	1018	444	812	888	670	592-630
2	920	101	267	345	128	102-117
3	1121	646	290	216	428	352-401
4	1225	444	25	76	186	192-212
5	1147	101	530	620	366	335-356
6	1311	646	1076	1165	911	853-887
7	451	450	929	1128	744	556-578
8	744	450	418	412	431	305-334
9	451	450	64	167	142	176-195
10	653	652	173	74	358	350-367
11	881	652	684	690	672	505-532
12	653	652	1154	1257	960	789-801

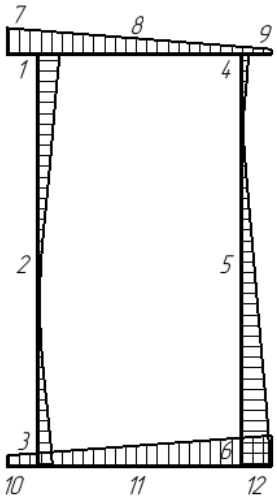


Рисунок 3.27 – К результатам вычисления напряжений

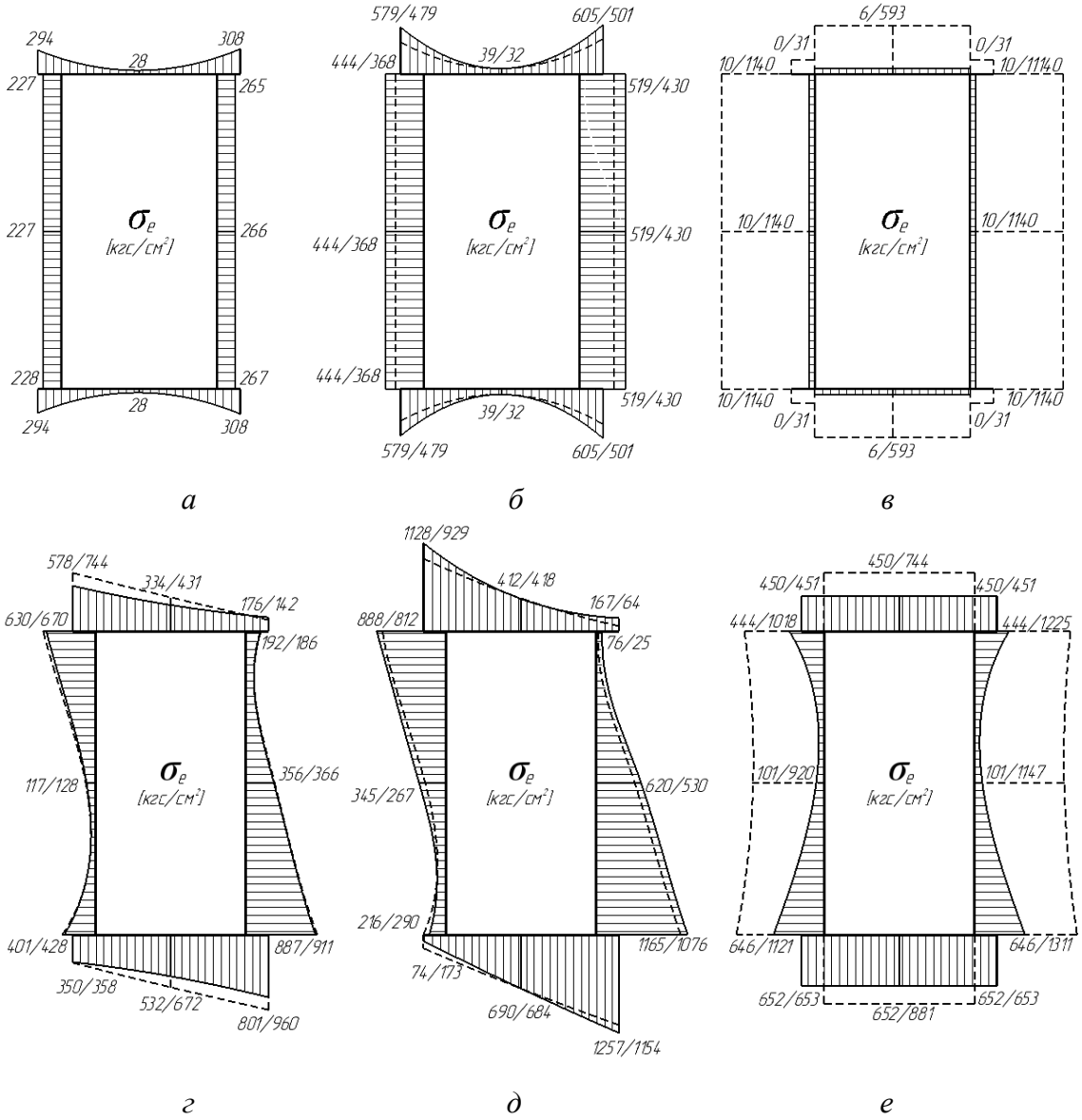


Рисунок 3.28 – Эпюры эквивалентных напряжений в нижнем поясе ППФ (сечение 2–2 на рисунке 3.16) от M_K, M_Z и Q_Y: *а* – метод №5, *б* – метод №4/№3, *в* – метод №2/№1; от всех внутренних усилий: *г* – метод №6/№5, *д* – метод №4/№3, *е* – метод №2/№1

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [92], при расчете на изгиб в плоскости ППФ считается внешне и внутренне статически определимой. Для этого нижний пояс принимается разрезным на опорах и в узлах примыкания решётки, что приводит к искажению результатов. Данная работа посвящена исследованию кручения пояса, для исключения влияния прочих факторов для методов №1–5 усилия M_Y, N и Q_Z определялись по методу №5 (таблица 3.8).

Точность определения внутренних усилий снижается с каждым шагом упрощения метода расчета и РС. Коробчатый пояс, по которому перемещается кран, выполняется неразрезным, это позволяет придать ему большую жёсткость и обеспечить плавность его оси при деформациях. Для упрощения расчета пояс считается разрезным на опорах. При переходе от метода №5 к методу №4, т. е. от неразрезного пояса к разрезному, результаты определения M_K и Q_Y снижаются более чем в два раза, M_Z возрастает почти в два раза.

При переходе от метода №4 к методу №3 точность определения усилий понижается в меньшей степени: M_K возрастает на 10 %, Q_Y снижается на 53 %, M_Z снижается на 17 %. Расчетная схема рамы, стойки 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 №1 и №2, позволяет учесть это и получить значения изгибающих моментов из плоскости ППФ в нижнем поясе и элементах решетки.

Метод №2, рассматривающий пояс как неразрезную балку на упруго-поворачивающихся опорах, имеет наименьшее расхождение с методом №4 в определении M_K – 5 %, но не позволяет получить усилия M_Z и Q_Y, вызываемые горизонтальным изгибом пояса, сопровождающим его закручивание. Величины усилий, полученные методом №1, сильно разнятся с результатами других методов. Это вызвано тем, что РС балки не соответствует работе пояса при кручении. Сечение балки поворачивается вокруг нейтральной оси без смещения, сечение

пояса поворачивается и смещается относительно нейтральной оси, вызывая дополнительный поворот сечения пояса.

Результаты аналитического определения напряжений методом №5 в большинстве точек выше результатов численного эксперимента №6, но сопоставимы с ними, формы эпюр идентичны. Точность определения напряжений снижается с упрощением метода расчета в меньшей степени, чем точность определения внутренних усилий. Это связано с тем, что больший вклад в картину напряжений вносят усилия, вызванные вертикальным изгибом нижнего пояса, определяемые для методов №1–5 по методу №5. Эпюры напряжений, полученные методами №1 и №2, имеют искаженную форму относительно результатов численного исследования №6.

Из рассмотренных аналитических методов определения внутренних усилий в ездовом поясе при кручении наиболее применимым для предварительного расчета является метод №3. Он позволяет значительно уменьшить погрешность в определении напряжений относительно результатов численного эксперимента №6 в сравнении с принятым методом расчета №1.

Выполнить точный расчет ППФ аналитическим методом не представляется возможным в силу сложности конструкции и особенностей её функционирования [52]. Проверочный анализ ППФ следует проводить численным методом конечных элементов с применением пластинчатых элементов. Рекомендуется выполнять расчёт ППФ в составе полного каркаса или части сооружения [126].

3.3. Сравнение результатов расчета с результатами натурного исследования

В рамках проведения авторского надзора специалистами ЦННИпроектстальконструкции и Челябпроектстальконструкции было выполнено обследование конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината [30, 34], введенного в эксплуатацию в 1990 г., в котором используются продольные ППФ. В процессе обследования выявлено большое количество дефектов в узлах

крепления к ездовому поясу решетки и в узлах опирания пояса на колонны. Помимо дефектов изготовления, транспортировки и монтажа присутствуют усталостные трещины, вызванное высокой динамической нагрузкой от мостовых кранов и её внецентренным положением относительно стенки ездового пояса. Проведена серия натурных испытаний с измерением НДС в наиболее часто повреждаемых узлах тензометрическим методом.

Изучением фактических свойств сталей, применяемых при изготовлении ППФ, и НДС нижнего пояса ППФ занимались К.И. Еремин, С.А. Нищета, М.В. Нащёкин и др. [30-34, 80]. Исследования НДС узлов примыкания к нижнему поясу элементов решетки и опорных узлов ППФ проводились тензометрическим методом. Наиболее полные результаты исследований приведены в [30, 34, 90, 117].

Объекты исследования – ППФ, расположенные в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ККЦ ММК) в прокатном цехе №3 ОАО «Златоусовский металлургический комбинат». ККЦ ММК построен в 1989 г. и состоит из двух основных производственных помещений: конвертерного отделения и отделения непрерывной разливки стали (ОНРС). Основной каркас ККЦ смонтирован по чертежам шифра 3-Ф1535.02 км1 ЦНИИПроектстальконструкции. Металлоконструкции каркаса изготовлены на Челябинском заводе металлоконструкций и смонтированы трестом «Уралстальконструкция».

Конвертерное отделение состоит из трех пролетов, шаг колонн 24 м. ППФ установлены по ряду «Е» (рисунок 3.16). В качестве стропильных конструкций используются стропильные балки. Кровля холодная из профильного металлического листа. В конвертерном отделении грузоподъемность мостового крана Q=450/100/20 т, вес крана 615 т, режим работы 7К.

Здание ОНРС имеет размеры в плане 150×292 м. Рабочая документация разработана на основании зданий Магнитогорского ГИПРОМЕЗа, Сантехпроекта, Волгоградского Тяжпромэлектропроекта и Сибирского Промстройпроекта. Здание ОНРС – пятипролётное, различные пролёты обслуживаются кранами

грузоподъемностью 500+100/20 т и 125/20 т. Сопряжение стропильных ферм с ППФ – жесткое.

Раскосы и стойки решетки ППФ составного двутаврового сечения. Нижний пояс – неразрезная сварная балка несимметричного коробчатого сечения. Узлы сопряжения решетки с прорезными фасонками нижнего пояса выполнены на высокопрочном крепеже. В ППФ использованы стали марок 16Г2ЛФ, 09Г2С и ВСт3сп5-1.

Были проведены исследования химического состава и механических характеристик сталей, применяемых при производстве ППФ [90]. Для проведения исследований механических характеристик стали был проведен отбор фрагмента крестового соединения из опорных частей ППФ. Цилиндрические образцы для изучения механических характеристик стали поперек проката соответствовали третьему типу по ГОСТ 1497-84, при этом форма, размеры и допускаемые отклонения по размерам соответствовали требованиям ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9561-2016. Химический состав стали был определен согласно ГОСТ 12344-2003, ГОСТ 12345-2001, ГОСТ 12346-78, ГОСТ 12347-77, ГОСТ 12348-78, ГОСТ 12350-78, ГОСТ 12351-2003, ГОСТ 12355-78, ГОСТ 12356-81, ГОСТ 12358-2002, ГОСТ 12359-99, ГОСТ 18895-97. Механические свойства стали изучали при статическом растяжении. Испытания проведены на машине ЦД-30 с максимальным усилием 30 т. В процессе испытаний производили запись диаграмм «$\sigma_i - \varepsilon_i$» и определяли: предел текучести $\sigma_в$ (кгс/мм^2), временное сопротивление $\sigma_т$ (кгс/мм^2), относительное удлинение после разрыва δ (%) и относительное поперечное сужение ψ (%). Ударную вязкость определяли при проведении испытаний по ГОСТ 9454-78 с использованием маятникового копра по ГОСТ 10708-82.

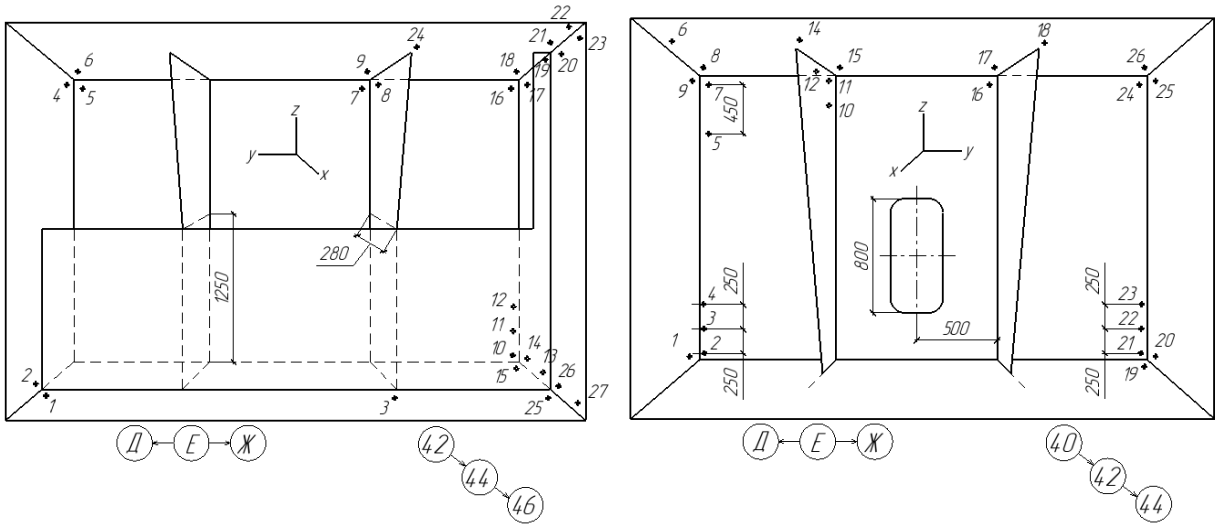
Проведено изучение кинетики напряженно-деформированного состояния от крановой нагрузки тензометрическим методом. Измерения проводились проволочными тензорезисторами с базой 5 мм, которые объединялись в трехкомпонентные прямоугольные тензорозетки, что позволило определить напряжения по основным направлениям. Регистрация показаний тензорезистров

осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3 в автоматическом режиме опроса и выдачи информации.

Во время испытаний в отделении ОНРС исследовалась опорная часть ППФ по оси «21», ряд «П». Тензометры были смонтированы в зонах, в которых имели место разрушения в аналогичных ППФ и в зонах, в которых возможно зарождение и развитие трещин.

При проведении испытания узла «21-П» загружение осуществлялось двумя кранами, расположенными соответственно в пролетах «Р-П» и «П-Н». Краны были загружены грузом Q=500 т. Положение тележек было фиксированным и определено исходя из условия максимально возможного приближения груза к ППФ.

В конвертерном отделении исследования проводились в узле, расположенном по ряду «Е», ось «44». При испытании узла ППФ загружение было осуществлено одним краном, расположенным в пролёте «Д-Е». Вес груза Q = 396 т. Приближение грузовой тележки составило 3,2 м (максимально возможное). Схема привязки центров прямоугольных тензорозеток показана на рисунке 3.29. Схема расположения крана в момент снятия отчётов показана на рисунке 3.30. При каждом положении тележки производился трёхкратный опрос тензорезисторов.



а *б*

Рисунок 3.29 – Схема привязки точек тензорезисторов: *а* – при испытании узла «44-Е»; *б* – при испытании узла «42-Е» (привязка тензорезисторов 50 мм)

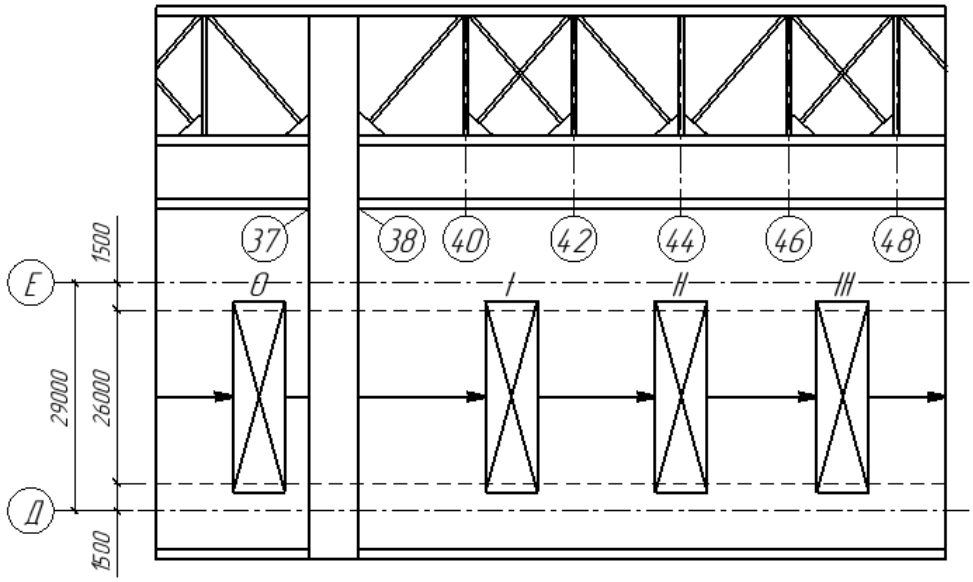


Рисунок 3.30 – Схема расположения мостового крана

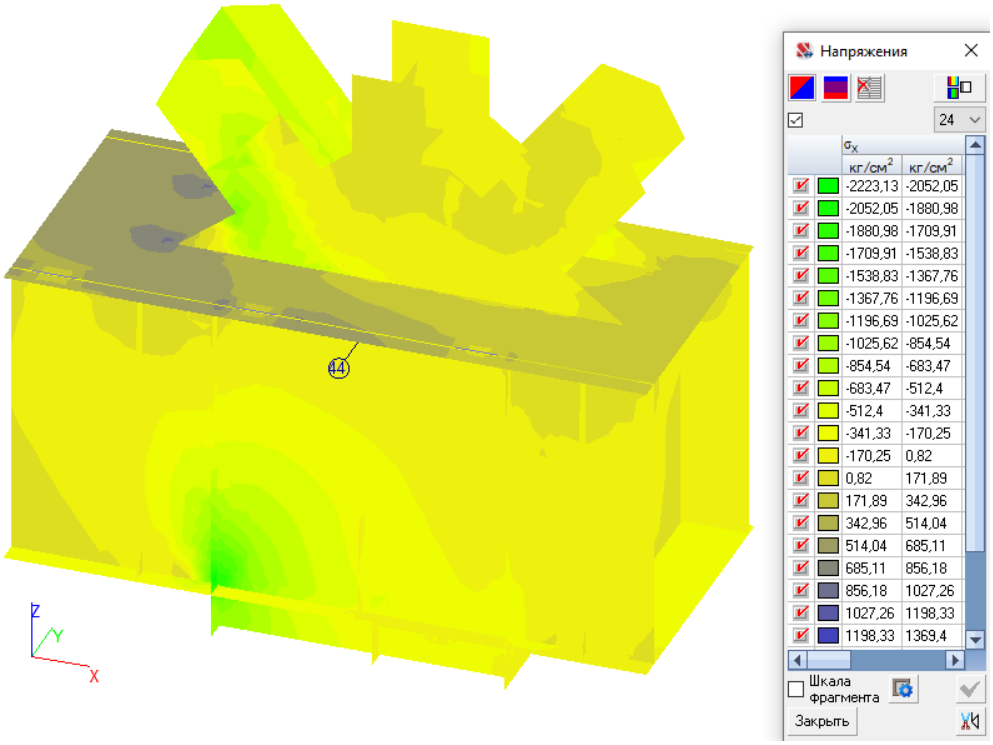
При проведении всех испытаний снятие нулевых отчётов производилось при нахождении крана за температурным швом. Регистрацию показаний осуществляли после фиксирования положения крана в заданной точке и выдерживания нагрузки в течение 5–10 минут.

Обработка результатов экспериментальных исследований произведена с помощью пакета программ Microsoft Exel и специально разработанной программы «Тензометрия» [90]. Обработка результатов производилась в несколько шагов согласно [87, 115, 122].

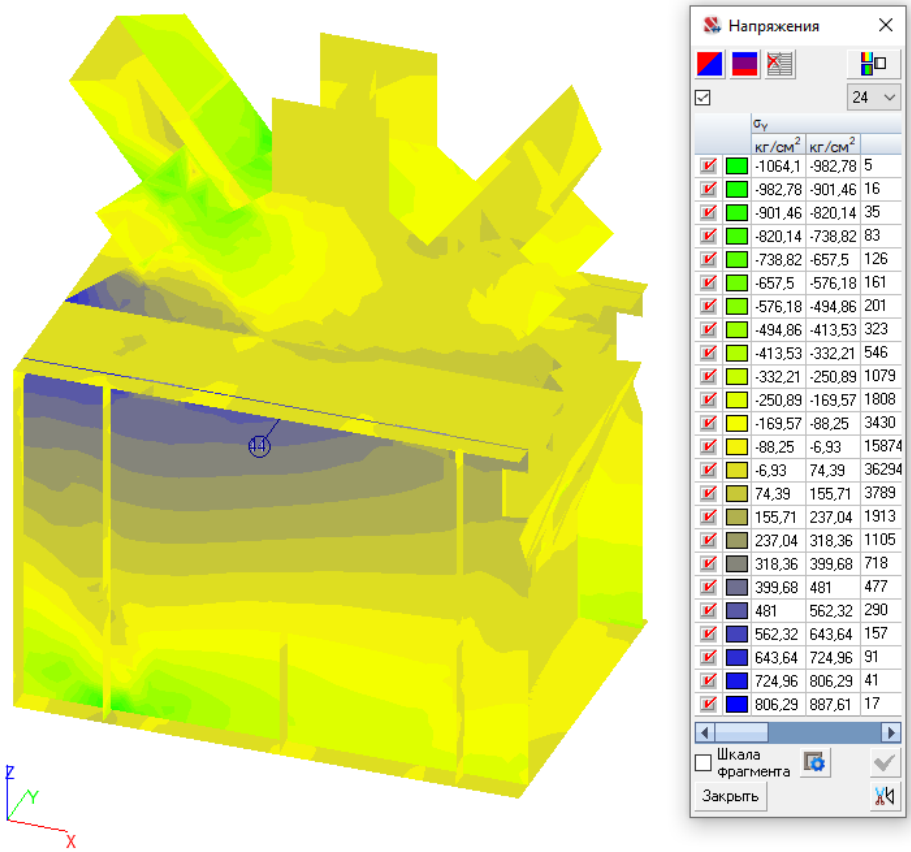
В рамках диссертационного исследования построена пространственная модель ППФ с применением оболочечных конечных элементов, позволяющих учесть упругую податливость в соединениях, влияние подкрепляющих элементов и конструктивного решения соединения на работу конструкции (рисунок 3.17). Подкрепляющие элементы нижнего пояса и конструктивные решения узлов учтены в РС. Тип конечных элементов – 44, размер (для нижнего пояса) – 0,2 м [126]. В узлах опирания стропильных ферм на верхний пояс установлены связи, противодействующие смещению по направлению оси Y, в нижних узлах колонны – связи, противодействующие смещению и повороту по всем направлениям.

Сравнение результатов численного расчета и натурного исследования рассматриваемой ППФ приведено в таблице 3.10. Поля напряжений в исследуемом

узле «44-Е» показаны на рисунках 3.31 и 3.32. Схема привязки точек определения напряжений в узле «44-Е» показана на рисунке 3.33.



а



б

Рисунок 3.31 – Поля напряжений в узле «44-Е» (узел 2 рисунка 3.16):
а – σ_x; *б* – σ_y

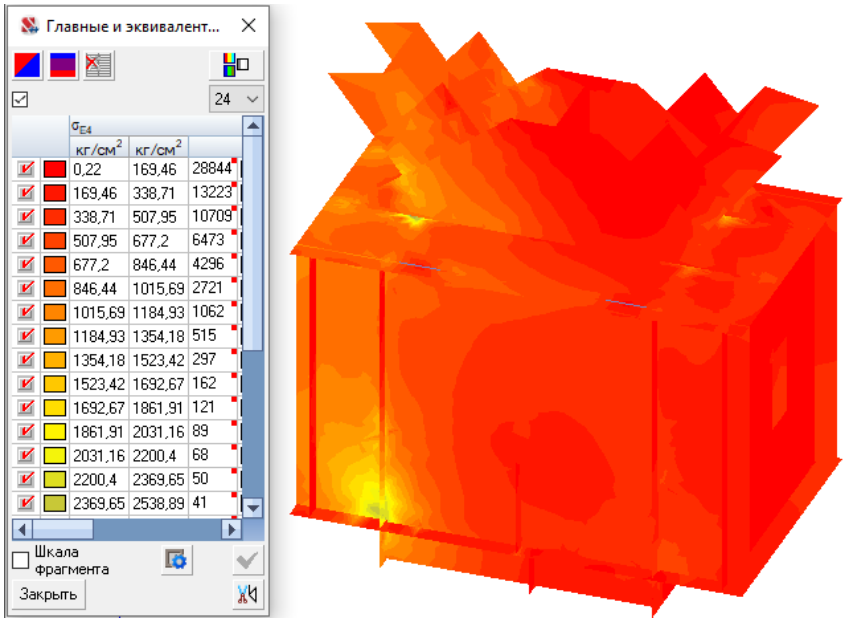


Рисунок 3.32 – Поля напряжений σ_e в узле «44-Е» ППФ ККЦ ММК

Таблица 3.10 – Сравнение значений напряжений в узле «44-Е» (узел 2 рисунка 3.16)

В кгс/см^2

Точка на рисунке 2.33	Экспериментальное исследование				Численный расчет			
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_e	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_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

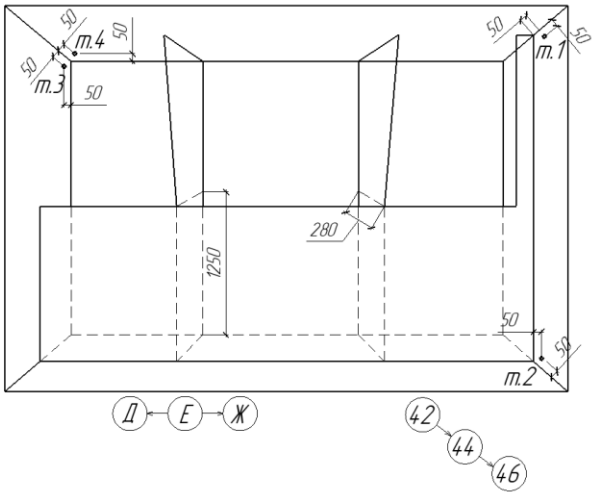


Рисунок 3.33 – Схема привязки точек определения напряжений в узле «44-Е»

Данные экспериментальных исследований НДС узла ППФ, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результатами численного расчета методом конечных элементов за исключением отдельных точек. Несоответствие отдельных напряжений может объясняться влиянием сварочных напряжений и скоплением трещиноподобных дефектов в околошовных зонах [30, 117].

3.4. Выводы по главе 3

1. Проведена проверка рекомендованной [92] методики определения внутренних усилий и напряжений в ППФ.

2. Предложена уточнённая расчётная схема нижнего пояса – балка на упругих опорах в узлах крепления элементов решетки. Представлен метод определения жесткости упругих опор, имитирующих работу решетки. Разработана методика определения усилий в нижние пояса с учетом упругой податливости решетки в плоскости ППФ. Проведены проверка и уточнение предложенной методики для ППФ с различными геометрическими параметрами.

3. Проанализирован вклад перемещений от изгибающего момента и поперечных сил в нижнем поясе и других элементах фермы в общую податливость нижнего пояса в плоскости ППФ. Произведена численная проверка метода [92] определения изгибающего момента в нижнем поясе ППФ от внецентренного примыкания элементов решетки.

4. Исследована работа нижнего пояса при кручении. Выявлены отличия его работы от работы балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу, являющейся расчетной схемой для определения внутренних усилий в нижнем поясе по действующей методике расчета.

5. 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.

6. Проведено численное исследование НДС ППФ. Выполнено сравнение напряжений, полученных аналитическими и численными вычислениями, натурным экспериментом.

7. Метод определения узловых моментов от расцентровки узла, используемый при расчёте лёгких ферм с жесткими узлами, применим на стадии предварительного расчёта ППФ как однопролётной конструкции.

ГЛАВА 4. Методика предварительного расчета подкраново-подстропильной фермы

4.1. Нагрузки

Конструкции ППФ могут воспринимать следующие виды нагрузок и воздействий:

а) нагрузки от собственной массы ППФ и массы поддерживаемых ею других элементов сооружения (стропильные фермы, покрытие и т.п.);

б) технологические нагрузки от коммуникаций;

в) технологические нагрузки от массы людей и ремонтных материалов на ездовых поясах ППФ;

г) вертикальное давление мостовых кранов;

д) горизонтальные воздействия кранов;

е) снеговые нагрузки, передаваемые через покрытие и стропильные фермы;

ж) ветровые воздействия, передаваемые через ограждения зданий;

з) температурные воздействия;

и) сейсмические нагрузки;

к) воздействия от осадки опор и поворота фундаментов;

л) нагрузка от производственной пыли [117].

Нагрузки а) и б) относятся к постоянным, з) и и) – к особым. Все остальные относятся к кратковременным, причем нагрузки г) и д) считаются за одну кратковременную нагрузку, принимаемую с учетом коэффициента сочетаний ψ_t по п. 9.18 СП 20.13330.2016.

На начальном этапе расчета допускается учитывать нагрузки от собственной массы ППФ приближенно путем умножения усилий и перемещений, определяемых от вертикальных нагрузок, на коэффициент α_1 = 1,08–1,10.

Нагрузки от мостовых кранов определяются в соответствии с технологическим заданием, с учетом режима работы кранов и зданий.

Нормативная вертикальная нагрузка F_n, передаваемая колесом крана на головку кранового рельса, принимается в соответствии с требованиями государственных стандартов на краны, а для нестандартных кранов – в соответствии с данными, указанными в паспортах заводов-изготовителей.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки ${T_n}^{\text{п}}$, направленной поперек кранового пути и вызываемой торможением электрической тележки, принимается равным:

$$ {T_n}^{\text{п}} = k \cdot (9{,}8 \cdot Q + G_{ct})/n_o; \qquad (4.1) $$

где Q – грузоподъемность крана;

G_{ct} – вес крановой тележки;

n_o – количество катков на одной стороне кранового моста;

$k = 0{,}05$ для кранов с гибким подвесом груза, $k = 0{,}10$ для кранов с жестким подвесом груза.

Эта нагрузка может быть направлена как внутрь, так и наружу рассматриваемого пролета.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки ${T_n}^{\text{б}}$, направленной поперек кранового пути и вызываемой перекосами мостовых электрических кранов и непараллельностью крановых путей (боковой силой), для каждого ходового колеса крана принимается равным:

$$ {T_n}^{\text{б}} = 0{,}2 \cdot F_n \,. \qquad (4.2) $$

Эта нагрузка учитывается только при расчете прочности и устойчивости балок крановых путей и их креплений к колоннам в зданиях с кранами групп режимов работы 7К, 8К. Нагрузка передается на балку кранового пути от всех колес одной стороны крана и может быть направлена как внутрь, так и наружу рассматриваемого пролета здания. Нормативную горизонтальную нагрузку ${T_n}^{\text{п}}$ не следует учитывать совместно с боковой силой ${T_n}^{\text{б}}$.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки ${T_n}^{\text{пр}}$, направленной вдоль кранового пути и вызываемой торможением моста электрического крана, принимается равным:

$$T_n^{\text{пр}} = 0{,}1 \cdot F_n \cdot n_{\text{т}}; \quad (4.3)$$

где $n_{\text{т}}$ – количество тормозных катков на одной стороне кранового моста (при отсутствии данных допускается принимать $n_{\text{т}} = 0{,}5 \cdot n_o$).

Вертикальная крановая нагрузка считается приложенной в срединной плоскости соответствующей стенки ездового пояса; горизонтальная – на уровне головки кранового рельса.

В зданиях тяжелого режима работы учитывается эксцентричность приложения крановых нагрузок, создающая в уровне подошвы рельса местный крутящий момент:

$$M_n^{\text{кр}} = F_n \cdot e + 0{,}75 \cdot T_n^{\text{б}} \cdot h_p\ ; \quad (4.4)$$

где e – эксцентриситет, вызванный смещением оси рельса по отношению к срединной плоскости стенки, принимаемый равным 15 мм;

h_p – высота рельса.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки $T_n^{\text{у}}$, направленной вдоль кранового пути и вызываемой ударом крана о тупиковый упор, следует определять по прил. А.2 СП 20.13330.2016.

Расчетные крановые нагрузки определяются умножением нормативных значений на коэффициенты надежности по нагрузке γ_f, динамичности k_d и сочетаний ψ_t. Величины этих нагрузок принимаются как одна кратковременная. Порядок их подсчета и количество кранов, учитываемых при расчете крановых путей, приведены в таблице 2.1 [51].

При учете местного и динамического действия сосредоточенной вертикальной нагрузки от одного колеса крана полное нормативное значение этой нагрузки следует умножать при расчете прочности балок крановых путей на дополнительный коэффициент $k_{\text{м}}$, принимаемый по п. 9.9 СП 20.13330.2016.

При расчете на выносливость балок крановых путей следует учитывать пониженное значение нагрузки, которое определяется умножением нормативного значения вертикальной нагрузки от одного крана в каждом пролете здания на коэффициент $k_{\text{у}}$, принимаемый в соответствии с п. 9.19 СП 20.13330.2016.

Нормативные значения технологических нагрузок в) принимаются по технологическому заданию, а при отсутствии последнего равными 2 кН/м^2.

4.2. Статический расчет системы

Правило знаков:

Нормальные силы положительны при растяжении. Изгибающие моменты положительны, если изгибают конструкцию или элемент выпуклостью в положительном направлении координатных осей. Поперечные силы положительны, если увеличивают изгибающие моменты в положительном направлении координатных осей. Крутящие моменты положительны, если вращают сечение против часовой стрелки при взгляде с положительного конца оси поворота.

Напряжения положительны, если на площадке с положительной внешней нормалью они направлены в положительном направлении координатных осей.

В качестве основных элементов (стержней) как правило ППФ используются призматические тонкостенные стержни закрытого профиля. Последние характерны для ездовых поясов. На рисунке 4.1 показано произвольное сечение такого стержня. Оси O_oUV – главные центральные, $O_oy_oz_o$ – центральные, Oyz – рабочие. Алгоритм вычисления геометрических характеристик призматического тонкостенного стержня приведен в [52].

Предварительный расчет ППФ, имеющий цель назначить предварительные размеры сечений её основных элементов, проводится в два этапа.

На первом этапе подсчитываются вертикальные погонные нагрузки на ППФ: $q_{\text{с}}$ – от веса вышележащих конструкций каркаса, $q_{\text{к}}$ – от кровли, $q_{\text{т}}$ – технологическая, S – снеговая, а также расчетное давление F катков мостового крана.

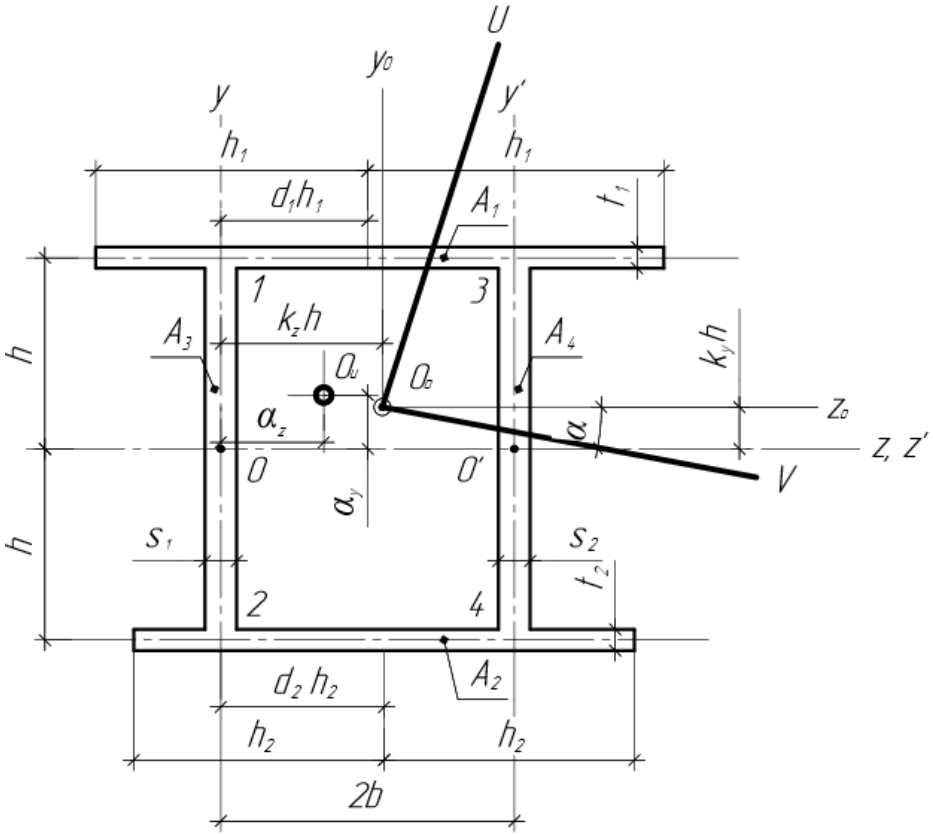


Рисунок 4.1 – Произвольное сечение призматического тонкостенного стержня закрытого профиля

По этим нагрузкам определяется приближенное значение расчетного изгибающего момента при установке на ППФ катков по правилу Винклера:

$$M_z = \alpha_1 \alpha_2 \left[0{,}125(q_{\text{с}} + q_{\text{к}} + q_{\text{т}} + S)L^2 + \frac{\psi_t}{L} \sum F\, y_k (L - y_k) \right] \; ; \qquad (4.5)$$

где L – пролет ППФ;

y_k – расстояния колес кранов от левой опоры ППФ;

α_1 – коэффициент, учитывающий влияние собственного веса ППФ и равный 1,08 – 1,10;

α_2 – коэффициент, для разрезных ППФ $\alpha_2 = 1$, для ППФ в виде ригеля рамы $\alpha_2 = 0{,}8 - 0{,}9$;

ψ_t – коэффициент сочетаний, принимаемый п. 9.18 СП 20.13330.2016 в зависимости от числа учитываемых кранов.

Нормальные силы в нижнем $N_{\text{Н}}$ и верхнем $N_{\text{В}}$ поясах подсчитываются по формуле:

$$N_{\text{Н}} = -N_{\text{В}} = 0{,}98\frac{M_z}{h} \ ; \tag{4.6}$$

где h – высота ППФ по осям поясов.

В ездовом поясе подсчитываются изгибающие моменты:

– от изгиба пояса в составе ППФ:

$$M'_{zn} = 0{,}02M_z \ ; \tag{4.7}$$

– от местного изгиба, вызванного собственным весом пояса, технологической нагрузкой в нем и давлением колес кранов, поставленных также, как и при вычислении M_z по (4.1):

а) для пролетных сечений

$$M_{zn}" = \alpha_1(0{,}042q_{\text{т}}l^2 + \psi_t\zeta\xi_1 lF) \ ; \tag{4.8}$$

б) для опорных сечений

$$M_{zn}" = -\alpha_1(0{,}083q_{\text{т}}l^2 + \psi_t\zeta\xi_2 lF) \ ; \tag{4.9}$$

где – l длина панели;

ξ_i – числовые коэффициенты, принимаемые по таблице 4.1;

$\zeta = 1$ при кранах на одной стороне ППФ и $\zeta = 2$ при кранах на двух сторонах.

Таблица 4.1 – Значения коэффициентов ξ_i

Количество колес кранов на одной стороне ППФ	1	2	3	4
ξ_1	0,17	0,20	0,30	0,38
ξ_2	0,08	0,14	0,20	0,22

Сечение ездового пояса $A_{\text{н}}$ подбирается по нормальной силе $N_{\text{н}}$ и изгибающему моменту M_{zn}, равному:

$$M_{zn} = M'_{zn} + M_{zn}" \ ; \tag{4.10}$$

при расчетном сопротивлении материала, равном $0{,}8R$.

Сечение неездового пояса $A_{\text{в}}$ – по нормальной силе $N_{\text{в}}$ при расчетном сопротивлении $0{,}75R$.

Подсчитывается момент инерции I_n ездового пояса и момент инерции I_L ППФ, а также параметр β:

$$I_L = I_n + 0{,}9\frac{A_н A_в}{A_н + A_в}h^2 \ ;$$

$$\beta = \frac{I_n}{0{,}6 I_L} \ . \qquad (4.11)$$

Прикладывается собственный вес ППФ $q_ф^н$ и вес ездового пояса $q_п^н$ на один погонный метр:

$$q_ф^н = \psi_ф \gamma (A_н + A_в) \ ;$$

$$q_п^н = \psi_п \gamma A_н \ ; \qquad (4.12)$$

где $\gamma = 78{,}5$ кН/м ; $\psi_ф = 2{,}2 - 2{,}5$; $\psi_п = 1{,}4 - 1{,}6$.

Для ППФ в виде ригеля рамы определяется параметр κ:

$$\kappa = \frac{I_L H}{I_\kappa L} \ ; \qquad (4.13)$$

где H – расчетная высота рамы;

I_κ – момент инерции колонны в плоскости рамы.

Второй этап приближенного расчета проводится тем же путем, что и предварительный, со следующими изменениями:

1) Для подсчета максимального изгибающего момента в ППФ используется формула:

$$M_z = B\left[\left(q_ф + q_ш + q_к + q_т + S\right)\frac{L^2}{C} + \frac{\psi_t}{L}\sum F\, y_k (L - y_k)\right] \ ; \qquad (4.14)$$

где для разрезной ППФ $B = 1, C = 8$;

для ППФ в виде ригеля рамы $B = 1 - 1/(0{,}5\kappa - 1)$, $C = 24$;

2) При изгибе в плоскости ППФ нормальные силы в элементах рассчитываются по внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой модели с неразрезным нижним поясом (рисунок 4.2).

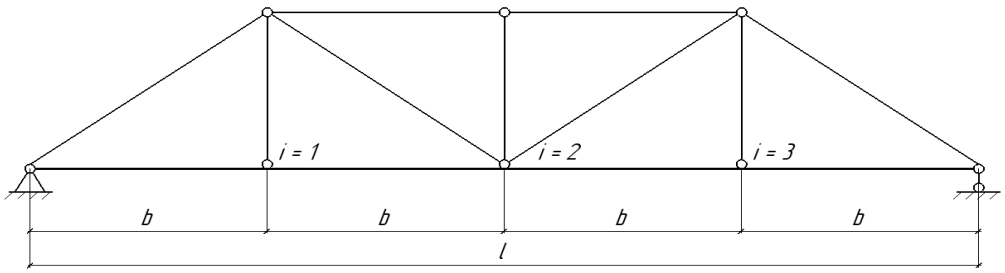


Рисунок 4.2 – РС ППФ с неразрезным нижним поясом

3) Изгибающие моменты в ездовом пояса определяются как в балке на упругих опорах (рисунок 4.3)

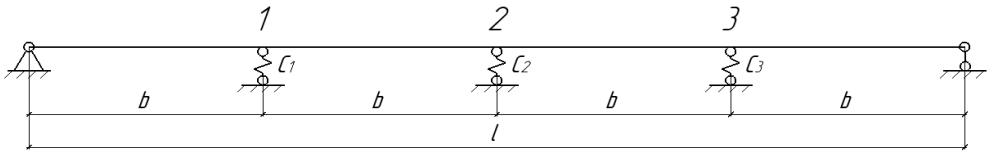


Рисунок 4.3 – РС балки на упругих опорах

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

$$\delta_{\text{ППФ}} = \sum_{1}^{m} \int_{0}^{l} \frac{[\overline{M_{\text{НП}}^{0}}]^2}{EI_{\text{у НП}}} ds + \frac{\sum_{1}^{m} l_{i\,\text{р}} [N_{i\,\text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}}; \qquad (4.15)$$

где $i -$ номер узла сопряжения решетки с нижним поясом (без учета опорного) – рисунок 4.2.

Для ближайших к опорам узлов ($i = 1; i = n - 1$) трех- и двухпанельной ППФ формулу (4.15) можно упростить:

$$\delta_{\text{ППФ}} = \frac{2b \sum_{1}^{m} [M_{i\,\text{НП}}]^2}{3EI_{\text{у НП}}} + \frac{\sum_{1}^{m} l_{i\,\text{р}} [N_{i\,\text{р}}]^2}{EA_{\text{р}}}. \qquad (4.16)$$

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

$$\text{C}_i = \frac{EA_{\text{р}}}{\sum_{1}^{m} l_{i\,\text{р}} [N_{i\,\text{р}}]^2} + EI_{\text{у НП}} \left(\frac{1}{\int_{0}^{l} [\overline{M_{\text{НП}}^{0}}]^2} - \frac{3n}{(n-i)^2 i^2 b^3} \right). \qquad (4.17)$$

Для ближайших к опорам узлов сопряжения нижнего пояса с решеткой ($i = 1; i = n - 1$) трех- и двухпанельной ППФ формула (4.17) упрощается до вида:

$$\text{C}_i = \frac{EA_{\text{р}}}{\sum_{1}^{m} l_{i\,\text{р}} [N_{i\,\text{р}}]^2} + \frac{3EI_{\text{у НП}}}{b} \left(\frac{1}{2 \sum_{1}^{m} [M_{i\,\text{НП}}]^2} - \frac{n}{(n-1)^2 b^2} \right); \qquad (4.18)$$

где n – количество панелей ППФ;

$b -$ длина панели нижнего пояса;

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

$N_{i\,\text{р}}$ – продольные усилия в i-ых элементах решетки и верхнего пояса;

$l_{i\,\text{р}}$ – длина i-ого элемента решетки или верхнего пояса;

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

$A_{\text{р}}$ – площади элементов решетки и верхнего пояса.

Определение внутренних усилий $M_{i\,\text{НП}}$ и $N_{i\,\text{р}}$ производится по $(n-1)$ раз внутренне статически неопределимой шарнирно-стержневой РС ППФ с неразрезным нижним поясом (рисунок 4.3).

4) Учет влияния решетки при расчете ездового пояса на горизонтальный изгиб и кручение производится следующим образом:

а) При горизонтальном изгибе расчет пояса как в раме, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке (рисунок 4.4). Момент инерции вертикальных элементов рамы равен сумме проекций моментов инерции всех элементов решетки, сходящихся в узле i. $I_{\text{прив.}i}$ – приведенный момент инерции k_i стержней решетки равен:

$$I_{\text{прив.}i} = \sum_{j=1}^{k_i} I_j \sin\alpha_j \quad ; \tag{4.19}$$

где α_j – угол наклона j–ого элемента решетки к оси ездового пояса.

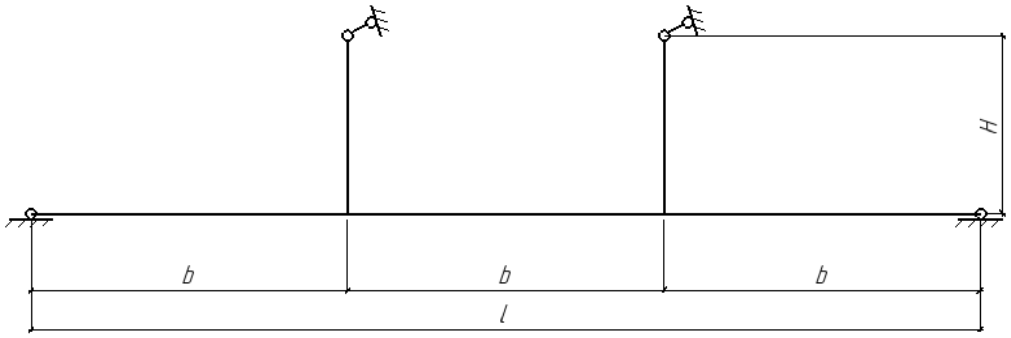


Рисунок 4.4 – Расчетная схема нижнего пояса для расчета на горизонтальный изгиб и кручение (H – высота ППФ по осям пояса)

б) При кручении расчет ездового пояса производится как в раме, стойки которой по жесткости эквивалентны решетке (рисунок 4.4). Момент инерции вертикальных элементов рамы определяется по формуле (4.19).

По полученным в результате расчетов значениям узловых изгибающих моментов M_{yi} и бимоментов B_i строятся соответствующие эпюры в ездовом поясе, а также определяются дополнительные усилия в элементах решетки.

Для элемента решетки в виде стержня открытого профиля (элемент j) значения изгибающего момента M_j (максимальное), моментов чистого кручения $M_{\text{кр.}j}$, стесненного кручения $M_{\omega j}$ и бимоментов $B_{\omega j}$ подсчитываются соответственно по формулам:

$$M_j = (R_i h + K_i)\sin\alpha_j\, I_{yj} I_{\text{прив.}i}^{-1} \;;$$

$$M_{\text{кр.}j} = G I_{\text{кр.}j} k_j \theta_i \sin\alpha_j \left[\cosh k_j l_j - \cosh k_j \left(l_j - s_j\right)\right] A_k^{-1} \;;$$

$$M_{\omega j} = E I_{\omega j} {k_j}^3 \theta_i \sin\alpha_j \cdot \cosh k_j \left(l_j - s_j\right) \cdot A_k^{-1} \;;$$

$$B_{\omega j} = -E I_{\omega j} {k_j}^2 \theta_i \sin\alpha_j \cdot \sinh k_j \left(l_j - s_j\right) \cdot A_k^{-1}; \qquad (4.20)$$

где k_j – изгибно-крутильная характеристика стержня;

s_j – расстояние вдоль оси элемента от неездового пояса;

l_j – длина элемента решетки;

R_i – реакция и реактивный крутящий момент в узле (с индексом «о» вверху – в основной системе):

$$R_i = R_i^o + \frac{M_{i-1}}{d_i} - M_i\left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_{i+1}}\right) + \frac{M_{i+1}}{d_{i+1}} \;;$$

$$K_i = K_i^o + \frac{B_{i-1}}{d_i} - B_i\left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_{i+1}}\right) + \frac{B_{i+1}}{d_{i+1}}; \qquad (4.21)$$

где d_i – длина i–ой панели (рисунок 4.6);

$$A_k = k_j l_j \cosh k_j l_j - \sinh k_j l_j \;; \qquad (4.22)$$

θ_i – угол поворота узла i в горизонтальной плоскости (рисунок 4.5), равный сумме угла поворота узловой линии панели $i+1$ и девиации на опоре i со стороны панели $i+1$

$$\theta_i = \varphi_{i+1} + \tau_{i,i+1} \;; \qquad (4.23)$$

причем

$$\varphi_{i+1} = (\Delta_{i+1} - \Delta_i) d_{\;i+1} \;; \qquad (4.24)$$

где

$$\Delta_i = R_i \chi_\Delta^{-1} + K_i h \left(2 E I_{\text{прив.}i}\right)^{-1} \;; \qquad (4.25)$$

$$\tau_{i,i+1} = \left(6EI_y d_{i+1}\right)^{-1} \left[\sum_{k=1}^{n_{i+1}} a_k\left(d_{i+1}^2 - a_k^2\right) - 2d_{i+1}^2(M_i + 0{,}5M_{i+1})\right] \; ; \quad (4.26)$$

где n_{i+1} – количество грузов в панели $n+1$;

a_k – их удаление от левого конца панели (рисунок 4.5).

Окончательный (проверочный) расчет на все виды воздействий, испытываемых ППФ, проводится после назначения размеров поперечных сечений основных элементов методом конечных элементов (МКЭ) с применением вычислительных комплексов SCAD, ЛИРА, МОНОМАХ, Stark-ES и т.п. При этом следует:

1) Максимальные усилия в элементах ППФ от воздействия кранов определять по линиям влияния;

2) Производить учет жесткости узлов системы;

3) Производить учет эксцентричности крепления решетки к ездовому поясу;

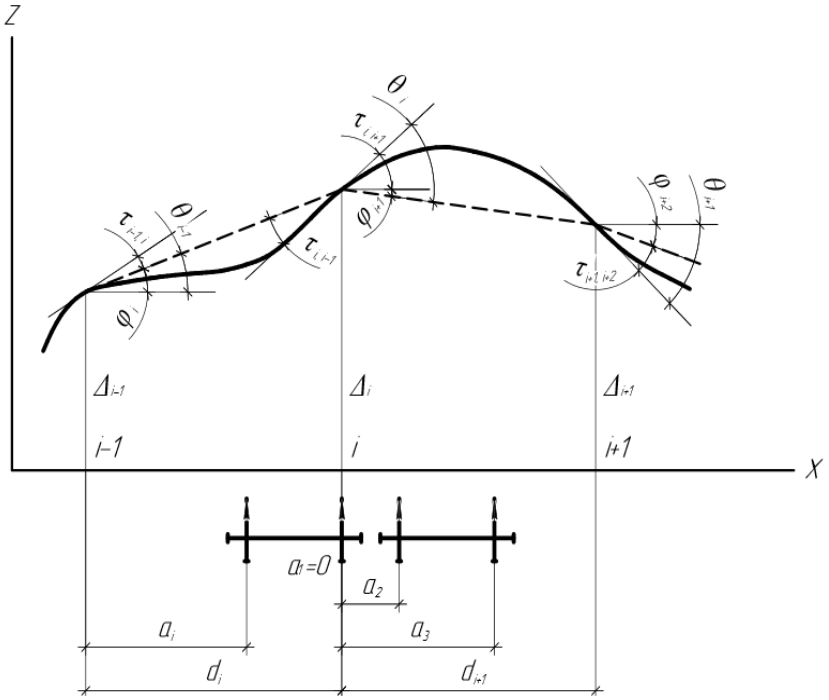


Рисунок 4.5 – Общая схема деформаций ездового пояса вблизи узла i

4) Производить учет влияния решетки при расчете ездового пояса на горизонтальный изгиб и кручение и учитывать дополнительные усилия, возникающие при этом в решетке;

5) Расчет проводить с использованием конечных элементов оболочки. Использовать конечно-элементную сетку, содержащую не менее 15 элементов по высоте нижнего пояса фермы, изготовленной из тонкостенного закрытого коробчатого профиля, и не менее четырёх элементов по высоте полки двутавровой балки. Использовать четырехугольные элементы с соотношением сторон, близким к единице. Применение треугольных конечных элементов не рекомендуется [126];

6) Выполнять расчёт ППФ в составе полного каркаса или части сооружения. Для уменьшения количества конечных элементов и времени решения при создании расчетной схемы можно выделить в продольном направлении рассматриваемого здания ППФ с опорными колоннами, а в поперечном направлении необходимо учитывать конструкции смежных пролетов [102, 126].

4.3. Расчет напряжений

Основные (элементарные) напряжения вычисляются в элементах ППФ в общем случае (произвольное поперечное сечение, не имеющее осей симметрии) по формулам:

– от растяжения-сжатия:

$$\sigma_x = \frac{N}{A}\ ; \tag{4.27}$$

– от изгиба в плоскости xOy

$$\sigma_x = \frac{M_z\left(I_{y_0}y_o - I_{y_0z_0}z_o\right)}{\Delta I}\ ;$$

$$\tau_{xs} = \frac{-Q_y\left(I_{y_0}S_{z_0} - I_{y_0z_0}S_{y_0}\right)}{\delta_s \Delta I}\ ; \tag{4.28}$$

– от изгиба в плоскости xOz

$$\sigma_x = \frac{M_y\left(I_{z_0}z_o - I_{y_0z_0}y_o\right)}{\Delta I}\ ;$$

$$\tau_{xs} = \frac{-Q_z\left(I_{z_0}S_{y_0} - I_{y_0z_0}S_{z_0}\right)}{\delta_s \Delta I}\ ; \tag{4.29}$$

где S_{y_0} и S_{z_0} определяются по п. 3.4. [52]. Для сечений, обладающих соответствующими осями симметрии, формулы (4.28), и (4.29) переходят соответственно в формулы Л.Новье и Д.И.Журавского;

– от кручения в стержне замкнутого контура возникают:

– нормальные секториальные напряжения

$$\sigma_{x\omega} = \frac{B_\omega \omega}{I_\omega} \; ; \tag{4.30}$$

– касательные напряжения чистого кручения (в замкнутой части контура)

$$\tau_{ks} = \frac{\mp M_x}{8bh\delta_s} \; ; \tag{4.31}$$

где верхний знак относится к верхнему поясу и левой стенке, нижний – нижнему поясу и правой стенке;

– секториальные касательные напряжения (во всех точках контура)

$$\tau_{\omega s} = \frac{-M_\omega \overline{S_\omega}}{I_\omega \delta_s} \; ; \tag{4.32}$$

где $\overline{S_\omega}$ определяется по п. 3.13 [52].

Местные напряжения могут возникать от трех факторов: локального воздействия крановых (или других подобных) нагрузок, эксцентричности в передаче кранового давления на стенку стержня, местных подкреплений типа диафрагм и ребер жесткости. Практически эти напряжения свойственны лишь ездовым поясам ППФ. Методика определения местных напряжений приведена в [52].

4.4. Результаты расчёта подкраново-подстропильной фермы по предложенной аналитической методике

В данном разделе приведено сравнение результатов расчёта продольной ППФ по принятой аналитической методике с результатами расчёта по аналитической методике Руководства по проектированию стальных подкрановых конструкций [97] и результатами численных расчетов.

Объект исследования - ППФ конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Тип конструкции – продольная ППФ, пролет – 36 м, высота – 15,44 м (рисунок 3.16).

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 [97];

2. Предложенная аналитическая методика;

3. Численный расчёт с использованием стержневой плоской РС однопролётной ППФ с учетом эксцентриситета крепления решетки [52] (рисунок 3.25);

4. Численный расчёт с использованием стержневой плоской РС неразрезной ППФ (рисунок 3.26);

5. Численный расчёт с использованием пространственной РС из оболочечных конечных элементов (рисунок 4.6).

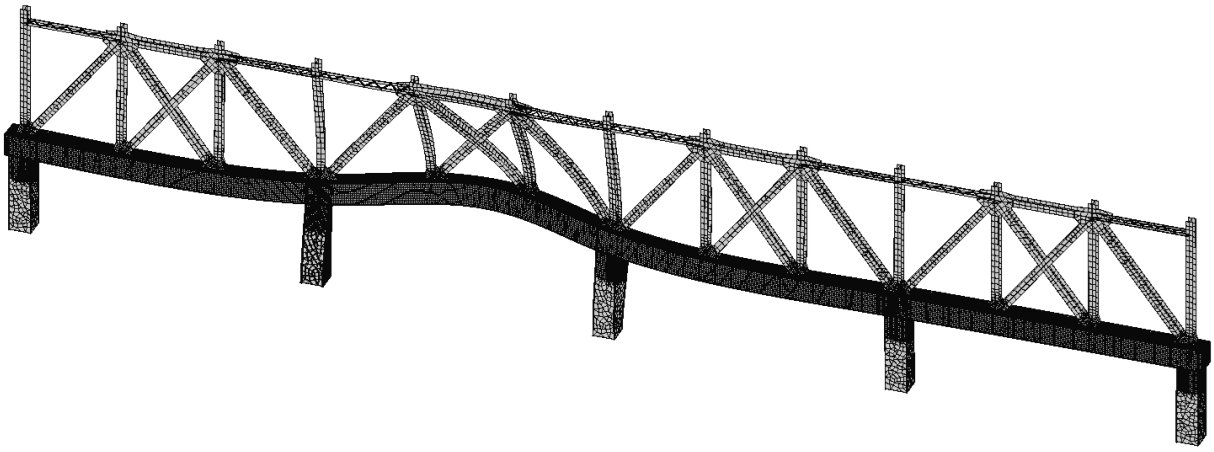


Рисунок 4.6 – Деформации пространственной РС при горизонтальной нагрузке от торможения крана в середине пролёта

Перечисленными методиками определены усилия и напряжения в середине пролёта (сечение 2–2 рисунка 3.16) для каждого из указанных выше видов нагрузки. Загружение осуществлялось одним краном грузоподъемностью 450 т.

Вес груза – 396 т. Рассмотрены два наиболее опасных [26, 27] положения крана – в середине пролёта и на опоре. Значение горизонтальной нагрузки от торможения тележки определено по [51] в соответствии с указаниями СП 20.13330.2016. Сбор постоянных нагрузок от собственной массы ППФ и массы поддерживаемых ею других элементов сооружения приведен в пункте 2.1.

Результаты определения напряжений приведены на рисунках 4.7 и 4.8.

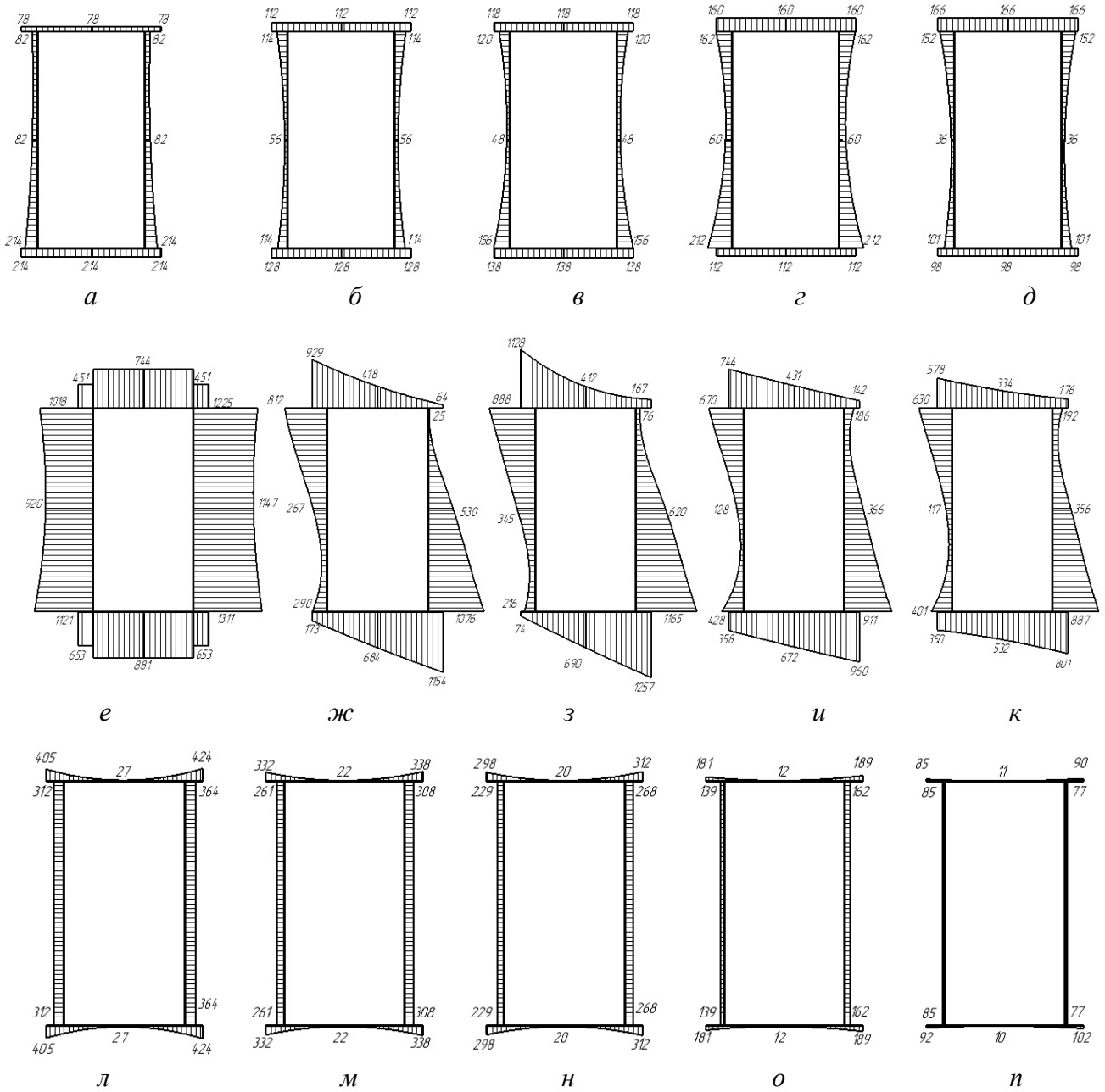
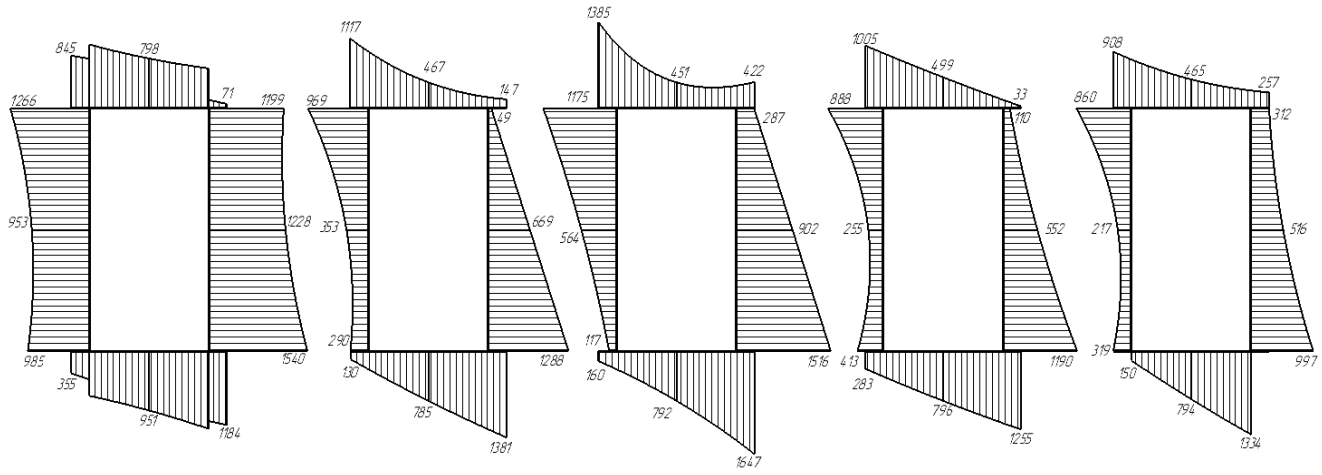


Рисунок 4.7 – Эпюры эквивалентных напряжений [кгс/см^2] ездового пояса в середине пролета (сечение 2–2 рисунка 3.16), полученные: а – по методике №1; б – по методике №2; в – по методике №3; г – по методике №4; д – по методике №5 (постоянная нагрузка); е – по методике №1; ж – по методике №2; з – по методике №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)



а *б* *в* *г* *д*

Рисунок 4.8 – Эпюры эквивалентных напряжений [кгс/см^2] ездового пояса в середине пролета (сечение 2–2 рисунка 3.16), полученные: а – по методике №1; б – по методике №2; в – по методике №3; г – по методике №4; д – по методике №5 (постоянная и крановая нагрузки)

При переходе от пространственной к плоской КЭ модели максимальные напряжения в рассматриваемом сечении:

– при вертикальном изгибе в стенках возрастают на 6 %, в верхней полке снижаются на 4 %, в нижней полке возрастают на 14 %;

– при кручении в стенках возрастают на 3 %, в верхней полке – на 22 %, в нижней полке – на 17 %;

– при горизонтальном изгибе в стенках и полках возрастают более чем в 2 раза.

При переходе от плоской неразрезной к плоской однопролетной КЭ модели максимальные напряжения в рассматриваемом сечении:

– при вертикальном изгибе в стенках и верхней полке снижаются на 24 %, в нижней полке возрастают на 19 %;

– при кручении в стенках и нижней полке возрастают на 22 %, в верхней полке – на 34 %;

– при горизонтальном изгибе в стенках и полках возрастают на 40%.

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 [97] 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 [97] 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 РС [52, 61, 64, 67]. Необходимо рассмотреть возможность разработки метода учета неразрезности РС многопролетных ППФ на стадии предварительного расчета. Проверочный расчет многопролетных ППФ следует проводить по неразрезной РС [129].

Формы эпюр эквивалентных напряжений от постоянной и тормозной крановой нагрузок, полученных различными методами, совпадают. При горизонтальном изгибе ездового пояса аналитические расчёты и численные расчёты с применением плоских стрежневых 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% [15, 51]. Минимальная погрешность в определении напряжений от горизонтального изгиба при аналитических и численных расчётах с использованием плоских стержневых систем – более 200 % [67]. 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 КЭ [51, 62, 129].

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 КЭ.

Предложенная аналитическая методика предварительного расчёта позволяет значительно увеличить точность определения напряжения в сравнении с ранее используемой аналитической методикой [97]. Точность определения максимальных напряжений в рассматриваемом сечении (сечение 2–2 рисунка 3.16) относительно результатов численного расчёта пространственной КЭ модели в сравнении с методикой [97] 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 %.

Выполнена проверка по предельным состояниям.

При выполнении расчёта по предельным состояниям приложены все нагрузки в соответствии с пунктом 4.1. Сбор нагрузок приведен в пункте 2.1.

Наибольшие напряжения возникают в ездовом поясе в зоне примыкания к верхней полке стенки и опорной диафрагмы и зоне стыка ребер жесткости с поясами и стенкой.

Максимальное напряжение при расположении двух кранов в середине пролета в зоне сопряжения прорезной фасонки с опорной диафрагмой $\sigma_{max} = 55779\ \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} > [\sigma_{\text{т}}] = 52000\,\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$, что соответствует результатам натурных измерений [29].

Проверка по второй группе предельных состояний по вертикальному предельному прогибу:

$$f = 20{,}8\ \text{мм} < f_u = \frac{36000}{600} = 60\ \text{мм}.$$

Проверка по второй группе предельных состояний по горизонтальному предельному прогибу в соответствии с прил. Д СП 20.13330.2016 проводится от сил торможения тележки одного крана:

$$f_{\text{т}} = 3{,}5 \text{ мм} < f_u = \frac{36000}{2000} = 18 \text{ мм}.$$

Так как при кручении ездовой пояс ППФ испытывает горизонтальный изгиб, в проверку по горизонтальным предельным прогибам следует включать составляющую горизонтального перемещения от несимметричной вертикальной нагрузки, вызванной односторонним расположением крана:

$$f_{\text{т+к}} = 8{,}5 \text{ мм} < f_u = \frac{36000}{2000} = 18 \text{ мм}.$$

4.5. Выводы по главе 4

1. Составлен перечень основных нагрузок, воспринимаемых ППФ. Актуализирован порядок расчета крановых нагрузок.

2. Уточнена 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.

2. Составлена методика предварительного расчета ППФ.

3. Приведены рекомендации по проверочному расчёту ППФ.

4. Предложенная аналитическая методика предварительного расчёта позволяет значительно увеличить точность определения напряжения в сравнении с ранее используемой аналитической методикой [97].

5. Проверка по второй группе предельных состояний осуществляется в соответствии с СП 20.13330.2016, который не выделяет ППФ среди других подкрановых конструкций. Прогиб рекомендуется определять от сил торможения тележки одного крана, направленных поперек пути. При кручении ездовой пояс ППФ испытывает горизонтальный изгиб, вклад в общее горизонтальное перемещение составляющей от несимметричной вертикальной нагрузки,

вызванной односторонним расположением крана, может превышать вклад от горизонтальной нагрузки, вызванной торможением тележки. 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.

6. При горизонтальном изгибе ездового пояса, вызванного торможением тележки крана, плоские стрежневые РС дают значительную погрешность в определении перемещений и напряжений относительно пространственной РС. 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. При переходе от неразрезной к разрезной РС происходит существенное снижение точности результатов расчета. Необходимо рассмотреть возможность разработки метода учета неразрезности РС многопролетных ППФ на стадии предварительного расчета.

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 ей 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.

Список литературы

1. Александров А.В. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы: учеб. для вузов / А.В. Александров, Б.Я. Лащеников, Н.Н. Шапошников; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1983. - 488 с.

2. Апалько А.А. Напряженное состояние стенок сварных подкрановых балок под действием местных статических нагрузок: автореф.дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Александр Андреевич Апалько. - М.:МИСИ, 1960. - 20 с.

3. Бейлин Е.А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержней открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей / Е.А. Бейлин // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. Межвузовский тематический сборник трудов. - ЛИСИ, 1991. - С. 57-74.

4. Березкина Ю.В. Остаточный ресурс сварных ездовых балок коробчатого сечения с учётом инерционных воздействий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Юлия Викторовна Березкина - Магнитогорск, 2007. - 23 с.

5. Беляев Ю.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Ю.И. Беляев, В.С. Корниенко. - М.: Строиздат, 1968. – 206 с.

6. Бриккель Д.М. Анализ НДС подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на стадии роста усталостной трещины / Д.М. Бриккель // Материалы международной научно-практической конференции «Наука сегодня: задачи и пути их решения», Вологда, 31 мая 2017 года. - Вологда, Издательство ООО "Маркер", 2017. - С. 10–11.

7. Броуде Б.М. Распределение сосредоточенного давления в металлических балках / Б.М. Броуде. – М.: Стройиздат, 1950. – 84 с.

8. Броуде В.И. Надежность подъемно-транспортных машин / В.И. Броуде, Л.Н, Семенов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 183 с.

9. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций / Д.В. Бычков. – М.: Госстройиздат, 1962. – 475 с.

10. Валь В.Н. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. - М.: Стройиздат, 1987. - 219 с.

11. Васильев А.В. Разработка конструкций соединений на нестандартных крепежных элементах для восстановления подкрановых балок с усталостными трещинами: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01 / Васильев Александр Витальевич – Пенза, 1998. – 24 с.

12. Веденников Г.С. Металлические конструкции / Г.С. Веденников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева – общий курс – 7-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 760 с.

13. Власов В.З. Избранные труды. Т. 2 Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения общей технической теории оболочек / В.З. Власов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 328 с.

14. Власов В.З. Строительная механика тонкостенных пространственных систем / В.З. Власов. – М.: Гостехиздат, 1950. – 695 с.

15. 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.

16. Востров В.К. К расчёту на прочность толстолистового проката, нагружаемого в направлении толщины/ В.К. Востров // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчёт сооружений». ФГУП «НИЦ Строительство» – 2007. – №1. – С.13-18.

17. Гардеев, В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гардеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин. –М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 477 с.

18. Горев В.В. Металлические конструкции. Том 2. Конструкции зданий / В.В. Горев. – М. : Высшая школа, 2004. – 551 с.

19. Горицкий В.М. Анализ причин трещинообразования в сварных соединениях главных балок металлоконструкций выездной эстакады /

В.М. Горицкий, О.В. Горицкий // Промышленное и гражданское строительство. - 2001. - №6. - С. 29–31.

20. Горицкий В.М. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конвертерного производства ОАО «Северсталь» / В.М. Горицкий, В.Н. Артюхов, Е.А. Щербаков, Г.Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. – 2001. – №6. – С. 31-34.

21. Горькин И.Н. Повышение выносливости неразрезных металлических подкрановых конструкций: автореф. дис. … канд. техн. наук: 2.1.1 / Гарькин Игорь Николаевич – Пенза, 2022. – 23 с.

22. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. - М: Стандартинформ, 2019. - 16 с.

23. Гребеник В.М. Повышение надёжности металлургического оборудования: справочник / В.М. Гребеник, А.В. Гордиенко, В.К. Цапко. - М.: Металлургия, 1988. – 688 с.

24. Джанелидзе Г.Ю. Статика упругих тонкостенных стержней / Г.Ю. Джанелидзе, Я.Г. Пановко. – М. – Л.: Гостехиздат. 1948. – 208 с.

25. Доркин В.В. Металлические конструкции: учебник / В.В. Доркин, М.П. Рябцева. – М.: ИНФА-М, 2009. – 457 с.

26. Евдокимов В.А. К вопросу повышения расчетной долговечности элементов конструкции подкрановых балок / В.А. Евдокимов, Е.А. Щербаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №5. – С.28-30.

27. Ельнов Н.А. Анализ применения систем типа «подкраново-подстропильные фермы» в большепролетных цехах одноэтажных промышленных зданий / Н.А. Ельнова, Е.А. Кочетова // Труды научного конгресса 14-го российского архитектурно-строительного форума, Нижний Новгород, 17–20 мая 2016 года. - Нижний Новгород, издательство ННГАСУ, 2016. - С. 143–146.

28. Еремин К.И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.23.01 / Еремин Константин Иванович. – М., 1996. – 45 с.

29. Еремин К.И. Предотвращение разрушений строительных металлических конструкций: монография / К. И. Еремин. - М-во образования Рос. Федерации, Магнитог. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова. - Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2004. - 235 с.

30. Еремин К.И. Изучение действительной работы циклически нагруженных строительных металлоконструкций / К.И. Еремин, С.А. Нищета, М.В. Нащекин. – Магнитогорск: МГМА, 1996. – 228 с.

31. Еремин К.И. Металлические конструкции промышленных зданий, сооружений и кранов-перегружателей металлургического комплекса / К.И. Еремин, С.А. Нищета, М.В. Нащекин. – Магнирогорск: МГМА, 1997. – 110 с.

32. Еремин К.И. Реконструкция и усиление промышленных зданий с металлическим каркасом / К.И. Еремин, С.А. Нищета. - Магнитогорск, МГМИ, 1994. – 56 с.

33. Еремин К.И. Особенности эксплуатации металлических конструкций промышленных зданий: монография / К.И. Еремин, А.Н. Шувалов, Г.А. Павлова, С.А. Матвеюшкин, М.В. Нащекин, Е.Л. Алексеева; под ред. К.И. Еремина: М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. стр. ун-т». – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2012 – 248 с.

34. Еремин К.И. Влияние эксцентриситета на напряженно-деформированное состояние верхней зоны стенок подкраново-подстропильных ферм / К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Наука и безопасность. - 2015. - № 5(18). - С. 49–52.

35. Еремин К.И. Сценарии прогрессирующего обрушения неразрезных подкраново-подстропильных ферм с накопленными усталостными повреждениями / К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. - №5 – С. 46 -49.

36. Еремин К.И. Моделирование развития усталостных повреждений в подкраново-подстропильных фермах / К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Вестник МГСУ. - 2014. - №5 - С. 30-38.

37. Ерёмин К.И. Напряженно - деформированное состояние узлов подкраново-подстропильных ферм / К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Промышленное и гражданское строительство. - 2012. - №4. - С. 52-54.

38. Ерёмин К.П. Закономерность повреждений подкраново-подстропильных ферм па стадии эксплуатации / К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Промышленное и гражданское строительство. - 2013. - №4. - С. 34-36.

39. Заикин А.И. Расчет строительных конструкций методом конечных элементов на ЭВМ / А.И. Заикин. – Магнитогорск: МГМА, 1996. - 67 с.

40. Калашников, Г.В. Настоящее и будущее подкрановых балок / Г.В. Калашников // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2007. – №7. – С. 2-9.

41. Карпиловский В.С. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитавренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. - Москва: СКАД СОФТ, 2015. – 848 с.

42. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.

43. Кузьмишкин А.А. Выносливость металлических подкрановых конструкций при тяжелом режиме циклических нагружений: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01/ Кузьмишкин Алексей Александрович. – Пенза, 2006. – 23 с.

44. Кудишин Ю.И. Некоторые особенности работ сварных подкрановых балок: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01/ Кудишин Юрий Иванович. – М., 1967. – 10 с.

45. Кунин Ю.С. Исследование процессов нагружения стальных подкрановых балок вертикальными крановыми нагрузками в цехах металлургического производства: автореф. дис. … канд.техн.наук: 05.23.01 / Кунин Юрий Саулович. – М.: МИСИ, 1970. – 15 с.

46. Лампси Б.Б. Металлические тонкостенные несущие конструкции при локальных нарузках / Б.Б. Лампси. – М.: Стройиздат, 1979. – 270 с.

47. Лампси Б.Б. Оценка влияния особенностей конструкции и нагрузки на напряженное состояние и прочность ездовых поясов систем типа подкраново-

подстропильных ферм: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, 01.02.03 / Лампси Борис Борисович. – Горький: Горьковский ордена трудового красного знамени инженерно-строительный институт им. В.П. Чкалова 1983. – 220 с.

48. Лампси Б.Б. Расчет подкраново-подстропильных ферм / Б.Б. Лампси - Горький, 1978. - 52 с.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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

53. Лаштанкин А.С. Повышение выносливости подрельсовой зоны подкрановых балок снижением динамики воздействий колёс мостовых кранов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Лаштанкин Алексей Сергеевич. - Пенза, 2011. - 20 с.

54. Лещенко А.П. Новые начала строительной механики тонкостенных конструкций: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Лещенко Александр Петрович - С-Пб., 1997. - 23 с.

55. Лещенко А.П. Новые начала строительной механики тонкостенных конструкций / А.П. Лещенко. – М.: Стройиздат, 1995. - 720 с.

56. Лужин О.В. Проблемы расчета строительных конструкций на надежность / О.В. Лужин // Прочность, надежность и долговечность строительных конструкций. – Магнитогорск, 1990.

57. Лужин О.В. Теория тонкостенных стержней замкнутого профиля и её применение в мостостроении / О.В. Лужин. - М.: ВИА, 1959. - 296 с.

58. Мазур Г.Э. Конечные элементы для решения задач о концентрации напряжений в статической и динамической постановке: дис. … канд. техн. наук: 05.23.17 / Мазур Геннадий Эдуардович. – Ростов, 2000. – 227 с.

59. Мандриков А.П. Примеры расчета металлических конструкций: учебное пособие / А.П. Мандриков. - 3-е изд., стереотипное — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 432 с.

60. 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.

61. Маркина Ю.Д. Кручение нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухов. - 2023. - № 11. - С. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

62. Маркина Ю.Д. Автоматизированный предварительный расчёт как начальный этап BIM-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.

63. Маркина Ю.Д. Особенности статического расчёта подкраново-подстропильной фермы / Ю.Д. Маркина // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сборник трудов 13ой 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. Мельников Н.П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития / Н.П. Мельников. – М.: Строиздат, 1983. – 543 с.

69. Металлические конструкции. Общий курс: учебник для вузов / Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Г. С. Ведеников, [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 384 с.

70. Металлические конструкции / Сб. тр. МИСИ – М., 1977. – 103 с.

71. Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В.Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) — М.: изд-во АСВ, 1998. — 576 с.

72. Металлические конструкции. В 3 т. Т.2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова) - М.: изд-во АСВ, 1998. - 512 с.

73. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения: Учеб. Пособие для строительных вузов / В.Г. Аржаков, В.И. Бабкин, В.В. Горев и др.; Под ред. В.В. Горева. – М.: Высш. шк., 1999. – 544 с.

74. Митюгов, Е.А. Исследование кручения верхнего пояса и местного изгиба стенки в металлических подкрановых балках: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01/ Митюгов Евгений Александрович. – М., 1970. – 20 с.

75. Михейковский И.Е. Расчет оболочек и складок методом перемещений / И.Е. Михейковский. – М.: Госстройиздат, 1960. – 174 с.

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

77. Нежданов К.К. Преимущества использования неразрезных подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Горькин // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. - 2018. - № 1 (6). - С. 9-16.

78. Нежданов К.К. Перспективные разработки в области конструирования подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Горькин // Образование и наука в современном мире. Инновации. - 2018. - № 2 (15). - С. 204-213.

79. Нежданов К.К. Результаты испытаний неразрезных подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Горькин, Д.Х. Курткезов // Региональная архитектура и строительство. - 2020. - № 3 (44). - С. 78-83.

80. Нежданов К.К. Решение проблемы выносливости подкрановых балок при тяжёлом режиме эксплуатации: моногр. / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 124 с.

81. Нежданов К.К. Подкрановые конструкции: учеб. пособие / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 140 с.

82. Никитина Е.А. Определение остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с учетом накопления повреждений в реальных условиях эксплуатации / Е.А. Никитина, П.А. Хазов, Д.М. Бриккель // Приволжский научный журнал. - 2018. - №1 - С. 9-14.

83. Нищета С.А. Исследование воздействий мостовых кранов на стальные колонны промышленных зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Нищета Сергей Алексеевич - М., 1983. - 20 с.

84. Овсянников В. Е. Некоторые аспекты оценки состояния подкрановых балок / В.Е. Овсянников // Вестник КГУ. - 2011. - № 1. - С. 3-5.

85. Оценка напряженно-деформированного состояния продольных сварных стыковых соединений коробчатого пролетного строения методом магнитной памяти металла / В.М. Горицкий, А.В. Маланьин, О.В. Горицкий, Г.М. Плесков // Промышленное и гражданское строительство. - 2011. - №6. - С. 33–36.

86. Патент № 754013 СССР, МПК Е04С 3/00 (2006.01). Подкраново-подстропильная ферма: № 2651613 : заявл. 31.07.1978 : опубл. 07.08.1980 / Толстобров Г.М.; заяви. Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского и проектного института строительных металлоконструкций. – 3 с.

87. Патент № 2235674С2 Российская Федерация, МПК В66С 6/00 (2006.01), В66С 7/00 (2006.01), Е04С 3/04 (2006.01). Подкраново-подстропильная балка: № 2002112378/11 : заяви. 07.05.2002 : опубл. 10.09.2004 / Нежданов К.К., Нежданов А.К., Туманов В.А.; заяви. Пензенская государственная архитектурно-строительная академия. — 12 с.

88. Патент № 2003116199А Российская Федерация, МПК В66С 7/00 (2006.01). Подкраново-подстропильная балка: № 2003116199/11 : заяви. 02.06.2003 : опубл. 27.11.2004 / Нежданов К.К., Нежданов А.К., Кузьмишкин А.А.; заяви. Туманов В.А. — 1 с.

89. Патент № 2674736 Российская Федерация, МПК В66С 7/00 (2006.01). Способ защиты от обрушения подкраново-подстропильных ферм: № 2017102086 :

заяви. 23.01.2017 : опубл. 12.12.2018 / Нежданов К.К., Нежданов А.К., Маслов А.Д., Игошин А.А.; заяви. ПГУАС — 18 с.

90. Плевков В.С. Оценка технического состояния, восстановление и усиление строительных конструкций инженерных сооружений: учебное издание / В.С. Плевков, А.И. Мальганов, И.В. Балдин; Под ред. В.С. Плевкова. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 316 с.

91. Потапов А.Н. Динамический расчет подкрановой фермы при конструктивно нелинейной работе ее элементов / А.Н. Потапов, Н.А. Зямбаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». - 2015. - № 3. С. 26–31.

92. Рамшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство / Л.З. Рамшинский. - М.: Наука, 1971. – 192 с.

93. Рекомендации по освидетельствованию подкрановых конструкций ОНРС ККЦ Магнитогорского металлургическая комбината. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова, 1990.

94. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении: монография / А.Н. Романов. – М.: Наука, 1988. – 279 с.

95. Романов М.В. Напряжённо-деформированное состояние опорных частей подкраново-подстропильных ферм: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Романов Михаил Викторович - Магнитогорск, 2002. - 166 с.

96. Рудаков К.Н. Femap 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. К.: КПИ, 2011. – 317 с..

97. Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций/ ЦНИИПроектстальконструкция. – М.: 1976. – 112 с.

98. Сердюк В.В. Прогнозирование повреждаемости верхней зоны стенки эксплуатируемых сварных подкрановых балок интенсивной нагруженности: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01/ Сердюк Вячеслав Викторович. – Липецк, 2005. – 25 с.

99. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. - М: Минстрой России, 2016. - 104 с.

100. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 11-2381*. - М: Минстрой России, 2017. - 148 с.

101. СП 294.13258000.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования. - М.: Минстрой России, 2017. - 158 с.

102. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Стренг Г., Фикс Дж. – М.: Мир, 1977. – 350 с.

103. Строительные конструкции нефтегазовых объектов: учебник / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков, В.Н. Мохов и др. – СПб.: ООО «Недра», 2008. -780 с.

104. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы: учебник для ВУЗов / А,В, Александров, Б.Я. Лащеников, Н.Ню Шапошников; Под ред. А.Ф. Смирнова – М.: Строиздат, 1983. – 488 с.

105. Туснина О.А. Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания / О.А. Туснина // Промышленное и гражданское строительство. - 2021. - № 9. - С. 60-65. doi: 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65.

106. Туснина О.А. Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов / О.А. Туснина // Вестник МНСУ. - 2023. - № 2. - С. 241-253. doi: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253.

107. Туснина О.А. Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конвертерного цеха / О.А. Туснина, С.А. Павлов // Вестник гражданских инженеров. - 2019. - № 6 (77). - С. 114–122. doi: 10.23968/1999–5571-2019-16-5-114-122.

108. Туснина О.А. Опыт замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой подкраново-подстропильной фермы / О.А. Туснина, В.Ф. Такки, И.Ф. Егоров // Промышленное и гражданское строительство. - 2023. - № 4. - С. 21-28. doi: 10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.

109. Уваров Б.Ю. Исследование действительного, напряженного состояния подкрановых балок и их элементов / Б.Ю. Уваров, Ю.И. Кудишин, В.И. Смирнов // Металлические конструкции: сб. – М.: Стройиздат, 1966. - С. 179-194.

110. Улыбин, А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния стальных балок перекрытий /А.В. Улыбин // Гидротехническое строительство. – 2009. – №12. – С. 25-27.

111. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций / А.А. Уманский. — М. Оборониздат: 1939.— 112 с.

112. Федосеев В.П. Экспериментально-теоретическое исследование усталостной прочности сжатой зоны стенки сварной подкрановой балки: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.01 / Федосеев В.П. – М., 1975.- 23 с.

113. Федотов В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел / В.В. Федотов. – Ташкент: Изд-во ФАИ Узбек. ССР, 1985. – 167с.

114. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. 2 / А.П. Филин.— М.: Наука, 1978.— 616 с.

115. Чалков, Г.В. Напряжения в стенках подкрановых балок повышенного ресурса при местном кручении верхнего пояса: дис. … канд. техн. наук: 05.23.01/ Чалков Геннадий Владимирович. – Новосибирск, 2012. – 184 с.

116. Чаусов И.Г. Моделирование кинетики деформирования материала в зоне предразрушения / И.Г. Чаусов, А.З. Богданович // Проблемы прочности. - 2003. - №2. - С. 54-65.

117. Шишов К.А. Ресурс металлических конструкций промышленных зданий предприятий черной металлургии / К.А. Шишов, В.Ф. Сабуров, В.И. Камбаров // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1988. – №12. – С. 15-19.

118. Шульга С.Н. Ремонт усталостных трещин в ездовом нижнем поясе подкраново-подстропильной фермы / С.Н. Шульга, Г.А. Арутюнян // Предотвращение аварий зданий и сооружений. URL: http://www.pamag.ru/pressa/remont-ustalostnih-treshin (дата обращения: 14.09.2020).

119. Шульга С.Н. Методика оценки живучести и определение остаточного ресурса подкраново-подстропильных ферм с трещиноподобными дефектами / С.Н. Шульга // Наука и безопасность. - 2014. - № 4(13). - С. 1–33.

120. Шульга С.Н. Остаточный ресурс подкраново-подстропильных ферм с неразрезным нижним поясом на стадии роста усталостной трещины: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Шульга Степан Николаевич – М., 2015. - 133 с.

121. Chen W.F. Handbook of Structural Engineering / W.F. Chen, E.M. Lui - 2 edition. - New York, CRC Press, Boca Raton, 2005. – 1026 p.

122. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross-sections exhibiting no warping / A. Chiskis, R. Parnes // Journal of Applied Mechanics. - 2000. - Vol. 67. - P. 460–464.

123. Citarelli S. Fatigue failure of runway beams due to wheel loads / S. Citarelli, M. Feldmann // Special Issue: Proceedings of Nordic Steel. - 2019. - Vol. 3. Iss. 3-4. - P. 621-628.

124. Elluin F. An energy-based failure behavior of materials / F. Elluin, D. Kulawski // J. of Microstructure and Mechan. Behavior of Materials. - 1986. - P. 591-600.

125. Engel H. Structure System / H. Engel. - Hatje Cantz Verlag, Zeppelitinstra, Ostfildern, Germany; 5th edition, 2013 – 366 p.

126. Davison B. Steel Designers' Manual / B. Davison, W. Owens Graham. - Wiley-Blackwell, 2018 – 451 p.

127. Doostfatemeh A. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges / A. Doostfatemeh, M. Hematiyan, S. Arghavan // Journal of Mechanics. - 2009. - Vol. 25. No. 4. - P. 401–409.

128. Gonçalves R. Buckling behaviour of thinwalled regular polygonal tubes subjected to bending or torsion / R. Gonçalves, D. Camotim // Thin-Walled Structures. - 2013. - Vol. 73. - P. 185–197.

129. Tusnina O.A. Finite element analysis of crane secondary truss / O.A. Tusnina // Magazine of Civil Engineering. - 2018. - № 1(77). - P. 68-89. doi: 10.18720/MCE.77.7.

130. Kujawa M. Elastic distortional buckling of thin-walled bars of closed quadratic cross-section / M. Kujawa // Mechanics and Mechanical Engineering. - 2013. - Vol. 17. № 2. - P. 119–126.

131. Li L-Y. Free torsion of thin-walled structural members of open and closed-sections / L-Y. Li, D. Easterbrook // Applied Mathematics and Mechanics. - 2014. - Vol. 35. № 1. - P. 25–32.

132. Maccrimmon. R.A. Guide for the design of crane-supporting steel structures / R.A. Maccrimmon. - Canadian Institute of Steel Construction, 2004. – 129 p.

133. 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 // Приволжский научный журнал. - 2024. - № 1 (69). - С. 11-21.

134. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams / L. Mentrasti // Thin-Walled Structures. - 1990. - Vol. 10. № 3. - P. 175–193.

135. Musat S.D., Epureanu B.I. Study of warping torsion of thin-walled beams with closed cross-section using macroelements / S.D. Musat, B.I. Epureanu // Communications in Numerical Methods in Engineering. - 1996. - Vol. 12. - P. 873–884.

136. Omidvari A. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion / A. Omidvari, M. Hematiyan // International Journal of Engineering. - 2015. - Vol. 28. № 8. - P. 1226–1232.

137. Rice J.R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notched and cracks / J.R. Rice // J. Appl. Mech. – 1968. - № 35. – P. 287-298.

138. Rykaluk K. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders-locations, causes and calculations / K. Rykaluk, K. Marcinczak, S. Rowicski // Archives of Civil and Mechanical Engineering. - 2018. - № 18. - P. 69-82.

139. Srinivasan V. Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion / V. Srinivasan, T. Purushothaman, S. Chatterjee // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. - 2017. - Vol. 8. № 8. - P. 1580–1587.

140. Wardenier J. Evaluation of cracks in an offshore crane runway girder / J. Wardenier, P. de Vries, G. Timmermann // Steel Construction. - 2017. - No. 10. - P. 67-71.

141. Zolina, T.V. Revisiting the Reliability Assessment of frame constructions of Industrial Building / T.V. Zolina, P.N. Sadchikov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752–753. – P. 1218–1223.

Приложение 1. Акты внедрения

Акт внедрения ООО «Приволжский Центр диагностики строительных конструкций»

ООО " ПЦДСК " " ПРИВОЛЖСКИЙ ЦЕНТР ДИАГНОСТИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ "

Общество с ограниченной ответственностью
«Приволжский Центр диагностики строительных конструкций»
603132, г. Нижний Новгород, ул. Молитовская, д. 6, корп. 2, офис.8,
Тел. 8-(831)-283-05-77
E-mail:pcdsk@pcdsk.ru, www.pcdsk.ru, ОГРН 1145258003582,
ИНН 5258115936, КПП 525801001

АКТ

о применении результатов диссертационной работы Маркиной Юлии Дмитриевны «Расчёт подкраново-подстропильных ферм с учетом упругой податливости узлов примыкания элементов решетки к ездовому нижнему поясу»

В ходе диссертационной работы Маркиной Юлией Дмитриевной было проведено исследование:

- деформативно-жесткостных характеристик ферм;
- влияния жесткости узловых соединений на напряжения в поясах фермы;
- методов учёта жесткости узловых соединений при аналитическом и численном расчёте;
- влияния расцентровки узлов примыкания решетки к поясу фермы на её напряженное состояние;
- напряженно-деформированного состояния поясов фермы при изгибе и кручении.

Результаты исследования использованы компанией ООО «Приволжский Центр диагностики строительных конструкций» при выполнении:

- экспертизы строительных конструкций и инженерных систем отдельностоящего здания (Корпус цеха рулевых колонок) с пристройками лит. 64А1-64А2 (нежилое);
- экспертизы строительных конструкций литейного участка по производству черного и цветного литья по адресу: г. Нижний Новгород, пр. Ленина, д. 88, Литейный цех №1";
- экспертизы строительных конструкций производственного корпуса МСК-11 (навес в/о Д/6-1 ООО "ТЕХНОПАРК") по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Монастырка, д. 17";
- проектной документации по ремонту деформированных стропильных ферм в осях U/7а-12а и V/7а-12а формовочного участка ЛЦ №1 БЕ МП ПАО «ГАЗ» в г. Нижнем Новгороде.

Внедрение результатов исследования позволило более полно использовать ресурс материалов и привело к экономическому эффекту.

Директор ООО «Приволжский Центр диагностики строительных конструкций» Казаков Е.В.

5 декабря 2024 г.

Акт внедрения ЗАО «Производственная компания Автокомпонент Нижний Новгород»

Autocomponent Производственная компания

Закрытое акционерное общество
«Производственная компания Автокомпонент Нижний Новгород»

603016, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Монастырка, 17а
Тел.: +7 (831) 259-58-57, +7 (831) 259-58-50, факс: +7 (831) 259-58-59
info@autocomponent.info, www.autocomponent.info

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Настоящим актом подтверждаем, что сотрудниками ФГБОУ ВО "Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет", заведующим кафедрой теории сооружений и технической механики, канд. тех. наук Лампси Борисом Борисовичем, доцентом той же кафедры канд. физ.-мат. наук Лампси Борисом Борисовичем и аспирантом той же кафедры Маркиной Юлией Дмитриевной в процессе выполнения работы по разработке усилений в двух пролетном производственном корпусе подкрановых балок пролетами 6,0 и 12,0 метров в связи с заменой мостового крана грузоподъемностью 10,0 тс. на 50,0 тс. были успешно внедрены результаты научных исследований, выполненных в процессе подготовки Маркиной Ю. Д. кандидатской диссертации по специальности «2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения». Результаты выполненной работы успешно реализованы на действующем предприятии и опубликованы в периодическом научном издании «Приволжский научный журнал"/ Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2022. - №2. Внедрение полученных результатов позволило обеспечить безостановочную работу действующего производства в течении всего периода проведения реконструкции.

Генеральный директор. Л.Ш. Сетдикова

04.09.2024 г.

Закрытое акционерное общество «Производственная компания Автокомпонент Нижний Новгород»

Акт внедрения «Технoплатформа 2035»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
проректор по научной работе
доктор технических наук
Монич Дмитрий Викторович

«11» 10 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертации Маркиной Юлии Дмитриевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения», были успешно применены при разработке систем мониторинга строительных конструкций в рамках проекта «Технoплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.), реализованного на базе научно-исследовательской лаборатории «Непрерывный контроль технического состояния зданий и сооружений» при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Заведующий лабораторией
«Непрерывный контроль технического
состояния зданий и сооружений»,
кандидат технических наук, доцент Хазов Павел Алексеевич

Акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
доктор исторических наук
Гордин Алексей Александрович
_____
«__» 09 2024 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Настоящим подтверждаем, что результаты кандидатской диссертации **Маркиной Юлии Дмитриевны** внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учре-ждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строитель-ный университет»:

Направление подготовки/ Специальность	Дисциплина	Внедренные результаты
08.04.01 Строительство (профиль: искусственный интеллект в строительной отрасли)	Системы автоматизированного проектирования в промышленном и гражданском строительстве	Применение упрощенных схем при расчете подкрановых конструкций. Изучение влияния параметров расчётных схем на точность результатов расчёта. Геометрическая оптимизация расчетных моделей при различных видах нагружения.
08.04.01 Строительство (профиль: промышленное и гражданское строительство)	Теория расчета и проектирования	Изучение влияния жесткости и расцентровки узлов на напряженно-деформированное состояние подкрановых конструкций. Методы учёта жесткости узловых соединений при аналитическом и численном расчёте. Методика расчёта ездового нижнего пояса подкраново-подстропильных ферм с учётом жесткости узловых соединений элементов решетки с ездовым поясом.
08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений (специализация: строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений)	Системы автоматизированного расчёта и проектирования в строительстве	Выбор уровня геометрической детализации компьютерной модели при выполнении статических расчетов. Применение упрощенных схем при расчете подкрановых конструкций.

Декан инженерно-строительного факультета, кандидат технических наук, доцент _____ Кондрашкин Олег Борисович

Приложение 2. Дипломы и сертификаты

Диплом победителя IX Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов «Наука будущего – наука молодых». 1 место секции Инженерные науки

SCIENCE OF THE FUTURE | САМАРА 29 ОКТЯБРЯ — 1 НОЯБРЯ 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

IX ВСЕРОССИЙСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ
НАУКА БУДУЩЕГО — НАУКА МОЛОДЫХ

ДИПЛОМ I МЕСТО

МАРКИНА
ЮЛИЯ ДМИТРИЕВНА

Победитель конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов

СЕКЦИЯ | ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ

СЕРГЕЙ САЛИХОВ
СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА

ДМИТРИЙ ИВАНОВ
СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА

ДИРЕКЦИЯ | ИНКОНСАЛТ

Диплом победителя II степени Международного конкурса научно-исследовательских работ «Призвание – изучать!»

ДИПЛОМ

Победителя II степени
Международного конкурса научно-исследовательских работ среди молодых ученых
«Призвание - изучать!»
Награждается

Маркина Юлия Дмитриевна

В номинации: Лучшая научная статья

Название работы: КРУЧЕНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ

Руководитель
Научно-творческого общества «Эрудит»
Маршов Н.В.

Россия, Москва
27.11.2023
№ СЗ_1560_2

Диплом победителя II степени в секции «Строительство и архитектура» XXVIII Нижегородской сессии молодых ученых

НИЖЕГОРОДСКАЯ СЕССИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ НИЖЕГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ

НИЖЕГОРОДСКИЙ НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

ДИПЛОМ ПОБЕДИТЕЛЯ

2 степени в секции «Строительство и архитектура»
XXVIII Нижегородской сессии молодых ученых

ВРУЧАЕТСЯ

Маркиной Юлии Дмитриевне

Министр образования и науки
Нижегородской области

М.Ю. Пучков

г. Нижний Новгород
2023 год

Диплом победителя I степени Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ «К вершинам познания - 2023»

Диплом победителя

I степени

Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ «К вершинам познания - 2023»

Награждается
Маркина Юлия Дмитриевна

Номинация: Лучшая научная статья

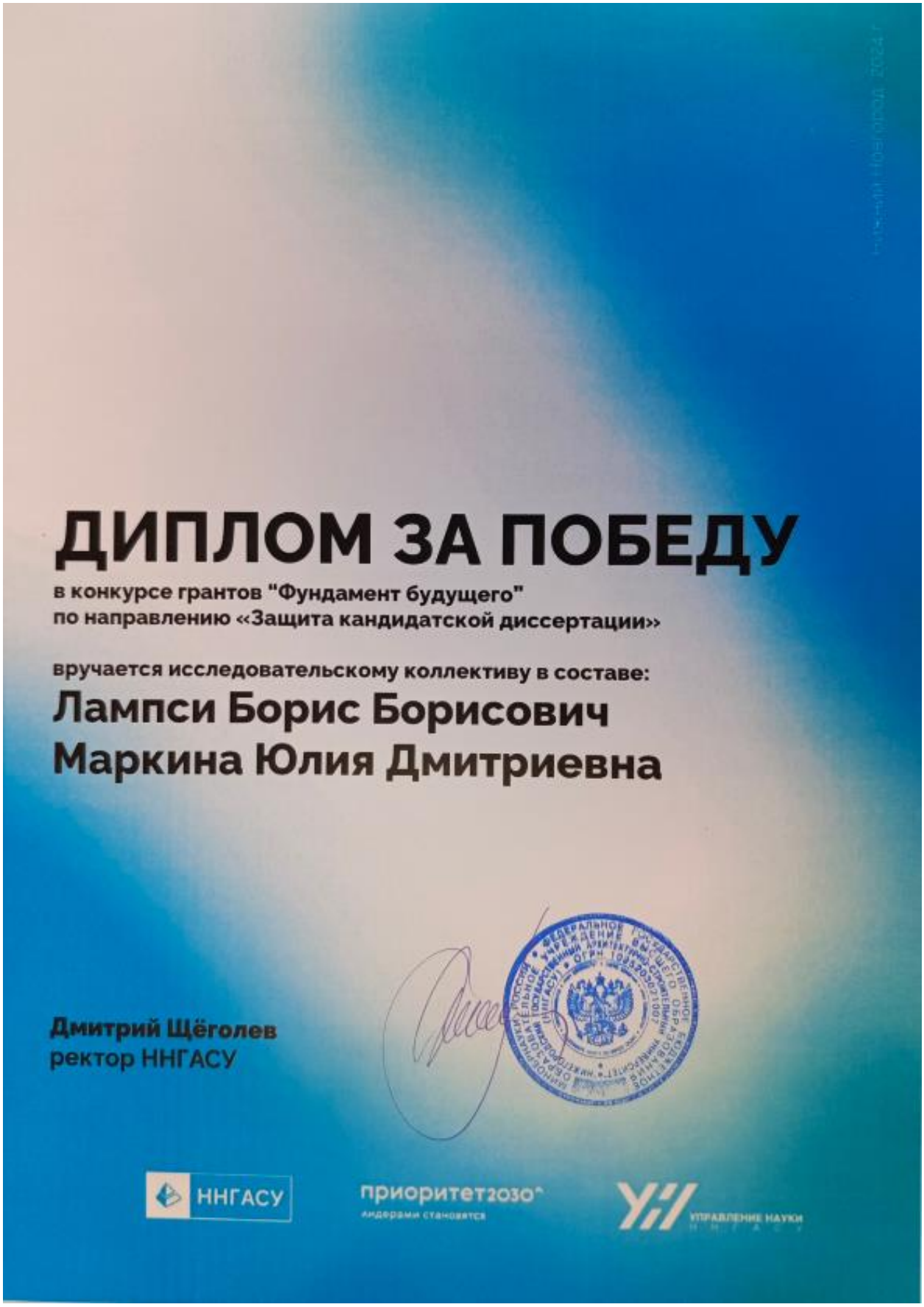
Направление: Строительство

Название работы: НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ ПРИ СТЕСНЕННОМ КРУЧЕНИИ

Руководитель Научно-творческого общества
«Просвещение»
Едаков Д.С.
Россия, Москва

25.12.2023
(№1140-06)

Диплом за победу в конкурсе грантов «Фундамент будущего»



ДИПЛОМ ЗА ПОБЕДУ

в конкурсе грантов "Фундамент будущего"
по направлению «Защита кандидатской диссертации»

вручается исследовательскому коллективу в составе:

Лампси Борис Борисович
Маркина Юлия Дмитриевна

Дмитрий Щёголев
ректор ННГАСУ

ННГАСУ

приоритет2030
лидерами становятся

УПРАВЛЕНИЕ НАУКИ
ННГАСУ

Сертификат за активное участие в XV академических чтениях, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г. Л.

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (МИНСТРОЙ РОССИИ)

федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)

Сертификат

Вручается:

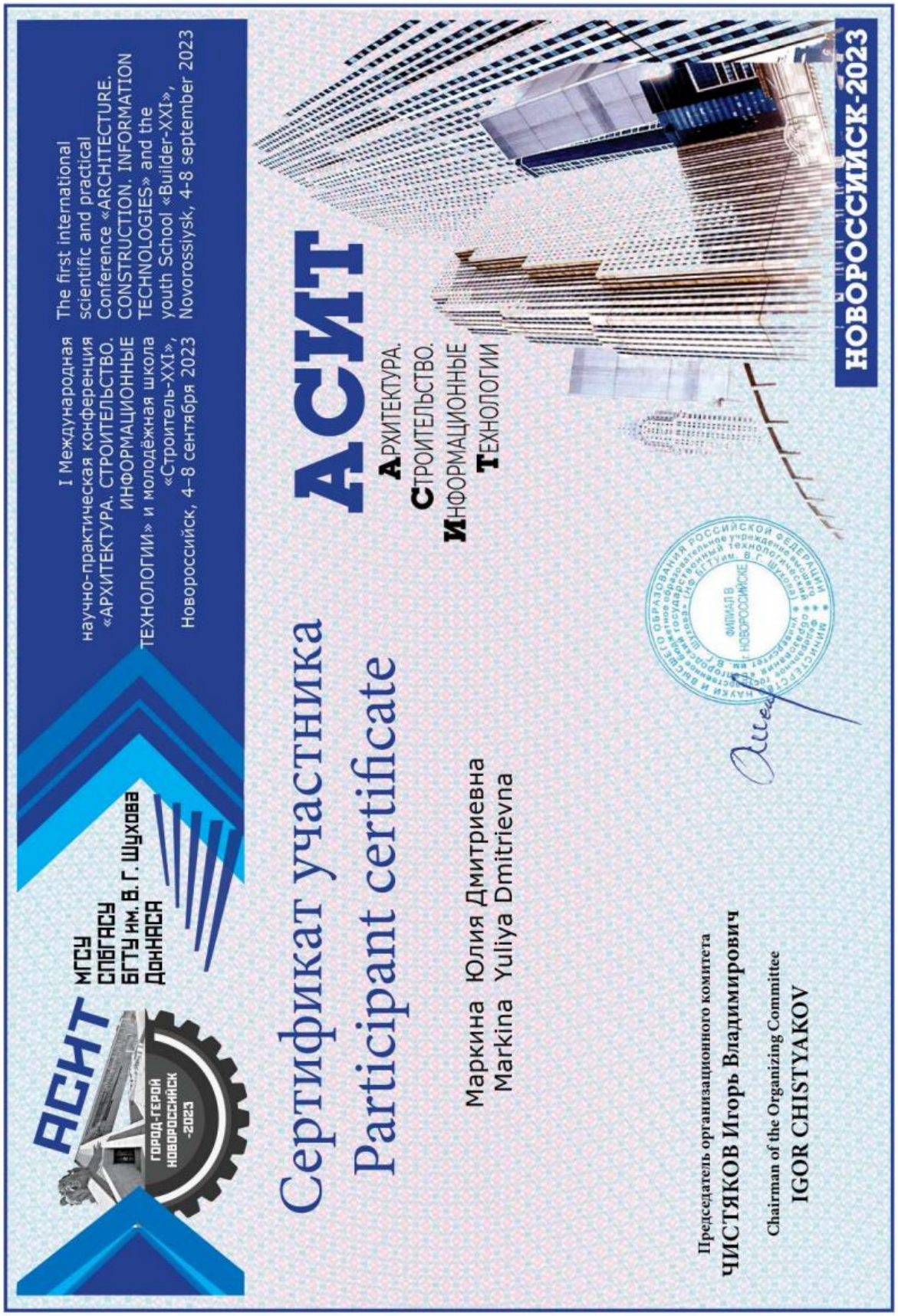
Маркиной Юлии Дмитриевне

За активное участие в XV-ой научной конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» в рамках Академических чтений, посвященных памяти академика Осипова Г.Л.

Председатель оргкомитета
Директор НИИСФ РААСН — И.Л. Шубин

Москва
2 июля 2024 г.

Сертификат участника I международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Информационные технологии



Сертификат участника Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее»

Сертификат участника XXVIII Нижегородской сессии молодых ученых

НИЖЕГОРОДСКАЯ СЕССИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ НИЖЕГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ

НИЖЕГОРОДСКИЙ НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

ПОДТВЕРЖДАЕТ, ЧТО

Маркина Юлия Дмитриевна

принял(а) участие в XXVIII Нижегородской сессии молодых ученых

Директор ГБУ ДПО ННИЦ

А.В. Тихонов

г. Нижний Новгород
2023 год

Сертификат участника научно-практической конференции XIII всероссийского фестиваля науки