

ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ
ИЗ ПЯТИГРАННЫХ ТРУБ

LIGHT METALLIC CONSTRUCTIONS
OF FIVE-SIDED TUBES

Federal Agency on Education
The Tomsk State University of Architecture
and Building

M.M. Kopytov, A.V. Matveev

LIGHT METALLIC CONSTRUCTIONS OF FIVE- SIDED TUBES



Tomsk 2007

Федеральное агентство по образованию
Томский государственный
архитектурно-строительный университет

М.М. Копытов, А.В. Матвеев

ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ИЗ ПЯТИГРАННЫХ ТРУБ

Scientific & Technical Translations



Томск 2007

УДК [624.014:692.4.001.24(043.3)]

К65

Копытов М.М., Матвеев А.В. **Легкие металлоконструкции из пятигранных труб.** — Томск: STT, 2007. — 124 с.

ISBN 5-93629-353-3

В книге рассмотрены конструктивные особенности легких металлоконструкций, системообразующим элементом которых являются пятигранные трубы из состыкованных швеллера и уголка. Приведены результаты исследований и натурных испытаний таких конструкций. Представлены рекомендации по их расчету и конструированию. Проектное решение с применением бесфасоночных трехгранных ферм с поясами пентагонального сечения иллюстрируется конкретным примером. Рассмотрены особенности изготовления, транспортировки и монтажа таких конструкций. Даны технико-экономический анализ их использования в строительстве, эффективность и перспективы дальнейшего развития.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов-строителей, проектировщиков и научных работников. Она может быть использована в учебном процессе при подготовке инженеров и магистров.

УДК [624.014:692.4.001.24(043.3)]

Рецензенты:

Г.И. Белый — заведующий кафедрой “Металлические конструкции и испытание сооружений” СПб. ГАСУ, д.т.н., профессор;

И.И. Крылов — Генеральный директор ЗАО НТЦ “ЭРКОНСиб”, профессор НГАСУ.

ISBN 5-93629-253-3

© М.М.Копытов, А.В. Матвеев, 2007

© Оформление. STT™, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава I. Особенности пятигранного профиля из состыкованных швеллера и уголка	8
Глава II. Эффективные конструкции покрытий с поясами из труб пятигранного профиля сечения	13
Глава III. Основные результаты исследований пространственно-стержневых покрытий с поясами из составных труб пентагонального профиля сечения	26
Глава IV. Натурные испытания стальной бесфасоночной фермы	48
Глава V. Рекомендации по расчету и конструированию бесфасоночных металлоконструкций покрытий с поясами из пятигранных труб	59
Глава VI. Особенность изготовления, транспортировки и монтажа	68
Глава VII. Пример проектного решения с применением разработанных бесфасоночных трехгранных ферм	77
Глава VIII. Проблемы и перспективы развития металлоконструкций из пятигранных труб	106
Приложение 1. Сортамент составных пятигранных профилей образованных из состыкованных швеллеров по ГОСТ 8240-89 и горячекатаных равнополочных уголков по ГОСТ 8509-93 ..	113
Приложение 2. Коэффициенты учета развития пластических деформаций k_{Mx} , k_{My}	115
Список использованной литературы	120
Summary	123

ВВЕДЕНИЕ

Высокая и постоянно растущая стоимость металла требует разработки строительных конструкций с минимальной металлоёмкостью. Это особенно актуально для зданий малых и средних пролетов, имеющих в настоящее время и в ближайший перспективе наибольший рыночный спрос. При этом металлоконструкции должны быть простыми в изготовлении, удобными при транспортировке и монтаже.

Вниманию читателя предлагаются новые легкие металлоконструкции покрытий удельная металлоемкость и стоимость которых на 18–25% меньше, чем у современных традиционных аналогов. Приоритет защищен семью патентами и авторскими свидетельствами на изобретения. Эти конструкции изучены теоретически и экспериментально, апробированы в практике строительства и показали высокие эксплуатационные качества.

Разработанные конструкции получили высокую оценку специалистов на Международной выставке “METALLBUILD-2003” в Москве [15]. Они награждены золотой медалью межрегионального конкурса “Лучшие товары и услуги Сибири “ГЕММА-2006”.

Отличительной особенностью представленных в этой книге металлоконструкций является применение в основных несущих элементах составных стержней пятигранного профиля сечения. Такой стержень образуется посредством стыковки самых дешевых профилей проката: швеллера и уголка. Раскосная решетка из одиночных уголков крепится без фасонки непосредственно к поясам пространственно-стержневых конструкций бесфасоночного покрытия.

Причинами такой высокой эффективности (по сути каждое четвертое покрытие оказывается бесплатным) являются:

- отсутствие прогонов;
- отсутствие фасонки, коннекторов и других соединительных деталей;
- минимальная трудоемкость изготовления;
- транспортабельность и удобство монтажа;
- применение самых дешевых и ходовых профилей проката.

Дополнительным преимуществом является минимальная

строительная высота, а значит — снижение расходов на отопление “лишнего” объема помещения.

В этой книге содержится описание разработанных конструкций. Отмечены их достоинства и недостатки. Представлены основные результаты исследований и вытекающие отсюда практические рекомендации по их расчету и конструированию. На конкретных примерах отмечены особенности проектирования, которые помогут читателю самостоятельно решить вопросы расчета и конструирования предлагаемых конструкций. Дан технико-экономический анализ применения их в строительстве. Обозначены проблемы и перспективы дальнейшего развития таких конструктивных форм и способы их решения.

ОСОБЕННОСТИ ПЯТИГРАННОГО ПРОФИЛЯ ИЗ СОСТЫКОВАННЫХ ШВЕЛЛЕРА И УГОЛКА

Замкнутые сечения обладают известными преимуществами по сравнению с открытыми. Они имеют более высокую несущую способность при работе стержней на сжатие, изгиб, кручение, внецентренное сжатие. Они менее подвержены механическим повреждениям при транспортировке и монтаже, обладают повышенной коррозионной стойкостью, хорошей обтекаемостью ветровым потоком, эстетическими качествами.

Широкое распространение получили конструкции из круглых и гнутосварных прямоугольных труб, из составных прокатных уголков или швеллеров, образующих квадратное или прямоугольное сечение (рис. 1.1, а–б). Нами предлагается оригинальная форма сечения в виде пятигранника, которая может обеспечить бесфасоночное пространственное сопряжение элементов из прокатных профилей (патент на изобретение №2174576 RU и АС №98102236 RU [2, 3]). Пятигранник образуется из состыкованных швеллера и уголка (рис. 1.1, в).

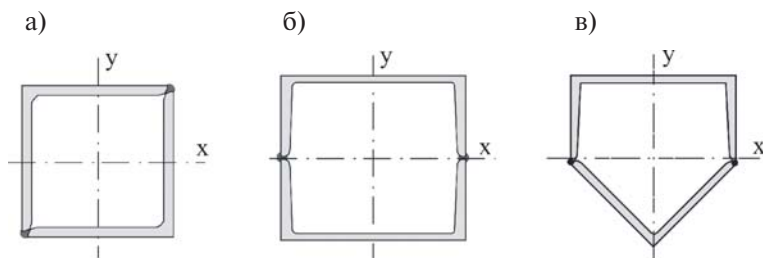


Рис. 1.1. Тубы из прокатных уголков и швеллеров

Появляется возможность к каждой грани этого сечения впритык с помощью тавровых сварных соединений крепить примыкающие стержни без фасонки, развивая конструкцию в пяти различных направлениях. При этом горизонтальная плоскость может быть использована для непосредственного опирания кровельного настила без прогонов. Это создает предпосылки для разработки эффективных пространственно-стержневых систем покрытий.

Стержни металлоконструкций с пятигранным контуром сечения могут иметь целый спектр более сложных композиций (рис. 1.2, б–ж).

Форма составного профиля может быть четырехгранной (рис. 1.2, ж), шестигранной (рис. 1.2, е), семигранной (рис. 1.2, г), десятигранной (рис. 1.2, в), двенадцатигранной (рис. 1.2, д); возможны и другие формы сечений, полученные на основе пятигранника. Это позволяет легко развивать конструктивную форму стержневой системы во многих различных, не только ортогональных или параллельных направлениях, что расширяет диапазон объемно-планировочных решений здания или сооружения и их нетрадиционное исполнение.

Они могут быть использованы в опорных конструкциях эстакад, башен, градирен, в колоннах, каркасах и ряде других со-

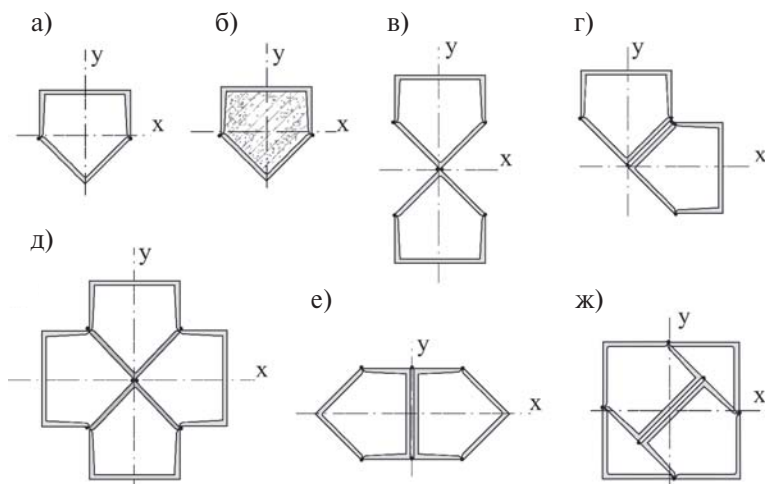


Рис. 1.2. Составные сечения с использованием пятигранного профиля

оружений и их элементов, работающих на сжатие с изгибом. Для большего повышения несущей способности и огнестойкости внутренняя полость пятигранника может быть заполнена бетоном (рис 1.2, б). Бетон включается в совместную работу с металлической обоймой и воспринимает часть нагрузки.

При малых гибкостях сжатых колонн и очень большой величине продольной силы (многоэтажные каркасы) могут использоваться составные профили сечения, соответствующие рисункам 1.2, д и 1.2, ж. Для сжатоизогнутых стержней с преобладанием изгиба относительно оси x рационально использовать десятигранный составной профиль (рис. 1.2, в). Для стержня сжатого и изгибаемого в двух ортогональных направлениях рационально применять Г-образный профиль (рис. 1.2, г). Он может быть использован в стойках каркаса, расположенных в углах здания.

Для эффективного применения пятигранного профиля в строительных конструкциях разработан сортамент этого составного сечения в диапазоне формообразующих швеллеров от №5 до №36 (Приложение 1). При составлении сортамента учтены все возможные варианты компоновки равнобоких уголков со швеллерами. В зависимости от соответствия размеров высоты сечения швеллера и расстояния между крайними точками перьев в сечении уголка возможны три варианта компоновки пятигранного сечения:

- 1) крайние точки перьев уголка лежат в плоскостях наружных граней полок швеллера (рис. 1.3, а);
- 2) крайние точки перьев уголка находятся с внутренней стороны от плоскостей наружных граней полок швеллера (рис. 1.3, б);
- 3) крайние точки перьев уголка находятся с наружной стороны

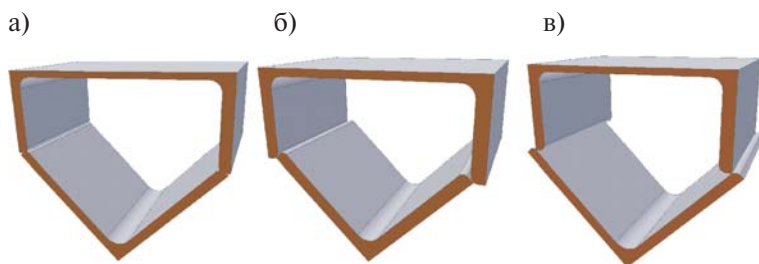


Рис. 1.3. Варианты компоновки пятигранного сечения

ны от плоскостей наружных граней полок швеллера (рис. 1.3, в).

Для оценки эффективности пятигранного составного профиля произведен сравнительный анализ его геометрических характеристик с соответствующими значениями квадратных и прямоугольных профилей (рис. 1.1). Параметром, определяющим работу сжатого стержня, является относительный радиус инерции i/A ; при работе на изгиб — относительный момент сопротивления W/A . Результаты представлены на графиках рис. 1.4.

Из графиков рис. 1.4 а видно, что относительный радиус инерции i_{min}/A пятигранного профиля в диапазоне высоты сечения до 20 см выше, чем у прямоугольного, а при дальнейшем увеличении высоты профилей эти параметры практически совпадают. Сравнение относительных радиусов инерции пятигранного и квадратного профилей показывает, что последний конкурентоспособен лишь в диапазоне уголков до №8. То есть в условиях сжатия пятигранный профиль предпочтительней как прямоугольного, так и квадратного профилей.

Из рис. 1.4 б следует, что относительный момент сопротив-

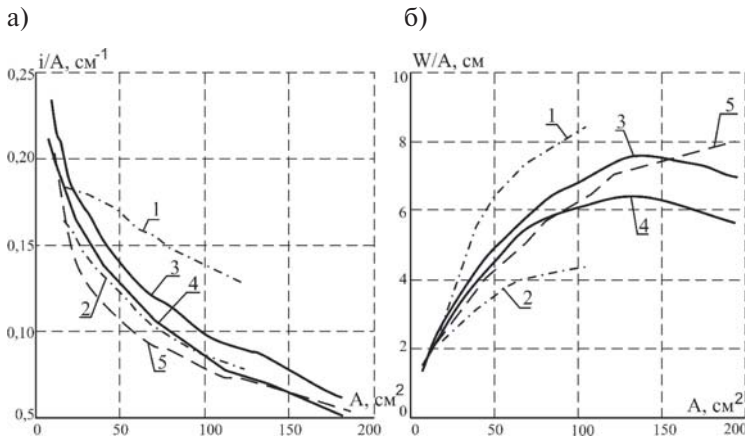


Рис. 1.4. Сравнение геометрических характеристик сечения:

- а) графики относительных радиусов инерции; б) графики относительных моментов сопротивления; 1 — i_y/A , W_y/A для коробчатого сечения из двух швеллеров; 2 — i_x/A , W_x/A для коробчатого сечения из двух швеллеров; 3 — i_y/A , W_y/A для пятигранного сечения; 4 — i_x/A , W_x/A для пятигранного сечения; 5 — i/A , W/A для коробчатого сечения из двух уголков

ления двух швеллеров W_y/A больше соответствующего значения пятигранного профиля. Однако, при ортогональной ориентации осей (W_x/A для прямоугольного и W_y/A для пятигранного) предпочтительней становится пятигранный профиль. Поскольку для него W_y больше W_x на 25...45%, то такой профиль выгодней ориентировать с расположением стенки швеллера в плоскости изгиба.

Анализ графиков показывает, что пятигранный профиль сечения, образованный из состыкованных швеллера и уголка, особенно эффективен при работе на сжатие с изгибом. Это и предопределяет его использование в пространственных конструкциях покрытий.

Глава II

ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЙ С ПОЯСАМИ ИЗ ТРУБ ПЯТИГРАННОГО ПРОФИЛЯ СЕЧЕНИЯ

В отечественной и зарубежной практике наметилась устойчивая тенденция развития строительства зданий и сооружений с небольшими пролетами 12...30 м. Они пользуются наибольшим рыночными спросом. Разработка новых конструктивных форм металлоконструкций покрытий таких зданий с использованием дешевых профилей проката, с упрощенным решением узлов (без фасонки) с сокращением или полным исключением вспомогательных элементов (прогонов и связей), обеспечивающих скоростной монтаж и индустриальный способ изготовления, представляется перспективным и актуальным.

Нами запатентованы, разработаны и исследованы бесфасоночные пространственно-стержневые металлоконструкции покрытий с поясами пятигранного профиля сечения [2–16]. Отличительной особенностью этих конструкций является применение в них системообразующего стержня пятигранного контура, который формируется из состыкованных швеллера и уголка.

Появляется возможность к каждой грани этого сечения впристык с помощью тавровых соединений крепить примыкающие стержни без фасонки (рис. 2.1, а). Горизонтальная плоскость может быть использована для опирания кровельного профнастила без прогонов (рис. 2.1, б).

Все конструкции образуются системой наклонных ферм, ориентированных под углом 45° к вертикали с нисходящими опорными раскосами и треугольной решеткой (рис. 2.2). Верхний пояс — пентагональный профиль; решетка — из одиночных угол-

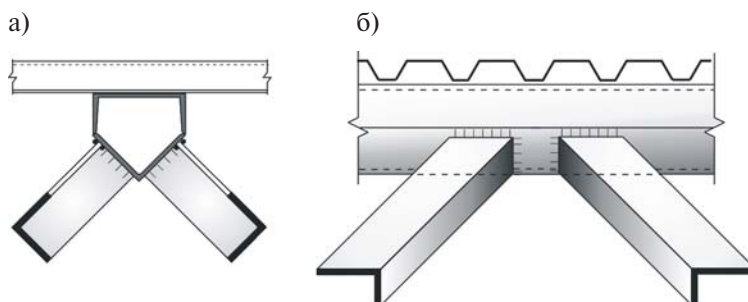


Рис. 2.1. Узлы беспрогонного бесфасоночного покрытия
а) поперечный разрез; б) продольный разрез

ков; нижний пояс — пентагональный профиль или одиночный уголок. Плоскость раскосной решетки ортогональна плоскостям граней поясов. Это упрощает подрезку торцов с последующей приваркой в тавр к поясным элементам.

Расстояние между узлами системообразующей фермы — 3 м. Предусмотрено опирание конструкций как на колонны и подстропильные элементы, так и на кирпичные стены. Размеры перекрываемых пролетов для I и IV снеговых районов: от 12 до 24 м при строительной высоте несущих конструкций 1,5 м. При пролетах 30–36 м требуется увеличение строительной высоты до 2,2 м из условия предельного прогиба.

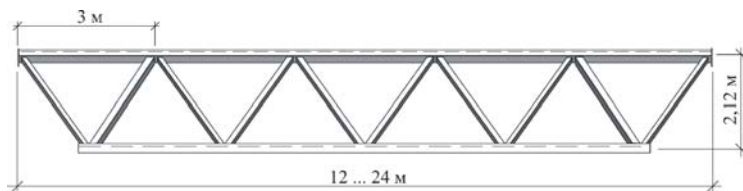


Рис. 2.2. Системообразующая плоская ферма для пространственных покрытий со строительной высотой 1,5 м

Складчатое покрытие. Авторское свидетельство Р.Ф.
№8716 RU.

План фрагмента складчатого покрытия показан на рисунке 2.3 а, поперечный разрез — рисунке 2.3 б.

Верхние пояса наклонных ферм 1 (рис. 2.3) выполнены из пятигранного профиля с горизонтальной ориентацией стенки швеллера. Раскосы 3 выполнены из одиночных уголков. Нижние пояса 2 выполняются из одиночных уголков или пятигранных профилей с ориентацией обушка вверх. Профнастил крепится к стенке швеллера.

Достоинства складчатой системы — регулярность и архитектурная выразительность конструктивной формы. Решетка и узлы слабо нагружены. Сечения уголков минимальны и чаще всего лимитируются предельной гибкостью. Из-за малой вели-

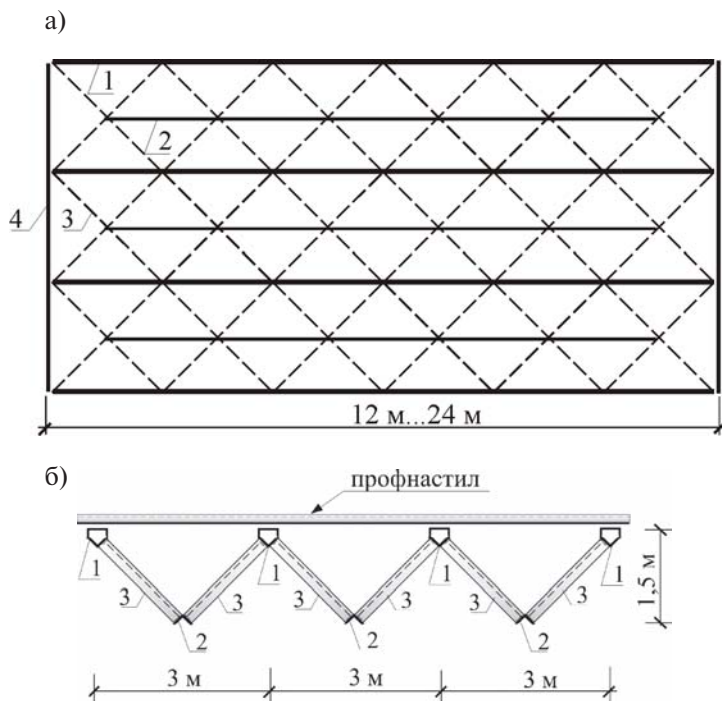


Рис. 2.3. Складчатое покрытие с верхним поясом пятигранного профиля

чины усилий узлы могут быть сильно расцентрованы и это упрощает процесс сварки конструкций. Недостаток её — относительная многоэлементность и большой объем укрупнительной сборки.

Покрытие из трехгранных ферм. Патент РФ №2188287RU, патент РФ №36119RU, патент РФ №36118RU, патент РФ №49859

Покрытие образуется из расположенных с определенным шагом трехгранных ферм [4]. План фрагмента покрытия пока-

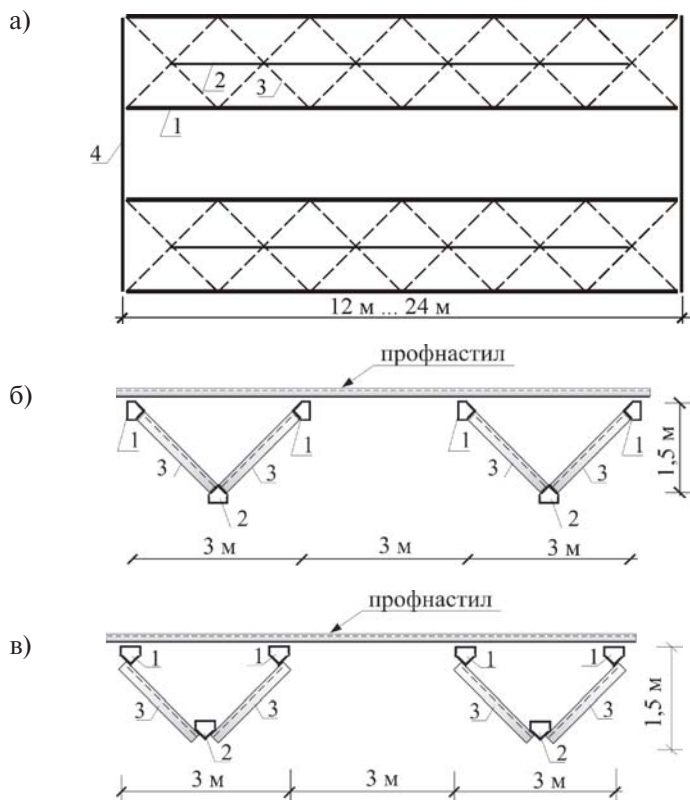


Рис. 2.4. Покрытие в виде трехгранных ферм

зан на рисунке 2.4 а, а варианты поперечных разрезов приведены на рисунках 2.4 б и 2.4 в. Раскосы могут быть приварены к поясам по торцам тавровыми швами [4] или по полкам угловыми швами [8].

Каждая трехгранная ферма образована из двух наклоненных под углом 45° ферм и включает два верхних пояса 1 пятигранного профиля из швеллера и уголка с вертикальной ориентацией стенки формообразующего швеллера, нижний пояс 2 пятигранного профиля с горизонтальной ориентацией стенки швеллера и раскосную решетку 3 из одиночных уголков.

Между собой трехгранные фермы объединяются профилированным настилом или панелями “сэндвич”, которые крепятся к полке швеллера. Опирающие трехгранные фермы происходит на подстропильные фермы 4, либо на продольные несущие стены.

В трехгранных фермах вдвое уменьшено количество стержневой раскосной решетки и нижних поясов. Они стали более нагруженными. Такие фермы могут целиком изготавливаться на заводе и легко транспортироваться любым видом транспорта. По сравнению со складчатой системой в трехгранной бесфасонной ферме усилия в раскосах и нижних поясах удвоились и требуется более строгое качество исполнения узлов, которые также могут быть расцентрованными. На заводе контроль качества швов не представляет труда, а все монтажные сопряжения предусмотрены только на болтах.

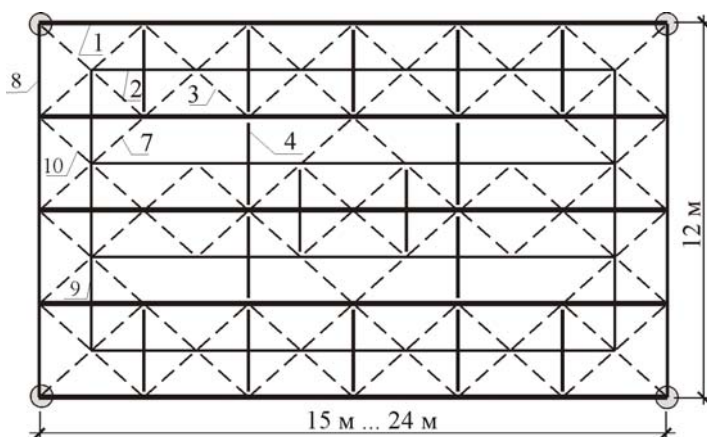
Дополнительное снижение металлоемкости можно получить за счет использования в наиболее напряженных элементах стали высокой прочности (бистальное сечение пятигранника) или применения предварительного напряжения [6].

Структурное покрытие. Патент РФ №19068RU

В структурном покрытии в отличие от вышерассмотренных конструкций присутствуют затяжки по поясам и торцевые наклонные фермы, входящие в пространственную стержневую систему. План структурного покрытия размером 12×18 м представлен на рисунке 2.5 а, поперечный разрез на рисунке 2.5 б.

Структурное покрытие образуется из объединенных профнастилом или панелями “сэндвич” трехгранных ферм 5, 6. Верхние пояса 1 выполнены из пятигранного профиля с горизонтальной ориентацией стенки швеллера. Нижние пояса 2 из одиночного уголка, ориентированного боушком вверх или пяти-

а)



б)

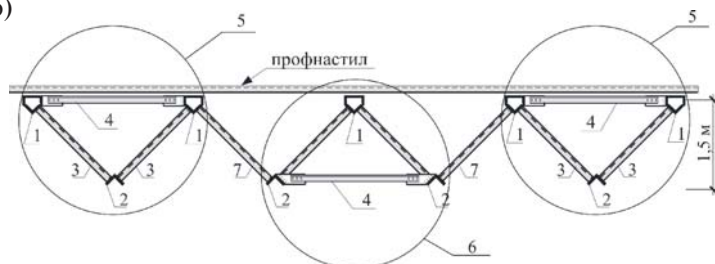


Рис. 2.5. Структурное покрытие

гранного профиля, в зависимости от требуемой несущей способности нижнего пояса. Раскосы 3 выполняются из одиночных уголков, торцами примыкающих к полкам поясных уголков 1 и 2.

На монтаже структурное покрытие собирается из пространственных трехгранных ферм 5, 6 полной заводской готовности, объединенных раскосами 7, которые устанавливаются при укрупнительной сборке и профилированным листом или панелями “сэндвич”. Трехгранные фермы 5 и 6 содержат либо один нижний и два верхних пояса, либо один верхний и два нижних пояса, которые соединяются затяжками 4. В состав конструкции покрытия входят бортовые плоские наклонные фер-

М (рис. 2.5, а), пояса 8, 9 и раскосы 10 которых выполнены их оди- Ы
 ночных уголков. Наклонные бортовые фермы выполняют роль
 подстропильной конструкции и одновременно участвуют в со-
 вместной работе пространственного стуктурного покрытия, при
 этом опирание происходит на угловые точки структурной плит-
 ты.

Достоинства структурной плиты – разряженная сетка ко-
 лонн и отсутствие подстропильных конструкций. Недостаток
 – дополнительные трудозатраты в процессе укрупнительной
 сборки. Благодаря пространственной работе с разряженной
 сеткой элементов структурной композиции металлоемкость её
 – минимизирована. Масса блока размером $18 \times 12 \times 1,5$ м для IV
 снегового района при теплой кровле составляет 5,2 т. Это по-
 зволяет использовать на монтаже автокран типа МКА-16.

Варианты конструктивных решений узлов сопряжения по-

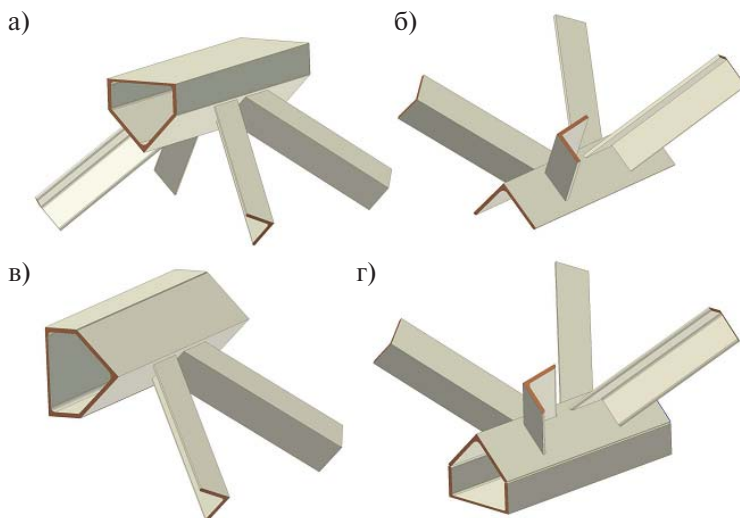


Рис. 2.6. Бесфасоночное сопряжение раскосной решетки с поясами:

а) с верхним поясом складчатого и структурного покрытия; б) с нижним поясом
 складчатого и структурного покрытия; в) с верхним поясом трехгранной простран-
 ственной фермы; г) с нижним поясом трехгранной пространственной фермы

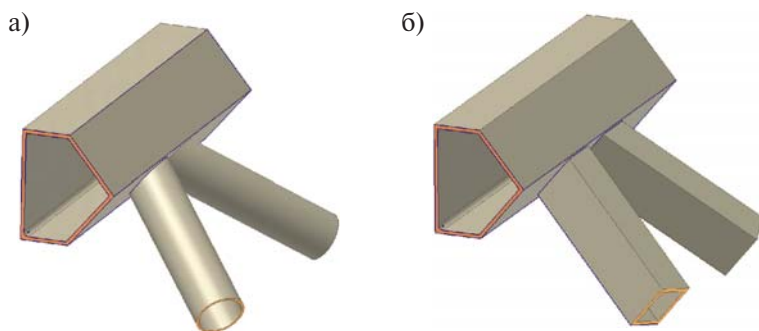


Рис. 2.7. Бесфасоночное сопряжение поясов с раскосами из труб:
а) круглые трубы; б) квадратные трубы из гнутосварных профилей

ясов и раскосной решетки приведены на рисунке 2.6 (патент №36118RU). Отличительной особенностью этих узлов является простота изготовления: достаточно подрезать лишь одну полку раскосной решетки под заданным углом одинаковым для всех раскосов.

Для полной герметизации всех элементов конструкций покрытия возможна замена раскосной решетки из одиночных уголков трубами (рис. 2.7). В этом случае подрезка торцов решетки по наклонной плоскости несколько усложняет процесс изготовления. Зато повышается коррозионная стойкость, обтекаемость и эстетичность конструкции. Одновременно увеличивается несущая способность раскосов.

Известно, что расход металла является определяющим показателем в структуре стоимости металлоконструкций. В обобщенном виде он характеризуется параметром удельной металлоемкости: расход металла на 1 м^2 покрытия.

Для выяснения конкурентоспособности изучаемых пространственно-стержневых беспрогонных и бесфасоночных покрытий произведен их сравнительный анализ с существующими современными конструктивными формами. Сравнительный анализ удельной металлоемкости для блоков покрытий $18 \times 12 \text{ м}$ с учетом профнастила при нагрузке $3,8 \text{ кН/м}^2$ представлен на гистограмме (рис. 2.8). Распределение металла по элементам покрытия приведено в таблице 2.1.

В качестве сопоставимых вариантов приняты:

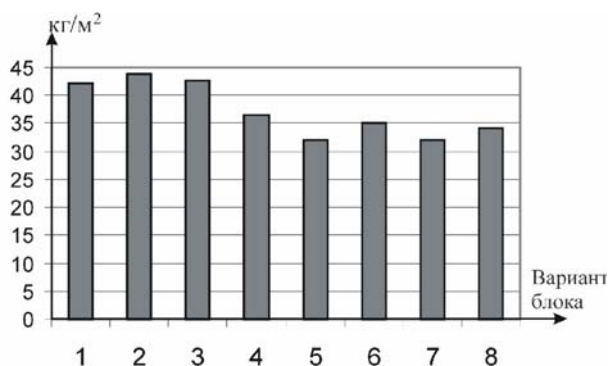


Рис. 2.8. Удельная металлоемкость блоков покрытий

- 1) стропильные фермы из уголков высотой 2,5 м;
- 2) стропильные фермы из круглых труб высотой 2,9 м;
- 3) стропильные фермы с поясами из тавров высотой 3,15 м;
- 4) структурное покрытие ЦНИИСК высотой 1,5 м;
- 5) стропильные фермы из ГСП типа «Молодечно» высотой 2 м;
- 6) складчатое покрытие с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м;
- 7) трехгранные фермы с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м;
- 8) структурное покрытие с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м.

Из гистограммы и табл. 2.1 видно, что металлоемкость разработанных бесфасоночных покрытий находится на уровне легких покрытий из гнутосварных профилей типа «Молодечно». Дополнительное преимущество предлагаемых нами конструкций по сравнению с блоками «Молодечно»: снижение в общем балансе на 10% расхода металла на профнастил, рыночная стоимость которого в 1,5...2,5 раза больше, чем у прокатных профилей. Это достигается за счет того, что шаг поясов разработанных нами покрытий 3 м, а в фермах типа «Молодечно» — 4 м.

Кроме того в наших вариантах используются самые дешевые профили проката, уменьшена строительная высота на 25%, а следовательно, затраты на стеновое ограждение и последующие

Таблица 2.1

**Распределение металла по элементам сравниваемых вариантов
легких металлических покрытий**

№ варианта	Наименование покрытия	Масса конструкции покрытия, кг/м ²						
		стропильные фермы	подстропиль- ные фермы	прогоны	связи	опорные стойки	профнастил	всего
1	Стропильные фермы из уголков высотой 2,5 м	14,6	5,71	7,54	1,66	1,85	10,9	42,26
2	Стропильные фермы из круглых труб высотой 2,9 м	10,1	6,56	12,51	2,42	1,76	10,9	43,89
3	Стропильные фермы с поясами из тавров высотой 3,15 м	13,4	7,2	7,54	1,66	1,85	10,9	42,55
4	Структурное покрытие ЦНИИСК высотой 1,5 м	26,2	-	-	-	-	10,9	37,1
5	Стропильные фермы из ГСП типа “Молодечно” высотой 2,0 м	14,26	2,13	-	0,6	5,01	12,0	32,0
6	Складчатое покрытие с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м	19,5	4,1	-	-	-	10,9	34,5
7	Покрытие в виде трех- гранных ферм с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м	17,5	3,6	-	0,1	-	10,9	32,1
8	Структурное покрытие с поясами пятигранного профиля высотой 1,5 м	23	-	-	-	-	10,9	34,9

постоянные затраты на отопление “лишнего” объема здания. По сравнению с другими конструкциями в покрытиях с поясами пятигранного профиля из швеллера и уголка экономия металла достигает 27%.

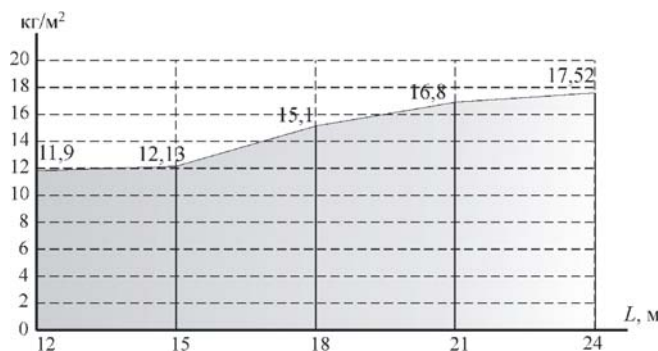


Рис. 2.9. Изменение металлоемкости трехгранных ферм в зависимости от пролета

Изменение удельной металлоемкости трехгранных ферм при нагрузке на покрытие $q = 300 \text{ кг/м}^2$ в зависимости от пролета приведено на графике (рис. 2.9). Разница в удельной металлоемкости при минимальном и максимальном пролетах достигает 30%. Такая же разница наблюдается и у складчатых и у структурных покрытий с пятигранными поясами.

Нами разработан проект покрытия комплекса теплых складских помещений в г. Томске размерами $120 \times 90 \times 6 \text{ м}$. Проектом предусмотрено пятипролетное здание $5 \times 18 \text{ м}$ с шагом колонн 12 м , с наружными кирпичными стенами. Техничко-экономические показатели в сопоставлении с типовым решением приведены в табл. 2.2. Стоимость в деле дана в ценах 2000 г.

Таблица 2.2

Техничко–экономические показатели проектных решений

Показатель	Типовое решение	Предлагаемое покрытие	Экономический эффект
Удельная металлоемкость	42,26 кг/м ²	31,55 кг/м ²	25%
Расход металла	456,4 т	346,6 т	110 т
Кирпичная кладка	1828 м ³	1505 м ³	323 м ³
Стоимость в деле	8800 тыс. руб.	6840 тыс. руб.	1960 тыс. руб.

Отметим, что по сравнению с аналогом строительная высота предлагаемого беспрогонного покрытия из трехгранных ферм (рис. 2.4) на 1,16 м меньше. Этим объясняется экономия кирпичной кладки на 17,6%. Кроме того, за счет снижения строительной высоты покрытия не нужно отапливать лишние 13 тыс. м³ помещений.

Трехгранные фермы пролетом 16,5 м внедрены в г. Томске (IV снеговой район) в 2000 г. С их помощью перекрыта летняя дискотека размерами в плане 12×17 м (рис. 2.10). Запроектировано, изготовлено и смонтировано покрытие, несущими конструкциями которого являются трехгранные фермы с поясами пятигранного профиля сечения.

Конструкции изготовлены в построечных условиях ограниченной площадки со сложным рельефом местности (крутой склон). Пояса ферм выполнены из состыкованных швеллера №14 и уголка 100×6,5; решетка из уголков 63×6 и 50×5 с расцентровкой в узлах. Кровля холодная из профнастила Н57-750-0,7. Кромки уголков раскосной решетки подрезались по раз-



Рис. 2.10. Трехгранные фермы в покрытии (Томск, 2000 г.)

метке отрезным кругом. Расход металла, включая профнастил, составил 22 кг/м² покрытия.

Дополнительными преимуществами предлагаемых металлоконструкций является их повышенная сейсмостойкость. Это связано с большой пространственной жесткостью конструктивной формы, с опиранием каждой трехгранной фермы не на две, а на четыре независимые опоры, с пониженным центром тяжести конструкции относительно опор.

Можно кратко сформулировать основные конструктивные особенности покрытий с поясами из труб пятигранного профиля сечения, определяющие их высокую эффективность:

- без прогонов;
- без фасонки;
- из самых дешевых и ходовых профилей проката;
- минимальная строительная высота.

Из опыта проектирования и технической литературы [1, 17] известно, что расход металла на прогоны составляет не менее 10 кг/м² покрытия. Фасонки и другие соединительные детали составляют 10–12% от общей массы конструкции покрытия. В выше рассмотренных же конструктивных формах прогоны и фасонки не требуются. Этим объясняется экономическая эффективность предлагаемых покрытий с поясами из труб пятигранного профиля сечения. Экономия металла может достигать 18...30%, а снижение стоимости до 20...25% по сравнению с традиционными конструкциями покрытий.

Преимущество перед зарубежными аналогами:

- простота решения пространственных узлов без коннекторов и др. деталей;
- возможность изготовления вручную на стройплощадке без спецоборудования;
- применение самых дешевых профилей и материалов металлоконструкций.

Рассмотренные конструкции покрытий могут быть использованы в производственных и общественных однопролетных и многопролетных зданиях. При пролетах от 12 до 24 м строительная высота покрытий составляет 1,5 м. Из условия деформативности при пролетах 30 м строительную высоту следует увеличить до 1,8 м; при пролетах 36–2,2 м. Они могут быть использованы в любом регионе при новом строительстве или реконструкции.

Глава III

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТЕРЖНЕВЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОЯСАМИ ИЗ СОСТЫКОВАННЫХ ТРУБ ПЕНТАГОНАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СЕЧЕНИЯ

Серьезной проблемой внедрения этих конструкций является неизученность работы, как составного пятигранного стержня, так и новых конструктивных форм, созданных на его основе. Решение этих задач можно получить только на базе экспериментально-теоретических исследований. Они позволяют разработать обоснованные рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу, которые представляются актуальными и востребованными в строительстве. Такие исследования проведены на кафедре металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета. Они представлены двумя кандидатскими диссертациями и тремя десятками публикаций в отечественной и зарубежной технической литературе.

Основные задачи исследований:

- обосновать конструктивные формы бесфасоночных покрытий с элементами составного пятигранного профиля из швеллера и уголка;
- изучить напряженно-деформированное состояние системообразующего сжатой изогнутого стержня в упругой и упругопластической стадии;
- провести численный анализ работы узлов сопряжений раскосной решетки и поясов;
- дать оценку жесткости элементов раскосной решетки из одиночных уголков с учетом упругой податливости их в узлах сопряжения с поясами;

- разработать программу расчета прочности пятигранного составного сечения при сжатии с изгибом стержня в двух ортогональных направлениях по критерию ограниченных пластических деформаций;
- произвести экспериментальную проверку полученных результатов;
- разработать инженерную методику расчета исследуемых конструкций.

В процессе исследований выполнен статический анализ и обоснованы конструктивные формы бесфасоночных пространственно-стержневых металлоконструкций покрытий в виде трехгранных ферм, складчатой системы и структурной плиты, которые были изображены на рисунках 2.3–2.5.

При всем разнообразии конструктивных форм, представленных на этих рисунках их объединяет общая топология расчетной модели. Все они имеют жесткие неразрезные пояса, к которым без фасонки в наклонной плоскости примыкают стержни раскосной решетки из одиночных уголков.

Из-за отсутствия гибких фасонки узлы сопряжения пояса и раскосов в системообразующей наклонной ферме нельзя считать шарнирными. При беспрогонном решении кровельного покрытия расчетная нагрузка передается не в узлы, а равномерно распределена по всему верхнему поясу пентагонального профиля сечения. В этом поясе помимо продольной силы N возникают изгибающие моменты M_x и M_y как от внеузового нагружения расчетной нагрузкой многопролетного неразрезного стержня, так и от жесткости узлов.

В процессе конструирования узлов неизбежна их расцентровка. Это может привести к появлению дополнительных усилий в элементах конструкции. При опирании торца раскоса в полку поясного уголка возможна упругая податливость узлового сопряжения, степень влияния которой на работу конструкции остается неопределенной.

На первом этапе расчета и конструирования представляется важным минимизировать количество элементов в пространственно-стержневой системе. Для реализации этой цели проведен статический анализ структурной плиты с верхними поясами пятигранного профиля сечения и остальными элементами из прокатных уголкового профиля. Он выполнен методом конечного элемента по программе “Мираж”.

Минимизация производится путем итерационного включения или исключения стержней в общем пространственном бло-

ке и анализа изменений внутренних усилий. При варьировании расчетно-конструктивными схемами накладывались ограничения:

- по количеству степеней свободы $W = 6D - 6Ж - 3Ш - C_0 < 0$;
- по жесткости $f/L \leq [f/L]$;
- по внутренним усилиям $N \leq \Phi$;
- по предельной гибкости $\lambda \leq [\lambda]$,

где: W – количество степеней свободы пространственно-стержневой системы; D – количество стержней (конечных элементов); $Ж$ – количество жестких закреплений; $Ш$ – количество шарниров придающих системе одну степень свободы; C_0 – количество внешних связей лишаящих систему одной степени свободы; f/L , $[f/L]$ относительный и предельный относительный прогиб; N – максимальное усилие в рассчитываемом элементе; Φ – предельная несущая способность элемента; λ , $[\lambda]$ – гибкость стержня и её предельное значение.

Исходными данными являются: общие размеры структурной плиты, шаг поясов в ортогональных направлениях, внешняя нагрузка, условия опирания. При общем подходе каждый частный случай имеет свое конкретное решение. Выполнен статический анализ структурной плиты размерами в плане 18×12 м, высотой 1,5 м с шагом поясов в ортогональных направлениях 3 м, при равномерно распределенной нагрузке на покрытие 3,6 кН/м².

Схема с разряженной раскосной решеткой, полученной в результате удаления малонагруженных (при $N < 10$ кН) раскосов приведена на рисунке 3.1. Такая система образуется из трех пространственных трехгранных ферм, объединенных поперечными распорками по верхним поясам и торцевыми наклонными подстропильными фермами. Запас по жесткости 10%. В крайних верхних поясах $M_x \approx M_y$. По своему значению усилия в поясах неотличимы от исходной схемы. Продольная сила в раскосах возрастает на 40%, что приводит к более эффективному использованию их сечения. Уменьшение влияния косоугольного изгиба в поясах достигается установкой дополнительных “монтажных” раскосов и затяжек по нижним поясам в центре блока. Итоговый вариант структурного покрытия приведен на рисунке 2.5.

Конструктивную особенность узла сопряжения иллюстрирует рисунок 3.2. Раскосы из одиночных уголков торцами прижимаются к поясному уголку пятигранника и вызывают в нем ме-

The diagram shows a cross-section of a reinforced concrete column. At the top, a rectangular section is subjected to a uniform downward load q , represented by four downward-pointing arrows. Below this, the column tapers into two diagonal members. The left diagonal member is labeled N_p with an arrow pointing downwards along its axis. The right diagonal member is labeled N_p' with an arrow pointing upwards along its axis. Dashed lines within the column indicate the internal structure and the path of the load.

A diagram showing a horizontal bar with a spring attached to its center. The spring is connected to a mass hanging from it. The mass is supported by three vertical lines, suggesting it is a rigid body or a mass with internal structure. The entire system is shown in a perspective view.

стный изгиб полок от усилий, возникающих в раскосах и как следствие — податливость примыкания раскосов к поясам (рис. 3.3).

29

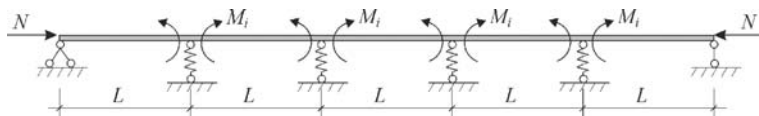


Рис. 3.4. Расчетная схема верхнего пояса на упругих опорах

филя сечения представляет собой многопролетный неразрезной стержень, шарнирно закрепленный по концам и упруго опертый на промежуточные опоры (рис. 3.4).

Свойство упруго перемещающейся опоры характеризуется соотношением:

$$R_k = v_k \cdot y_k$$

где: R_k – реакция опоры; y_k – её линейное перемещение; v_k – коэффициент жесткости.

Податливое примыкание раскосов может оказывать заметное влияние на общий прогиб конструкции под нагрузкой. Для оценки влияния податливого примыкания раскосов на пространственную жесткость конструкции решен комплекс задач изгиба полки поясного уголка, загруженного локальной нагрузкой от усилий, возникающих в раскосах.

После проведения серии расчетов на расчетном комплексе SCAD проанализирована схема деформирования фрагмента узлового сопряжения. Изолинии перемещений полки поясного уголка, составляющего пятигранный профиль сечения верхнего пояса складчатой системы, представлены на рисунках 3.5–3.7. Пунктиром обозначены торцы примыкающих к поясу раскосов. Расположение узлов в системообразующей наклонной ферме приведено на рисунке 3.8.

Усилия в раскосах вызывают в полке поясного уголка локальные деформации, которые быстро угасают по мере удаления от места сопряжения элементов. Значительные перемещения происходят лишь на $1/4$ пластины в области действия нагрузки. На расстоянии $0,3$ длины полосы от центра узла они снижаются в 3 раза.

Анализ результатов показывает, что прогибы полок поясных уголков Δf , характеризующие степень податливого примыкания раскосов, соизмеримы с абсолютной деформацией раскосов ΔL и составляют от 20 до 90% их значений. Учет продольной (по

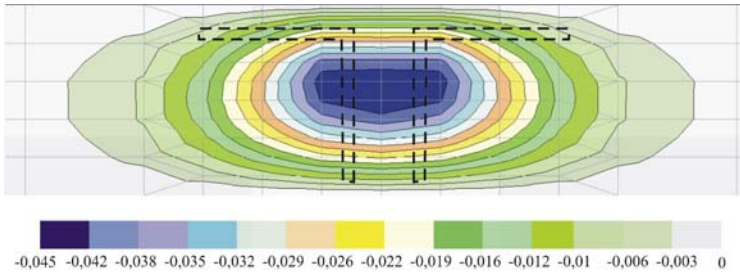


Рис. 3.5. Изополя перемещений полки в центральном узле 3

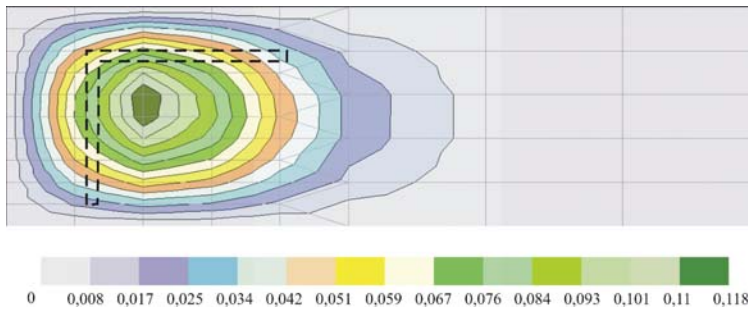


Рис. 3.6. Изополя перемещений полки в опорном узле 1

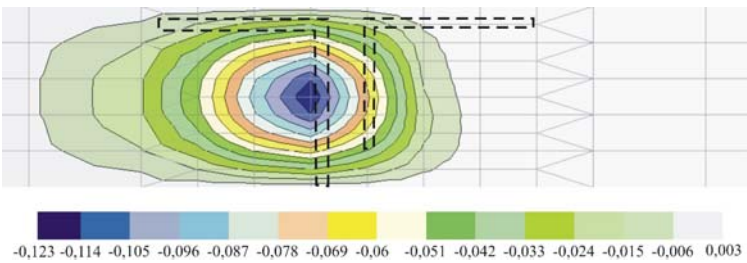


Рис. 3.7. Изополя перемещений полки в промежуточном узле 2

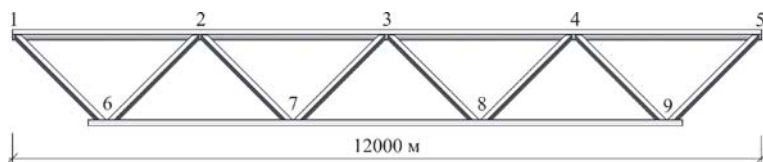


Рис. 3.8. Схема системообразующей фермы с верхним поясом пятигранного профиля и остальными элементами из одиночных уголков

направлению раскосов) податливости примыкания раскосов в расчетной схеме пространственной трехгранной фермы приводит к снижению общей жесткости раскосной решетки в 1,5 раза. При этом неизбежно возрастают общие вертикальные перемещения конструкции под нагрузкой.

Решен комплекс задач по оценке влияния податливого примыкания раскосов на прогибы конструкции при варьировании схемами загрузки. Результаты численного анализа приведены в таблице 3.1.

Из таблицы видно, что с учетом податливого примыкания раскосов прогибы конструкции увеличиваются по сравнению с расчетом без учета влияния податливого примыкания раскосов. Снижение пространственной жесткости конструкции практически не влияет на внутренние усилия в поясах и раскосах.

Особенности работы узлов бесфасоночных пространственно-стержневых металлоконструкций покрытий с поясами пятигранного составного профиля рассмотрены в диссертации [14]. Здесь расчетная модель узла представлена в виде системы сопрягающихся пластин. Методом конечного элемента дана оценка неоднородности напряженно-деформированного состояния в бесфасоночных узловых сопряжениях и установлено влияние геометрических параметров на работу узлов.

Отмечено, что расцентровка узла может снижать уровень напряжений по сравнению с центрированным узлом. В отличие от гнутосварных профилей в исследуемых конструкциях не требуется проверка узлов на продавливание. Из-за малой гибкости стенок пятигранника исключена потеря местной устойчивости полок поясного уголка. Несущая способность узла сводится к расчету сварных швов крепления раскосов к поясу, которые следует выполнить в соответствии со СНиП II-23-81* или СП 53-102-2004.

Таблица 3.1

Прогибы системообразующей фермы при варьировании схем загрузки, мм

Узлы	1–2	2	2–3	3	4	7	8
Нагрузка	$q = 7$ кН/м, распределенная по всему пролету						
Без учета податливости	7,27	3,42	6,2	4,8	3,42	2,21	2,21
С учетом податливости	7,7	4,29	7,1	6,0	4,29	2,75	2,75
Разница, %	5,6	20,3	12,7	20,0	20,3	19,6	19,6
Нагрузка	$q = 7$ кН/м, распределенная в 1/2 пролета						
Без учета податливости	6,8	2,147	5,23	2,41	1,28	1,59	1,24
С учетом податливости	7,2	3,3	6,78	3,62	1,5	2,7	1,46
Разница, %	5,6	34,9	22,9	33,4	14,7	41,1	15,1
Нагрузка	$P = 30$ кН, во всех узлах верхнего пояса						
Без учета податливости	2,7	4,83	6,6	6,92	4,83	3,22	2,22
С учетом податливости	3,3	6,3	8,0	9,0	6,33	4,2	4,2
Разница, %	18,2	23,3	17,5	23,7	23,7	23,3	47,1
Нагрузка	$P = 20$ кН, в середине панелей верхнего пояса						
Без учета податливости	10,9	3,52	8,1	4,9	3,52	2,25	2,25
С учетом податливости	11,4	4,63	9,1	6,42	4,63	2,93	2,93
Разница, %	4,4	24,0	11,0	23,7	24,0	23,2	23,2

В процессе теоретических исследований особое внимание было уделено изучению напряженно-деформированного состояния системообразующего стержня пятигранного профиля сечения. Эта задача изложена в диссертации [13]. При анализе упруго-пластической работы стержня по пространственно-де-

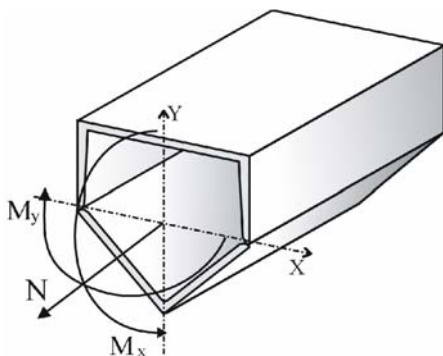


Рис. 3.9. Схема положительного направления действующих силовых факторов

формированной схеме использована методика Г.И. Белого [18] и реализована посредством алгоритма “Сечение”. Схема силовых факторов и их положительное направление представлена на рисунке 3.9.

Для реализации численной процедуры определения деформаций всё сечение представляется дискретизированным на малые площадки ΔA_k с координатами центра тяжести каждой площадки x_k, y_k (рис. 3.10). Деформации, возникающие в центре тяжести каждой площадки, при отсутствии начальных напряжений представлены в виде:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_k^N + \varepsilon_k^{Mx} + \varepsilon_k^{My},$$

а связь между ε_k и кривизнами:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 + v' / y_k + v'' / x_k + \varepsilon_k^{My},$$

где ε_0 — относительная линейная деформация оси стержня; v, v' — перемещения в направлении осей x, y ; $v' / y_k, v'' / x_k$ — приближенные значения кривизн в направлении осей x, y .

Связь между напряжениями σ_k и деформациями ε_k принимаются по унифицированной диаграмме деформирования стали, построенной в обобщенных координатах (рис. 3.11) и вращениях имеет вид:

$$\Delta \sigma = \Delta \varepsilon \cdot E_k,$$

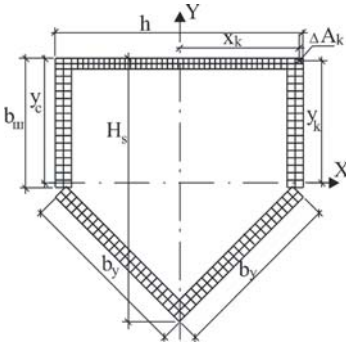


Рис. 3.10. Схема разбиения сечения на малые площадки

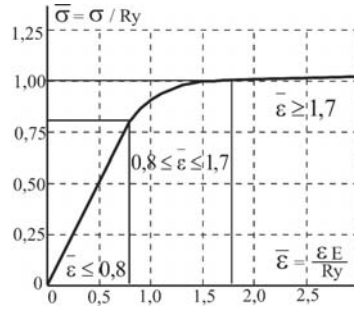


Рис. 3.11. Унифицированная диаграмма работы строительных сталей

где E_k — касательный модуль жесткости, определяемый по диаграмме (рис. 3.11).

В соответствии с критерием ограниченных пластических деформаций, предельное состояние устанавливается по максимальному значению остаточных деформаций $[\epsilon_{p,ocm}] = 3$, принятому на основании исследований Н.С. Стрелецкого и Г.Е. Бельского в современных нормах проектирования стальных конструкций.

Связь между заданными силовыми факторами в i -том сечении и напряжениями за пределом упругости выражается системой нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} N_i &= \int_A \sigma \cdot dA \approx \sum_{k=1}^m \sigma_k \cdot \Delta A_k ; \\ M_{xi} &= \int_A \sigma \cdot y \cdot dA \approx \sum_{k=1}^m \sigma_k \cdot y_k \cdot \Delta A_k ; \\ M_{yi} &= \int_A \sigma \cdot x \cdot dA \approx \sum_{k=1}^m \sigma_k \cdot x_k \cdot \Delta A_k . \end{aligned}$$

Нелинейность связана с касательным модулем E_k , который в процессе численного решения принимается по унифицированной диаграмме (рис. 3.11). Используя кинематическую и физическую зависимости, уравнения равновесия в форме приращений принимают вид:

$$\Delta N_i = k_{11} \cdot \Delta \epsilon_0 - k_{12} \cdot \Delta v'' - k_{13} \cdot \Delta u'' ;$$

$$\Delta M_{xi} = k_{21} \cdot \Delta \epsilon_0 - k_{22} \cdot \Delta v'' - k_{23} \cdot \Delta u'' ;$$

$$\Delta M_{yi} = k_{31} \cdot \Delta \epsilon_0 - k_{32} \cdot \Delta v'' - k_{33} \cdot \Delta u'' .$$

где $k_{11} \dots k_{33}$ – коэффициенты, определяющие жесткостные параметры пятигранного сечения:

$$k_{11} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot \Delta A_k , \quad k_{12} = k_{21} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot y_k \cdot \Delta A_k ,$$

$$k_{13} = k_{31} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot x_k \cdot \Delta A_k ; \quad k_{22} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot y_k^2 \cdot \Delta A_k ;$$

$$k_{23} = k_{32} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot x_k \cdot y_k \cdot \Delta A_k ; \quad k_{33} = \sum_{k=1}^m E_k \cdot x_k^2 \cdot \Delta A_k .$$

Решение системы уравнений равновесия проводится итерационным методом, позволяющим с помощью последовательных приближений получить с заданной степенью точности значения всех компонентов деформаций при любом сочетании силовых факторов.

На основе этой методики на языке “Object Pascal” была разработана программа автоматизированного определения напряженно-деформированного состояния составного профиля из швеллера и уголка с учетом ограниченного развития пластических деформаций. Блок-схема программы приведена на рисунке 3.12.

С помощью программы определены внутренние усилия, действующие в поперечном сечении составного стержня. Для произвольного пятигранного сечения определены максимальные внутренние усилия, соответствующие упругой работе материала при варьировании их соотношений.

Результаты расчета приводятся в виде графиков (рис. 3.13) взаимодействия относительных изгибающих моментов при фиксированном значении относительной продольной силы:

$$\tilde{N}' = [N'] / N'_{\max} ;$$

$$\tilde{M}'_x = [M'_x] / M'_{x,\max} ;$$

$$\tilde{M}'_y = [M'_y] / M'_{y,\max} ,$$

где \tilde{M}'_x , \tilde{M}'_y , \tilde{N}' – относительные значения усилий, соответствующих упругой работе материала; $[M'_x]$, $[M'_y]$, $[N']$ – предельные значения усилий, соответствующие упругой работе

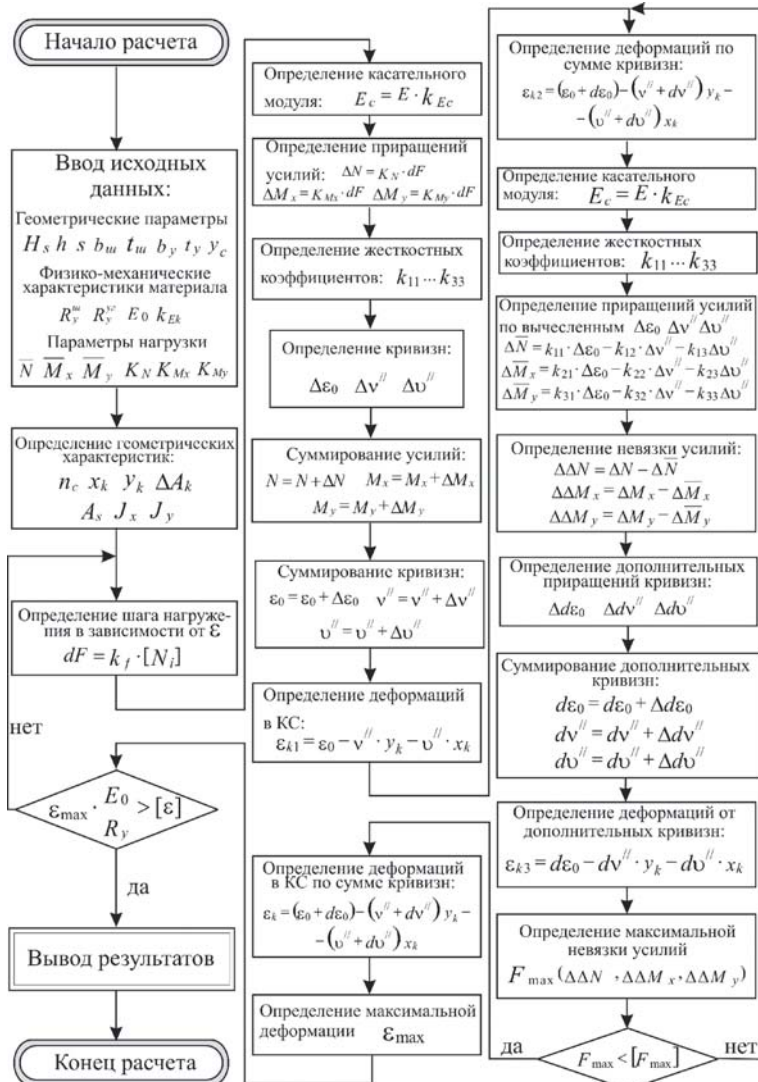


Рис. 3.12. Блок-схема определения н.д.с. пятигранного профиля

материала при совместном их действии; $M'_{x,\max}$, $M'_{y,\max}$, N'_{\max} — максимальные значения усилий, соответствующие упругой работе материала при раздельном их действии.

Анализ взаимодействия усилий (рис. 3.13) показывает, что при отсутствии продольной силы $\tilde{N}' = 0$ графики симметричны относительно обеих осей. Следовательно направление (знак) изгибающих моментов при отсутствии продольной силы не влияет на их соотношение. При максимальном положительном и отрицательном значении на графиках прослеживаются участки параллельные оси, на котором возрастание $[M'_y]$ не приводит к уменьшению $[M'_x]$. Это связано с тем, что пятигранное сечение имеет характерные угловые точки расположенные практически на центральных осях, в отличие от прямоугольного сечения из двух швеллеров и двух уголков. Графики взаимодействия предельных упругих моментов таких сечений (рис. 3.14) не имеют горизонтальных и вертикальных участков, так как оба изгибающих момента вызывают максимальные деформации в одной и той же точке сечения.

Примеры результирующих эпюр относительных деформаций в сечении пятигранника представлены на рисунке 3.15. Они построены в соответствии с графиками взаимодействия (рис 3.13) для двух вариантов соотношений усилий \tilde{M}'_x и \tilde{M}'_y . При значении \tilde{M}'_x значительно превышающем \tilde{M}'_y (рис 3.15, а) максимальное значение упругой деформации $\epsilon'_{0,8}$ возникает в обушке уголка (точка 5) на которую момент M'_y не оказывает влияния, так как точка расположена на оси у.

С возрастанием значения момента \tilde{M}'_y предельная упругая деформация переходит в обушок швеллера (точка 2), на которую оказывают влияние оба изгибающих момента и возрастание одного из них приводит к уменьшению другого. При изменении знака момента \tilde{M}'_x ситуация будет аналогична, изменится лишь положение предельной упругой деформации с точки 2 на точку 1.

Появление продольной силы при наличии обоих изгибающих моментов резко искажает картину работы пятигранного сечения. Графики взаимодействия предельных упругих моментов становятся несимметричны относительно оси \tilde{M}'_y , а графики с одинаковым значением \tilde{N}' и $-\tilde{N}'$ обратно симметричны друг другу. Это приводит к выводу, что направление (знак) и значение предельных упругих изгибающих моментов при наличии продольной силы влияет на их соотношение. При определенном направлении и знаке силовых факторов на графиках

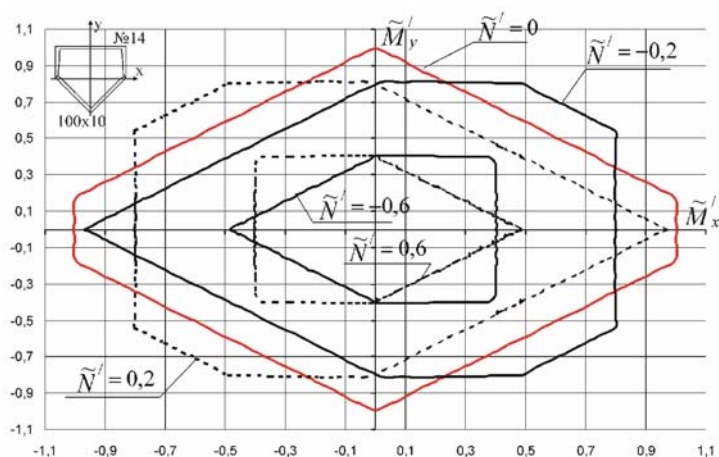


Рис. 3.13. Графики взаимодействия упругих изгибающих моментов при фиксированном значении продольной силы в пятигранном профиле сечения

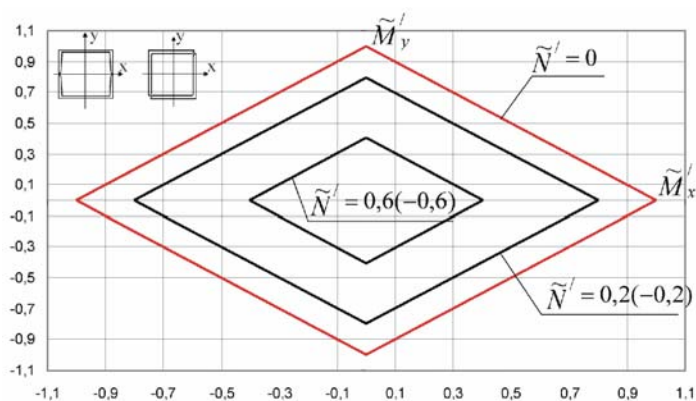
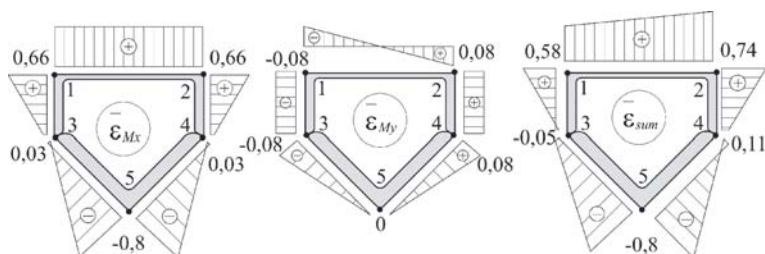


Рис. 3.14. Графики взаимодействия упругих изгибающих моментов при фиксированном значении продольной силы в прямоугольном профиле сечения

а)



б)

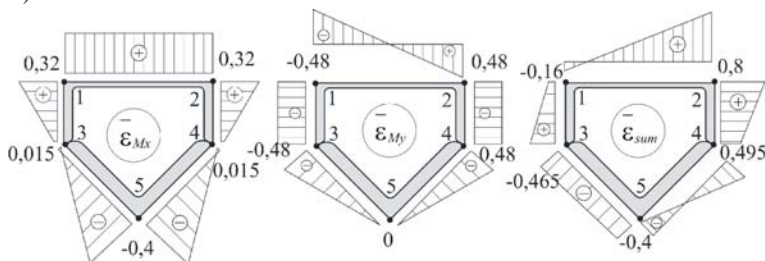


Рис. 3.15. Суммирование эпюр обобщенных деформаций при отсутствии продольной силы и значениях относительных изгибающих моментов:

а) $\tilde{M}'_x = 1$, $\tilde{M}'_y = 0,1$; б) $\tilde{M}'_x = 0,5$, $\tilde{M}'_y = 0,6$

(рис. 3.13) присутствуют вертикальные участки параллельные оси и участки практически параллельные оси. Наличие вертикальных участков поясняется на рисунке 3.15 а, сжимающая продольная сила лишь догружает точку с предельной $\varepsilon_{0,8}$. Наличие практически горизонтальных участков поясняется рисунке 3.1, 6.

Максимальная упругая деформация $\bar{\varepsilon}_{0,8}$ от суммарного действия силовых факторов \tilde{N}' , \tilde{M}'_x , \tilde{M}'_y (рис. 3.1, 6) возникает в полке швеллера (точка 3). Изгибающий момент \tilde{M}'_x оказывает малое влияние на эту точку, так как она расположена практически на оси x . Значение деформации ε от \tilde{M}'_x в точке 3 не превышает 1,5% $\varepsilon_{0,8}$. Практически постоянное значение \tilde{M}'_y при возрастании \tilde{M}'_x будет оставаться до тех пор пока предельная $\bar{\varepsilon}_{0,8}$ не возникнет в точке 2, на которую оба изгибающих момента оказывают существенное влияние и при возрастании значения одного из них будет происходить уменьшение другого

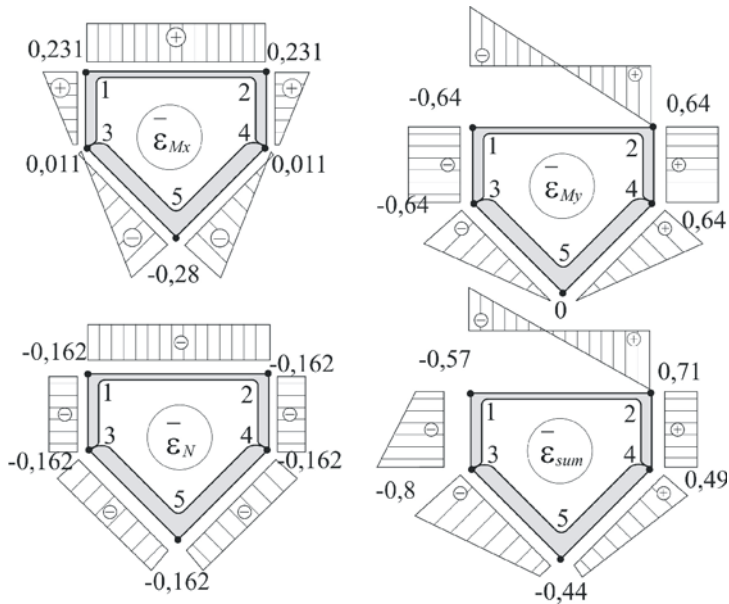


Рис. 3.16. Суммирование эпюр обобщенных деформаций при наличии продольной силы $\tilde{N}' = -0,2$ и $\tilde{M}'_x = 0,35$, $\tilde{M}'_y = 0,8$

(наклонный участок на графике 3.12 при $+\tilde{M}'_x$, $+\tilde{M}'_y$, $\tilde{N}' = -0,2$). Перемена знака \tilde{M}'_x с положительного на отрицательный, при наличии \tilde{N}' , приводит к перемене знаков в эпюре ε_{Mx} в результате предельная упругая деформация $\varepsilon_{0,8}$ будет возникать в точке 1 сечения, на которую оказывают существенное влияние все три силовых фактора. Поэтому на графике (рис. 3.13) при $-\tilde{M}'_x$, $+\tilde{M}'_y$, $-\tilde{N}'$ нет горизонтальных и вертикальных участков.

Обобщая изложенный анализ можно сказать, что на наступление предельной упругой деформации пятигранного профиля из швеллера и уголка существенное влияние оказывает направление (знак) силовых факторов и их соотношение. Возможны такие случаи, когда возрастание одного из силовых факторов при неизменном значении другого не вызывает появления пластических деформаций. В зависимости от соотношения внешних силовых факторов N , M_x , M_y меняются местоположение

“критических” точек сечения. Это можно использовать при регулировании усилий в конструкции и добиться перехода всего сечения в упруго-пластическую стадию работы, а не какой-то заведомо обреченной точки.

Разработанная программа расчета позволяет проследить процесс перехода сечения стержня в упруго-пластическую стадию и определить максимальные внутренние усилия, соответствующие появлению пластической деформации $[\epsilon_{p.i\bar{n}0}] = 3$:

$$\tilde{M}_x = [M_x] / M_{x,\max};$$

$$\tilde{M}_y = [M_y] / M_{y,\max};$$

$$\tilde{N} = [N] / N_{\max},$$

где \tilde{M}_x , \tilde{M}_y , \tilde{N} — относительные значения усилий, соответствующие появлению предельной остаточной пластической деформации; $[M_x]$, $[M_y]$, $[N]$ — предельные значения усилий, соответствующие появлению предельной остаточной пластической деформации при их совместном действии;

$M_{x,\max}$, $M_{y,\max}$, N_{\max} — максимальные значения усилий, соответствующие появлению предельной остаточной пластической деформации при раздельном их действии.

Графики взаимодействия предельных усилий представлены на рисунке 3.17.

При общей тенденции графиков взаимодействия предельных усилий соответствующих предельной остаточной пластической деформации (рис 3.17) и графиков предельных усилий при упругой работе материала (рис. 3.13), они имеют существенные различия.

В отсутствии продольной силы графики носят симметричный характер, то есть при появлении в пятигранном сечении максимальной пластической деформаций направление (знак) предельных изгибающих моментов не влияет на их соотношение. Они не имеют вертикальных участков, то есть возрастание одного предельного изгибающего момента приводит к уменьшению другого.

На рисунке 3.18 представлены изополя и эпюры обобщенных деформаций при $\tilde{M}_x=0,98$; $\tilde{M}_y=0,13$; $\tilde{N}=0$. Из рисунка 3.18 видно, что при \tilde{M}_x значительно превышающем \tilde{M}_y максимальная деформация возникает в точке 2 на которую оказывают влияние оба изгибающих момента, а при упругой работе (рис.

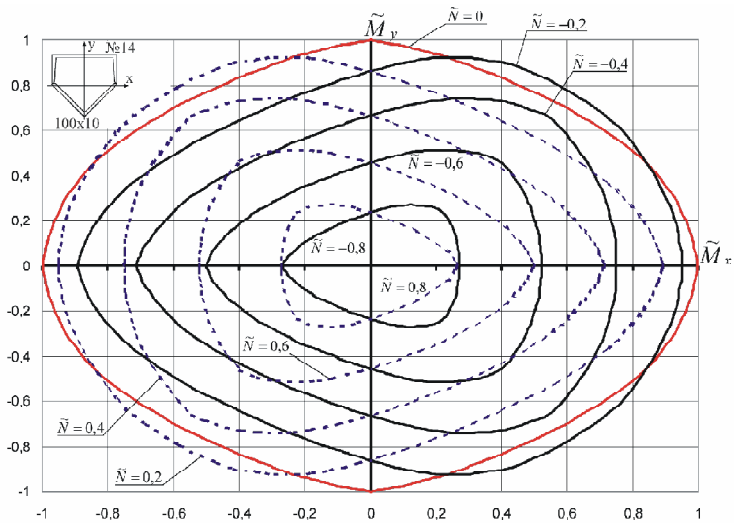


Рис. 3.17. Графики взаимодействия изгибающих моментов при фиксированном значении продольной силы, соответствующих появлению $[\varepsilon_{p,\max}]$

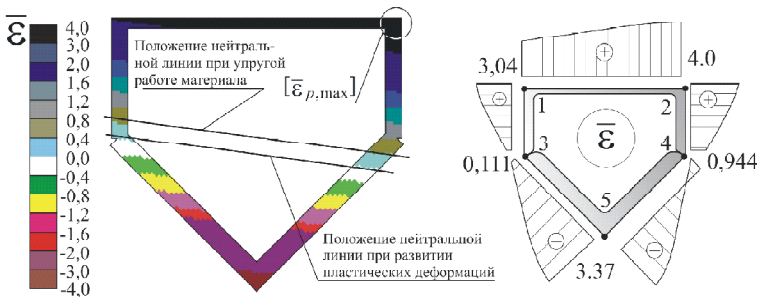


Рис. 3.18. Изополя (а) и эпюра (б) обобщенных деформаций пятигранного сечения при значениях относительных усилий $M_x=0,98$; $M_y=0,13$; $\tilde{N}=0$

3.15, а) в точке 5. Изменение точки возникновения предельной деформации при переходе в пластическую стадию связано со смещением нейтральной линии (центра жесткости сечения) в сторону обуха уголка (точка 5).

При иных соотношениях усилий эпюры обобщенных деформаций будут иметь другой вид. Графики взаимодействия предельных усилий подобные рис. 3.17 построены для всего сортамента пятигранных профилей сечения [13]. Установлено, что на характер взаимодействия предельных усилий существенно влияют геометрические параметры сечения: особенно – соотношение площадей швеллера и уголка составного профиля. Это показано на рисунках 3.19 и 3.20. На графиках цифрами обозначены сечения со следующими соотношениями площади швеллера и уголка: 1 – $A_{шв}/A_{уг}=3$; 2 – $A_{шв}/A_{уг}=2$; 3 – $A_{шв}/A_{уг}=1$; 4 – $A_{шв}/A_{уг}=0,5$; 5 – $A_{шв}/A_{уг}=0,3$.

Следует отметить, что не всегда отдельные максимальные значения усилий вызывают предельное состояние. На это следует обратить внимание при анализе расчетных сочетаний усилий.

Для оценки прочности сечений с учетом ограниченного развития пластических деформаций введены коэффициенты:

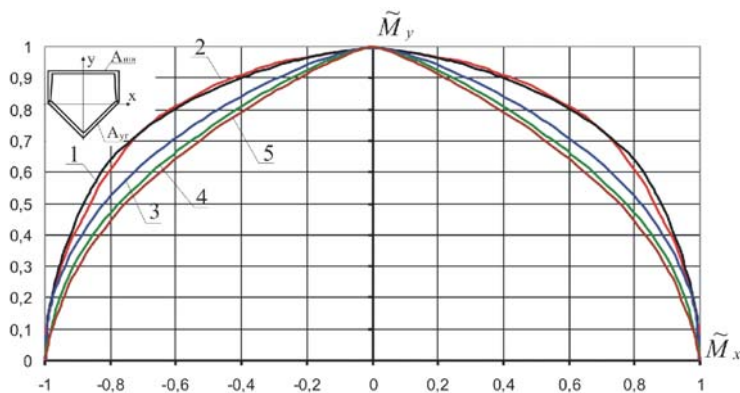


Рис. 3.19. Влияние геометрических параметров пятигранного профиля на предельные моменты при отсутствии N

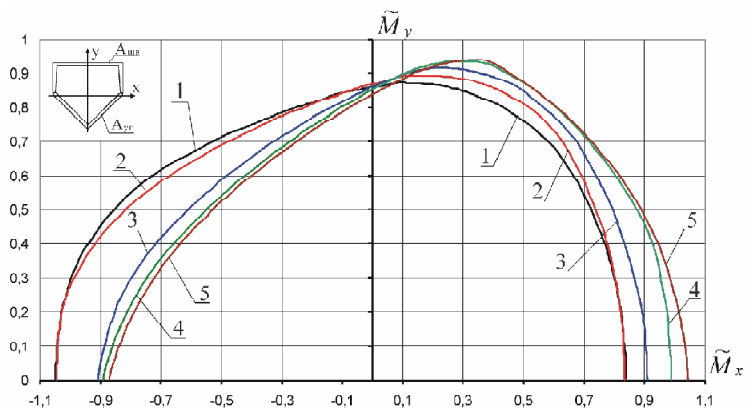


Рис. 3.20. Влияние геометрических параметров пятигранного профиля на предельные моменты при наличии N

$$k_N = \frac{[N]}{[N^{Ry}]}; \quad k_{M_x} = \frac{[M_x]}{[M_x^{Ry}]}; \quad k_{M_y} = \frac{[M_y]}{[M_y^{Ry}]},$$

где: $[N]$, $[M_x]$, $[M_y]$ – предельные значения усилий, соответствующие появлению ограниченной пластической деформации; $[N^{Ry}]$, $[M_x^{Ry}]$, $[M_y^{Ry}]$ – предельные значения усилий при совместном их действии, находящиеся в том же соотношении, что и $[N]$, $[M_x]$, $[M_y]$, и удовлетворяющие условию:

$$\pm \frac{[N^{Ry}]}{A} \pm \frac{[M_x^{Ry}] \cdot y}{J_x} \pm \frac{[M_y^{Ry}] \cdot x}{J_y} = R_y.$$

Эти коэффициенты зависят от соотношения $A_{шв}/A_{пр}$, от соотношения усилий и их направления (знака). В процессе численного анализа получены значения коэффициентов развития пластических деформаций. Они представлены в Приложении 2.

Установлено, что k_N для всего сортамента пятигранных профилей изменяется в пределах от 1,008 до 1,029 т.е. развитие ограниченных пластических деформаций позволяет повысить значение продольной силы всего на 0,8...2,9%. Поэтому в целях упрощения можно принимать $k_N = 1$.

Допущение ограниченного развития пластических дефор-

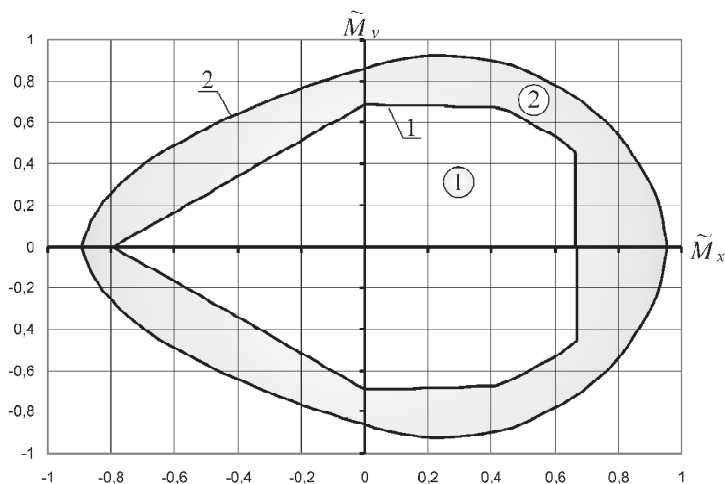


Рис. 3.21. Сравнение графиков взаимодействия \tilde{M}_x , \tilde{M}_y при $\tilde{N} \neq 0$ с учетом и без учета развития ограниченных пластических деформаций

маций при расчете прочности составного пятигранного профиля из швеллера и уголка позволяет повысить значения предельных усилий. Эффект повышения предельных моментов от учета развития ограниченных пластических деформаций показан на примере сечения, составленного из швеллера № 14 и уголка 100×10 (рис. 3.21).

На рисунке 3.21 кривая 1 соответствует расчету по упругой стадии по формуле (50) СНиП II-23-81*, кривая 2 — с учетом развития пластических деформаций, выявленных нашими исследованиями. Соответственно область 1 — область предельных значений усилий при использовании критерия краевой текучести, область 2 — область предельных усилий с учетом развития ограниченных пластических деформаций.

На наступление предельного состояния составного пятигранного профиля существенное влияние оказывает направление (знак) силовых факторов, их соотношение и геометрические параметры сечения. В зависимости от соотношения внешних силовых факторов N , M_x , M_y меняются местоположение “критических” точек сечения. Это можно использовать при регулировании усилий в конструкции и добиться перехода всего

сечения в упруго-пластическую стадию работы, а не какой-то заведомо обреченной точки. Не во всех случаях большие значения усилий вызывают предельное состояние сечения, на что стоит обратить внимание при анализе возможных расчетных сочетаний усилий.

Глава IV

**НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНОЙ
БЕСФАСОНОЧНОЙ ФЕРМЫ**

Для выявления действительной работы бесфасоночных пространственно-стержневых конструкций с поясами из труб пентагонального профиля сечения проведены испытания конструкции натуральных размеров.

Испытания выполнены в лаборатории ТГАСУ на стенде при проектном положении конструкции. Трехгранная ферма с параллельными поясами образована из двух наклонных ферм с нисходящими опорными раскосами и треугольной решеткой изготовлена на Юргинском машиностроительном заводе. Доставка фермы от завода изготовителя до лабораторного корпуса осуществлялась автотранспортом (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Транспортирование экспериментальной пространственной фермы

Габаритные размеры трехгранной фермы: пролет — 12 м; высота — 1,5 м; ширина — 3 м; панели поясов — 3 м. Перед проведением испытаний выполнен контрольный обмер элементов и узлов конструкции. Общий верхний пояс составлен из швеллера №12 по ГОСТ 8240-72 и уголка 80×10 по ГОСТ 8509-93, образующих пятигранный профиль. Нижние пояса из уголков 80×10, ориентированы обушками вверх. Раскосы из одиночных уголков 50×5, 75×8, 80×10 торцами приварены к поясным уголкам. Для обеспечения геометрической неизменяемости в процессе эксперимента, а также повышения пространственной жесткости при транспортировке смежные узлы нижних поясов в горизонтальной плоскости трехгранной фермы были связаны затяжками из уголков 50×5. Результаты обмера представлены на рисунке 4.2.

Методика проведения испытаний опубликована в [10, 11] и подробно описана в диссертациях [13, 14]. На первом этапе эксперимента изучалась работа конструкции в упругой стадии при варьировании величин нагрузок, характера и схем загрузки. На втором этапе изучалась её работа при переходе в упругопластическую стадию до потери несущей способности.

На первом этапе реализованы четыре схемы загрузки: равномерно распределенная нагрузка по всему и в половине пролета, сосредоточенные силы в узлах, сосредоточенные силы в середине панелей верхнего пояса. Предельная нагрузка назначалась так, чтобы максимальный уровень напряжений не превышал 80% R_y . На втором этапе при равномерно распределенной нагрузке по всему пролету конструкция загружалась до предельного состояния. Общий вид испытательного стенда показан на рисунке 4.3.

Измерение вертикальных и горизонтальных перемещений производилось прогибомерами ПМ, ПАО-5, а также индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Схема расстановки приборов показана на рисунке 4.4. Индикаторами с ценой деления 0,001 мм контролировалось возможное смещение швеллера относительно уголка составного профиля.

Измерение деформаций производилось с помощью тензорезисторов, сопротивлением 100 Ом и базой 20 мм. В качестве регистрирующей аппаратуры использован цифровой измерительный комплекс К732/1 с компьютерным управлением. Контролируемые тензорезисторами сечения пространственной фермы отмечены на рисунке 4.5.

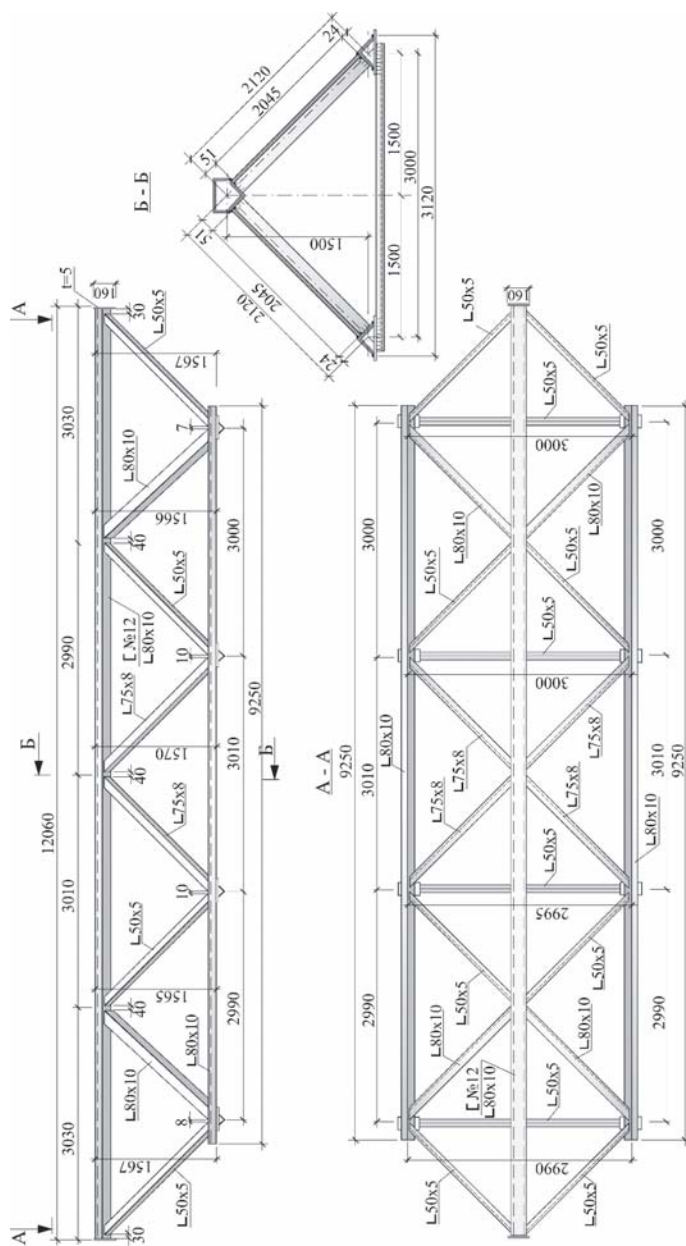


Рис. 4.2. Обмерочный чертеж пространственной трехгранной фермы



Рис. 4.3. Общий вид испытательного стенда

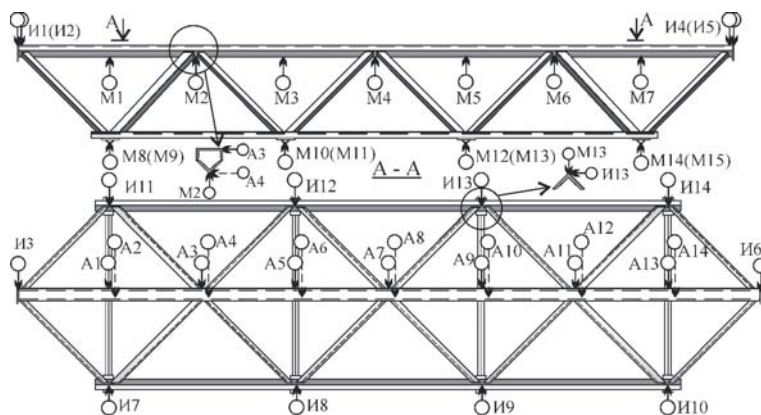


Рис. 4.4. Схема расстановки прогибомеров:

М – прогибомер Максимова, А – прогибомер Аистова ПАО-5,
И – индикатор часового типа

Эпюры прогибов верхнего пояса фермы при варьировании схем загрузки приведены на рисунке 4.6. Здесь линии 1 соответствуют теоретическим прогибам без учета податливого при-
мыкания раскосов к поясам; линии 2 – измеренные значения;

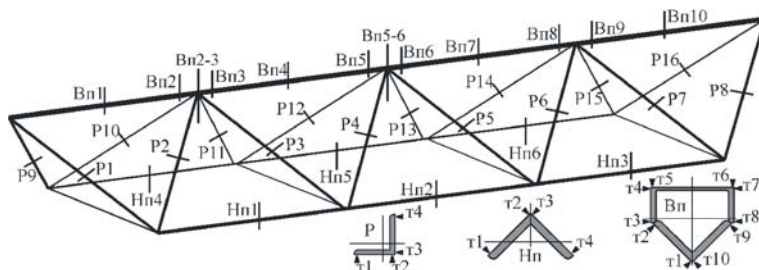


Рис. 4.5. Исследуемые сечения стержней и схемы размещения тензорезисторов

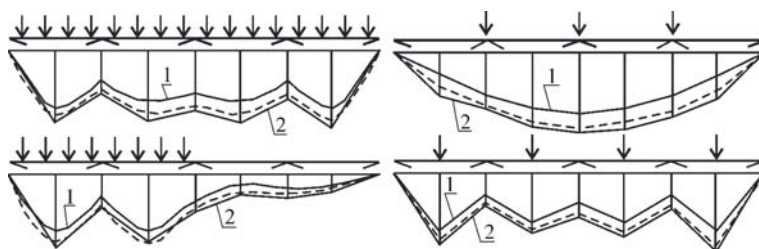
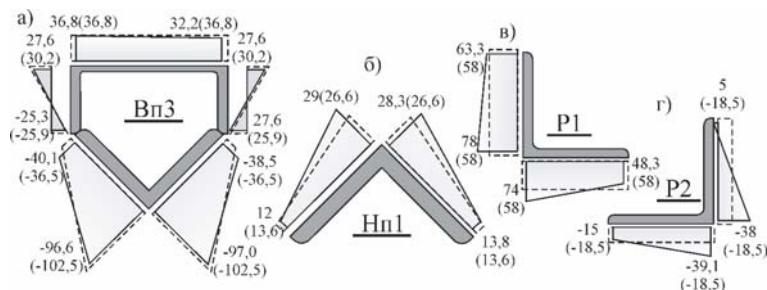


Рис. 4.6. Эпюры прогибов верхнего пояса при варьировании схемами загрузки

пунктир — прогибы с учетом податливого примыкания раскосов. Сходимость экспериментальных и теоретических результатов по прогибам с учетом податливости составляет от 2,6% до 9%; без учета податливости эта разница увеличивается от 6% до 24%. Расчет таких конструкций по 2-й группе предельных состояний следует выполнять с учетом податливого примыкания раскосов, использование эквивалентной жесткости дает удовлетворительный результат.

Вертикальные перемещения нижних поясов по характеру и величине аналогичны прогибам верхнего пояса. Горизонтальные перемещения верхнего и нижнего поясов на порядок меньше вертикальных, носят случайный характер и связаны с дефектами изготовления конструкции. Местный изгиб полки поясного уголка в зоне примыкания раскосов при максимальной нагрузке составил 0,76% от толщины полки. Сдвига швеллера

Рис. 4.7. Эпюры s (МПа) при равномерно распределенной нагрузке

относительно уголка составного пятигранного профиля не обнаружено: сечение работает монолитно.

Сравнение теоретических и экспериментальных значений нормальных напряжений в упругой стадии представлено на рисунке 4.7. Сплошными линиями показаны экспериментальные, пунктиром — теоретические эпюры. Теоретические значения приведены в скобках. Расхождение максимальных значений s для верхнего пояса пятигранного сечения не превышает 5–7% и составляет в среднем $\pm 4\%$; для нижнего пояса — менее 9%; для растянутых раскосов от 0 до 35%; для сжатых раскосов — от 0 до 45%. В раскосах появляются изгибные нормальные напряжения s , не учитываемые приближенной расчетной схемой, а большие расхождения соответствуют только малым усилиям в стержнях (разность малых чисел). Центральное сжатие или растяжения в раскосах не зафиксировано. Это связано как с несовершенствами изготовления, так и с особенностью работы узлов.

Особое внимание в процессе эксперимента уделено изучению работы внецентренно-сжатого составного стержня верхнего пояса в упругопластической стадии. Именно здесь ожидается исчерпание несущей способности конструкции.

В наиболее напряженных участках были намечены сечения для детального исследования процесса развития деформаций. Они отмечены на рисунке 4.8, а. Для оценки глубины развития пластических деформаций потребовалось установить дополнительные тензорезисторы. Схема их расстановки показана на рисунке 4.8, б. В каждом сечении устанавливалось по 20 тензорезисторов.

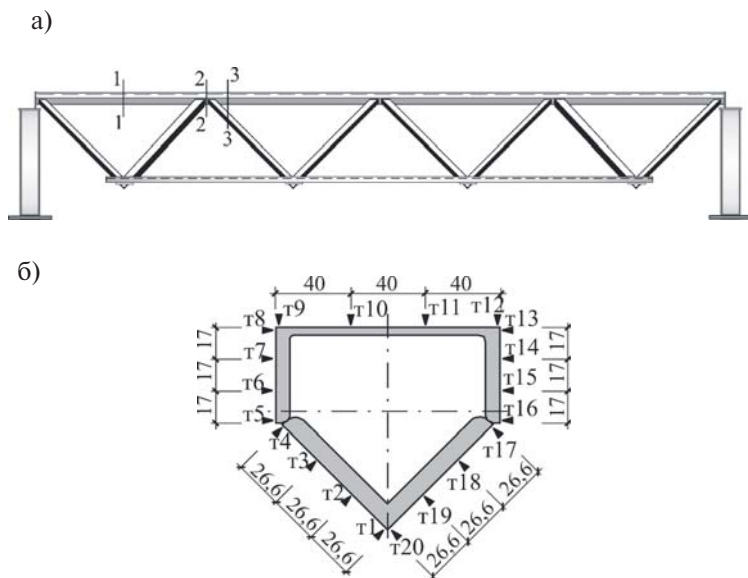


Рис. 4.8. Схема расположения наиболее напряженных сечений (а) верхнего пояса и схема расстановки тензорезисторов (б) для исследования развития пластических деформаций

Процесс развития деформаций в контрольных точках сечений 1–1 и 2–2 верхнего пояса показан на графиках рисунках 4.9 и 4.10 в обобщенных координатах деформаций $\bar{\varepsilon} = \varepsilon \cdot E / R_y$. На этих графиках сечение пятигранника представлено в развертке.

Начало зарождения пластических деформаций зафиксировано тензорезисторами т1 и т20 (рис. 4.8) в обушке поясного уголка по сечению 2–2. Процесс дальнейшего развития пластических деформаций в этом сечении при возрастании внешней нагрузки показан на графике рис. 4.11 б. Здесь представлено сравнение теоретических и экспериментальных значений $\bar{\varepsilon}$: кривая 1 соответствует теоретическим результатам, полученным в главе 3; кривая 2 – измеренным значениям деформации.

Сравнительный анализ показывает, что максимальное отклонение измеренных деформаций от теоретических – 7,5% при уровне $\bar{\varepsilon} = 1,5$. Это связано с известным несовпадением дей-

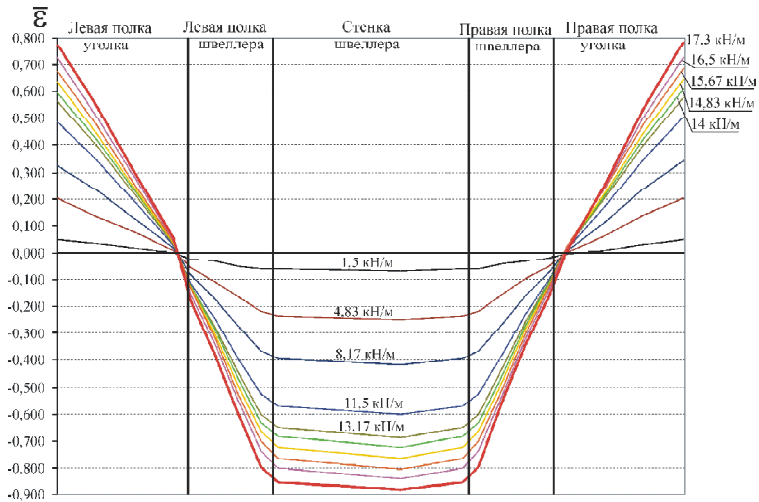


Рис. 4.9. Графики обобщенных деформаций ϵ в сечении 1–1

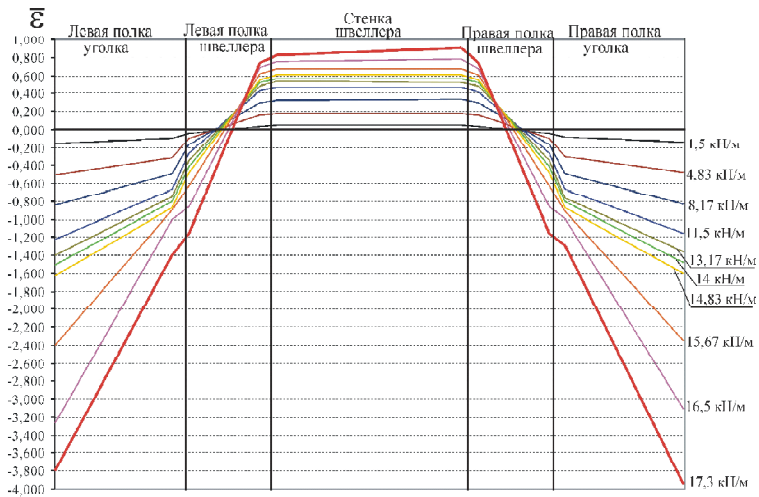


Рис. 4.10. Графики обобщенных деформаций ϵ в сечении 2–2

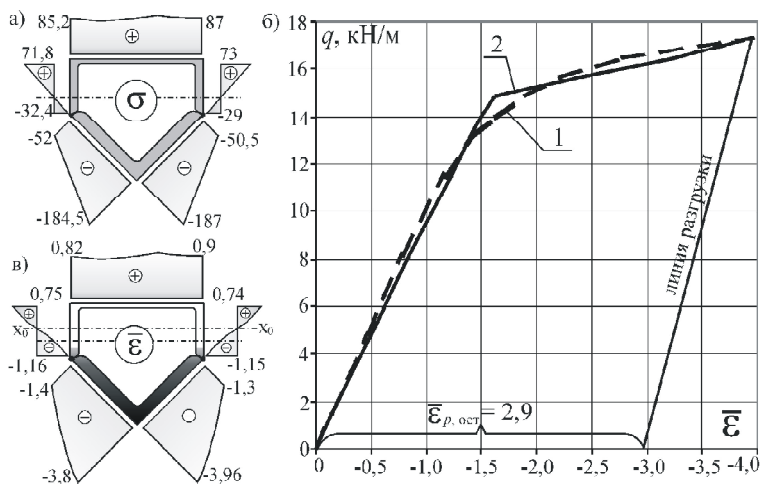


Рис. 4.11. Развитие пластических деформаций в расчетном сечении пояса составного профиля: а) эпюра s (МПа) на границе упругой работы; б) график развития $\bar{\epsilon}$ при переходе в предельное состояние; в) эпюра $\bar{\epsilon}$ в предельном состоянии

ствительной и унифицированной диаграммы работы стали при данном уровне деформаций. В дальнейшем, при уровне $\bar{\epsilon} = 4$, кривые 1 и 2 сближаются. Значение остаточной обобщенной деформации в обушке уголка составляет 2,9 (рис. 4.11 б), что отличается от принятого в качестве предельного состояния $[\bar{\epsilon}_{p, \text{до}}] = 3$ на 3,3%.

Глубина развития пластических деформаций в предельном состоянии показана на рис. 4.11 в. Уменьшение упруго работающего сечения приводит к смещению нейтральной оси $x_0 - x_0$. Процесс развития пластических деформаций интенсивно нарастает. Одновременно развиваются пластические деформации и в сечении ВпЗ (рис. 4.5). Несущая способность пояса исчерпана. Появление обширной зоны развития пластических деформаций сопровождается ростом прогибов конструкции. Однако механического разрушения в элементах и узлах фермы не зафиксировано. При снятии нагрузки конструкция стремится восстановить свою первоначальную форму с заметным появлением остаточных прогибов и необратимых деформаций.

Анализ вертикальных перемещений показывает, что линей-

ная зависимость прогибов от нагрузки сохраняется до величины загрузки 80% от предельной нагрузки. После достижения предельной нагрузки и последующего разгрузки конструкции остаточные прогибы достигали 20% от упругих прогибов.

Возможный сдвиг швеллера относительно поясного уголка составного стержня пятигранного сечения контролировался сдвигомером с использованием индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм. Измерение показаний прибора на превысило 0,001 мм вплоть до предельного нагружения конструкции. Это подтверждает предположение о совместной работе швеллера и уголка в составе пятигранного профиля. Местный изгиб полки поясного уголка в узлах сопряжения с раскосами не превышал 0,076 мм (0,76% от толщины сечения).

В процессе натурных испытаний получена качественная и количественная информация о напряженно-деформированном состоянии элементов фермы и конструкции в целом. Проведены сравнения теоретических результатов с экспериментальными. Дана экспериментальная оценка влияния податливого примыкания раскосов на общие прогибы фермы. Сходимость теоретических и экспериментальных результатов по прогибам с учетом податливого примыкания раскосов составляет 2,6...9,0%; без учета податливости до 24%.

В упругой стадии при всех рассмотренных вариантах нагружения средние отклонения теоретических и экспериментальных значений нормальных напряжений для пятигранного верхнего пояса составляет $\pm 4,3\%$; для нижнего пояса из одиночного уголка менее 9%. Центрального сжатия или растяжения в раскосах не зафиксировано. Это связано как с начальными несовершенствами изготовления, так и с особенностью работы бесфасоночных узлов фермы.

При переходе в упругопластическую стадию максимальные отклонения измеренных деформаций в пятигранном стержне пояса отличаются от теоретических на 7,5% при уровне $\bar{\epsilon} = 1,5$. Это связано с известным несовпадением действительной и унифицированной диаграмм работы стали на данном уровне деформаций. В предельном состоянии при $\bar{\epsilon}_{p, max} = 4$ расхождение экспериментальных и теоретических результатов не превышает 2%. Глубина развития пластических деформаций охватывает все сечение поясного уголка и соответствует теоретическому распределению деформаций. Измеренные остаточные

деформации после потери несущей способности с точностью 3,3% совпадают с теоретическими. Остаточные прогибы после разгрузки конструкции — 2 мм, что составляет 20% от максимальных упругих прогибов фермы.

Эксперимент подтвердил основные расчетные предпосылки и результаты теоретических исследований. Несущая способность исчерпывается в результате появления обширной зоны развития необратимых пластических деформаций одновременно в нескольких сечениях сжатоизогнутого верхнего пояса пятигранного профиля. При этом механического разрушения в элементах и узлах не зафиксировано. Результаты экспериментально-теоретических исследований позволяют обосновать методику расчета пространственно-стержневых металлоконструкций с поясами составного пятигранного профиля, допускающую частичное развитие пластических деформаций.

Глава V

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ БЕСФАСОНОЧНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ С ПОЯСАМИ ИЗ ПЯТИГРАННЫХ ТРУБ

Порядок расчета и подбора сечений элементов несущих конструкций покрытия представляется производить по следующей схеме:

- для заданной конструктивной формы (складчатая система, трехгранная ферма, структурная плита) на первом этапе определяются усилия и подбираются сечения элементов как в пространственно-стержневой системе с шарнирными узлами;
- на втором этапе конструируются узлы с учетом подобранных сечений элементов, зазоров между ними, технических условий и технологических факторов; определяется наличие эксцентриситетов и их величины;
- на третьем этапе определяются усилия в пространственно-стержневой системе с учетом неразрезности поясов, жесткости узлов, выявленных эксцентриситетов и по этим усилиям проверяются предварительно принятые сечения;
- на завершающем этапе производится оценка податливого примыкания раскосов и в необходимых случаях осуществляется корректировка сечений элементов конструкции.

Предварительный расчет прочности сжатоизогнутого стержня верхнего пояса согласно [19] рекомендуется выполнить по упругой стадии с введением коэффициента $\gamma_c = 1,2$:

$$\pm \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x \cdot y}{J_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{J_{yn}} \leq 1,2 R_y . \quad (1)$$

В дальнейшем после корректировки усилий N , M_x , M_y , связанных с учетом зазоров между раскосами в узлах, возможной их расцентровкой и принятыми конструктивными решениями, следует произвести перерасчет прочности сжато-изогнутого стержня пятигранного составного профиля сечения из швеллера и уголка с учетом развития пластических деформаций:

$$\pm \frac{N}{k_N \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} \pm \frac{M_x \cdot y}{k_{Mx} \cdot J_x \cdot R_y \cdot \gamma_c} \pm \frac{M_y \cdot x}{k_{My} \cdot J_y \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

где k_N , k_{Mx} , k_{My} — коэффициенты, учитывающий развитие пластических деформаций при совместном действии силовых факторов N , M_x , M_y , значения которых приведены в Приложении 2.

Расчетная схема на втором этапе и её конечно-элементное представление существенно изменяется по сравнению с первоначальным этапом. Изменяется и значения внутренних усилий N , M и Q .

Пространственная жесткость шатра и его геометрическая неизменяемость обеспечивается системой наклонных ферм, объединенных по верхним поясам жестким диском профнастила. Он выполняет функцию горизонтальных связей и работает как диафрагма. Методика расчета диафрагм жесткости из профнастила в покрытиях зданий изложена в [20]. Расчет сводится к условной замене сплошной среды крестовой решеткой из фиктивных растянутых стержней-связей и оценке прочности крепежных соединений. Поэтому проверка устойчивости верхнего пояса в горизонтальной плоскости не требуется. В вертикальной же плоскости может возникнуть необходимость этой проверки. Согласно СНиП II-23-81* она требуется при $m_{ef} = \eta m_x < 20$ и производится в зависимости от характера загрузки по формулам:

$$N/\varphi_{ex} \cdot A \leq R_y \cdot \gamma_c \text{ или } N/\varphi_{exy} \cdot A \leq R_y \cdot \gamma_c. \quad (3)$$

На данном этапе развития исследований для пятигранного профиля коэффициент влияния формы сечения η может быть принят по таблице 73 СНиП II-23-81* для типа сечения 9 или 11.

Для выявления гибкости верхнего пояса относительно горизонтальной оси x — x важное значение имеет определение его расчетной длины:

$$L_{ef} = \mu_x \cdot L, \quad (4)$$

где L — расстояние между узлами сопряжения пояса с раскосной решеткой.

Расчетная схема верхнего пояса с учетом упругого опирания в узлах фермы приведена на рис. 3.4.

Для регулярно расположенных опор критический параметр устойчивости зависит от числа пролетов n , условий закрепления концов многопролетного стержня и безразмерного параметра жесткости. Решение задачи устойчивости такого стержня имеется в параграфе 50 [21]. Там же приведены табулированные значения функции, определяющей критическое состояние стержня в зависимости от количества опор.

Однако, в инженерных расчетах удобнее использовать рекомендации [19]. Здесь в зависимости от условий опирания концов в пределах пролета L представлены выражения коэффициентов μ для вычисления L_{ef} . Применительно к верхнему поясу исследуемой конструкции следует принять:

$$\mu = 0,5 \sqrt{\frac{(n + 4,8)(\psi \cdot n + 4,8)}{(n + 2,4)(\psi \cdot n + 2,4)}}, \quad (5)$$

где: $n = c_m \cdot L / E \cdot J$ — параметр жесткости; c_m — коэффициент жесткости упругого защемления, равный значению реактивного момента, возникающего в опорном сечении при повороте его на угол, равный 1,0; ψ — соотношение коэффициентов c_m на противоположных опорных сечениях.

Пределы изменения значений: $0,5 \leq \mu \leq 1,0$.

Следует отметить, что для структурных покрытий из прокатных профилей с неразрезными поясами двутаврового сечения согласно п. 20.8 [19] принимается значение $\mu = 0,85$. Для неразрезных поясов стропильных ферм из гнутосварных замкнутых профилей согласно п. 15.20 [19]:

$$\mu = 0,65 \sqrt{\frac{n \cdot 10^3 + 1}{n \cdot 10^3 + 0,43}}, \quad (6)$$

где: $n = qH/2 \cdot N$ — параметр распределенной нагрузки ($0 \leq n \leq 4H_tH/L^2$); q — распределенная нагрузка на пояс; N — продольная сила; H , L — высота сечения пояса и его длина; H_t — высота фермы по осям поясов.

Сравнительный анализ показывает, что диапазон изменения параметров m , представленный (5), (6), включая $\mu = 0,85$, находится в общих пределах. Для просчитанных сопоставляемых

частных конструктивных решений значения m отличаются незначительно. Поэтому для предварительной оценки устойчивости пояса пятигранного профиля сечения можно принять $\mu = 0,85$ с корректировкой его значения на завершающем этапе по формуле (5).

На третьем этапе расчета сжатоизогнутого стержня пятигранного профиля сечения после корректировки расчетных усилий и m проверка устойчивости производится по формулам (3) с учетом п.п. 5.27*–5.34 СНИП II-23-81*.

Более простой способ оценки устойчивости стержней коробчатого сечения при сжатии с изгибом в одной или двух главных плоскостях изложен в СП 53-102-2004. Расчетные формулы имеют вид:

$$\frac{N}{\varphi_{ey} \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} + \frac{M_x}{c_x \cdot \delta_x \cdot W_{x, \min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1;$$

$$\frac{N}{\varphi_{ex} \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y \cdot \delta_y \cdot W_{y, \min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (7)$$

где φ_{ex} , φ_{ey} — коэффициенты устойчивости при сжатии с изгибом, определяемые по табл. Ж.3 [23]; c_x , c_y — коэффициенты, принимаемые по табл. К.1 [23] для типа сечения 3; δ_x , δ_y — коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\delta_x = 1 - 0,1 \frac{N \cdot \bar{\lambda}_x^2}{A \cdot R_y} \text{ и } \delta_y = 1 - 0,1 \frac{N \cdot \bar{\lambda}_y^2}{A \cdot R_y}.$$

Сравнительный анализ показывает, что разница результатов, подсчитанных этим способом и по способу СНИП II-23-81* не превышает 1%.

Нижние пояса рассматриваемых пространственно-стержневых конструкций покрытия работают в условиях растяжения с возможным появлением изгибающих моментов вследствие расцентровки узлов. Оценка прочности нижних поясов при пятигранном составном профиле их сечения следует выполнять по формуле (2). Если пояс состоит из одиночного уголка (рис. 2.3 или 2.5), то прочность следует проверять согласно п. 5.25* СНИП II-23-81* по формуле:

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x \cdot W_{xn, \min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y \cdot W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (8)$$

При этом согласно п. 20.13 [19] в формуле (8) следует принять $\gamma_c = 0,75$, а коэффициенты, учитывающие развитие пластических деформаций, в этом случае принимаются $c_x = c_y = 1,25$; $n = 1,5$.

На предварительном этапе подбора сечений растянутой и сжатой решетки прочность этих элементов проверяется по формулам центрального растяжения или сжатия. На завершающем этапе прочность растянутых раскосов проверяется по формуле (8), а устойчивость сжатых раскосов с учетом их частичного защемления в узлах по формуле:

$$\frac{N}{\varphi_{exy} A} \leq R_y \cdot \gamma_c$$

с учетом рекомендаций п.п. 5.27*–5.34* СНиП II-23-81*. Вычисляя приведенный относительный эксцентриситет $m_{ef} = \eta m_y$, коэффициент влияния формы сечения η следует определять как для сечений типа 11 по табл. 73 СНиП II-23-81*, а расчетную длину раскосной решетки $L_{ef} = 0,8 \cdot L$.

Можно использовать и другой способ расчета устойчивости сжатоизогнутого раскоса, рекомендуемый [19] для ферм из одиночных уголков по формуле (51) СНиП II-23-81*. При этом φ_e вычисляется по формуле:

$$\varphi_e = \frac{1}{1/\varphi_{eyo} + (2 - 0,2 \cdot \bar{\lambda}_{yo}) \cdot (1/\varphi_{exo} - 1/\varphi_{xо, \max})}. \quad (9)$$

Здесь φ_{exo} , φ_{eyo} – коэффициенты внецентренного сжатия, определяемые в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}_{xo}$ и $\bar{\lambda}_{yo}$ (вычисляемой относительно осей x_0-x_0 и y_0-y_0) и приведенного относительного эксцентриситета m_{efx0} и m_{efy0} , которые определяются по формулам:

$$m_{efx0} = 1,06 \cdot \epsilon_{xo} \quad \text{и} \quad m_{efy0} = 2,12 \cdot \epsilon_{yo},$$

где $\epsilon_{xo} = e_{xo}/z = M_{xo}/N_z$ и $\epsilon_{yo} = e_{yo}/z = M_{yo}/N_z$; z – определяется по рисунку 22 [19].

Значения M_{xo} и M_{yo} при расчете на устойчивость следует принимать для сечений в пределах средней трети длины стержня. Для равнополочных уголков коэффициенты φ_e , входящие в

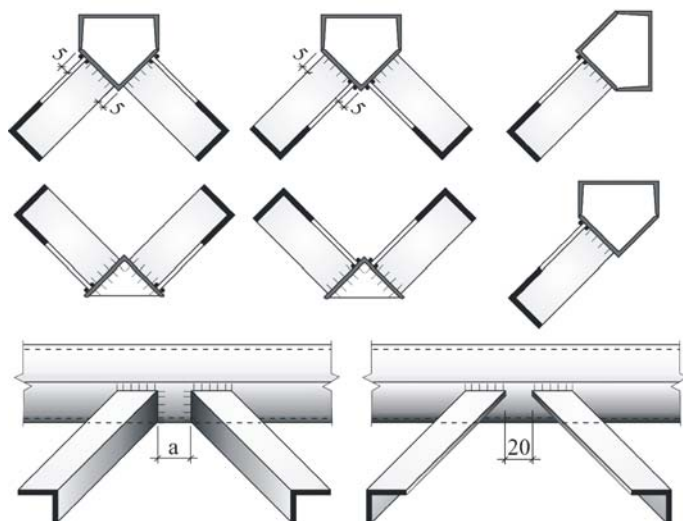


Рис. 5.1. Варианты узлов сопряжения поясов и раскосной решетки

формулу (9) табулированы и приведены в табл. 55 [19] в зависимости от значений ϵ_{x0} , ϵ_{y0} .

Варианты конструктивных решений узлов сопряжения поясов с раскосной решеткой приведены на рисунке 5.1.

Расчет узлов примыкания раскосов к поясам сводится к расчету сварных швов. Тавровые соединения следует рассчитывать и конструировать в соответствии с [19, 22, 23]. На первом этапе сварные швы можно рассчитывать как стыковые на воздействие продольных усилий в раскосе.

При конструировании узлов зазоры между перьями смежных уголков раскосной решетки принимаются по аналогии с фермами из гнутосварных профилей равными 20 мм. Зазоры между обухами смежных раскосов согласно п. 13.9* СНиП II-23-81*:

$$a = 6 \cdot t - 20 \text{ мм},$$

где t — наибольшая из толщин примыкающих раскосов.

Расстояние от ребра поясного уголка до сварного шва крепления раскоса следует принимать не менее 5 мм (см. рис. 5.1).

В отдельных случаях полка раскоса может оказаться больше полки поясного уголка. В этом случае перо раскосного уголка выходящего за грань пояса следует подрезать. Размер подрезки должен быть минимальным (до совпадения с гранью поясного уголка).

При конструировании узлов неизбежна их расцентровка. Поэтому на третьем этапе расчета корректируется расчетная схема пространственно-стержневой системы с учетом неразрезности поясов, расцентровки и жесткости узлов и выявляются новые расчетные усилия в элементах системы. В раскосах могут появиться не только продольные, но также поперечные силы, изгибающие и крутящие моменты.

Перерасчет тавровых сварных соединений следует выполнить на действующие усилия N , M , Q согласно [22, 23]. Условие прочности сварных швов:

$$\tau_f / R_{wf} \cdot \gamma_c \leq 1 \quad \text{и} \quad \tau_z / R_{wz} \cdot \gamma_c \leq 1, \quad (10)$$

где τ_f и τ_z — расчетные напряжения по металлу шва и границы сплавления. Каждое из них определяется:

$$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + (\tau_Q + \tau_{My})^2}, \quad (11)$$

где τ_N , τ_{Mx} , τ_Q , τ_{My} — напряжения в расчетной точке сварного шва от дифференцированного воздействия N , Q , M_x и M_y .

В сварном шве, расположенном на наклонной площадке относительно действующих силовых факторов, возникает сложное напряженное состояние. Напряжения в шве действуют как в его плоскости, так и в ортогональном направлении. Эти обстоятельства индивидуальны для каждого узла. Они подробно рассмотрены далее в приведенных примерах расчета узлов.

В соответствии со сложившейся практикой проектирования фермы пролетом до 15 м выполняются в виде одной отправочной марки. При больших пролетах — они разделяются на одинаковые отправочные марки. Монтажный стык в этом случае решается в виде фланцевого сопряжения на высокопрочных болтах. Расчет и конструирование этого узла следует выполнять согласно [24]. Эти же рекомендации содержаться в первом томе Справочника проектировщика [17].

Следует отметить, что монтажный стык растянутого пояса является одним из наиболее ответственных узлов конструкции.

Из-за тонкостенности элементов пятигранника катеты сварных швов соединения их с толстым фланцем должны быть очень малы, чтобы не вызвать пережога тонких элементов. При этом в толстом фланце возможен непровар. Требуется разрешить возникшие противоречия. При конструировании этого узла центр сварных швов должен совпадать с нейтральной осью пятигранной трубы, чтобы не вызвать появление дополнительных изгибающих моментов.

Узлы опирания верхних поясов пространственно-стержневых конструкций на подстропильные конструкции или колонны решаются традиционно. Опорная реакция передается через опорное ребро, приваренное в торце пятигранной трубы. Толщина опорного ребра определяется из условий смятия. Следует также проверить прочность сварного шва крепления опорного ребра к поясу. Открытые торцы нижнего пятигранного пояса должны быть заглушены для герметизации замкнутого сечения.

Жесткость бесфасоночной фермы с учетом податливости узлов сопряжения необходимо скорректировать. Рекомендуется определять минимальную высоту фермы по следующей формуле:

$$h_{min} = 5/24 \cdot \sigma_{fn} / E \cdot [L/f] \cdot L \cdot k_d, \quad (12)$$

где: σ_{fn} — максимальное напряжение в поясе от нормативной нагрузки; $[L/f]$ — величина, обратная допустимому действующими нормами предельному прогибу; L — пролет фермы; k_d — коэффициент, учитывающий податливость решетки:

$$k_d = 1 + 2 \cdot h/L. \quad (13)$$

Последняя формула, полученная в [1] для ферм с замкнутыми сечениями стержней, достаточно хорошо совпадает с вышеописанными натурными испытаниями.

Устойчивость верхних поясов пространственно-стержневых систем в горизонтальной плоскости обеспечена диафрагмами жесткости из профнастила. Расчет жесткости этих диафрагм можно выполнить согласно [20]. Если жесткость профнастила достаточна, то проверки устойчивости ферм в горизонтальной плоскости не потребуются. В процессе рабочего проектирования следует соблюдать общие правила конструирования, допуски и ограничения, предусмотренные ГОСТ 23118-99,

СП 53-101-98, СП 53-102-2004 и других требований стандартов и технических условий на проектирование, изготовление и монтаж конструкций.

Следует заметить, что при сборе нагрузок на верхние пояса рассматриваемых пространственно-стержневых систем нужно обратить внимание на размер профнастила. В зависимости от длины листа он может работать по однопролетной или многопролетной схеме. А это означает, что опорные реакции его (нагрузка на смежные верхние пояса ферм) могут быть как одинаковыми, так и различными.

Глава VI

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВКИ И МОНТАЖА

Технология изготовления элементов пространственных покрытий с поясами составного профиля из швеллера и уголка зависит от массовости изделий, материально-технической базы и ряда других обстоятельств. Конструктивные решения рассматриваемых покрытий разработаны с учетом современной тенденции повышения степени заводской готовности, рациональной разбивки конструкции на транспортабельные отправочные элементы. Рассмотрим особенности изготовления, транспортировки и монтажа исследуемых пространственно-стержневых покрытий.

Основные технологические процессы изготовления таких конструкций: правка прокатных элементов, обработка деталей, сборка и сварка. В заводских условиях правка уголковой стали производится на углоправильных вальцах, остальные детали — на листоправильных. Правка производится при кривизне более 1/1000 длины или более 5 мм.

Для изготовления сборочных марок из стального проката необходимо произвести разметку по шаблону. Отличительной особенностью разрабатываемых конструкций является одинаковая и постоянная длина раскосов, а также угол подрезки полки уголков (может изменяться только размер сечения). При этом под косым углом подрезается лишь одна полка по обоим концам раскоса; кромка второй полки ортогональна его длине.

В заводских условиях резку прокатных профилей для таких конструкций эффективней выполнять на комбинированных пресс-ножницах Н635А, которые имеют минимальные габариты: длина — 2,45 м, ширина — 1,0 м, высота — 2,5 м, вес — 5 т.

Они позволяют обрабатывать швеллера до №30, уголки до 180×18 мм. На строительной площадке прокатные профили режут по разметке или шаблону с помощью шлейф машины.

Процессу сборки отправочных марок предшествует изготовление стержней пятигранного профиля. Формообразующие уголок и швеллер обжимается в струбцине (рис. 6.1, а). Стабильность составного профиля обеспечивается фиксаторами из коротышовых уголков.

Далее следует процесс сварки, которую можно осуществлять автоматически под слоем флюса с использованием сварочных тракторов. Симметричное расположение сварных швов относительно вертикальной оси сечения дает компенсацию остаточных сварочных деформаций. Относительно же горизонтальной оси швы смещены на определенное расстояние, поэтому возможны саблевидные остаточные деформации стержня. Для их предотвращения необходимо применять обратноступенчатый метод сварки, при котором шов разбивается на участки, длиной 200–250 мм (при ручной сварке) и 1500–2000 мм (при автоматической). При ручной сварке сварной шов может выполняться прерывистым. Последовательность наложения швов показана на рисунке 6.1, б.

Для установки монтажных фланцев по концам поясов возможно применение универсального кондуктора (рис. 6.1, в). Он представляет собой раму 1, на которой установлены тумбы 2 и 3, оснащенные прижимами. Их переставляют по длине кондуктора в зависимости от длины собираемого пояса и крепят к раме 1. Пневмопружины прижимают фланцы к фиксаторам в про-

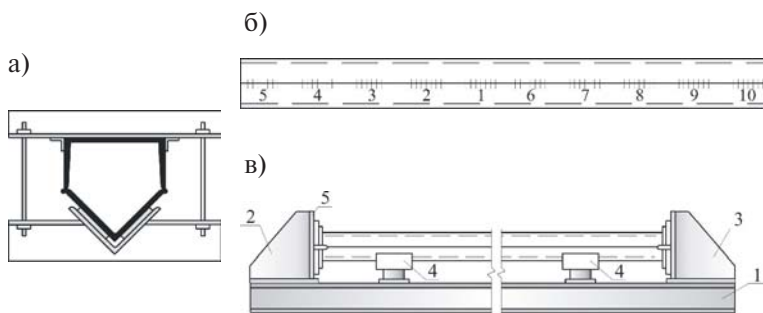


Рис. 6.1. Изготовление стержня пятигранного профиля

цессе сборки. В промежутках между тумбами установлены регулируемые по высоте упоры 4. При сборке кондуктор настраивают на определенную длину. В фиксаторы 2 устанавливают фланцы. После установки пояса тумбу 1 досылают до упора 4 точной настройкой. Производят прихватку фланца к поясу, снимают пояс с фланцами с кондуктора и производят окончательную обварку фланцев. Для изготовления составных пятигранных профилей из швеллера и уголка возможно использование автоматических линий, описанных в [1].

Сборку плоской наклонной торцевой фермы возможно производить традиционными приемами – на стеллаже с помощью упоров-коротышей и шаблонов для монтажных узлов (рис. 6.2).

Для сборки отправочных марок в виде трехгранных ферм с одним верхним поясом (рис. 6.2, а) или двумя верхними поясами (рис. 6.2, б) необходимо использовать пространственные рамы-кондукторы из уголков, которые устанавливаются по концам отправочных марок (рис. 6.2, в). Нижние 1 или верхние 2 устанавливаются на стеллаж 3 по упорам 4. На два верхних 2 или нижних 1 пояса устанавливается нижняя рама кондуктора 5. На верхнюю раму кондуктора 6 устанавливается третий пояс. Далее следует выверка осевых размеров, установка

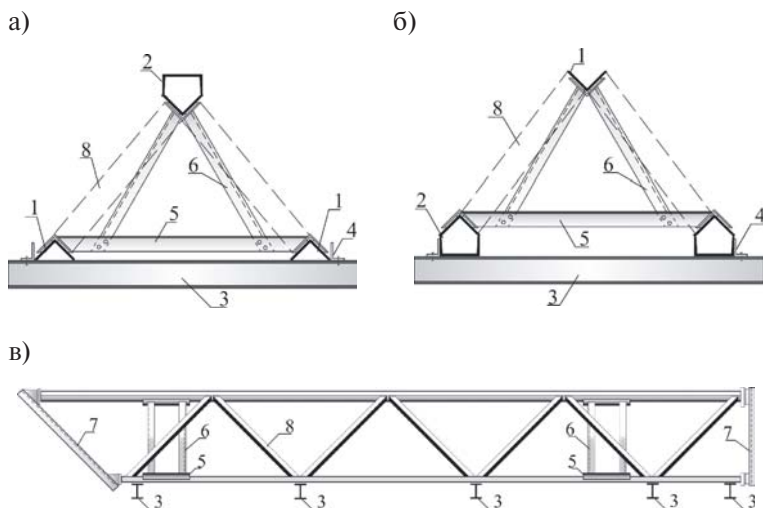


Рис. 6.2. Сборка трехгранных ферм

шаблонов-фиксаторов 7 на монтажные узлы, разметка узлов и установка раскосной решетки 8 на прихватках. Последовательно устанавливая трехгранную ферму на все грани производят обварку примыкающих торцов раскосной решетки 8 к поясам 1 и 2.

Независимо от конструктивной формы исследуемых металлоконструкций покрытия отправочными марками их основных укрупненных элементов являются пространственные трехгранные фермы. Поперечное сечение этих ферм — равнобедренный прямоугольный треугольник с размерами катетов 2,12 м и гипотенузой 3 м при строительной высоте покрытия 1,5 м (расстояние от вершины треугольника до гипотенузы). В отдельных случаях (структурная плита) могут появиться дополнительные линейные элементы, а также второстепенные связевые элементы, монтажные раскосы или затяжки. При пролетах ферм более 24 м высота их может быть увеличена из условий жесткости конструкции.

Габариты отправочных марок позволяют транспортировать их от завода — изготовителя до строительной площадки любым видом транспорта. Транспортировка и складирование трехгранных ферм отправочных марок возможна пакетом с вложением ферм одна в другую, что позволяет максимально использовать грузоподъемность транспортного средства и компактное их складирование.

Конструкции пролетом до 15 м перевозятся целиком; свыше 15 м в виде двух одинаковых отправочных марок. Процесс укрупнительной сборки их производится на отметке чистого пола без применения каких-либо дополнительных приспособлений: используются фланцевые соединения на болтах. При небольшом объеме грузоперевозок эффективно использовать автомобили с полуприцепом или прицепом общего назначения. При большом объеме грузоперевозок — автомобильными тягачами с прицепами — тяжеловозами или платформами. Схемы транспортировки отправочных марок представлены на рисунке 6.3.

Габарит высоты наклонной фермы 2,12 м позволяет пакетировать 4 отправочные марки в кузов полуприцепа общего назначения. Автомобилем ЗиЛ 441510 с полуприцепом ОдАЗ 885 можно транспортировать 4 трехгранные фермы пролетом 15 м общим весом 6,4 т, что составляет 82% грузоподъемности этого автомобильного средства перевозки. Одним рейсом доставляются все несущие конструкции для перекрытия площадью

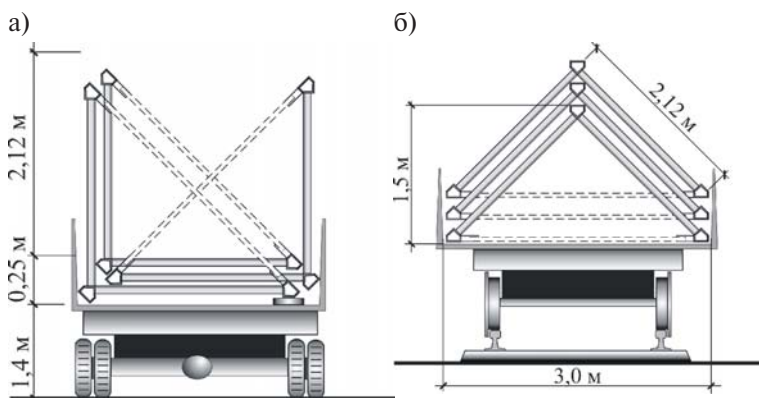


Рис. 6.3. Схемы транспортировки отправочных марок

360 м². На автомобильных и железнодорожных платформах отправочные марки пакетируются “в ёлочку” (рис. 6.3). Обозначенные пунктиром транспортные расчалки используются на монтаже в виде распорок по шатру.

При транспортировке структурного покрытия на заводе полностью изготавливаются его отправочные марки в виде трехгранных ферм 5, 6 (рис. 2.5), они перевозятся аналогично (рис. 6.3). На сборочной площадке к ним присоединяются недостающие элементы торцевых ферм, а также разряженные внутри структуры стержни раскосов и распорок. На монтаже удобнее по возможности использовать болтовые соединения. Тогда в отдельные узлы придется ввести ограниченное количество фасоннок.

Процесс укрупнительной сборки структурной плиты рекомендуется производить в такой последовательности: сначала на подкладке устанавливается трехгранная ферма 6 (рис. 2.5) с одним верхним поясом. К её концам в ортогональном направлении посредством фланцевых соединений на болтах крепятся наклонные торцевые плоские фермы (бортовые элементы). Устанавливаются трехгранные фермы 5 с двумя верхними поясами и до расстроповки крепятся болтами в монтажных узлах к наклонным бортовым фермам, создавая жесткую обвязку по контуру структуры. Далее верхние и нижние пояса ферм 5 и 6 связываются разряженной системой раскосов 7. Здесь же на

сборочной площадке можно уложить и закрепить кровельное покрытие из профлиста или панелей “сэндвич”.

Подъем в проектное положение осуществляется одним краном соответствующей грузоподъемности с использованием строповочной траверсы. Стropовка производится в 4 опорных узлах. При возведении многопролетных или протяженных зданий возможно применение конвейерного метода монтажа. Сборочные линии могут располагаться в каждом пролете. При наличии подкрановых путей в возводимом здании возможно применение установщика.

Вес структурной плиты габаритами 18×12×1,5 м для IV снегового района и теплой кровли составляет 5,2 т. Это позволяет использовать на монтаже автокран типа МКА-16 с вылетом стрелы 18 м. Такие конструкции эффективны при перекрытии больших площадей с разряженной сеткой колонн.

Резюмируя можно отметить, что все рассмотренные конструкции покрытий просты в изготовлении, транспортировке, и монтаже. Массовое изготовление их не требует больших капиталовложений, производственных площадей и спецоборудования. Оно может быть организовано в условиях механической мастерской, а при небольшом объеме строительно-монтажных работ — непосредственно на строительной площадке с использованием простейших подручных приспособлений.

Дадим оценку трудоемкости изготовления таких конструкций по методике Я.М. Лихтарникова [25]. Трудоемкость изготовления конструкций из малоуглеродистой стали по основным технологическим операциям:

$$T_u = k_{сер} \cdot k_u \cdot \Psi_T \cdot \mu \sqrt{Q_{осн} \cdot n_{осн}}$$

где $k_{сер}$ — коэффициент серийности, значение которого зависит от количества отправочных марок в партии (табл. 9 [25]); k_u — коэффициент повышения удельной трудоемкости изготовления при применении сталей повышенной прочности (для малоуглеродистой стали $k_u = 1$); Ψ_T — коэффициент трудоемкости изготовления:

$$\Psi_T = 1 + \frac{\beta}{k_u} \sqrt{(k_{стп} - 1) \cdot d};$$

μ , β , d — соответственно — коэффициенты технологичности, транспортабельности и детальности (табл. 11 [25]);

$$d = n_{всп}/n_o; k_{сmp} = 1 + Q_{всп}/Q_{осн};$$

$n_o, n_{всп}$ — количество основных и вспомогательных деталей конструкции; $k_{сmp}$ — строительный коэффициент массы; $Q_{осн}, Q_{всп}$ — масса основных (расчетных) деталей и вспомогательных.

В таблице 6.1 представлен сравнительный анализ трудоемкости изготовления трехгранной фермы с поясами пятигранного профиля из швеллера и уголка (вариант 1) и традиционной плоской фермы из уголков (вариант 2) для пролета 18 м при нагрузке на покрытие 3 кН/м²; сталь С245; объем партии конструкций — 11 шт.

Анализ показывает, что трудоемкость изготовления разработанных конструкций трехгранных ферм по чертежам КМД на 20,5% меньше, чем для плоских ферм из уголков, а удельная трудоемкость изготовления снижается на 29,3%. Это связано со снижением количества дополнительных деталей (фасонки, прокладок и т.п.) в 5 раз. По отдельным этапам изготовления снижение удельной трудоемкости составило: на стадии обработки — 7%; на стадии сборки — 56%; на стадии сварки — 37%. Несмотря на то, что масса трехгранной фермы на 12% больше, чем у плоской, расход металла на покрытие с плоскими фермами на 12% больше, чем у покрытия с трехгранными фермами. Расход металла на покрытие в варианте 1 без учета профнастила составляет 23 кг/м², в варианте 2—28,5 кг/м², то есть достигается общая экономия металла 19,5%. Это связано с отсутствием в предлагаемом нами конструктивном решении прогонов и значительном сокращении связевых элементов по шатру.

Заводская технологическая себестоимость вычислена согласно [26] по формуле:

Таблица 6.1

Сравнительный анализ трудоемкости изготовления конструкций

Вар.	$Q_{осн}$ т	$Q_{всп}$ т	$k_{стр}$	$n_{всп}$	n_o	d	μ	β	ψ_T	$k_{ср}$	T_u чел- час	T_u/G чел- час./т
1	1,58	0,05	1,03	20	36	0,56	2,0	1,0	1,13	1	17,04	10,45
2	1,19	0,26	1,22	98	38	2,59	1,5	1,49	2,125	1	21,44	14,78

$$C_u = [Q(C_{осн.м} + C_{з.с}) + T_u \cdot \alpha_u (1 + k_{н.р}) + Q \cdot H / \alpha_m] k_p k_{ис} + C_T,$$

и составила в ценах 1980 г. для варианта 1 $C_u = 278,2$ руб., для варианта 2 $C_u = 253,06$ руб. Здесь учтена масса конструкций Q , удельная стоимость основных материалов $C_{осн.м}$, заготовительно-складские расходы $C_{з.с}$, трудоемкость изготовления T_u , среднечасовая зарплата a_u , накладные расходы к основной зарплате $k_{н.р}$, условно-постоянные расходы H , коэффициенты учета рентабельности и отчислений на исследовательские работы k_p , $k_{ис}$, стоимость транспортирования к месту монтажа автотранспортом на расстояние до 10 км — C_T .

Таблица 6.2

Заводская себестоимость металлоконструкций покрытий

Наименование отправочной марки	Масса 1 марки, кг	Количество	Общая масса Q , т	$C_{ом}$ р/т	T_u чел. ч	C_u руб.
Плоские стропильные фермы из спаренных уголков						
Ферма Ф1	1450	11	15,95	127	235,84	2784
Прогоны	145	80	11,6	122	1,64	1808
Распорки	120	30	3,6	127	2,23	592,5
Вертикальные связи	289	9	2,6	127	2,75	432,9
Горизонталь- ные связи	63	42	2,65	127	2,55	472,6
Итого:	—	172	36,4	—	245	6090
Беспрогонное покрытие с трехгранными фермами						
Ферма Ф2	1630	11	17,93	127	187,44	3060
Подстропиль- ные балки	406,5	20	8,13	122	1,79	1272
Распорки	23	42	0,97	127	0,67	168
Итого:	—	73	27,03	—	190	4500

При ощутимом снижении трудоемкости изготовления на 29,3% удельная стоимость изготовления разработанной конструкции снизилась незначительно, и составила по варианту 1 = 170,7 руб./т, по варианту 2 = 174,5 руб./т. Экономия в денежном выражении всего 2,2%. Несмотря на небольшую финансовую экономию на данном этапе производства работ разработанная конструкция на 29% снижает сроки её изготовления по сравнению с традиционными фермами.

Для оценки стоимости в деле рассмотрены эти два варианта применительно к покрытию здания размерами в плане 18×60 м. В варианте 1 – беспрогонное покрытие с использованием трехгранных ферм с поясами пятигранного профиля. В варианте 2 – плоские фермы из спаренных уголков с шагом прогонов 3 м. Сравнение произведено на основании чертежей КМ. При оценке заводской себестоимости по данным [26] приняты: $C_{зс} = 1,5$ руб./т; $a_{и} = 0,56$ руб./ч; $k_{н.р} = 3,75$; $H = 11$ р/т; $a_{м} = 1$; $k_{р} = 1,114$; $k_{ис} = 1,00539$; $C_{Т} = 1$ руб./т. Расчет стоимости по вариантам представлен в таблице 6.2.

Сравнительный анализ двух решений показывает, что применение в рассмотренном покрытии беспрогонных трехгранных ферм с поясами пятигранного профиля из швеллера и уголка дает экономию металла 9,37 т, что составляет 25,7%, снижение заводской стоимости на 26% при одновременном снижении трудозатрат на 22,4%.

Технико-экономический анализ показывает, что разработанные беспрогонные покрытия с поясами пятигранного профиля позволяют одновременно снизить металлоёмкость, трудоемкость изготовления и монтажа, транспортные расходы и стоимость в деле. Такие конструкции могут быть использованы при обустройстве площадок газо- и нефтедобычи, при возведении эстакад, башен, градирен и других инженерных сооружений.

Глава VII

ПРИМЕР ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ БЕСФАСОНОЧНЫХ ТРЕХГРАННЫХ ФЕРМ

Требуется разработать проект каркаса одноэтажного производственного здания с использованием в конструкциях покрытия трехгранных бесфасоночных ферм с поясами из труб пятигранного профиля сечения. Место строительства — г. Томск (IV снеговой и III ветровой район строительства). Здание размерами в плане 20х60 м и высотой помещения 6 м примыкает к существующему каркасу без перепада высот. Здание бескрановое не отапливаемое.

Рассмотрены два варианта конструктивных решений каркаса. Вариант 1 (рис. 7.1—7.3) предусматривает использование ферм пролетом 15 м с сеткой колонн внутри здания 6х15 м. Вариант 2 (рис. 7.4—7.6) предусматривает фермы пролетом 18 м и свободным от колонн внутренним пространством. Ограждающие конструкции — кровельный и стеновой профнастилы.

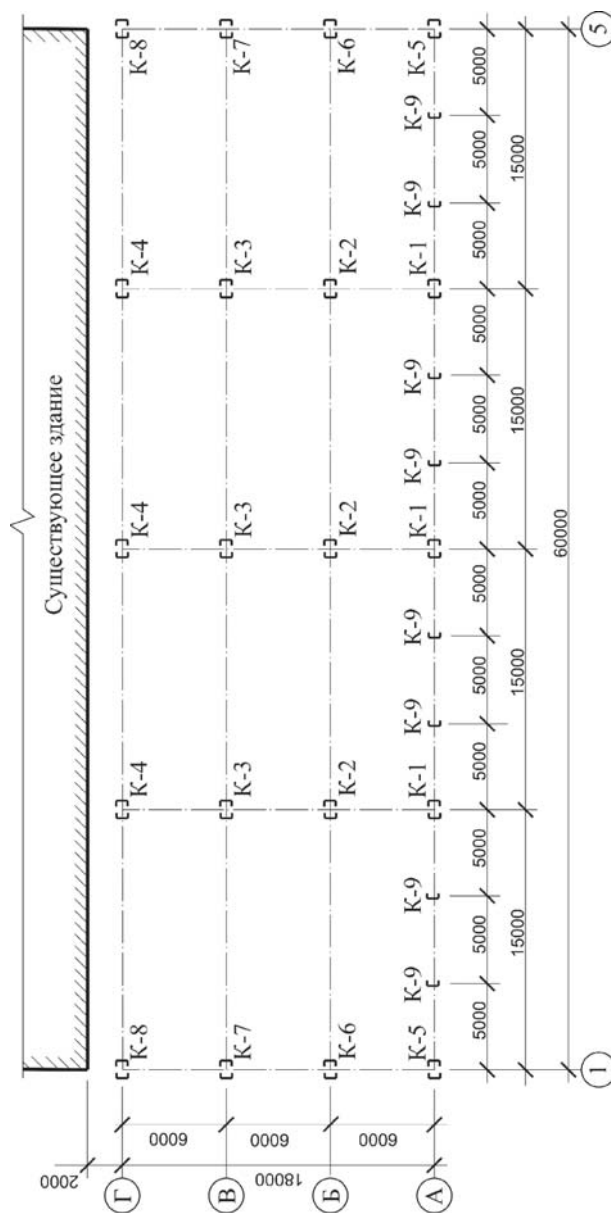
Интенсивность нагрузок на покрытие, включая собственную массу несущих и ограждающих конструкций:

1,9 кН/м² — нормативное значение;

3,0 кН/м² — расчетное значение.

Материал несущих конструкций — сталь С245 по ГОСТ 27772-88. Электроды типа Э42 по ГОСТ 9467.

Кровельный профнастил Н57-750-07 по ГОСТ 24045-94 принят по трехпролетной схеме опирания на пояса ферм 3+3+3 = 9 м. Несущая способность его — 3,1 кН/м² лимитируется условием устойчивости стенки гофра на опоре. Для обеспечения работы профнастила в качестве диафрагм жесткости [20] его не-



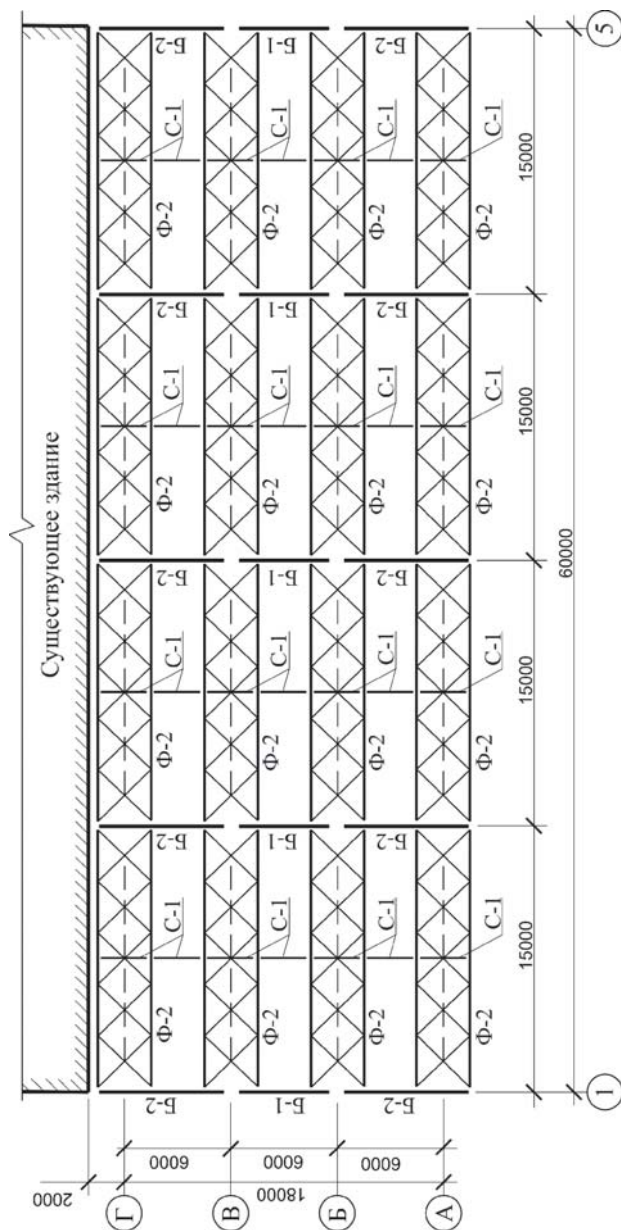


Рис. 7.2. План покрытия (покрытие с фермами пролетом 15 м)

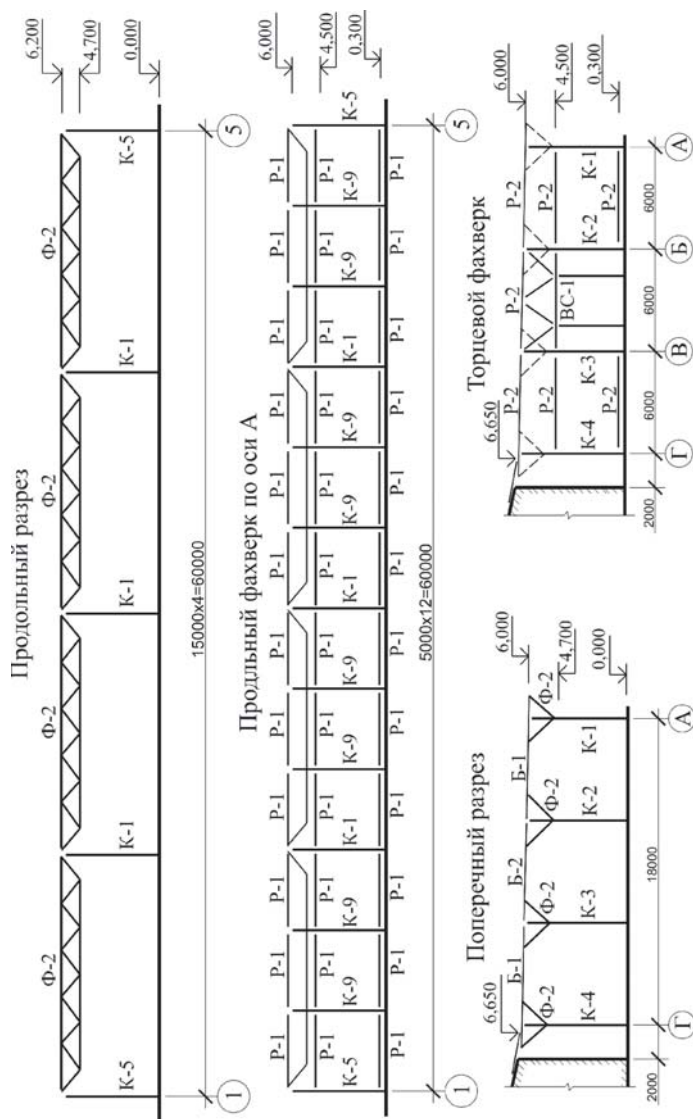


Рис. 7.3. Разрезы по каркасу (покрытие с фермами пролетом 15 м)

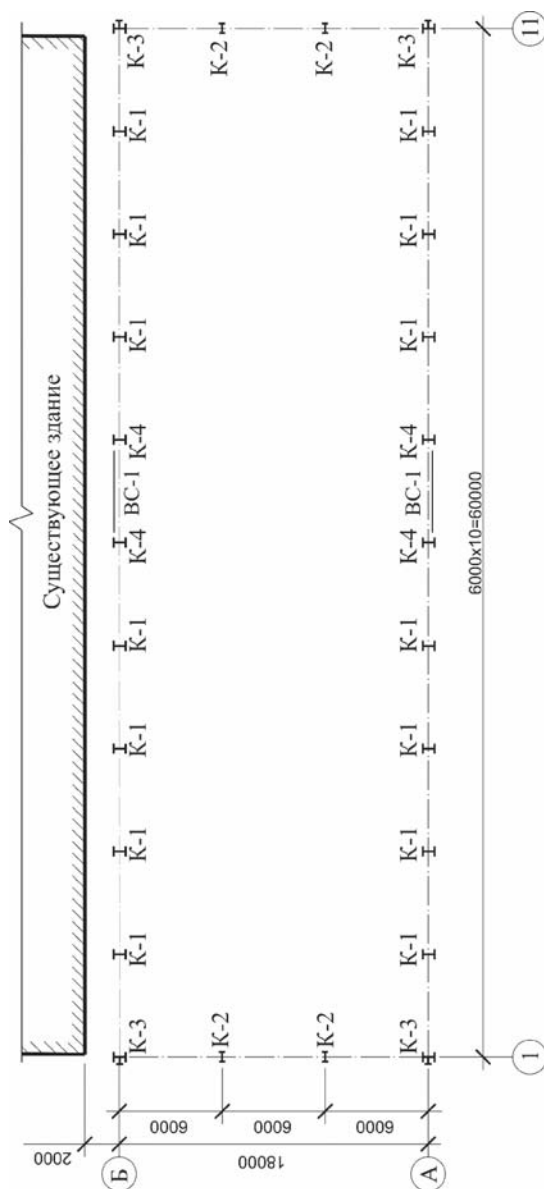


Рис. 7.4. План колонн (покрытие с фермами пролетом 18 м)



Рис. 7.5. План покрытия (покрытие с фермами пролетом 18 м)

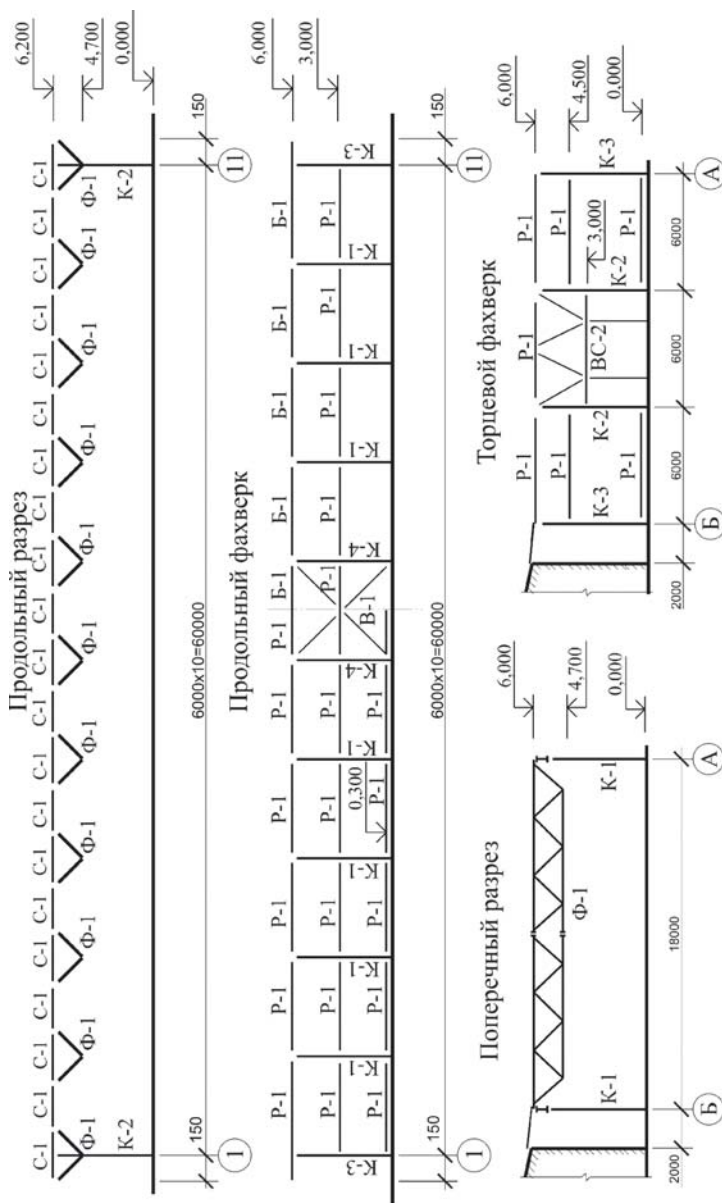


Рис. 7.6. Разрезы по каркасу (покрытие с фермами пролетом 18 м)

обходимо крепить самонарезающими болтами М6×20 в каждом третьем гофре.

На первом этапе расчетная схема трехгранной фермы представлена (рис. 7.7) в виде пространственно-стержневой системы с неразрезными поясами и шарнирно примыкающими центрированными узлами крепления к ним раскосов и распопрок. В узлы верхних поясов ферм введены условные затяжки, заменяющие работу профнастила. Статический расчет выполнен по программе “Мираж”.

Расчетные усилия и результаты предварительного подбора сечений наиболее нагруженных элементов приведены в таблице 7.1.

Пятигранное сечение верхнего пояса сформировано из [12 и] 90×6. Стенка швеллера расположена в горизонтальной плос-

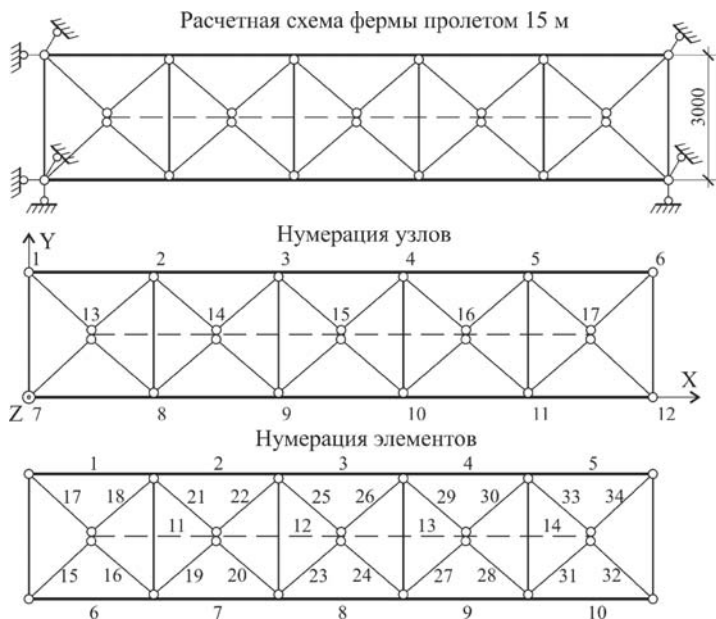


Рис. 7.7. Расчетная схема ферм пролетом 15 м с центрированными узлами (вид в плане)

Таблица 7.1

Предварительный подбор сечения стержней фермы

Элемент фермы	№ элем.	N кН	M кН*м	Сечение	Площадь см ²	e см	Расчетная длина
Верхний пояс	3	-165,196	-5,317	Швеллер 12, уголок 90×6	23,91	3,22	3,00
Нижний пояс	12	330,22	1,57	Швеллер 12, уголок 90×6	23,91	—	3,00
Растянутые раскосы	15, 19, 23	97,941	—	Уголок 50×5	4,8	—	2,60
Сжатые раскосы	16	-97,526	—	Уголок 100×6,5	12,82	—	2,34
	20	-45,538	—	Уголок 75×6	8,78	—	2,34
Элемент фермы	№ элем.	Радиус инерции, см	λ	$[\lambda]$	φ (φ_e)	σ кН/см ²	Несущая способ. кН/см ²
Верхний пояс	3	3,94	76	130	0,325	21,26	24,0
Нижний пояс	12	3,94	76	400	—	16,89	24,0
Растянутые раскосы	15, 19, 23	0,98	265	400	—	20,40	24,0
Сжатые раскосы	16	1,99	117	188	0,445	17,095	18,38
	20	1,48	158	183	0,284	18,265	18,38

кости. На неё укладывается кровельный профнастил. Геометрические характеристики сечения (Приложение 2):

$$A = 23,91 \text{ см}^2; W_x = 50,97 \text{ см}^3; i_x = 3,94 \text{ см}.$$

$$e = M/N = 3,22 \text{ см}; m_x = 3,22 \cdot 23,91/50,97 = 1,51;$$

$$\lambda_x = 300/3,94 = 76;$$

$$\bar{\lambda} = 76 \sqrt{24,0/(2,06 \cdot 10^4)} = 2,62.$$

Коэффициент влияния формы сечения принят по таблице 73 СНиП II-23-81* для сечения типа 11:

$$\eta = 1,45 + 0,04 \cdot 1,51 = 1,51; m_{ef} = 1,51 \cdot 1,51 = 2,28.$$

По табл. 74 СНиП II-23-81* $\sigma = 0,325$.

$$\sigma = 165,196/0,325 \cdot 23,91 = 21,26 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Устойчивость обеспечена с запасом 13%.

Из условий унификации нижний пояс ферм принят того же сечения, что и верхний. Условие прочности его при растяжении с изгибом:

$$\sigma = 330,22/23,91 + 157/50,97 = 16,89 \text{ кН/см}^2 < 24,0 \text{ кН/см}^2.$$

Геометрическая длина раскосов, расположенных в наклонной плоскости $L = \sqrt{1,5^2 + 2,121^2} = 2,598 \text{ м}$, $L_{ef} = 0,9 \cdot 2,598 = 2,338 \text{ м}$. Проверка устойчивости сжатых раскосов:

— элемент 16 из $\angle 100 \times 6,5$;

$$\sigma = 97,52 \text{ кН}/0,445 \cdot 12,82 \text{ см}^2 = 17,095 \text{ кН/см}^2 < 0,75 \cdot 24,0 = 18,0 \text{ кН/см}^2;$$

— элемент 20 из $\angle 75 \times 6$;

$$\sigma = 45,538 \text{ кН}/0,289 \cdot 8,78 \text{ см}^2 = 17,95 \text{ кН/см}^2 < 0,75 \cdot 24,0 = 18,0 \text{ кН/см}^2.$$

Устойчивость сжатых раскосов обеспечена с запасом 7% и 0,3%.

На втором этапе расчета производится конструирование узлов сопряжения поясов с раскосами и определение их расценки. Конструкция узлов при обозначении, соответствующем рисунку 7.4, приведена на рисунках 7.8 и 7.9. На этом этапе расчета сварные швы крепления раскосов рассчитываются как стыковые. Несущая способность сварного шва:

$$R_{wy} \cdot \gamma_c = 0,85 \cdot 24,5 \cdot 1 = 20,825 \text{ кН/см}^2.$$

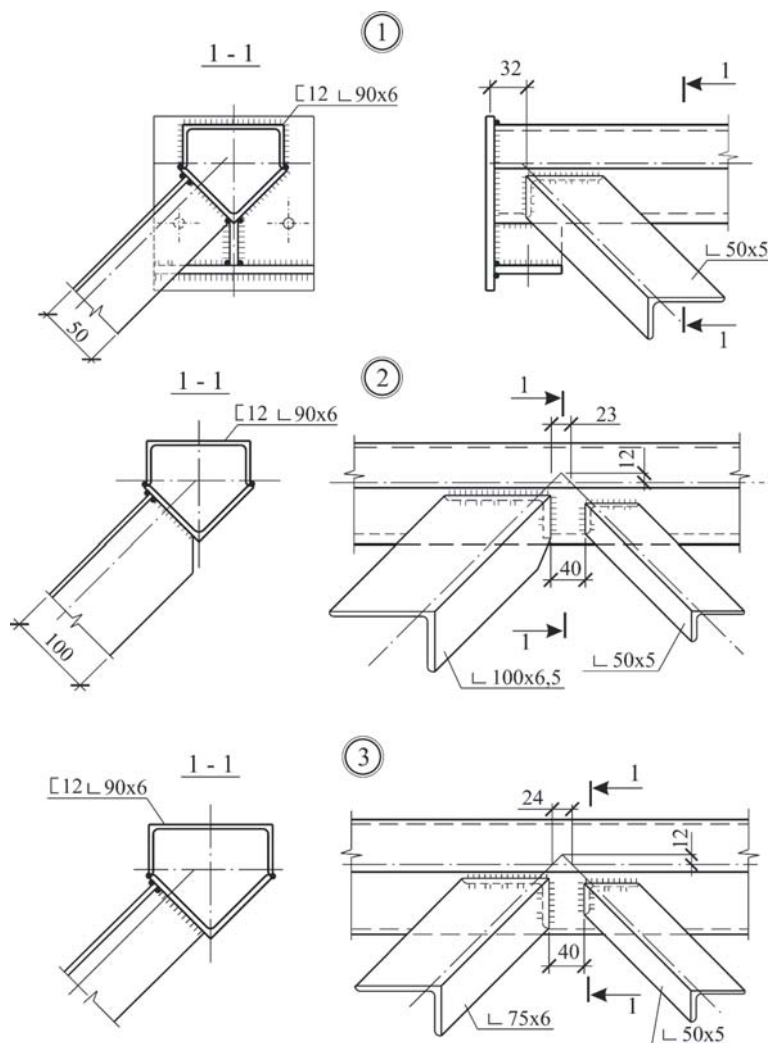


Рис. 7.8. Узлы 1, 2, 3 фермы пролетом 15 м

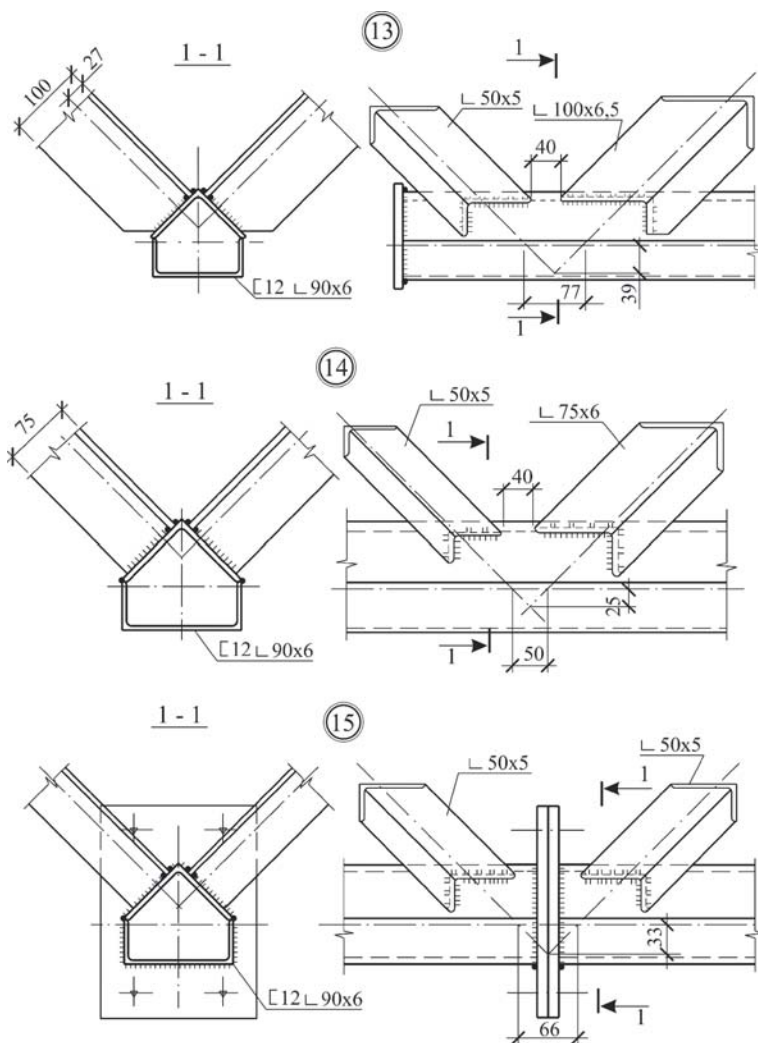


Рис. 7.9. Узлы 13, 14, 15 фермы пролетом 15 м

Напряжения в раскосах (табл. 7.1) меньше $R_{wy} \cdot \gamma_c$. Исключение составляет раскос 15 (узлы 1 и 13). Его необходимо проверить с учетом фактических размеров примыкающего под углом 45° раскоса к поясу. Одна полка уголка 50×5 (без подрезки) равна 50 мм; другая (гипотенуза подрезанного торца) равна 70,7 мм. Площадь торца: $(5,0 + 7,07) \cdot 0,5 = 6,035 \text{ см}^2$. Проверка прочности стыкового шва при максимальном усилии 97,941 кН:

$$\sigma_w = 97,941 / 6,035 = 16,23 \text{ кН/см}^2 < 20,825 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность всех стыковых швов обеспечена.

На третьем этапе расчета производится корректировка расчетной схемы с учетом неразрезности поясов, расцентровки раскосов и жесткости узлов. В процессе статического расчета выявлены усилия в элементах фермы. Результаты приведены в таблице 7.2.

Наиболее напряженным элементом верхнего пояса являет-

Таблица 7.2

Усилия в стержнях с учетом расцентровки узлов

Элемент фермы	Обозначение	Усилия			
		N , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	Q , кН
Верхний пояс	1	-52,85	-7,54 +5,93	0,21 0,181	-15,8
	2	-137,46	-6,9 +3,63	0,14 0,05	13,77
	3	-164,2	-5,52 4,45	-0,18 -0,07	-13,4
Нижний пояс	11	221,8	5,19	0	-2,3
	12	328,16	0,81	0	-0,1
Раскосы	15	95,7	0,23	0,2	-0,16
	16	-100,2	1,27	-1,09	0,63
	19	47,4	0,01	0	0
	20	-46,13	0,03	-0,11	0
	23	0,13	0,05	0,02	-0,03

ся элемент 3. Проверка прочности его в опорном сечении при расчете по упругой стадии:

$$\sigma = 164,2/23,91 + 552/50,97 + 18/72,33 = 17,95 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности наиболее нагруженного элемента 11 нижнего пояса:

$$\sigma = 221,8/23,91 + 519/80,97 = 19,46 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность поясов ферм обеспечена даже без учета возможности развития пластических деформаций.

Для проверки устойчивости сжатого верхнего пояса необходимо определить расчетные длины с учетом упругого закрепления расчетных элементов на опорах. Предварительно нужно определить коэффициенты μ . Рекомендации по их вычислению приведены в разделе 5.

Наиболее нагруженным элементом верхнего пояса является элемент 3. Он опирается в узлах 3 и 4 (рис. 7.7) на 2 уголка раскосной решетки: $\angle 50 \times 5$ и $\angle 75 \times 6$ (рис. 7.8). Суммарный момент инерции этих уголков $J_1 = 4,63 + 19,3 = 23,93 \text{ см}^4$. Длина уголков $L = 2,6 \text{ м}$.

Коэффициент жесткости упругого защемления:

$$c_m = 3 \cdot 2,06 \cdot 10^4 \cdot 23,93 / 260 = 9175.$$

Соотношение c_m на противоположных опорах одинаково, т.е. $\Psi = 1$. Параметр жесткости

$$n = 9175 \cdot 300 / 2,06 \cdot 10^4 \cdot 370,5 = 0,3606.$$

В соответствии с (5) раздела 5

$$\mu = 0,5 \sqrt{\frac{(0,3606 + 4,8)^2}{(0,3606 + 2,4)^2}} = 0,9347.$$

Отметим, что для структурных покрытий типа ЦНИИСК с поясами двутаврового сечения следует принимать $\mu = 0,85$ (разница 9%).

Проверка устойчивости сжатой изогнутого стержня верхнего пояса.

Согласно п. 5.34 СНиП II-23-81* расчет по (62) не имеет

Таблица 7.3

Проверка устойчивости в плоскости изгиба

N кН	M_x кН·см	A см ²	W_x^{min} см ³	e_x см	m_x	m_{ef}	$\mu \cdot L_x$	$\bar{\lambda}$	φ_e	σ МПа	$R_y \gamma_c$ МПа
164,2	445	23,91	50,97	2,71	1,27	1,905	280	2,45	0,37	185,6	240

смысла, т.к. в нашем случае $m_{ef,y} < m_x$. Требуется проверка по (51) и (56), принимая $e_y = 0$. Результаты этой проверки приведены в таблице 7.3.

Устойчивость в плоскости изгиба обеспечена.

Результаты проверки устойчивости из плоскости изгиба приведены в таблице 7.4.

Устойчивость из плоскости изгиба обеспечена.

В СП 53-102-2004 рекомендуется расчет на устойчивость сплошностенчатых стержней постоянного коробчатого сечения с изгибом в одной или в двух главных плоскостях выполнять по формулам (7), приведенным в разделе 5 этой книги.

При расчете наиболее напряженного элемента верхнего пояса фермы по формулам (7), имеем:

$$N = 164,2 \text{ кН}; M_x = 445 \text{ кН·м}; M_y = 7 \text{ кН·м};$$

$$e_x = 2,71 \text{ см}; e_y = 0,043 \text{ см};$$

$$\lambda_x = 280/3,94 = 71; \bar{\lambda}_x = 2,45; \lambda_y = 300/4,26 = 70,42; \bar{\lambda}_y = 2,43$$

$$m_x = 2,71 \cdot 23,91 / 50,97 = 1,27; \eta = 1,45 + 0,04 \cdot 1,27 = 1,5;$$

$$m_{ef,x} = 1,5 \cdot 1,27 = 1,905; \varphi_{ex} = 0,37; A_f/A_w = 5,76/18,15 = 0,32;$$

$$c_y = 1,1 \text{ (табл. К.1)}; \delta_y = 1 - 0,1 \cdot 164,2 \cdot 2,43^2 / 23,91 \cdot 24 = 0,831;$$

Таблица 7.4

Проверка устойчивости из плоскости изгиба

N кН	M_x кН·см	A см ²	W_y см ³	λ_y	φ_y	α	β	c	σ_y МПа	$R_y \gamma_c$ МПа
164,2	445	23,91	72,23	70,42	0,75	0,6	1,0	0,5675	161,3	240

$$W_y = 72,33 \text{ см}^3;$$

$$164,2/0,37 \cdot 23,91 \cdot 24 + 7/1,1 \cdot 0,831 \cdot 72,33 \cdot 24 = 0,777 < 1;$$

$$m_y = 0,043 \cdot 23,91/72,33 = 0,0142; \eta = 1,5; m_{ef,y} = 0,0213; \varphi_{ey} = 0,94;$$

$$c_x = 1,16; \delta_x = 0,1 \cdot 164,2 \cdot 2,45^2/23,91 \cdot 24; W_x^{min} = 50,97 \text{ см}^3;$$

$$164,2/0,94 \cdot 23,91 \cdot 24 + 445/1,16 \cdot 0,829 \cdot 50,97 \cdot 24 = 0,6827 < 1.$$

Устойчивость сжатоизогнутого верхнего пояса фермы обеспечена и по рекомендациям [23]. Расхождение результатов расчета по методикам СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004 составляет 0,5%. Пример подтверждает возможность использования как формул (3) приведенных в разделе 5, так и формулы (7) при оценке устойчивости сжатого стержня с пятигранным профилем сечения.

Проверка прочности раскосов выполняется по (49) СНиП II-23-81*. При этом n , c_x , c_y принимаются по табл. 66 для типа сечения 5 б. Наиболее напряженным является раскос 15 (табл. 7.2): $N = 95,7 \text{ кН}$; $M_x = 23 \text{ кН} \cdot \text{см}$; $M_y = 20 \text{ кН} \cdot \text{см}$. Сечение его из уголка 50×5 : $A = 4,8 \text{ см}^2$; $W_x = W_y = 3,13 \text{ см}^3$; $c_x = c_y = 1,47$; $n = 3$. Условие прочности с учетом развития пластических деформаций:

$$(95,7/4,8 \cdot 24)^3 + (23 + 20/1,47 \cdot 3,13 \cdot 24) = 0,962 < 1.$$

Прочность раскоса обеспечена. Аналогично проверяется прочность и остальных раскосов.

Оценку устойчивости сжатоизогнутых раскосов выполняют по (62) СНиП II-23-81*. Для раскосной решетки из одиночных уголков расчетная длина $L_{ef} = 0,8 \cdot L$ [19]. Наиболее опасным элементом раскосной решетки является элемент 16 или 18 из уголка $100 \times 6,5$. Геометрическая длина раскоса $L = 2,6 \text{ м}$. Расчетные параметры для оценки устойчивости приведены в табл. 7.5.

Условие устойчивости:

$$N/\varphi_{exy}A \leq R_y \gamma_c, \text{ где}$$

Таблица 7.5

К оценке устойчивости раскосов 16 и 18

L_{ef} см	A см ²	$i_{x,y}$ см	i_{min} см	i_{max} см	$W_{x,y}$ см ³	W_{min} см ³	N кН	M_x кН·см	M_y кН·см	e_x см	e_y см
208	12,82	3,09	1,99	3,88	16,69	13,38	-100,2	127	-109	1,268	1,088

Относительный эксцентриситет $m_y = 1,088 \cdot 12,82 / 16,69 = 0,836$.

Гибкость $\lambda_y = 208 / 3,09 = 67,3$; $\bar{\lambda}_y = 67,3 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 2,295$.

Коэффициент $\eta = 1,8 + 0,12 \cdot 0,836 = 1,904$;

$m_{efy} = 1,904 \cdot 0,836 = 1,59$; $\varphi_{ey} = 0,42$;

$c = \beta / (1 + \alpha \cdot m_y) = 1 / (1 + 0,692 \cdot 0,836) = 0,634$,
где $\alpha = 0,65 + 0,05 \cdot 0,836 = 0,692$;

$\varphi_{exy} = 0,42 \left(0,6 \cdot \sqrt[3]{0,634} + 0,4 \cdot \sqrt[4]{0,634} \right) = 0,366$;

$\sigma = 100,2 / 0,366 \cdot 12,82 = 21,35$ кН/см² < $24 \cdot 0,95 = 22,8$ кН/см².

Согласно п. 5.34 СНиП II-3-81*, следует проверить условие: $m_x = 1,268 \cdot 12,82 / 16,69 = 0,974 < m_{efy} = 1,59$ значит, дополнительной проверки при $e_y = 0$ не требуется.

Устойчивость раскоса 16 обеспечена с запасом 6%.

Рассмотрим другой способ расчета устойчивости этого раскоса, рекомендуемый [19] для ферм из одиночных уголков и представленный формулой (9) этой книги. Для определения φ_e с помощью табл. 55 [19] необходимо предварительно вычислить $\bar{\lambda}_{y0, \max}$ — условную гибкость в плоскости наименьшей жесткости уголка и e_x — условный относительный эксцентриситет в плоскости фермы.

Для рассматриваемого раскоса

$$\lambda_{y0} = 208 / 1,99 = 104,5; \quad \lambda_{y0, \max} = 104,5 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 3,567$$

$$e_x = e_x / z = 1,268 / 2,355 = 0,538,$$

где z — расстояние от центральной оси до середины полки уголка: $z = 2,68 - 0,325 = 2,355$ см.

По табл. 55 [19] находим $\varphi_e = 0,345$. Проверка устойчивости:

$$\sigma = 100,2/0,345 \cdot 12,82 = 22,65 \text{ кН/см}^2 < 0,95 \cdot 24 = 22,8 \text{ кН/см}^2.$$

Устойчивость раскоса и по этому способу расчета обеспечена. Сравнение двух вариантов расчета дает разницу между ними 6%.

Проверим устойчивость другого опасного раскоса 20 по рекомендациям [19]. Результаты оценки устойчивости приведены в табл. 7.6.

Принятый ранее без учета изгиба раскос из уголка 75×5 по условию устойчивости сжатоизогнутого стержня не проходит. Увеличим его сечение, приняв уголок 90×6. Сечение этого уголка достаточно для восприятия сжатия с изгибом (табл. 7.6). Таким образом, на третьем этапе расчета с учетом расцентровки узлов и дополнительно появившихся изгибающих моментов M_x и M_y пришлось изменить ранее принятое на первом этапе сечение раскоса 20.

По результатам статического расчета максимальный прогиб фермы от расчетных нагрузок — 26,33 мм. При переходе к нормативным нагрузкам соотношением $q_n/q = 1,9/3,0 = 0,6333$ этот прогиб в узле 15 будет: $0,6333 \cdot 26,33 = 16,675$ мм. С учетом податливости узлов решетки по формуле (13) максимальный прогиб увеличится и составит $f = (1 + 2 \cdot 1,5/15) \cdot 16,675 = 20$ мм. Предельный прогиб согласно табл. 19 СНиП 2.01.07-85* для фермы пролетом 15 м $f_u = L/175 = 15000/175 = 85,7$ мм. Жесткость фермы (проверка по прогибам) обеспечена.

Расчет узлов сопряжения с поясами сводится к расчету сварных швов. Тавровые соединения без разделки кромок согласно [22] должны проверяться по металлу шва, по металлу границы сплавления и по металлу в направлении толщины проката. Параметры сварных соединений приняты: $\beta_f = 0,7$; $\beta_z = 1$; $\gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1$;

Таблица 7.6

К оценке устойчивости раскоса 20

Сечен. уголка	A см ²	i_{min} см	λ_{yo}	$\bar{\lambda}_{yo, max}$	N кН	M_x кН·см	M_y кН·см	e_x см	ϵ_x	φ_e	σ
75×5	7,39	1,49	139,6	4,76	-46,13	3,0	-11	0,065	0,037	0,238	26,2
90×6	10,6	1,79	116	3,96	-46,13	3,0	-11	0,065	0,031	0,29	15,0

$R_{wf} = 180$ МПа; $R_{wz} = 166,5$ МПа; $R_{th} = 0,5 R_u = 180$ МПа. Несущая способность соединения:

- по металлу шва $\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} = 0,7 \cdot 180 \cdot 1 = 126$ МПа;
- по металлу границы сплавления $\beta_f \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} = 1 \cdot 166,5 \cdot 1 = 166,5$ МПа;
- в направлении толщины проката $2,88 \cdot \beta_f \cdot R_{th} = 2,88 \cdot 0,7 \cdot 180 = 362$ МПа.

Несущая способность сварных швов определяется прочностью по металлу шва.

Расчет узла сопряжения раскосов с поясами фермы.

В качестве примера рассмотрим расчет узла 2 (рис. 7.8). Расчетная схема узла в плоскости раскосов и поперечный разрез 1–1 представлены на рисунке 7.10.

Расчетные усилия на концах сечений стержней раскосов приведены в таблице 7.7.

Схема сварного соединения раскоса 18 с поясом фермы представлена на рисунке 7.11. Катеты швов приняты 6 мм. Перо уголка $100 \times 6,5$ в месте сопряжения с поясом подрезано на 20 мм по конструктивным соображениям. Из-за подрезки одной полки уголка нейтральная ось сечения $z_{18}-z_{18}$ сместится и центральные оси x_0-x_0 и y_0-y_0 займут положение $x-x$ и $y-y$ (рис. 7.11). При этом $\Delta x = -1,03$ см; $\Delta y = -1,09$ см.

Длина одной полки раскоса по наклонному сечению $L = 100$ мм / $\sin 54^\circ 42' = 112,5$ мм; длина второй подрезанной полки 70

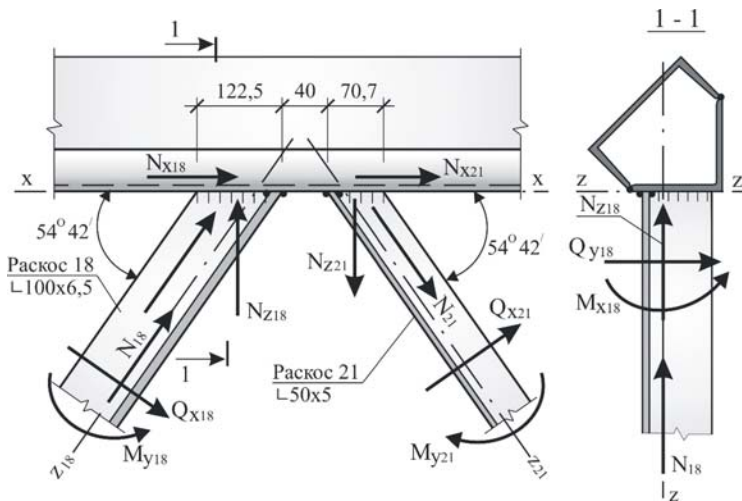


Рис. 7.10. Расчетная схема узла 2

Таблица 7.7

Расчетные усилия в опорных сечениях раскосов

Стрежень раскоса	Сечение	N кН	M_x кН·см	M_y кН·см	M_z кН·см	Q_x кН	Q_y кН	N_z кН	N_x кН
18	L100×6,5	-100,17	-10,91	12,8	-0,947	0,63	0,64	-81,75	-7,88
21	L50×5	47,7	0	0,1	—	—	—	32,14	27,39

мм. Расчетные длины сварных швов за вычетом 10 мм на непровар показаны на рисунке 7.11.

Геометрические характеристики сечения сварных швов:

$$A_w = 0,6 \cdot (11,25 + 10,6 + 7 + 6,35) = 21,12 \text{ см}^2;$$

$$x_w = 0,6 \cdot (11,25 \cdot 5,625 + 10,6 \cdot 5,95 + 6,35 \cdot 0,67) / 21,12 = 3,71 \text{ см};$$

$$y_w = 0,6 \cdot (0,67 \cdot 10,6 + 7 \cdot 3,5 + 6,35 \cdot 3,825) / 21,12 = 3,71 \text{ см};$$

$$J_{wx} = 6,36 \cdot 0,74^2 + 6,75 \cdot 1,79^2 + 0,6 \cdot 7^3 / 12 + 4,2 \cdot 1,91^2 + \\ + 0,6 \cdot 6,35^3 / 12 + 3,81 \cdot 2,235^2 = 90,18 \text{ см}^4;$$

$$J_{wy} = 4,2 \cdot 3,91^2 + 3,81 \cdot 3,51^2 + 0,6 \cdot 11,25^3 / 12 + 6,75 \cdot 1,915^2 +$$

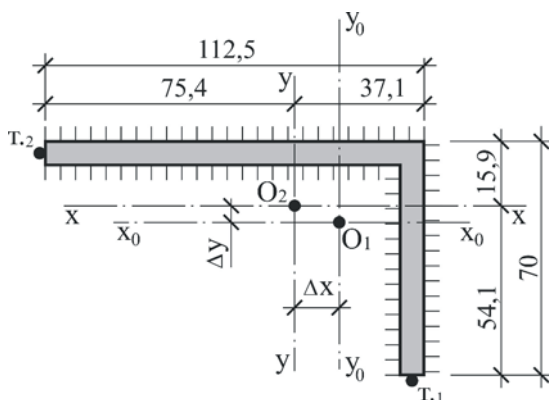


Рис. 7.11. Схема сварного соединения раскоса 18 с поясом фермы

$$+0,6 \cdot 10,6^3 / 12 + 6,36 \cdot 1,59^2 = 282,7 \text{ см}^4;$$

Расчетные сочетания усилий в поперечном сечении раскоса: $N = -100,17 \text{ кН}$; $M_x = -10,91 \text{ кН см}$; $M_y = -12,8 \text{ кН см}$; $Q_x = 0,63 \text{ кН}$; $Q_y = 0,64 \text{ кН}$; $M_z = -0,947 \text{ кН см}$. При переходе к наклонной площадке сечения раскоса силу N можно представить в виде составляющих по нормальям:

$$N_{z18} = -100,17 \cdot \sin 54^\circ 42' = -81,75 \text{ кН};$$

$$N_{x18} = -100,17 \cdot \cos 54^\circ 42' = -57,88 \text{ кН};$$

При переносе нейтральной оси из точки O_1 в точку O_2 (рис. 7.11) от воздействия продольной силы N_{z18} появляются дополнительные изгибающие моменты:

$$\Delta M_x = N_{z18} \cdot \Delta x = -81,75 \cdot 1,03 = -84,2 \text{ кН см};$$

$$\Delta M_y = N_{z18} \cdot \Delta y = -81,75 \cdot 1,09 = -89,1 \text{ кН см}.$$

Суммируя их с изгибающими моментами РСУ будем иметь:

$$M_x = -10,91 - 84,2 = -95,11 \text{ кН см};$$

$$M_y = 12,8 - 89,1 = -76,3 \text{ кН см};$$

Расчетными точками сварных швов таврового соединения будут наиболее удаленные точки 1 и 2 (рис. 7.11):

$$\text{— точка 1: } \sigma_1 = -81,75 / 21,12 - 95,11 \cdot 5,41 / 90,18 - 76,3 \cdot 3,71 / 282,7 = 10,58 < 12,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$\text{— точка 2: } \sigma_2 = -81,75 / 21,12 + 95,11 \cdot 1,59 / 90,18 + 76,3 \cdot 7,54 / 282,7 = -0,16 < 12,6 \text{ кН/см}^2.$$

В плоскости сварных швов действуют усилия: $Q_x = 0,63 \text{ кН}$; $Q_y = 0,64 \text{ кН}$; $N_x = -57,88 \text{ кН}$, приложенные с эксцентриситетами Δx и Δy , а также $M_z = -0,947 \text{ кН см}$. Результирующая сдвигающая сила:

$$Q = \sqrt{(57,88 + 0,63)^2 + 0,64^2} = 58,51 \text{ кН}.$$

Напряжения в сварных швах от воздействия Q будут $\tau_Q = 58,51 / 21,12 = 2,77 \text{ кН/см}^2$.

Дополнительные напряжения в точке 1 от эксцентричного приложения Q_x и Q_y :

$$\tau_{Mx} = \frac{58,51 \sqrt{5,41^2 + 3,71^2}}{90,18 + 282,7} = 1,029 \text{ кН/см}^2;$$

$$\tau_{My} = \frac{0,64 \sqrt{5,41^2 + 3,71^2}}{90,18 + 282,7} = 0,011 \text{ кН/см}^2.$$

Для определения напряжений от крутящего момента $M_z = -0,947 \text{ кН см}$ необходимо вычислить геометрические ха-

Таблица 7.8

Геометрические характеристики и касательные напряжений при кручении

m_1	$J_k'/\text{см}^4$	m_2	$J_k''/\text{см}^4$	$J_k/\text{см}^4$	$W_k'/\text{см}^3$	$W_k''/\text{см}^3$	$W_k/\text{см}^3$	$\tau_p/\text{кН/см}^2$
9,17	5,9	5,583	3,423	9,323	4,92	2,853	7,784	0,122

рактические сечения сварных швов при кручении. Результаты вычислений приведены в табл. 7.8.

Здесь m_1 и m_2 — соотношение сторон сварных швов по каждой полке уголка; J_k' , J_k'' , J_k — моменты инерции при кручении каждой полки и сечения в целом; W_k' , W_k'' , W_k — моменты сопротивления при кручении.

Результирующие сдвигающие напряжения в плоскости сварных швов для точки 1:

$$\tau = \sqrt{(2,77+1,029)^2 + (0,03+0,011+0,122)^2} = 3,803 \text{ кН/см}^2.$$

Векторная сумма напряжений в точке 1 и проверка прочности сварного соединения:

$$\sqrt{10,58^2 + 3,803^2} = 11,24 \text{ кН/см}^2 < 12,6 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность сварного соединения обеспечена с запасом 10%.

Схема сварного соединения раскоса 21 с поясом фермы приведена на рисунке 7.12. Здесь показаны расчетные длины сварных швов катетом 5 мм за вычетом 10 мм на непровар. Геометрические характеристики сечения сварных швов представлены в таблице 7.9.

При обозначениях рисунка 7.10 расчетные усилия в узле при-

Таблица 7.9

Геометрические характеристики сечения сварных швов

$A/\text{см}^2$	$x_w/\text{см}$	$y_w/\text{см}$	$J_{xw}/\text{см}^4$	$J_{yw}/\text{см}^4$	$W_{x1}/\text{см}^3$	$W_{y1}/\text{см}^3$	$W_{x2}/\text{см}^3$	$W_{y2}/\text{см}^3$
10,57	2,13	1,096	15,82	46,72	4,647	21,93	14,43	10,52

ведены в таблице 7.7. В раскосе 21 подрезки полок уголка не было; значит не возникает дополнительных усилий ΔM_x и ΔM_y , связанных с изменением положения оси $z_{21}-z_{21}$.

Максимальные напряжения в тавровом соединении (рис. 7.12) будут:

- в точке 1 $\sigma_1 = 32,14/10,57 + 0,1/21,93 \text{ кН/см}^2$;
- в точке 2 $\sigma_1 = 32,1/10,57 + 0,1/10,52 = 3,05 \text{ кН/см}^2$.

В плоскости сварных швов действуют усилия:

$$Q_x = 0,1 \text{ кН}, Q_y = 0,1 \text{ кН}, N = 27,39 \text{ кН}.$$

Результирующая сдвигающая сила:

$$Q = \sqrt{(27,39 + 0,1)^2 + 0,1^2} = 27,49 \text{ кН}.$$

$$\tau = 27,49/10,57 = 2,6 \text{ кН/см}^2.$$

Векторная сумма напряжений в наиболее опасной точке 2 соединения будет $\sqrt{3,05^2 + 2,6^2} = 4,01 \text{ кН/см}^2 < 12,6 \text{ кН/см}^2$. Прочность сварного соединения обеспечена с большим запасом и можно принять здесь минимальный катет шва = 4 мм.

Расчет опорного узла 1.

Конструкция узла показана на рисунке 7.8. Расчет сводится к определению размеров опорного фланца из условия смятия, проверка прочности сварных швов крепления пятигранного

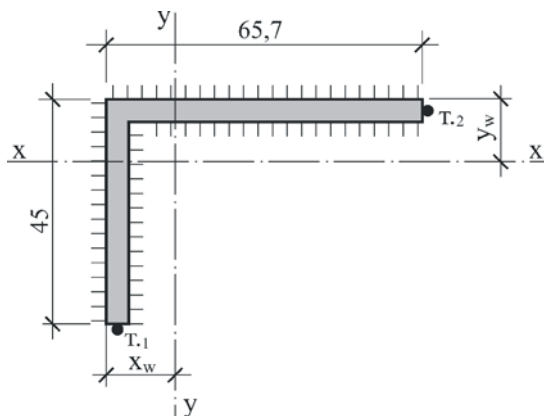


Рис. 7.12. Схема сварного соединения раскоса 21 с поясом фермы

пояса к опорному фланцу и крепления опорного раскоса к поясу фермы.

Ширина фланца принимается по размеру швеллера №12, составляющего пояс фермы: $b_{фл} = 140$ мм. Расчетное сопротивление смятию $R_p = 361$ МПа. Опорная реакция фермы $N = 67,5$ кН. Требуемая толщина фланца $t_{фл}^{треб} = 67,5 / (14 \cdot 36,1) = 0,134$ см = 1,34 мм. Принимается толщина фланца $t_{фл} = 10$ мм по конструктивным соображениям.

Сварные швы крепления пояса к опорному фланцу показаны на рисунке 7.13. Сварные швы крепления полки швеллера и поясного уголка приняты катетами 6 мм. Такой катет в тонкой стенке швеллера принимать нельзя из-за опасности её пережога, а катет шва менее 6 мм вызовет непровар по толщине фланца. Примем в качестве связующего горизонтальный катет шва 4 мм и в расчете его учитывать не будем. В итоге расчетная длина сварного шва катетом 6 мм будет: $L_w = 2 \cdot (5 \text{ см} + 9 \text{ см}) - 1 \text{ см} = 27$ см, а площадь его сечения $A_w = 0,6 \cdot 27 = 16,2$ см². Расчетные напряжения в шве:

$$\tau_w = 67,5 / 27 = 4,17 \text{ кН/см}^2 < 12,6 \text{ кН/см}^2.$$

Опорный раскос из уголка 50×5 соединяется с поясом фер-

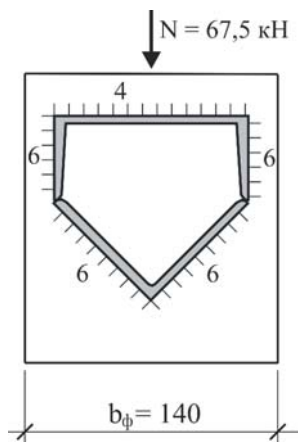


Рис. 7.13. Соединение пояса с опорным фланцем

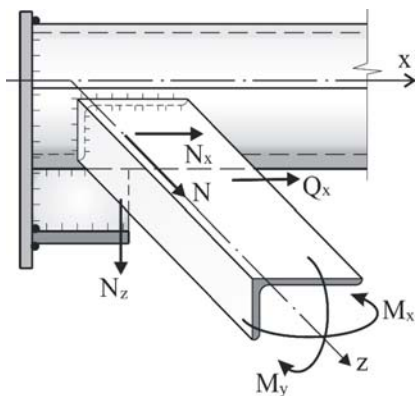


Рис. 7.14. Соединение опорного раскоса с поясом фермы

мы аналогично вышерассмотренному узлу 2. Расчетная схема его приведена на рисунке 7.14. Размеры сварных швов соответствуют рисунку 7.12.

Расчетные усилия: $N = 95,7$ кН; $N_z = 64,92$ кН; $N_x = 55,33$ кН; $M_x = 23$ кН·см; $M_y = 20$ кН·см; $Q_x = -0,16$ кН. По аналогии с рисунком 7.12 максимальные напряжения будут в точке 2 таврового соединения:

$$\sigma = 64,92/10,57 + 23/14,43 + 20/10,52 = 9,637 \text{ кН/см}^2.$$

В плоскости сварных швов $Q = 55,33 + 0,16 = 55,49$ кН.

$$\tau = 55,49/10,57 = 5,25 \text{ кН/см}^2.$$

Векторная сумма напряжений и проверка прочности швов:

$$\sqrt{9,637^2 + 5,25^2} = 10,97 \text{ кН/см}^2 < 12,6 \text{ кН/см}^2.$$

Прочность соединения обеспечена с запасом 13%. Аналогично рассчитываются и остальные узлы фермы. При пролете до 15 м конструкция изготавливается целиком без укрупнительной сборки. При пролете 18 м она разбивается на две симметричные отправочные марки с монтажным фланцевым узлом сопряжения на высокопрочных болтах. Рассмотрим расчет этого узла применительно к варианту 2 конструктивного решения каркаса (рис. 7.4–7.6).

Расчет монтажного узла сопряжения нижнего пояса трехгранной фермы пролетом 18 м.

Нижний пояс фермы образован из состыкованных швеллера №14 и уголка 100×7. Растягивающие усилия в узле сопряжения $N = 491,3$ кН. Размеры фланца и высокопрочных болтов соединения представлены на рисунке 7.15.

При расчете и конструировании фланцевого соединения следует соблюдать требования [24, 19, 22]. Толщина фланца и диаметр высокопрочных болтов приняты минимальными — 20 мм. Фланец сцентрирован по нейтральным осям пятигранного профиля пояса фермы. Этим исключено появление дополнительных изгибающих моментов в сварных соединениях. Болты расположены симметрично относительно нейтральных осей и максимально приближены к контуру сечения пояса.

Расстояние от оси болта до наружного контура фланца при-

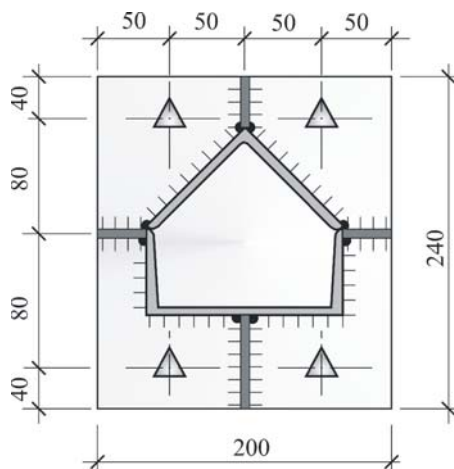


Рис. 7.15. К расчету фланцевого сопряжения нижнего пояса

ня-то минимальным: $a = 2d_0 = 40$ мм. Расстояние от центра отверстия до края пятигранного профиля: $b_1 \geq k_f + d_s/2 + 2 = 9 + 37/2 + 2 = 29,5$ мм.

Здесь $k_f = 9$ мм — максимальный катет шва, $d_s = 37$ мм — диаметр шайбы. При четырех болтах необходимо не менее трех ребер жесткости длиной не менее 1,5 высот сечения трубы. При соблюдении этих правил расчет соединения сводится к расчету прочности болтов и сварных швов крепления торца пятигранника к фланцу.

Высокопрочные болты М20 из стали 40Х "селект": $A_{bh} = 2,45$ см²; $R_{bun} = 1100$ МПа; $R_{bh} = 0,7 \cdot 1100 = 770$ МПа. Расчетное усилие растяжения болта $B_p = 770 \cdot 2,45 \cdot 10^{-1} = 188,7$ кН. Условие прочности болтов:

$$N \leq n \cdot k_2 \cdot B_p; 491,3 \text{ кН} < 4 \cdot 0,85 \cdot 188,7 = 641,58 \text{ кН}.$$

Прочность болтов обеспечена.

Материал фланца — сталь 09Г2С по ГОСТ 19282-73*: $R_y = 330$ МПа; $R_{yn} = 345$ МПа; $R_{th} = 164,28$ МПа. Сварка полуавтоматическая проволокой Св-08Г2С при диаметре проволоки 1,4—2 мм: $R_{wf} = 200$ МПа; $R_{wz} = 166,5$ МПа; $\beta_f = 0,8$; $\beta_z = 1$;

$\gamma_{wf} = \gamma_{wz} = 1,0$. Катеты швов приняты по толщинам стыкуемых элементов и обозначены на рисунке 7.15.

В принятом конструктивном решении (рис. 7.15) центр тяжести сварных швов совпал с центром нейтральной оси пояса и дополнительного изгибающего момента от эксцентриситета не будет.

$$A_w = 0,8 \cdot 10 \cdot 2 + 2 \cdot 0,9 \cdot 5 + 0,6 \cdot 14 = 33,4 \text{ см}^2.$$

Проверка прочности сварных швов выполнена по (1), (2) и (10) [22]:

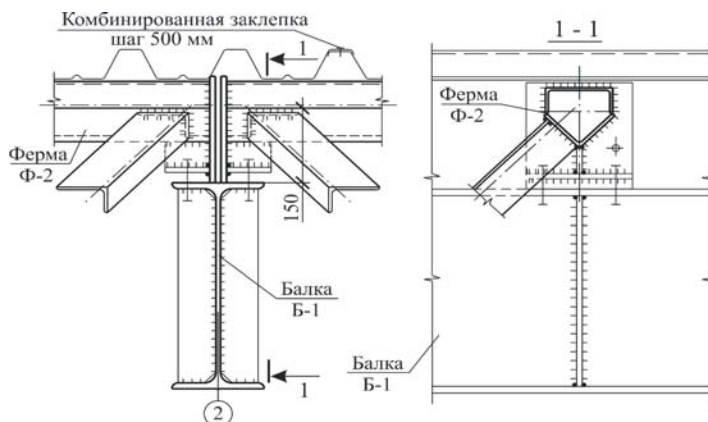
- по металлу шва $491,3 \text{ кН} / (0,8 \cdot 33,4 \text{ см}^2) = 18,39 \text{ кН/см}^2 < 20 \text{ кН/см}^2$;
 - по металлу границы сплавления $491,3 \text{ кН} / (1 \cdot 33,4 \text{ см}^2) = 14,7 \text{ кН/см}^2 < 16,65 \text{ кН/см}^2$;
 - по металлу соединения в направлении толщины проката $491,3 / 1,15(0,5 \cdot 14 + 0,8 \cdot 10,4 + 0,7 \cdot 20) = 14,57 \text{ кН/см}^2 < 16,43 \text{ кН/см}^2$.
- Прочность сварных швов обеспечена с запасом 8%.

Следует отметить, что запас прочности растянутого стержня нижнего пояса фермы по результатам расчета составляет 20%. Наиболее уязвимым местом в таких конструкциях являются сварные швы крепления пояса к фланцу. Катеты этих швов нельзя увеличить из-за опасности пережога тонких полок составного сечения. Поэтому по возможности надо избегать монтажные стыки конструкции или применять в растянутом нижнем поясе более толстые профили.

Рассмотренные трехгранные фермы покрытия опираются на подстропильные балки из прокатного двутавра 40Б2. Узлы их опирания и конструктивные решения карниза представлены на рисунке 7.16. Подстропильные балки шарнирно опираются на оголовки колонн. Эти колонны запроектированы из труб $\varnothing 219 \times 7$, которые с помощью четырех анкерных болтов жестко заземлены в фундамент. Дополнительные стойки из швеллеров имеют шарнирное сопряжение с фундаментом.

Пространственная жесткость каркаса обеспечивается жестким сопряжением несущих колонн каркаса с фундаментами, системой подстропильных балок и пространственными фермами покрытия, раскрепленными по верхним поясам жестким диском покрытия. Для удобства монтажа рекомендуется в середине пролета трехгранной ферм установить дополнительные распорки. Стойки стенового фахверка раскрепляются вертикальными крестообразными связями, системой распорок, од-

а)



б)

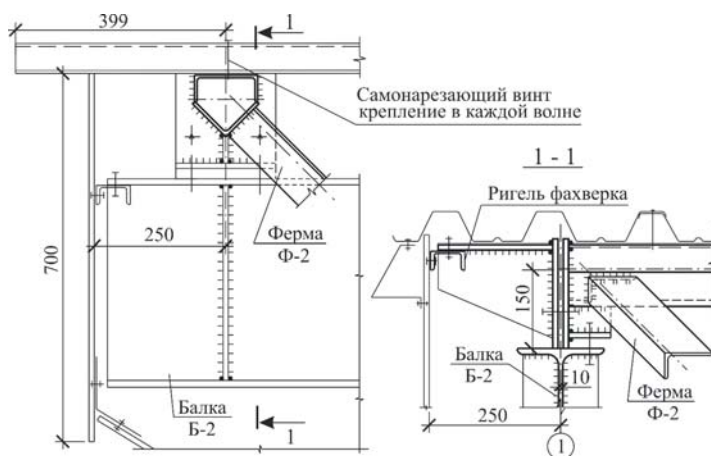


Рис. 7.16. Узлы опирания ферм:
а) сопряжение ферм с подстропильной балкой;
б) решение карнизного узла

новременно выполняющих функции импостов и подкосами в торце здания.

Расход металла на 1 м^2 покрытия, включая профнастил, составляет по варианту 1: $29,51 \text{ кг/м}^2$; по варианту 2: $31,67 \text{ кг/м}^2$ (без профнастила $20,37 \text{ кг/м}^2$ и $22,53 \text{ кг/м}^2$). Расход металла на 1 м^3 здания, включая несущие и ограждающие конструкции: по варианту 1: $6,09 \text{ кг/м}^3$; по варианту 2: $6,48 \text{ кг/м}^3$. В зданиях большей высоты возможно придется вводить дополнительные элементы связей по шатру и колоннам.

Глава VIII

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЯТИГРАННЫХ ТРУБ

Нами рассмотрены лишь первоочередные задачи изучения, проектирования и разработки металлоконструкций из пятигранных труб составного сечения. Показана высокая эффективность их использования в беспрогонных и бесфасоночных покрытиях. Однако спектр их применения в других конструктивных формах может быть гораздо шире.

Да и рассмотренные конструкции покрытий можно усовершенствовать, используя сечение разных марок стали (бистальные конструкции) и эффект предварительного напряжения. Можно создать полностью герметизированные конструкции, в которых рассосы из уголковых профилей достаточно заменить круглыми или гнутосварными прямоугольными трубами. Такие конструкции обладают повышенной коррозионной стойкостью и обтекаемостью при воздействии ветровых нагрузок.

Проведенные исследования показали, что при равномерно распределенной нагрузке в наиболее напряженных сечениях пятигранного верхнего пояса пластические деформации в швеллере и уголке составного профиля развиваются не одинаково. В обухе уголка интенсивность развития пластических деформаций в 3 раза больше, чем в стенке швеллера. Для повышения несущей способности резонно в пятигранной составной трубе использовать уголковый профиль из стали повышенной прочности. При этом одновременно, хоть и частично, решается задача оптимизации конструкции.

Задача предварительного напряжения растянутого нижнего пояса трехгранной фермы решается очень просто с помощью затяжки внутри пятигранной трубы. В этом случае за счет снижения растягивающей продольной силы существенно умень-

шатся напряжения в сварных швах, что особенно важно при расчете монтажного узла (см. пример расчета и рис. 7.15). Одновременно должны уменьшиться усилия в раскосах. Это может привести к уменьшению их сечений и исключить подрезку пера уголка в узле сопряжения раскоса с поясом (см. пример расчета и рисунки 7.10 и 7.11), что существенно снизит напряженное состояние сварного шва.

Реализация этих идей требует отдельного исследования пред-варительно напряженных и бистальных конструкций пространственно-стержневых покрытий с поясами пятигранного составного профиля сечения. При этом можно получить дополнительно ощутимый экономический эффект.

В модернизированных конструктивных решениях пространственно-стержневых покрытий может возникнуть более сложное напряженно-деформированное состояние, что было рассмотрено нами выше. В элементах конструкции кроме продольных сил, а также M_x и M_y могут появиться ощутимые усилия Q_x , Q_y , крутящий момент M_k , а также дополнительные напряжения от стесненного кручений B_w .

Реализованный в наших исследованиях метод оценки предельных состояний позволяет применить его при общем случае статического нагружения. В этом случае появится ряд дополнений к расчетной модели. Относительные деформации и деформации сдвига будут определяться в виде:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 - v_{//y_k} - v_{//x_k} - \theta_{//} \cdot \omega_k;$$

$$\gamma_k = v_{//} \cdot S_{x,k}/k_x \cdot i_x^2 \cdot t - v_{//} \cdot S_{y,k}/k_y \cdot i_y^2 \cdot t - \theta_{//} \cdot 2 \cdot t_k,$$

где ε_0 — относительная линейная деформация оси стержня; θ — угол закручивания при стесненном кручении; v_r , v_r , θ_r — дополнительные перемещения и угол закручивания от действия поперечных сил и стесненного кручения; ω_k — секториальная координата k -той площадки сечения; $S_{x,k}$, $S_{y,k}$ — статические моменты отсеченной части сечения; t — толщина элемента сечения, в котором определяются деформации сдвига; t_k — расстояние от срединной поверхности до центра тяжести элементарной k -той площадки; k_x , k_y — безразмерные коэффициенты сдвига, зависящие от формы и размеров поперечного сечения элемента:

$$k_x = A/J_x^2 \int S_{x,k}^2(y) \cdot dy/t(y), \quad k_y = A/J_y^2 \int S_{y,k}^2(x) \cdot dx/t(x).$$

Физическая зависимость касательных напряжений от сдвиговых деформаций в приращениях:

$$\Delta \tau = \Delta \gamma G_k,$$

где G_k — касательный модуль жесткости второго рода, который может быть выражен через E_k : $G_k = E_k [2(1+\mu_k)]^{-1}$; μ_k — коэффициент Пуассона, который можно представить дискретно на основе экспериментальных исследований в виде зависимости — за пределом упругости.

При общем случае нагружения и сложном напряженно-деформированном состоянии вводится понятие интенсивности напряжений, которые зависят от интенсивности деформаций:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{3 \cdot \gamma^2}{4(1+\mu)^2}}.$$

К нелинейным уравнениям равновесия в сечении элемента (9) [13] добавляются соответствующие уравнения, учитывающие поперечные силы, крутящий момент и бимомент:

$$Q_x = \sum_{k=1}^{mx} \tau_k \cdot \Delta A_k; \quad Q_y = \sum_{k=1}^{my} \tau_k \cdot \Delta A_k$$

$$M_k = 2 \cdot \alpha_0 \sum_{k=1}^m \tau_k \cdot t_k \cdot \Delta A_k; \quad B_\omega = \sum_{k=1}^m \sigma_k \cdot \omega_k \cdot \Delta A_k$$

где α_0 — коэффициент, зависящий от формы сечения, и определяемый опытным путем; m_x, m_y — число площадок на которых напряжения проектируются на оси x и y .

Приращения усилий в i -том сечении запишутся в виде:

$$\Delta N_i = k_{11} \cdot \Delta \varepsilon_0 - k_{12} \cdot \Delta v' - k_{13} \cdot \Delta v'' - k_{14} \cdot \Delta \theta';$$

$$\Delta M_{xi} = k_{21} \cdot \Delta \varepsilon_0 - k_{22} \cdot \Delta v' - k_{23} \cdot \Delta v'' - k_{24} \cdot \Delta \theta';$$

$$\Delta M_{yi} = k_{31} \cdot \Delta \varepsilon_0 - k_{32} \cdot \Delta v' - k_{33} \cdot \Delta v'' - k_{34} \cdot \Delta \theta';$$

$$\Delta B_\omega = k_{41} \cdot \Delta \varepsilon_0 - k_{42} \cdot \Delta v' - k_{43} \cdot \Delta v'' - k_{44} \cdot \Delta \theta';$$

$$\Delta Q_x = -k_{51} \cdot \Delta v'_\gamma - k_{52} \cdot \Delta v''_\gamma - k_{53} \cdot \Delta \theta'_\gamma;$$

$$\Delta Q_y = -k_{61} \cdot \Delta v'_\gamma - k_{62} \cdot \Delta v''_\gamma - k_{63} \cdot \Delta \theta'_\gamma;$$

$$\Delta M_k = -k_{71} \cdot \Delta v'_\gamma - k_{72} \cdot \Delta v''_\gamma - k_{73} \cdot \Delta \theta'_\gamma,$$

где k_{ij} — коэффициенты, характеризующие жесткостные пара-

метры пятигранного сечения, определяются так же как и в диссертации [13] путем добавления соответствующих коэффициентов.

При исследовании бистального составного стержня пятигранного профиля будем иметь дело с разными механическими свойствами металла сопрягаемых элементов. Учет различий в нелинейных свойствах материалов, в частности в различиях расчетного сопротивления стали формообразующих швеллера $R_{y, шв}$ и уголка $R_{y, уг}$ производится корректировкой коэффициентов:

$$k_{11} = \sum_{k=1}^{m_{ш}} E_k \cdot \Delta A_k + \sum_{k=m_{ш}}^{m_{уг}} E_k \cdot \frac{R_{y, уг}}{R_{y, шв}} \Delta A_k ,$$

$$k_{12} = \sum_{k=1}^{m_{ш}} E_k \cdot y_k \cdot \Delta A_k + \sum_{k=m_{ш}}^{m_{уг}} E_k \cdot y_k \cdot \frac{R_{y, уг}}{R_{y, шв}} \Delta A_k \text{ и т.д.,}$$

где $m_{уг}$, $m_{ш}$ — количество элементарных площадок в уголке и швеллере.

При использовании эффекта предварительного напряжения составного пятигранного стержня, учет начальных напряжений производится введением в уравнение линейных деформаций k -той площадки величины деформации от начальных упругих напряжений:

$$\varepsilon_{k,r} = \sigma_{k,r} / E$$

Влияние начальных несовершенств и дефектов пятигранного сечения, полученных в процессе жизнедеятельности конструкций можно учитывать введением в дискретную схему соответствующих изменений. Так влияние местного ослабления сечения в виде выреза учитывается исключением из дискретной схемы соответствующих участков. Влияние местной гибели полок формообразующих швеллера и уголка, а также смещение швеллера относительно уголка можно учитывать изменением геометрии дискретной модели в соответствии с рассматриваемым дефектом.

Таким образом, примененный метод исследования напряженно-деформированного состояния составного пятигранного профиля из швеллера и уголка является базой для проведения дальнейших исследования пространственной работы стерж-

жня, оценки влияния дефектов на предельные состояния и методов повышения его несущей способности.

Для оценки устойчивости внецентренно сжатого стержня в форме СНИП II-23-81* необходимо знать коэффициент влияния формы сечения, коэффициенты, для вычисления поправки s на изгибо-крутильную форму потери устойчивости. При оценке устойчивости по формулам (105 и 106) СП 53-102-2004 требуется знать коэффициенты c_x , c_y , n . Нами в расчетах принимались значения этих коэффициентов для форм сечения близких к пятиграннику или одиночному уголку. Для более строгого построения расчетных рекомендаций нужно провести дополнительные исследования по выявлению этих параметров.

Составные пятигранные трубы могут найти применение в ко-лоннах одноэтажных и многоэтажных зданий, опорах, арках, рамах и других конструкциях, воспринимающих центральное или внецентренное сжатие. Возникает проблема устойчивости таких стержней, которая требует отдельного самостоятельного исследования.

Накопленный опыт исследования подобных конструкций в работах Г.И. Белого и его учеников [18] показывает, что эффективным методом может оказаться реализация алгоритма "Стержень". Метод основан на аппроксимации пространственных форм деформирования в виде линейной комбинации частных форм. Физическая нелинейность учитывается введением дополнительных пространственных перемещений сечения стержня, которые определяются в процессе выявления равновесных состояний при каждом приращении нагрузки.

С помощью алгоритма "Сечение" определяются значения пластических составляющих кривизн и кручения. По этим составляющим выявляются дополнительные пространственные перемещения, которые для принятой исходной модели упругого стержня играют роль начальных геометрических несовершенств. Физические соотношения принимаются в форме приращений.

Расчет устойчивости в форме СНИП II-23-81* требует корректного определения расчетной длины стержня, которая зависит от степени защемления элемента на опорах. Кроме того на устойчивость влияют начальные несовершенства (погиби), форма сечения и другие факторы. Они выявляются в процессе специальных исследований и представляются в виде эмпирически полученных параметров и условий.

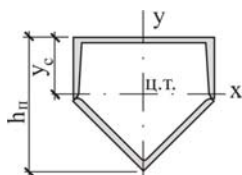
Профессором И.Д. Грудевым [27] предложен расчетный способ оценки устойчивости, в котором исключены понятия расчетной длины, коэффициента продольного изгиба и других параметров. Задача в каждом конкретном случае решается с помощью компьютера путем моделирования нелинейного процесса потери устойчивости в упругопластической постановке с использованием численных алгоритмов. Критерием устойчивости является нулевая отпорность стержня, когда его деформации возрастают без увеличения нагрузок. Исходными параметрами расчета являются длина стержня, геометрические размеры поперечного сечения, начальная погибь, условия упругого закрепления концов и диаграммы упруго-пластических свойств металла.

С помощью компьютера просматривается процесс деформирования стержня при ступенчатом нагружении. Шаговым методом проводится перерасчет формы оси стержня и накопление расчетных величин: перемещений, деформаций, усилий, моментов. Максимальное значение нагрузки, соответствующее нулевой отпорности стержня, принимается в качестве предельной при оценке устойчивости.

Многообразие конструктивных форм с использованием пятигранного составного стержня и бесфасоночным сопряжением их элементов неизбежно связано с многообразием конструктивных решений узлов. Прочность и надежность узлового сопряжения элементов могут оказаться решающими при проектировании конструкции. Исследование особенностей работы узлов таких конструкций представляется одной из актуальных проблем, требующих более подробного изучения.

В заключении следует отметить, что рассмотренные металло-конструкции с применением стержней составного пятигранного профиля из состыкованных швеллера и уголка являются прогрессивными и эффективными. Они позволяют одновременно снизить металлоемкость, трудоемкость изготовления и монтажа, транспортные расходы и стоимость в деле. Дальнейшее развитие их требует дополнительных исследований. Основные проблемы их развития отмечены в этом разделе.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Сортамент составных пятигранных профилей, образованных из горячекатанных швеллеров по ГОСТ 8240-89 и горячекатанных равнополочных уголков по ГОСТ 8509-93

Швеллера	Уголки	$t_{\text{ш}}, \text{мм}$	$h_{\text{ш}}, \text{см}$	$y_c, \text{см}$	$A, \text{см}^2$	$J_x, \text{см}^4$	$J_y, \text{см}^4$	$W_{x_{\text{max}}}, \text{см}^3$	$W_{x_{\text{min}}}, \text{см}^3$	$W_y, \text{см}^3$	$i_x, \text{см}$	$i_y, \text{см}$
5	3,5	3	5,8	1,9	8,2	23,7	26,5	12,05	6,22	10,61	1,7	1,8
5	3,5	4	5,9	2	8,33	26,4	27,6	13,08	6,84	11,02	1,78	1,82
5	3,5	5	5,9	2,4	9,44	32,4	28,5	14,17	9	11,4	1,85	1,74
6,5	4,5	3	6,9	2,4	10,16	42,7	56,73	18,82	9,24	17,45	2,05	2,36
6,5	4,5	4	7	2,5	10,99	52,6	59,1	21,1	11,72	18,19	2,19	2,32
6,5	4,5	5	7	2,6	11,8	58,1	61,3	21,83	13,43	18,87	2,22	2,28
8	5,6	4	8,1	2,8	13,36	83,3	110,2	29,54	15,88	27,54	2,5	2,87
8	5,6	5	8,2	4	14,39	98,2	114,8	32,19	19,22	28,69	2,61	2,82
10	7	4,5	9,7	3,5	17,1	167,8	220	48,1	26,8	44	3,13	3,58
10	7	5	9,7	3,6	17,76	176,5	225	48,85	28,75	44,93	3,15	3,55
10	7	6	9,7	3,8	19,05	191,1	233,6	50,01	32,23	46,73	3,17	3,5
10	7	7	9,7	3	20,32	202,3	242,2	50,72	35,1	48,44	3,15	3,45
10	7	8	9,8	4,2	21,57	225,6	250,4	53,87	39,83	50,07	3,23	3,4
12	9	6	12	4,6	23,91	370,5	434	80,6	50,97	72,33	3,94	4,26
12	9	7	12	4,8	25,58	395,3	453,7	82,03	56,11	75,61	3,93	4,21
12	9	8	12	5	27,23	436,2	472,4	86,25	63,14	78,73	3	4,16
12	9	9	12	5,2	28,9	476,9	490	90,42	70,24	81,66	4,06	4,12
14	10	6,5	13	5,1	28,42	548,2	684,5	106,49	68,33	97,78	4,39	4,91
14	10	7	13	5,2	29,35	564,2	698	107,21	71,34	99,71	4,38	4,87
14	10	8	13	5,5	31,2	595,2	724,5	108,71	77,36	103,49	4,37	4,82
14	10	10	13	5,8	34,84	644,4	774,8	110,89	87,55	110,69	4,4	4,71
14	10	12	13	6	38,3	680,6	822	112,39	95,64	117,42	4,21	4,62
14	10	14	13	6,2	41,88	707,5	866	113,5	101,98	123,71	4,11	4,54
14	10	16	13	6,3	45,28	729,9	907	114,54	107,35	129,57	4,01	4,47
16	11	7	14	5,5	33,25	716,9	1025,5	128,51	82,39	128,19	4,64	5,55
16	11	8	14	5,8	35,4	758	1061,5	130,39	89,53	132,68	4,63	5,48
18	12,5	8	16	6,5	40,39	1128,1	1556,8	173,64	118,22	172,97	5,28	6,21
18	12,5	9	16	6,7	42,7	1182,9	1610	175,85	127,03	178,89	5,26	6,14
18	12,5	10	16	6,9	45,03	1227,5	1661	177,35	134,63	184,56	5,22	6,07

Материал	Номер	$t_{\text{с}}, \text{мм}$	$h_{\text{п}}, \text{см}$	$y_{\text{с}}, \text{см}$	$A, \text{см}^2$	$J_{\text{с}}, \text{см}^4$	$J_{\text{п}}, \text{см}^4$	$W_{\text{с, max}}, \text{см}^3$	$W_{\text{с, min}}, \text{см}^3$	$W_{\text{п}}, \text{см}^3$	$i_{\text{с}}, \text{см}$	$i_{\text{п}}, \text{см}$
18	12,5	12	16	7,2	49,59	1305,6	1760	180,19	148,47	195,55	5,13	5,95
18	12,5	14	16	7,5	54,07	1366,2	1853,9	182,39	159,82	205,99	5,03	5,85
18	12,5	16	16	7,7	58,47	1417,2	1942,8	184,39	169,66	215,87	4,92	5,76
20	14	9	18	7,4	48,12	1678,2	2259,4	226,66	161,44	225,94	5,91	6,85
20	14	10	18	7,6	50,73	1749	2333,6	229,11	172,04	233,36	5,87	6,78
20	14	12	18	8	55,89	1866,4	2477	233,08	190,6	247,69	5,78	6,65
22	16	10	20	8,6	58,13	2704,3	3339,1	314,36	234,92	303,55	6,82	7,58
22	16	11	20	8,9	61,12	2877,2	3450,1	323,84	253,96	313,64	6,86	7,51
22	16	12	20	9,1	64,09	2969,4	3560	326,62	266,98	323,63	6,81	7,45
22	16	14	20	9,5	70,27	3219,9	3772,1	338,39	298,18	342,92	6,77	7,32
22	16	16	20	9,7	75,77	3344,3	3975,7	342,41	317,1	361,43	6,64	7,24
22	16	18	20	9,9	81,49	3452,6	4171	345,97	334,1	379,18	6,51	7,15
22	16	20	20	10,2	87,1	3548,7	4358,3	349,46	349,32	396,2	6,38	7,07
24	18	11	22	9,6	69,3	3807,5	4833,1	394,17	302,94	402,76	7,41	8,34
24	18	12	22	9,9	72,79	4034	4992,8	405,3	325,91	416,06	7,44	8,28
27	20	12	24	10,6	82,4	5420,3	7056,2	512,13	396,85	522,68	8,12	9,26
27	20	13	24	10,9	86,05	5704,4	7276,2	525	423,27	538,97	8,14	9,19
27	20	14	24	11,1	89,8	5859,1	7493	529,1	441,58	555,03	8,08	9,13
27	20	16	24	11,5	97,18	6266,1	7915,4	545,51	483,66	586,32	8,03	9,02
27	20	20	25	12,1	111,74	6847,2	8720,4	567,42	548,88	645,95	7,83	8,83
27	20	25	25	12,5	129,49	7415,4	9654	590,89	613,21	715,11	7,57	8,63
27	20	30	25	12,8	146,74	7738,6	10511,1	604,66	653,39	778,59	7,26	8,46
30	22	14	26	11,7	100,88	7610	10280,2	652,3	525,12	685,34	8,69	10,1
30	22	16	26	12,1	109,08	8109,2	10855,4	670,7	572,45	723,69	8,62	9,97
33	25	16	29	13,2	124,9	11467,6	15472,1	871,4	725,05	937,70	9,58	11,13
33	25	18	29	13,6	134,22	12165,7	16316,7	895,31	785,42	988,89	9,52	11,03
33	25	20	29	14	143,46	13059,1	17139,7	931,4	856,05	1038,77	9,54	10,93
33	25	22	29	14,3	152,62	13673,6	17941,6	954,02	908,84	1087,37	9,47	10,84
33	25	25	29	14,6	166,21	14191	19105,5	969,25	962,99	1157,91	9,24	10,72
33	25	28	30	15,1	179,62	15442	20223,8	1023,52	1058,38	1225,69	9,27	10,61
33	25	30	30	15,2	188,46	15705	20944,7	1032,77	1085,3	1269,37	9,13	10,54
36	25	16	29	12,6	131,8	11477,2	18312,1	911,97	704,44	1017,34	9,33	11,79
36	25	18	29	13	141,12	11972,8	19156,7	923,81	752,18	1064,26	9,21	11,65
36	25	20	29	13,4	150,36	12403,3	19979,7	934,55	794,79	1109,99	9,08	11,53
36	25	22	29	13,5	159,52	12763,9	20781,6	943,92	831,23	1154,53	8,95	11,41
36	25	25	29	13,8	173,11	13265,9	21945,5	958,32	882,35	1219,2	8,75	11,26
36	25	28	29	14,1	186,52	13675	23063,8	971,25	924,12	1281,32	8,56	11,12
36	25	30	29	14,2	195,36	13913,8	23784,7	979,54	948,25	1321,37	8,44	11,03

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 1

Значения коэффициентов учета развития пластических деформаций k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $A_{\text{нл}}/A_y = 0,3$

M_x M_y	Значение k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $N/(A R_y \gamma_c)$ равном											
	для $-N + M_x + M_y$; $-N + M_x - M_y$;						для $N + M_x + M_y$; $N + M_x - M_y$;					
	$N - M_x + M_y$; $N - M_x - M_y$						$-N - M_x + M_y$; $-N - M_x - M_y$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
My=0	1,405	1,632	2,030	2,318	2,538	2,267	1,405	1,535	1,633	1,742	1,887	1,808
32,33	1,429	1,629	2,027	2,321	2,528	2,290	1,429	1,561	1,656	1,766	1,907	1,778
13,29	1,463	1,623	2,026	2,317	2,531	2,312	1,463	1,587	1,687	1,790	1,944	1,778
9,00	1,484	1,617	2,025	2,313	2,511	2,303	1,484	1,611	1,711	1,819	1,945	1,815
6,14	1,518	1,609	2,015	2,306	2,511	2,353	1,518	1,641	1,737	1,842	1,973	1,786
4,88	1,541	1,600	2,009	2,301	2,500	2,278	1,541	1,662	1,754	1,855	1,991	1,786
3,76	1,575	1,586	1,998	2,284	2,490	2,324	1,575	1,689	1,779	1,877	1,991	1,821
3,17	1,601	1,576	1,985	2,266	2,471	2,308	1,601	1,708	1,794	1,889	2,009	1,759
2,57	1,631	1,552	1,963	2,234	2,440	2,317	1,631	1,733	1,813	1,906	2,009	1,793
2,23	1,650	1,534	1,940	2,207	2,416	2,279	1,650	1,747	1,825	1,913	2,017	1,793
1,94	1,674	1,518	1,913	2,174	2,387	2,267	1,674	1,764	1,836	1,925	2,000	1,767
1,63	1,696	1,553	1,866	2,118	2,344	2,250	1,696	1,777	1,852	1,932	2,017	1,767
1,44	1,709	1,576	1,824	2,072	2,292	2,260	1,709	1,787	1,854	1,927	2,000	1,767
1,22	1,722	1,600	1,759	2,001	2,217	2,264	1,722	1,792	1,857	1,930	1,984	1,742
1,08	1,730	1,615	1,701	1,936	2,153	2,193	1,730	1,793	1,854	1,929	1,984	1,742
0,92	1,730	1,628	1,614	1,836	2,048	2,148	1,730	1,787	1,851	1,912	1,969	1,688
0,82	1,726	1,630	1,541	1,754	1,947	2,092	1,726	1,778	1,841	1,904	1,946	1,719
0,69	1,714	1,628	1,429	1,622	1,759	1,750	1,714	1,766	1,823	1,886	1,924	1,667
0,61	1,702	1,620	1,378	1,519	1,634	1,600	1,702	1,752	1,807	1,867	1,903	1,667
0,52	1,680	1,601	1,481	1,600	1,699	1,632	1,680	1,729	1,780	1,835	1,875	1,618
0,45	1,661	1,582	1,542	1,640	1,726	1,625	1,661	1,707	1,760	1,813	1,848	1,618
0,39	1,641	1,557	1,580	1,661	1,745	1,633	1,641	1,687	1,735	1,789	1,814	1,571
0,32	1,608	1,514	1,605	1,668	1,739	1,625	1,608	1,653	1,702	1,750	1,789	1,571
0,27	1,582	1,495	1,605	1,664	1,724	1,604	1,582	1,627	1,669	1,718	1,757	1,528
0,20	1,544	1,512	1,593	1,640	1,690	1,571	1,544	1,591	1,634	1,679	1,707	1,528
0,16	1,513	1,512	1,573	1,617	1,660	1,532	1,513	1,561	1,601	1,648	1,678	1,486
0,11	1,472	1,501	1,544	1,586	1,622	1,500	1,472	1,519	1,556	1,599	1,632	1,447
0,08	1,437	1,481	1,521	1,560	1,599	1,442	1,437	1,485	1,524	1,566	1,604	1,421
0,03	1,385	1,456	1,492	1,535	1,571	1,425	1,385	1,443	1,480	1,520	1,544	1,385
Mx=0	1,369	1,435	1,474	1,510	1,541	1,385	1,369	1,435	1,474	1,510	1,541	1,385

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 2

Значения коэффициентов учета развития пластических деформаций k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $A_{ш}/A_{yz} = 0,5$

$\frac{M_x}{M_y}$	Значение k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $N/(A R_y \gamma_c)$ равном											
	для $-N + M_x + M_y$; $-N + M_x - M_y$;						для $N + M_x + M_y$; $N + M_x - M_y$;					
	$N - M_x + M_y$; $N - M_x - M_y$						$-N - M_x + M_y$; $-N - M_x - M_y$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
$M_y=0$	1,305	1,684	1,982	2,104	2,220	2,000	1,305	1,426	1,505	1,600	1,716	1,630
32,33	1,332	1,682	1,981	2,105	2,223	2,000	1,332	1,451	1,537	1,622	1,752	1,667
13,29	1,367	1,681	1,979	2,103	2,222	2,000	1,367	1,488	1,570	1,664	1,782	1,643
9,00	1,395	1,680	1,975	2,104	2,215	2,000	1,395	1,512	1,593	1,685	1,802	1,643
6,14	1,436	1,674	1,964	2,091	2,222	1,969	1,436	1,548	1,626	1,720	1,830	1,679
4,88	1,465	1,667	1,953	2,082	2,206	1,970	1,465	1,574	1,651	1,741	1,841	1,679
3,76	1,503	1,656	1,937	2,075	2,204	2,000	1,503	1,609	1,685	1,763	1,860	1,655
3,17	1,532	1,639	1,917	2,056	2,189	1,972	1,532	1,630	1,703	1,784	1,870	1,655
2,57	1,567	1,612	1,890	2,032	2,166	1,947	1,567	1,661	1,727	1,808	1,888	1,655
2,23	1,594	1,590	1,862	2,011	2,159	2,000	1,594	1,678	1,741	1,820	1,889	1,690
1,94	1,613	1,561	1,830	1,991	2,134	1,976	1,613	1,695	1,756	1,834	1,898	1,690
1,63	1,637	1,512	1,780	1,946	2,097	1,955	1,637	1,711	1,772	1,842	1,899	1,633
1,44	1,653	1,504	1,736	1,907	2,060	1,935	1,653	1,721	1,779	1,849	1,900	1,667
1,22	1,664	1,526	1,669	1,845	2,005	1,939	1,664	1,725	1,782	1,847	1,901	1,667
1,08	1,667	1,536	1,614	1,791	1,957	1,904	1,667	1,727	1,782	1,846	1,893	1,667
0,92	1,669	1,546	1,526	1,701	1,858	1,875	1,669	1,718	1,774	1,837	1,878	1,613
0,82	1,664	1,549	1,453	1,622	1,772	1,817	1,664	1,713	1,769	1,830	1,871	1,613
0,69	1,652	1,544	1,369	1,510	1,629	1,585	1,652	1,698	1,752	1,814	1,856	1,613
0,61	1,641	1,535	1,444	1,571	1,676	1,607	1,641	1,688	1,739	1,798	1,841	1,562
0,52	1,620	1,515	1,522	1,627	1,721	1,625	1,620	1,666	1,716	1,774	1,805	1,563
0,45	1,602	1,494	1,562	1,650	1,738	1,642	1,602	1,648	1,696	1,749	1,783	1,563
0,39	1,580	1,467	1,584	1,658	1,749	1,608	1,580	1,626	1,673	1,723	1,762	1,563
0,32	1,553	1,466	1,594	1,657	1,733	1,604	1,553	1,598	1,643	1,693	1,733	1,515
0,27	1,527	1,481	1,589	1,650	1,720	1,600	1,527	1,575	1,617	1,665	1,712	1,515
0,20	1,491	1,488	1,572	1,623	1,674	1,535	1,491	1,542	1,582	1,626	1,672	1,485
0,16	1,465	1,486	1,547	1,594	1,648	1,512	1,465	1,516	1,556	1,604	1,644	1,441
0,11	1,426	1,468	1,515	1,563	1,615	1,462	1,426	1,483	1,520	1,563	1,610	1,441
0,08	1,392	1,448	1,490	1,534	1,583	1,421	1,392	1,453	1,491	1,533	1,584	1,412
0,03	1,344	1,419	1,459	1,503	1,542	1,389	1,344	1,415	1,455	1,499	1,540	1,371
$M_x=0$	1,318	1,402	1,438	1,481	1,525	1,343	1,318	1,402	1,438	1,481	1,525	1,343

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 3

Значения коэффициентов учета развития пластических деформаций k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $A_{ш}/A_{yc} = 1$

$\frac{M_x}{M_y}$	Значение k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $N/(A R_y \gamma_c)$ равном											
	для $-N + M_x + M_y$; $-N + M_x - M_y$;						для $N + M_x + M_y$; $N + M_x - M_y$;					
	$N - M_x + M_y$; $N - M_x - M_y$						$-N - M_x + M_y$; $-N - M_x - M_y$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
$M_y=0$	1,565	1,738	1,798	1,871	1,932	1,722	1,565	1,302	1,408	1,504	1,612	1,577
32,33	1,567	1,739	1,797	1,878	1,947	1,684	1,567	1,335	1,443	1,531	1,641	1,577
13,29	1,564	1,736	1,797	1,883	1,949	1,700	1,564	1,377	1,479	1,580	1,663	1,577
9,00	1,564	1,733	1,791	1,877	1,938	1,750	1,564	1,410	1,510	1,604	1,702	1,615
6,14	1,555	1,729	1,787	1,874	1,929	1,714	1,555	1,454	1,550	1,644	1,740	1,615
4,88	1,550	1,724	1,785	1,872	1,932	1,727	1,550	1,486	1,581	1,665	1,743	1,615
3,76	1,539	1,714	1,777	1,867	1,935	1,696	1,539	1,527	1,610	1,696	1,781	1,654
3,17	1,529	1,702	1,770	1,859	1,917	1,708	1,529	1,556	1,634	1,720	1,800	1,593
2,57	1,506	1,682	1,757	1,844	1,911	1,720	1,506	1,589	1,664	1,739	1,811	1,593
2,23	1,480	1,669	1,746	1,836	1,914	1,667	1,480	1,615	1,680	1,763	1,821	1,593
1,94	1,498	1,649	1,731	1,818	1,900	1,679	1,498	1,634	1,690	1,768	1,840	1,593
1,63	1,531	1,611	1,704	1,800	1,880	1,724	1,531	1,652	1,706	1,779	1,832	1,630
1,44	1,552	1,582	1,679	1,771	1,862	1,677	1,552	1,663	1,715	1,791	1,841	1,630
1,22	1,576	1,532	1,642	1,729	1,826	1,667	1,576	1,666	1,719	1,796	1,850	1,630
1,08	1,588	1,489	1,604	1,693	1,786	1,657	1,588	1,667	1,712	1,788	1,833	1,630
0,92	1,593	1,418	1,541	1,634	1,742	1,632	1,593	1,660	1,707	1,779	1,824	1,630
0,82	1,593	1,359	1,484	1,584	1,689	1,625	1,593	1,653	1,694	1,766	1,807	1,630
0,69	1,585	1,374	1,397	1,489	1,593	1,568	1,585	1,639	1,683	1,751	1,798	1,593
0,61	1,576	1,382	1,437	1,534	1,634	1,591	1,576	1,628	1,670	1,741	1,789	1,593
0,52	1,561	1,375	1,504	1,599	1,681	1,610	1,561	1,610	1,647	1,719	1,755	1,536
0,45	1,542	1,403	1,539	1,622	1,711	1,600	1,542	1,592	1,631	1,697	1,745	1,536
0,39	1,523	1,433	1,559	1,638	1,719	1,605	1,523	1,575	1,614	1,677	1,727	1,536
0,32	1,498	1,458	1,565	1,640	1,712	1,568	1,498	1,549	1,584	1,647	1,685	1,500
0,27	1,472	1,465	1,557	1,632	1,702	1,600	1,472	1,527	1,565	1,621	1,676	1,500
0,20	1,442	1,467	1,535	1,610	1,667	1,529	1,442	1,501	1,532	1,591	1,634	1,464
0,16	1,414	1,457	1,517	1,577	1,634	1,515	1,414	1,477	1,510	1,569	1,616	1,464
0,11	1,373	1,436	1,482	1,544	1,600	1,438	1,373	1,447	1,478	1,533	1,589	1,429
0,08	1,340	1,413	1,452	1,511	1,557	1,419	1,340	1,423	1,453	1,515	1,549	1,429
0,03	1,294	1,380	1,416	1,472	1,521	1,414	1,294	1,387	1,425	1,481	1,522	1,393
$M_x=0$	1,261	1,362	1,398	1,455	1,504	1,345	1,261	1,362	1,398	1,455	1,504	1,345

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 4

Значения коэффициентов учета развития пластических деформаций k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $A_{ш}/A_{yc} = 2$

$\frac{M_x}{M_y}$	Значение k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $N/(A R_y \gamma_c)$ равном											
	для $-N + M_x + M_y$; $-N + M_x - M_y$;						для $N + M_x + M_y$; $N + M_x - M_y$;					
	$N - M_x + M_y$; $N - M_x - M_y$						$-N - M_x + M_y$; $-N - M_x - M_y$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
$M_y=0$	1,658	1,740	1,811	1,890	1,933	1,625	1,658	1,438	1,461	1,585	1,692	1,692
32,33	1,660	1,737	1,802	1,884	1,903	1,625	1,660	1,440	1,500	1,624	1,731	1,692
13,29	1,656	1,735	1,795	1,859	1,937	1,750	1,656	1,437	1,552	1,673	1,769	1,692
9,00	1,654	1,743	1,801	1,871	1,939	1,556	1,654	1,434	1,592	1,712	1,808	1,692
6,14	1,641	1,736	1,799	1,883	1,914	1,667	1,641	1,436	1,637	1,761	1,846	1,769
4,88	1,637	1,728	1,801	1,866	1,917	1,667	1,637	1,480	1,676	1,790	1,865	1,769
3,76	1,629	1,724	1,788	1,866	1,895	1,600	1,629	1,537	1,727	1,838	1,941	1,769
3,17	1,615	1,712	1,779	1,853	1,923	1,700	1,615	1,571	1,757	1,858	1,961	1,769
2,57	1,587	1,696	1,766	1,841	1,927	1,545	1,587	1,620	1,789	1,877	1,980	1,769
2,23	1,573	1,680	1,749	1,830	1,907	1,636	1,573	1,658	1,803	1,897	1,980	1,769
1,94	1,548	1,665	1,743	1,826	1,889	1,583	1,548	1,687	1,816	1,897	2,000	1,769
1,63	1,505	1,631	1,710	1,789	1,854	1,667	1,505	1,712	1,822	1,902	1,980	1,769
1,44	1,469	1,601	1,681	1,760	1,860	1,615	1,469	1,727	1,828	1,902	1,980	1,769
1,22	1,492	1,555	1,636	1,720	1,796	1,571	1,492	1,732	1,815	1,882	1,961	1,692
1,08	1,524	1,512	1,602	1,681	1,772	1,533	1,524	1,736	1,809	1,873	1,961	1,692
0,92	1,552	1,447	1,534	1,612	1,694	1,563	1,552	1,721	1,782	1,853	1,922	1,692
0,82	1,560	1,383	1,478	1,550	1,636	1,529	1,560	1,706	1,769	1,824	1,902	1,692
0,69	1,564	1,431	1,534	1,604	1,723	1,588	1,564	1,686	1,743	1,804	1,863	1,692
0,61	1,562	1,475	1,579	1,647	1,734	1,625	1,562	1,675	1,728	1,792	1,843	1,615
0,52	1,547	1,508	1,597	1,673	1,758	1,625	1,547	1,643	1,694	1,752	1,804	1,615
0,45	1,531	1,521	1,606	1,675	1,754	1,562	1,531	1,618	1,668	1,723	1,765	1,615
0,39	1,511	1,528	1,602	1,658	1,733	1,600	1,511	1,593	1,641	1,693	1,745	1,538
0,32	1,479	1,520	1,587	1,638	1,695	1,533	1,479	1,558	1,608	1,653	1,706	1,538
0,27	1,457	1,508	1,570	1,615	1,672	1,533	1,457	1,533	1,575	1,624	1,667	1,538
0,20	1,417	1,487	1,533	1,575	1,614	1,571	1,417	1,501	1,535	1,584	1,627	1,462
0,16	1,394	1,464	1,508	1,552	1,589	1,500	1,394	1,476	1,508	1,554	1,588	1,462
0,11	1,347	1,434	1,470	1,509	1,556	1,429	1,347	1,433	1,482	1,515	1,549	1,385
0,08	1,315	1,404	1,443	1,481	1,528	1,357	1,315	1,410	1,448	1,485	1,510	1,385
0,03	1,271	1,363	1,402	1,435	1,481	1,385	1,271	1,375	1,408	1,446	1,471	1,308
$M_x=0$	1,239	1,345	1,381	1,406	1,451	1,308	1,239	1,345	1,381	1,406	1,451	1,308

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 5

Значения коэффициентов учета развития пластических деформаций k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $A_{\text{пл}}/A_{\text{yc}} = 3$

$\frac{M_x}{M_y}$	Значение k_{M_x} , k_{M_y} при отношении $N/(A R_y \gamma_c)$ равном											
	для $-N + M_x + M_y$; $-N + M_x - M_y$;						для $N + M_x + M_y$; $N + M_x - M_y$;					
	$N - M_x + M_y$; $N - M_x - M_y$						$-N - M_x + M_y$; $-N - M_x - M_y$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
$M_y=0$	1,697	1,787	1,862	1,954	2,000	1,667	1,697	1,490	1,453	1,634	1,780	1,727
32,33	1,705	1,793	1,866	1,912	1,957	1,667	1,705	1,491	1,494	1,671	1,829	1,727
13,29	1,701	1,791	1,851	1,926	1,958	1,667	1,701	1,493	1,553	1,730	1,878	1,727
9,00	1,705	1,784	1,862	1,938	1,960	1,833	1,705	1,491	1,594	1,779	1,927	1,727
6,14	1,698	1,773	1,849	1,941	1,962	1,571	1,698	1,482	1,652	1,828	1,951	1,727
4,88	1,687	1,780	1,854	1,915	1,963	1,714	1,687	1,479	1,693	1,853	2,000	1,727
3,76	1,669	1,776	1,842	1,910	1,964	1,714	1,669	1,495	1,756	1,902	2,024	1,727
3,17	1,657	1,760	1,837	1,913	1,966	1,625	1,657	1,536	1,798	1,950	2,049	1,727
2,57	1,638	1,743	1,823	1,893	1,935	1,625	1,638	1,598	1,839	1,975	2,049	1,727
2,23	1,618	1,733	1,814	1,874	1,938	1,750	1,618	1,635	1,864	1,988	2,073	1,727
1,94	1,591	1,710	1,783	1,871	1,970	1,556	1,591	1,682	1,880	1,988	2,049	1,727
1,63	1,550	1,671	1,744	1,843	1,943	1,667	1,550	1,713	1,888	1,988	2,049	1,727
1,44	1,505	1,643	1,719	1,816	1,919	1,600	1,505	1,738	1,888	1,975	2,049	1,900
1,22	1,458	1,590	1,671	1,755	1,850	1,700	1,458	1,763	1,896	1,963	2,075	1,900
1,08	1,464	1,542	1,636	1,708	1,833	1,636	1,464	1,769	1,879	1,938	2,050	1,900
0,92	1,506	1,474	1,561	1,641	1,739	1,583	1,506	1,763	1,846	1,907	2,000	1,800
0,82	1,536	1,421	1,514	1,583	1,708	1,667	1,536	1,750	1,821	1,882	1,975	1,800
0,69	1,551	1,484	1,580	1,660	1,787	1,667	1,551	1,719	1,788	1,845	1,925	1,800
0,61	1,558	1,518	1,608	1,692	1,766	1,667	1,558	1,708	1,766	1,830	1,900	1,800
0,52	1,548	1,540	1,626	1,678	1,761	1,583	1,548	1,676	1,732	1,792	1,850	1,700
0,45	1,533	1,542	1,619	1,683	1,756	1,583	1,533	1,645	1,699	1,755	1,825	1,700
0,39	1,518	1,549	1,610	1,674	1,711	1,500	1,518	1,613	1,665	1,717	1,775	1,700
0,32	1,490	1,539	1,599	1,646	1,705	1,636	1,490	1,575	1,623	1,667	1,725	1,600
0,27	1,465	1,529	1,578	1,613	1,674	1,545	1,465	1,544	1,582	1,629	1,675	1,600
0,20	1,424	1,501	1,537	1,573	1,605	1,455	1,424	1,505	1,553	1,591	1,625	1,500
0,16	1,389	1,470	1,512	1,554	1,595	1,455	1,389	1,473	1,519	1,553	1,600	1,500
0,11	1,350	1,432	1,474	1,506	1,524	1,364	1,350	1,435	1,477	1,503	1,550	1,500
0,08	1,314	1,408	1,437	1,463	1,512	1,364	1,314	1,413	1,443	1,465	1,500	1,400
0,03	1,268	1,358	1,384	1,416	1,439	1,273	1,268	1,368	1,392	1,428	1,450	1,400
$M_x=0$	1,239	1,337	1,367	1,390	1,425	1,300	1,239	1,337	1,367	1,390	1,425	1,300

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бириулёв В.В., Кользеев А.А. Проектирование металлических конструкций с замкнутыми сечениями. – Новосибирск, 1988. – 88 с.
2. Патент на изобретение №2174576 РФ МКИ⁷ Е 04 С3/32. Тонкостенная несущая конструкция замкнутого сечения / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, А.С. Косинцев, С.Г. Яшин. – опубл. 10.01.2001; Бюл. №28.
3. Свидетельство на полезную модель №8716 МПК⁶ С3/4. Складчатое покрытие из наклонных ферм / М.М. Копытов. – опубл. 16.12.98; Бюл. №12.
4. Патент на изобретение №2188287 РФ МКИ⁷ Е04 С3/04. Покрытие из трехгранных ферм / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелехин. – опубл. 27.08.2002; Бюл. №24.
5. Свидетельство на полезную модель №19068 РФ МКИ⁷ Е 04 с 3/4. Структурное покрытие / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин. – опубл. 10.08.2001; Бюл. №22.
6. Патент на полезную модель №36119 РФ МКИ⁷ Е 04 С 3/32. Тонкостенная несущая конструкция замкнутого пятигранного сечения (её варианты) / М.М. Копытов, А.В. Матвеев, А.П. Малиновский, Е.А. Мелёхин. – опубл. 27.02.2004; Бюл. №6.
7. Патент на полезную модель №36118 РФ МКИ⁷ Е 04 С 3/04. Пространственный узел покрытия / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, С.Г. Яшин, А.В. Матвеев, Р.А. Осокин. – опубл. 27.02.2004; Бюл. №6.
8. Патент на полезную модель №49859 РФ Е04 3/04. Покрытие из трехгранных ферм / М.М. Копытов, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин. – опубл. 10.12.05; Бюл. №34.
9. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Осокин Р.А. Пространственные покрытия с поясами пентагонального сечения // Известия ВУЗов. Строительство. – 2002. – №4. – С.14–18.
10. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Косинцев А.С. Складчатое покрытие из прокатных профилей // Труды НГАСУ. – 1999. – Т.2. – №2(4). – С.43–49.
11. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В. Экспериментальное исследование бесфасоночной пространственной фермы с пентагональным сечением верхнего пояса // Известия ВУЗов. Строительство. – 2000. – №11. – С.129–132.
12. Матвеев А.В. Особенности расчетной схемы пространственной трехгранной фермы с пентагональным сечением верхнего пояса // Вестник ТГАСУ. – Томск, 1999. – №2. – С.131–137.
13. Матвеев А.В. Пространственно-стержневые конструкции покрытий с поясами составного профиля из швеллера и уголка. Дис. ... к.т.н. – Томск, 2004. – С.24.
14. Мелёхин Е.А. Работа узлов бесфасоночного складчатого покрытия с пояса-

- ми пятигранного составного профиля: Автореферат дис. ... к.т.н. – Томск, 2003. – С.20.
15. Копытов М.М., Матвеев А.В., Мелёхин Е.А. Бесфасоночные пространственно-стержневые покрытия с поясами пентагонального профиля сечения // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2003. – №11. – С.2–6.
 16. Копытов М.М., Матвеев А.В. Экспериментально-теоретические исследования бесфасоночных пространственно-стержневых металлоконструкций покрытий с поясами пентагонального профиля сечения. VIII Украинская научно-техническая конференция “Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее”. – Киев, 2004. – С.109–116.
 17. Кузнецов В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика). – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
 18. Белый Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: Дисс. ... д.т.н. – Л.: ЛИСИ, 1987. – 358 с.
 19. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* “Стальные конструкции”). – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
 20. Рекомендации по расчету жесткости диафрагм из стального профилированного настила в покрытиях одноэтажных производственных зданий при горизонтальных нагрузках. – М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1980. – 32 с.
 21. Короткин Я.И., Постнов В.А., Сиверс Н.Л. Строительная механика корабля и теория упругости”. Т.1. – Л.: Судостроение, 1968. – 424 с.
 22. Пособие по расчету и конструированию сварных конструкций (к главе СНиП II-23-81) / ЦНИИСК им. Кучеренко. –М.: Стройиздат, 1984. – 40 с.
 23. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций. – М., 2005. – 132 с.
 24. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / ЦНИИПРОЕКТ-СТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ им. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1989. – 50 с.
 25. Лихтарников Я.М. Металлические конструкции. Методы технико-экономического анализа и проектирования. – М.: Стройиздат, 1968. – 264 с.
 26. Сахновский М.М. Технологичность строительных стальных конструкций. – Киев: Будівельник, 1980. – 264 с.
 27. Грудев И.Н., Артемов А.А., Уточнение расчетной длины стержневых элементов, работающих в составе конструкции // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2003. – №11. – С.6–7.

SUMMARY

The book presents constructive specific features of light metallic construction, formed by five-sided tubes made of joint channel and capping. The authors give the results of research studying and testing on location of such constructions as well as recommendations on their calculation and design. A project solution applying non-face three-sided trusses with belts of pentagonal cross-section is illustrated with specific example. The details of manufacturing, transporting and assembling of such construction are considered as well as technical and economical analysis of their use in civil engineering, effectiveness and trends of further development.

The book is of interest for a wide range of specialists in civil engineering, designers and scientists. It can be used in education process for preparing the engineers and masters.

Издательство “СТТ” является лидером научного книгоиздания в Сибирском регионе, имеет собственное представительство в США, что позволяет выпускать литературу с американскими выходными данными, оформленными по международным стандартам. Издательство консультирует по вопросам защиты авторских прав, организации выпуска научной периодики и распространению научных книг и журналов в России и за рубежом.

Лучшие книги, выпущенные Издательством “СТТ”, находятся в крупнейших библиотеках мира – National Library of Medicine (USA), The British Library (UK), Library of Congress (USA) и в The US Patent Bureau (USA), что обеспечивает их размещение в мировых базах данных.



г. Томск, проспект Ленина 15^Б–1
(для корреспонденции: Россия, 634021, г. Томск, а/я 1747)
тел./факс: (3822) 421-455, 421-477, 206-857
e-mail: stt@sttonline.com

МИР ЖДЕТ ВАШИ КНИГИ!

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Н.М. Копытов
А.В. Матвеев

**ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ
ИЗ ПЯТИГРАННЫХ ТРУБ**

Дизайн — Е.В. Хоружая
Верстка — И.А. Надеина
Редактирование — С.В. Алексеев
Менеджер проекта — Т.В. Тихонова

Издательство «СТТ»
(Scientific & Technical Translations)
г. Томск, проспект Ленина, 15^Б-1
(для корреспонденции: Россия, 634021, г. Томск, а/я 1747)
тел./факс: (3822) 421-455, 421-477, 206-857
e-mail: stt@sttonline.com



Формат 84x108/32. Усл. п. л. 6,4. Уч.-изд. л. 6,1.
Бумага Select. Печать RISO. Гарнитура Newton7C.
Тираж 300 экз. Заказ № 353