

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. В. МИХАЙЛОВ, М. С. СЕРГЕЕВ

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЙ (СТРУКТУРЫ)

Учебное пособие



Владимир 2011

УДК 624.074.014
ББК 38.54
М69

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
промышленного и гражданского строительства
Электростальского политехнического института
(филиал НИТУ «МИСиС»)
М. Д. Корчак

Доктор технических наук, профессор кафедры
инженерных конструкций и архитектуры
Северного (арктического) федерального университета
Б. В. Лабудин

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Михайлов, В. В. Пространственные стержневые конструк-
М69 ции покрытий (структуры) : учеб. пособие / В. В. Михайлов,
М. С. Сергеев ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим.
гос. ун-та, 2011. – 56 с. ISBN 978-5-9984-0159-6

Приведены сведения по основам формообразования узловых соединений
структурных конструкций различным способом опирания и виды стержней.

Рассмотрены основные тенденции развития структурных конструкций, обла-
сти и примеры применения, а также принципы расчета пространственных стерж-
невых конструкций покрытий (структуры).

Предназначено для студентов 4-5-го курсов очной и заочной форм обучения
специальностей 270102 – промышленное и гражданское строительство, 270105 –
городское строительство и хозяйство.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соот-
ветствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 32. Табл. 9. Библиогр. : 11 назв.

УДК 624.074.014
ББК 38.54

ISBN 978-5-9984-0159-6

© Владимирский государственный
университет, 2011

Введение

Нарастающие темпы и уровень современного строительства, задачи экономии металла и трудоемкости предъявляют требования по применению экономных конструкций и дальнейшему их совершенствованию.

Основа современных мировых тенденций развития строительной индустрии – возрастающая степень заводской готовности строительных конструкций или их элементов.

Пространственные стержневые конструкции покрытий применяют для более эффективного промышленного производства строительных конструкций (СК), что позволяет снизить затраты от массовости их выпуска, специализации производства и рациональности конструктивных решений.

Наиболее рациональными конструктивными формами принято считать те, которые, обладая технологичностью изготовления и низкой материалоемкостью, обеспечивают возможность широкой унификации элементов конструкций с учетом отраслевых и межотраслевых требований, позволяют организовывать поточное производство ограниченной номенклатуры однотипных элементов, из которых можно создавать самые разнообразные плоские и пространственные конструкции или здания в целом с высокими архитектурно-эстетическими свойствами.

В основу разработки систем металлических перекрестно-стержневых пространственных конструкций (ПСПК) были положены следующие основополагающие архитектурно-конструктивные предпосылки: единый унифицированный сортамент элементов с максимальными композиционными возможностями; использование оптимальных по форме малодефицитных профилей проката; применение высокопрочных материалов; полная индустриализация производства, основанная на использовании высокопроизводительного автоматическо-

го оборудования, литья, штамповки и т.п.; компактность элементов системы и возможности их транспортировки любым видом транспорта; высокая надежность, быстрота сборки и монтажа элементов, включая конвейерную сборку и крупноблочный монтаж; широкие возможности объемно-пространственной композиции.

Высшее достижение в развитии данных систем – практически неограниченное разнообразие конструктивных форм на базе ограниченного набора исходных типов элементов, применяемых для строительства зданий и сооружений промышленного, гражданского и сельскохозяйственного назначения.

В настоящем пособии представлены сведения, обобщающие отечественный и зарубежный опыт развития и применения систем перекрестно-стержневых пространственных конструкций поэлементной сборки, т.е. систем, в основе построения которых лежат или один стержень, или стержень и узловой соединительный элемент. Как показал анализ мировой практики, такие системы получили наибольшее развитие, поскольку в их основу положен принцип максимальной децентрации материала.

В отличие от существующих методов строительства, основанных на типизации крупных строительных конструкций (колонна, балка, ферма и т.д.) или зданий в целом, объектами типизации в данных системах являются стержень и узловой элемент, оптимизированные по массе несущей способности и типизированные по геометрическим размерам исходных элементов (стержней, узловых элементов, соединений). Такие конструкции получили название конструкций поэлементной сборки.

В работе использованы разработки ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

Отметим, что еще не устоялась терминология, определяющая системы регулярной структуры. Их называют перекрестно-стержневыми пространственными конструкциями покрытий, или «структурными конструкциями» [1-11]. Этот термин и использован в пособии (СПК – структурные пространственные конструкции).

Техническая идея их появления состояла:

- в создании металлических конструкций с максимальной унификацией элементов заводского изготовления;
- простоте сборки на строительной площадке;

- малом весе основных элементов;
- пространственной работе;
- отсутствию элементов, отказ которых может приводить к обрушению или прогрессирующему разрушению.

В представленном пособии обобщен опыт конструирования структурных систем, показаны их преимущества и недостатки, что позволяет студентам раскрыть свои творческие способности в конструировании элементов и, главное, узловых соединений, надежных, простых, удобных для механизированного (автоматизированного) изготовления и монтажа.

Совершенствование стальных конструкций идет по пути экономии стали, что определяется не только настоящим временем, но и относительно дальней перспективой, поскольку по некоторым данным запасов железных руд хватит на 40 – 50 лет.

Перекрестно-стержневые пространственные конструкции, или пространственные структуры, могут представлять собой системы из вертикальных перекрестных ферм или, чаще всего, регулярные структуры, построенные на принципе многосвязности, составленные из правильных и полуправильных многогранников, обладающих двумя важнейшими свойствами: возможностью плотного заполнения пространства и одной длиной модульного стержня в пределах одной конструкции.

Этими свойствами обладают тетраэдр и октаэдр (рис. 1) и ряд архимедовых тел – полуправильных многогранников.

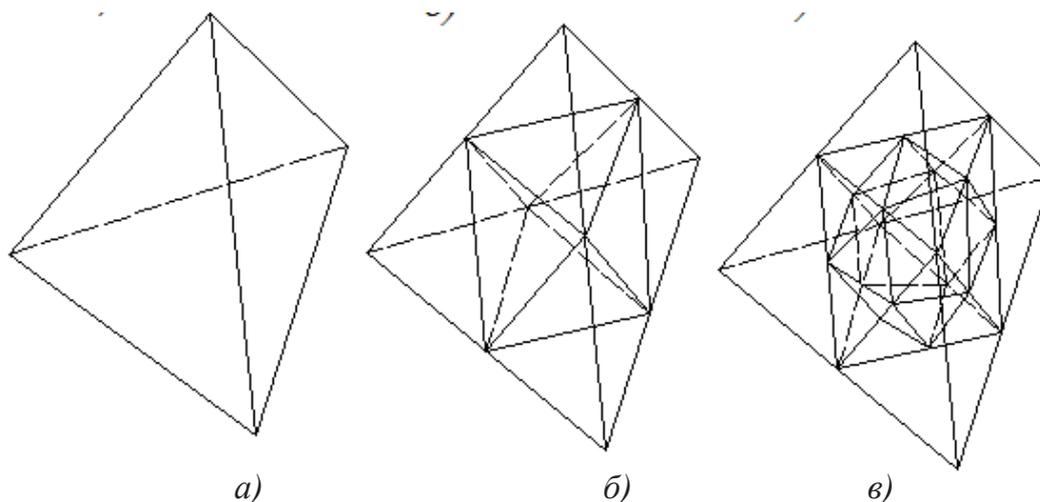


Рис. 1. Основные многогранники: а – тетраэдр; б – октаэдр; в – кубоктаэдр

ПСПК позволяют разнообразить формообразования покрытий.

1. Общая характеристика

В мировой практике проектирования пространственных систем наибольшее распространение, благодаря пространственной геометрической неизменяемости и равнодлинности ребер, получили конструкции на основе тетра-кубооктаэдрической группы. Основные, используемые для стержневых пространственных конструкций, – тетраэдр и октаэдр, которые называют структурами кристаллов.

Рассекая тетраэдр плоскостями, проходящими через середины его ребер, получаем октаэдр – второй исходный многогранник системы (см. рис. 1).

Сечение октаэдра плоскостями, проходящими через середины его ребер, дает кубооктаэдр – тело, грани которого образованы из шести квадратов и восьми равносторонних треугольников. Угол между каждым из двух квадратов равен 90° , а угол между квадратом и треугольником – $54^\circ 44'$, что соответствует углу между треугольной гранью и основанием полуоктаэдра. Кубооктаэдр – третий исходный многогранник (рис. 1, в), который вместе с полукубооктаэдром хорошо сочетаются в различных комбинациях с тетраэдром, октаэдром и полуоктаэдром.

Тетраэдр и октаэдр (или полуоктаэдр) в сочетании друг с другом полностью заполняют пространство, являясь взаимозаменяемыми телами.

Пространство, без остатка заполненное тетраэдрами и октаэдрами, представляет собой исходную матрицу, в которой осуществляется формообразование всех возможных в системе пространственных каркасов.

Каркасы формируются путем сечения решетки плоскостями, каждая из которых принадлежит какой-либо из граней тетраэдра, октаэдра или полуоктаэдра.

Один из видов кристаллических структур – «стержнелистовой» вариант с включением обшивок в работу всей системы.

Листовая часть представляет собой складчатую поверхность, образующую пирамиды или тетраэдры, и одновременно служит несущей конструкцией и ограждением.

Применяют и комбинированные с железобетонными плитами варианты металлических перекрестно-стержневых систем, например в плитах большепролетных покрытий.

На рис. 2 – 4 показаны варианты структурных конструкций из пи-

рамид, которые могут быть образованы только из стержневых элементов или из пластинок в сочетании со стержнями.

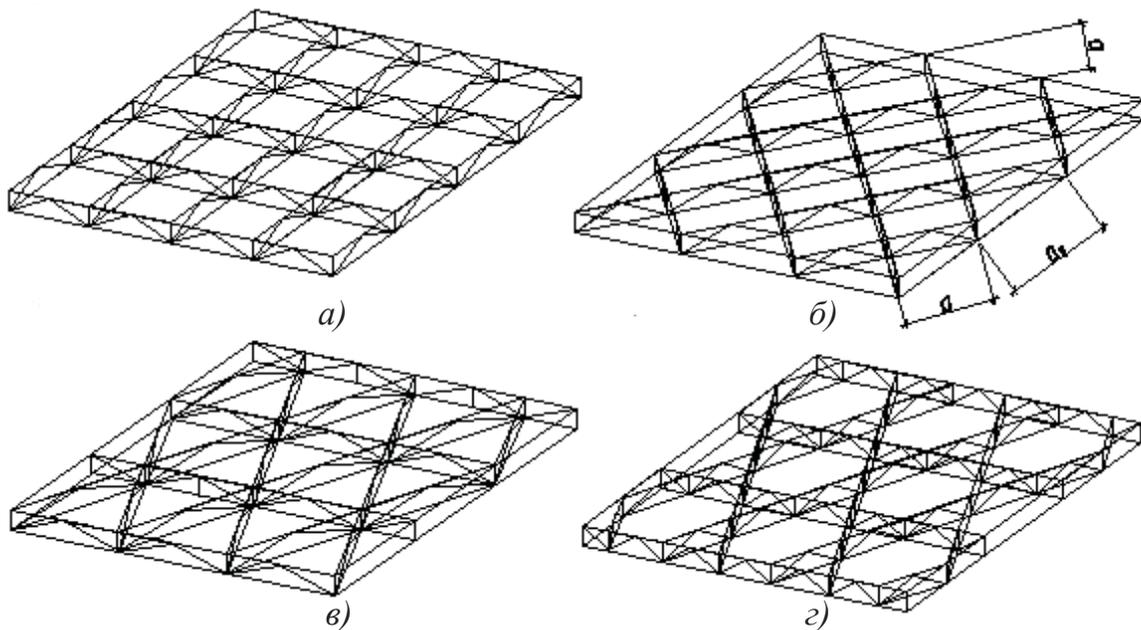


Рис. 2. Схемы перекрытий из вертикальных перекрёстных ферм: а, б – при расположении ферм в двух направлениях; в, г – то же в трёх направлениях

Пространственные системы регулярной структуры строят на принципе многосвязности. Это определяет целый ряд их преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями, скомпонованными из стропильных и подстропильных ферм, прогонов.

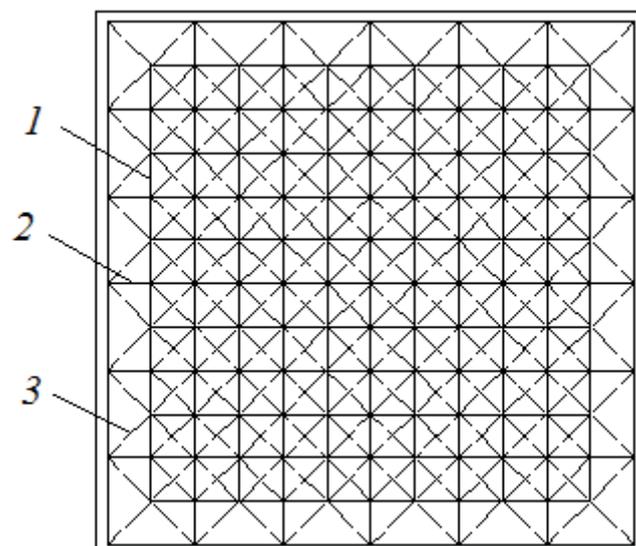


Рис. 3. Структурная плита: 1, 2 – верхние и нижние пояса соответственно; 3 – наклонные раскосы

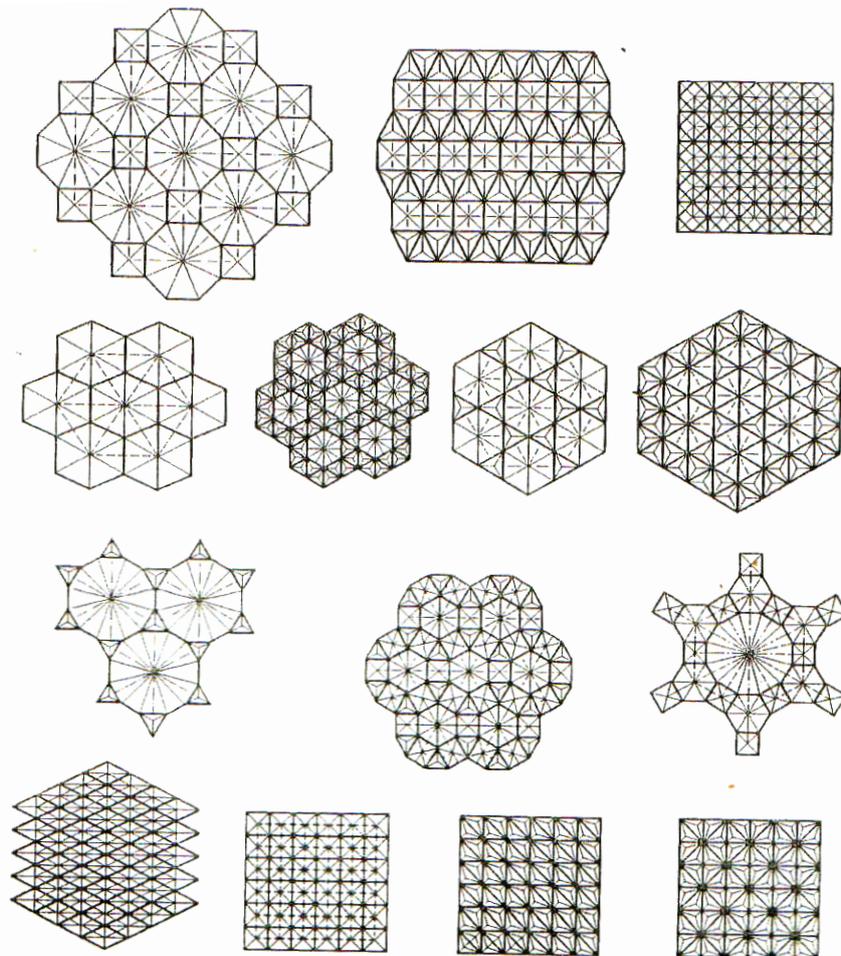


Рис. 4. Схемы конструкций регулярной структуры

Материал в такой системе распределяется сравнительно равномерно. При действии на систему подвижных и неравномерно приложенных нагрузок в работу включается большое число стержней, что позволяет создавать достаточно легкие конструкции несущих покрытий с многоопорным подвесным транспортом и другие эффективные системы. Наличие частой сетки узлов в уровне поясов структурной плиты упрощает применение верхнеподвесного транспорта.

Полагают, что среди преимуществ этого класса конструкций можно назвать и повышенную надежность, определяемую той же многосвязанностью (многократной статической неопределимостью). Резерв живучести многосвязанных систем заключается в возможности перераспределения усилий после выхода из строя или перехода в пластическую стадию деформирования отдельных перегруженных элементов. Архитекторов они привлекают своеобразием и многообразием рисунков кристаллической структуры (рис. 5), возможностью варьировать формы поверхностей в плане и в разрезах зданий (рис. 6 – 7) или, иными словами, архитектурной выразительностью.

Эти конструкции благодаря многосвязности и пространственной работе более жестки, чем плоские, что позволяет проектировать покрытия с несущими структурными плитами примерно вдвое меньшей высоты, чем традиционные ($1/15 \dots 1/25$ от пролета).

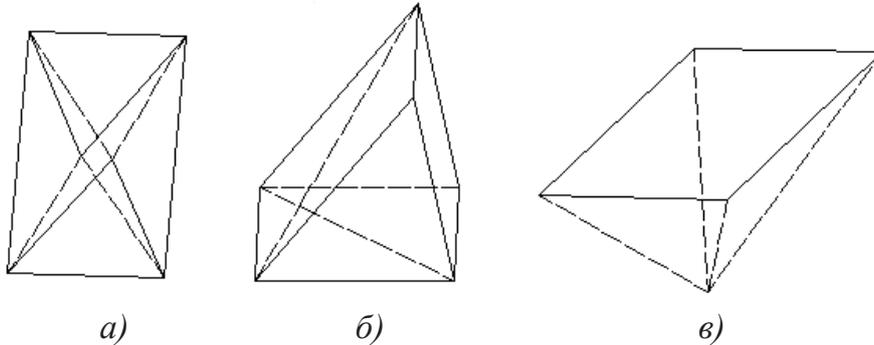


Рис. 5. Кристаллы структур: а – дупирамида; б – тетраэдр; в – пирамида

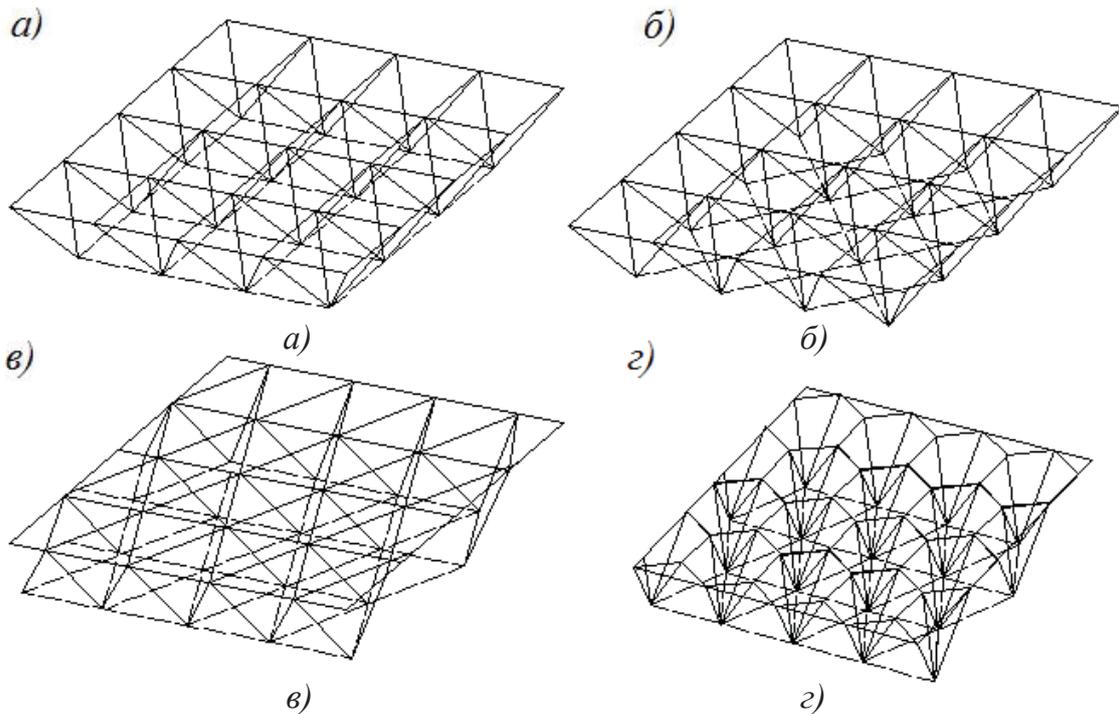


Рис. 6. Схемы структурных плит из решётчатых пирамид: а, б – с квадратным основанием (пентаэдров или полуоктаэдров); в – треугольным основанием (тетраэдров); г – шестиугольным основанием (гептаэдров)

Регулярность структур определяет повторяемость размеров и, как следствие этого, максимальную унификацию стержней и узлов, что делает возможной организацию поточного высокомеханизированного производства, позволяющего существенно снизить удельные трудозатраты на изготовление.

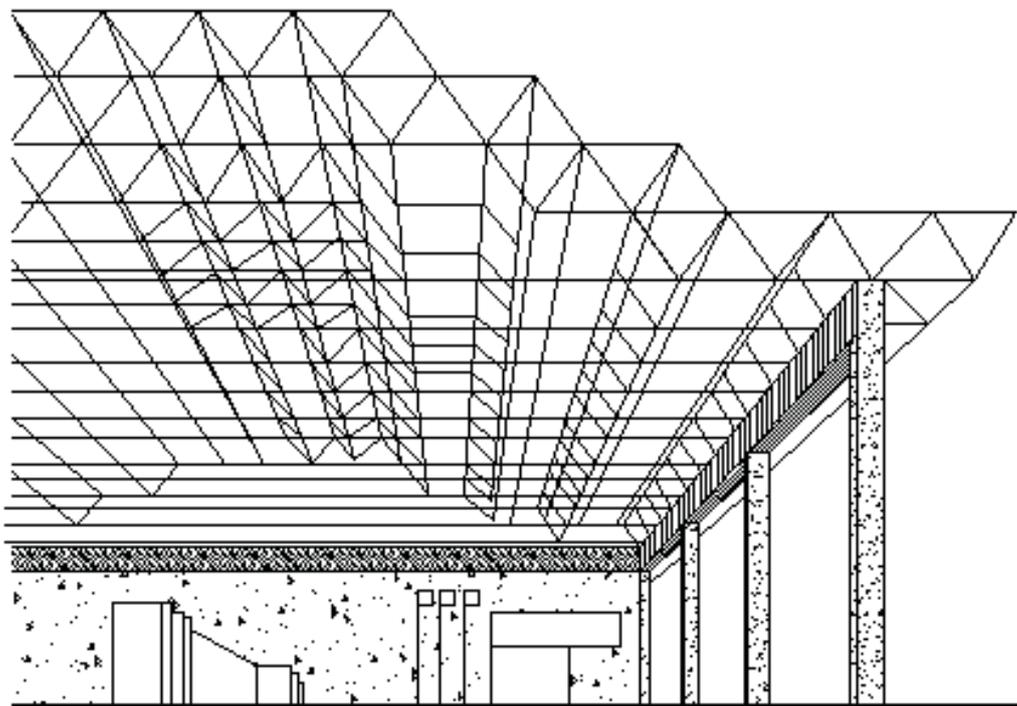
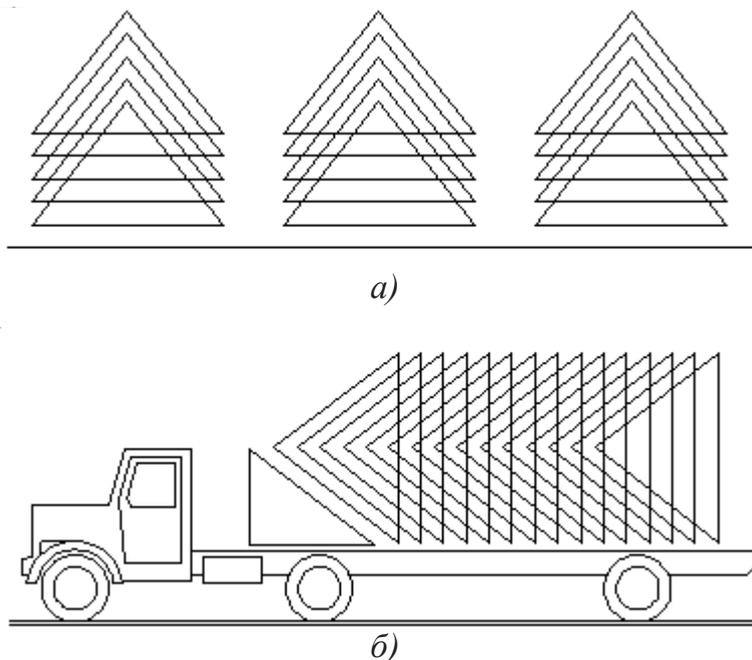


Рис. 7. Структурное покрытие в виде ступенчатой усеченной пирамиды (торец условно не показан)

При компоновке конструкций из укрупненных элементов типа пирамид возможно использование «принципа матрешки» для их транспортирования, т.е. вкладывать их одну в другую с образованием довольно компактного пакета из пирамид (рис. 8).



*Рис. 8. Схемы компактной упаковки пирамид:
а – при складировании; б – при перевозке*

Компактные пакеты из пирамид дают возможность монтажа пространственно жестких конструкций крупными блоками, конвейерным способом, без всякого усиления для устойчивости.

Недостатки структурных систем проистекают из основных особенностей, связанных с наличием большого числа стержней и узлов. Если в живой природе не возникает проблем в конструировании узлов на клеточном уровне, то для механических систем с большим числом узлов непросто найти рациональные решения.

Сложность узлов определяет недостатки рассматриваемого типа конструкций. В узлах структур сходятся шесть, а иногда и более стержней. От конструкции узла, от того, сколь высокую прочность при изготовлении она предполагает, зависит и сложность, а значит трудоемкость изготовления.

Именно конструкция узлов определяет главным образом и трудоемкость сборки конструкций на монтажной площадке. Трудоемкость сборки конструкций, приведенная к единице площади покрытия, например для различных конструктивных систем, может отличаться более чем в 10 раз!

В некоторых структурных плитах при замыкании узлов, особенно в узлах с использованием монтажной сварки, развиваются значительные начальные напряжения, снижающие несущую способность стержней и системы в целом.

Наличие большого числа стержней во многих случаях ведет к неполному использованию несущей способности элементов, сечения многих стержней подбирают по предельной гибкости. Это приводит к тому, что структурные плиты оказываются во многих случаях тяжелее, чем системы, составленные из плоских конструкций. Пространственно-стержневые системы регулярной структуры предполагают использование относительно тонкостенных профилей, например круглых или прямоугольных труб.

Некоторые из указанных недостатков существенно смягчаются большой повторяемостью стержней и узлов, что дает конструктору возможность найти удачную конструкцию, обеспечивающую достаточно высокую технологичность как при изготовлении, так и при сборке структур.

2. Конструкции структурных плит. Решение узлов

2.1. Виды кристаллических решеток, применяемые в структурах

Как уже отмечалось, основа любой структуры – «кристалл», образованный стержнями, которые расположены на его гранях. В качестве таких «кристаллов» используют пирамиды (тетраэдры и полуоктаэдры), параллелепипеды и другие многогранники. Геометрические построения структур отличаются чрезвычайным многообразием, что и определило интерес не только конструкторов, но и архитекторов к этому типу конструкций (рис. 9).

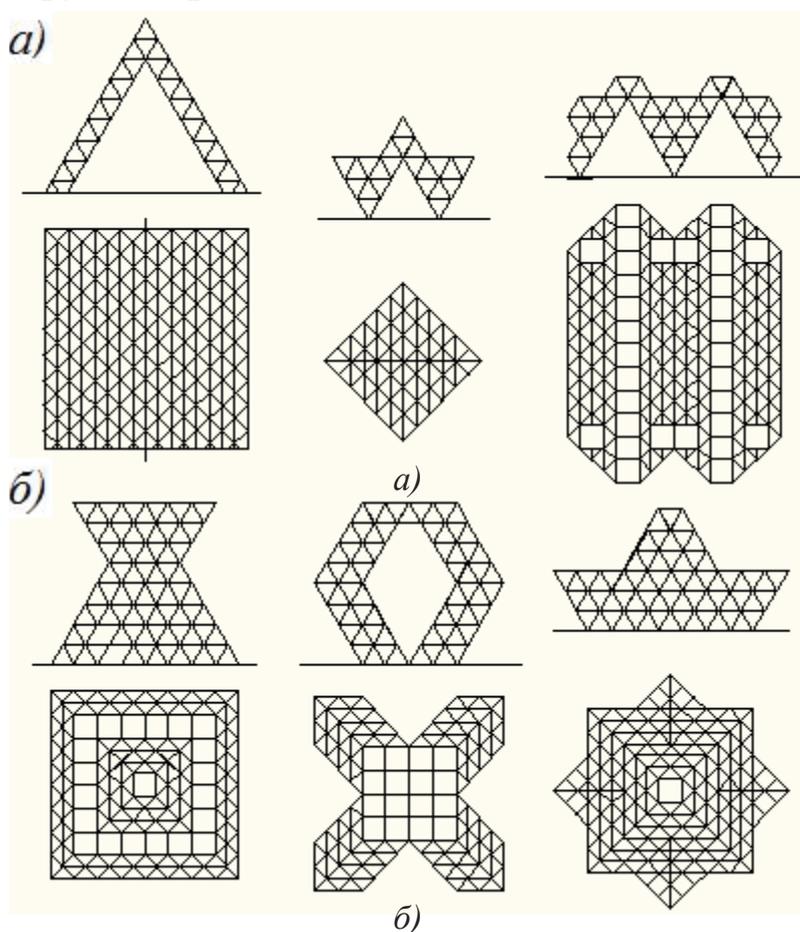


Рис. 9. Пространственные каркасы на квадратной планировочной сетке на основе: а – тетраэдра; б – октаэдра

Наиболее распространены двухсетчатые структурные плиты, которые по характеру сопротивляемости внешним воздействиям можно подразделить на две группы:

- системы с геометрически изменяемыми сетками поясов (ортогональные, гексагональные сетки), способными воспринимать усилия от изгибающих моментов в плите M_x, M_y ;

- системы с геометрически неизменяемыми сетками поясов (например треугольные сетки), способными воспринимать усилия и от изгибающих, и от крутящих моментов в плите M_x, M_y и H_{xy} .

Кристаллическая структура формируется не только вариацией поясных сеток, но и размещением раскосов, соединяющих узлы сеток. По степени регулярности строения поясных сеток в двухсетчатых структурных плитах можно выделить три класса систем:

- системы регулярные с одинаковым по всей площади строением верхних и нижних сеток поясов, геометрически изменяемых или неизменяемых;

- системы с регулярным строением поясных сеток, одна из которых геометрически изменяема, а вторая неизменяема;

- системы, в которых строение поясных сеток различно в угловых и центральных зонах перекрываемой площади (такого рода нерегулярности могут возникнуть в связи с малой величиной крутящих моментов в центральной зоне, удалением из центральной зоны стержней, предназначенных для их восприятия).

2.2. Конструкции структур и узлы сопряжений

Конструктивные решения структурных плит отличаются столь большим многообразием, что нет возможности описать их все подробно. В мировой практике применения структур насчитываются около 130 различных систем, отличающихся прежде всего конструкцией узла сопряжения стержней. Именно здесь сосредоточены главные особенности технологии изготовления и сборки конструкции, определяющие отличия одних систем от других.

Одной из первых нашла применение в строительстве система немецкой фирмы «Меро» (1942 г.), предложившей пространственно-стержневые сборно-разборные каркасы кристаллического строения для зданий военного назначения. Позднее такие конструкции стали применяться и в гражданском строительстве.

В отечественной практике эта система была несколько усовершенствована В.К. Файбишенко и другими конструкторами и получила название «Система МАрхИ».

Узел системы «Меро» (МАрхИ) состоит из литого сферического,

полусферического либо многогранного элемента-коннектора с высверленными в нем отверстиями для болтов по числу примыкающих стержней (рис. 10). Иногда коннекторы изготавливают из стержневых заготовок многогранного (например шестигранного) сечения. Болт пропускают в отверстие плоского цилиндрического вкладыша, запрессованного в торец трубчатого стержня и приваренного к нему. Между торцами коннектора и вкладыша размещают поводковую втулку шестигранного сечения с отверстием под болт, снабженную штифтовым фиксатором.

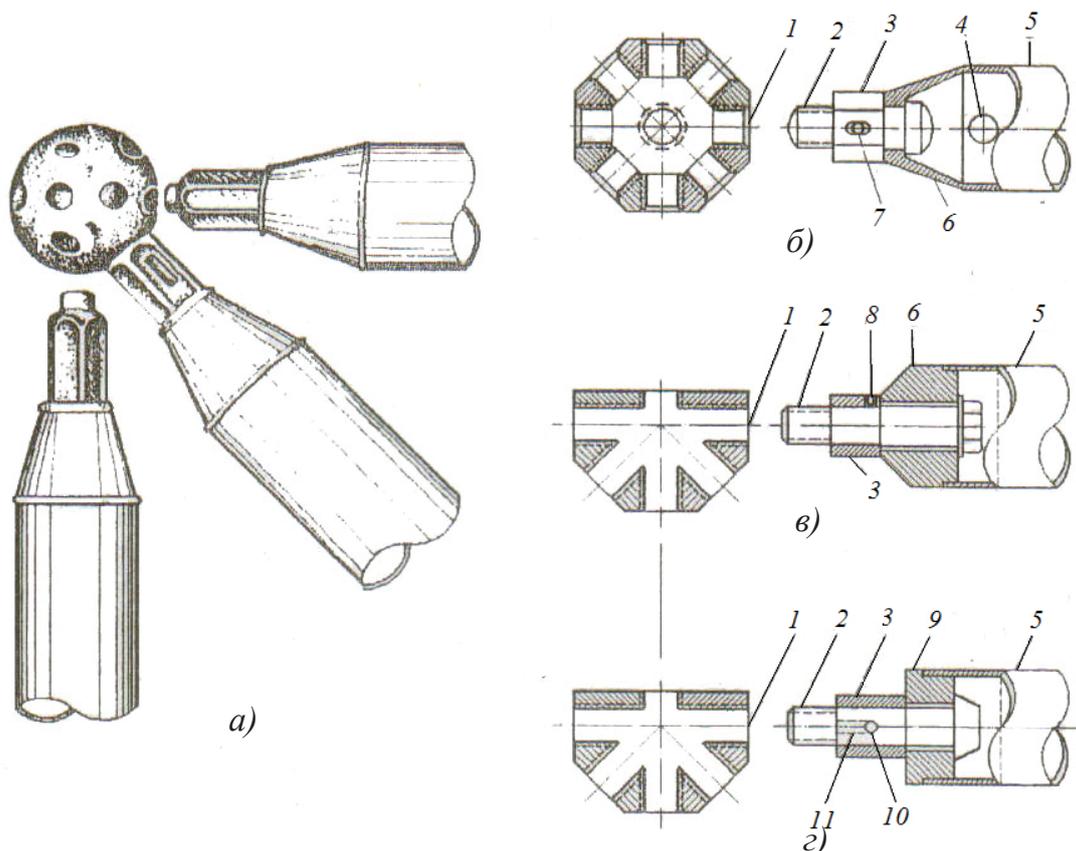


Рис. 10. Узловое соединение «Меро» и его модификации: а, б – общий вид узла, узловый элемент и детали стержня системы «Меро»; в, з – детали трубчатых элементов в соединениях систем «Веймар» и «Мархи»; 1 – отверстие с внутренней резьбой; 2 – болт; 3 – поводковая гайка; 4 – монтажное отверстие; 5 – труба; б – оголовок трубы; 7 – ведущий палец; 8 – фиксатор; 9 – шайба; 10 – штифт; 11 – прорезь в гайке

Болт с помощью втулки завинчивают в коннектор до плотного касания между втулкой и торцевыми поверхностями, что обеспечивает передачу сжимающих усилий через втулку и площади касания, а растягивающих – через болт. Стержни этой системы обладают высокой компенсационной способностью, что облегчает сборку.

Компенсационной способностью называют возможность сборки, не взирая на неточности изготовления стержней.

Недостаток конструкции – относительно высокая трудоемкость изготовления элементов узла; система сборно-разборная, трудоемкость монтажа 1...1,5 чел.-ч/м² перекрываемой площади.

Структуры МАрХИ базируются на применении унифицированных стержней и узловых коннекторов. Стержни из круглых труб с диаметром и толщиной от 60/3 до 146/10 имеют длину 1,5; 2 и 3 м. Общее число типов сечений унифицированных стержней обычно не превышает 10. В одной плите, как правило, используют не более четырех-пяти типов сечений.

При длине стержней 3 м высота плиты составляет 2,12 м. Плиты предназначены для пролетов 18 ... 36 м, при необходимости предусматривают консоли за счет смещения опорных конструкций от краев плиты к центру. Сечение коннекторов в плане представляет собой восьмиугольник, при этом используют два типа коннекторов с наибольшими размерами в плане 120×120 и 150×150 мм.

В системе «Октаплатт» (ФРГ, 1957 г.) сделана попытка облегчить и упростить узлы. Узловой элемент выполняют здесь в виде полого шара из двух штампованных половин, сваренных на подкладных кольцах.

Стержни из труб, обрезанные под прямым углом, приваривают к шаровым элементам на монтаже (рис. 11, а).

Достоинства узла заключаются не только в его относительной простоте, но и в свободе примыкания стержней под любым углом; недостатки – в отсутствии компенсационной способности стержней и большом объеме монтажной сварки.

По данным авторов конструкции узла наибольшее усилие на стержень (при использовании труб диаметром 65...115 мм) составляет 350 кН, которое определяется несущей способностью сварного шва в примыкании к шару.

Система «Триодетик», разработанная в Канаде (1962 г., фирма «Фентимен»), привлекла внимание специалистов своей оригинальностью. Для соединения трубчатых стержней со сплюснутыми концами применяют узловой цилиндр с прорезями. Сплюснутые концы труб подвергают специальной обработке в соответствии с прорезями (рис. 11, б). Все трубы, сходящиеся в узле, фиксируют в прорезях цилиндра одним зажимным болтом.

Система была запроектирована для конструкций из алюминиевых сплавов, что позволяло использовать метод экструзии для получения стержневой заготовки специального профиля и изготовления узловых цилиндров простой нарезкой кусков из этой заготовки.

Позднее появились структуры такой системы из стали с иной технологией производства узловых цилиндров (механическая обработка). Главное достоинство системы – малая трудоемкость сборки (0,2 чел.-ч/м²).

Конструкция узла, близкая к только что рассмотренной, предложена для структур системы «Берлин». К сплюсненным концам трубчатых стержней приваривают клиновидные калиброванные наконечники, образующие при сборе в узел цилиндр с отверстием внутри (рис. 11, в).

Торцы цилиндра закрывают стальными крышками с бортами по наружному контуру и стягивают в узле шпильками. Растягивающие усилия в узле передаются наконечниками через крышки, а сжимающие – через плоскости контакта наконечников. Узел прост в сборке при условии высокой точности изготовления.

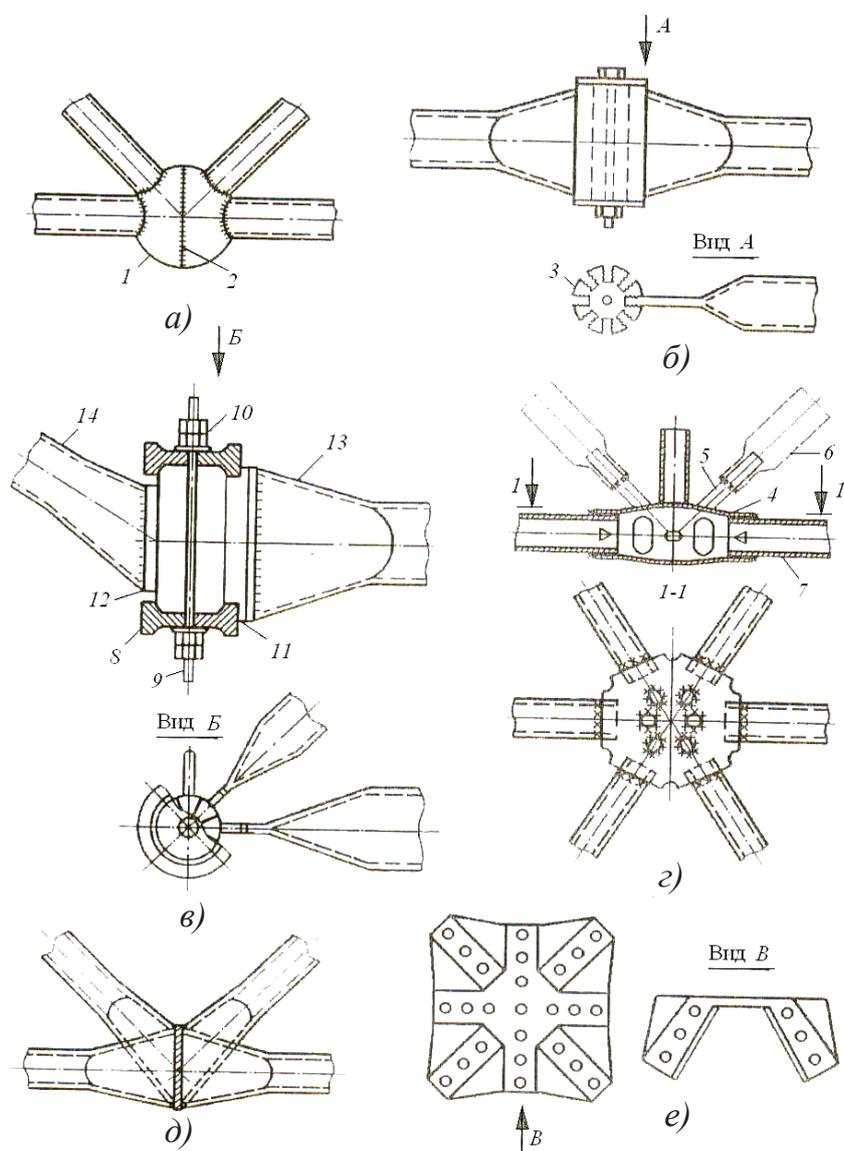


Рис. 11. Узлы различных структурных систем:

- а – «Октаплатт»;
- б – «Триодетик»;
- в – «Берлин»;
- г – «Дю Шато»;
- д – узел «ЦНИИСК»;
- е – «Юнистрэт»;
- 1 – шаровая вставка;
- 2 – сварной шов;
- 3 – фигурная прорезь;
- 4 – крышка;
- 5 – круглый стержень;
- 6 – труба раскоса;
- 7 – труба нижнего пояса;
- 8 – крышка;
- 9 – стяжной стержень;
- 10 – гайка с контргайкой;
- 11 – наконечник с приливом;
- 12 – то же без прилива;
- 13 – стержень нижнего пояса (труба со сплюсненным концом);
- 14 – труба раскоса

В узле системы «Дю Шато» (Франция) применены узловые штампованные фасонки (рис. 11, з). В каждой из двух фасонки предусмотрено по шесть полукруглых выемок, образующих после соединения фасонки узловой элемент с отверстиями для трубчатых стержней. Фасонки сваривают между собой по наружным линиям площадок касания. Стержни вставляют в отверстия и обваривают, образуя таким образом верхнюю или нижнюю сеть. Раскосы и стойки приваривают к наружным поверхностям узлового элемента (одной из фасонки). Узел обладает неплохой компенсационной способностью и довольно прост. Недостаток узла – большой объем монтажной сварки.

В узле «ЦНИИСК» (рис. 11, д) нет никаких дополнительных элементов. Концы труб сплющивают и в раскосах обрезают под нужным углом. Стержни при сборке закрепляют в специальном фиксаторе так, что между их торцами образуется свободное пространство, которое заполняют расплавленным металлом в процессе ванной сварки. Предполагается, что узел образует равнопрочное соединение с основными стержнями. Главное достоинство узла – минимальная металлоемкость: расход расплавленного металла – около 1,5 % от массы структуры, тогда как в других решениях расход металла на образование узлов составляет 5 – 7 %, а в некоторых системах – более 10 %. Недостатки узла – ограниченная компенсационная способность и значительный объем монтажной сварки.

Система «Юнистрэт» (США) также основана на использовании штампованных фасонки (рис. 11, е), отличающихся тем, что при штамповке создаются восемь плоскостей (по числу примыкающих стержней), где выполняют отверстия для крепления стержней из прокатных или гнутых профилей (уголков, тавров, швеллеров и т.п.). Решение направлено на снижение трудозатрат при изготовлении и монтаже.

Особенность систем «Веймар» и «МАрхИ» – возможность использования машиностроительных методов изготовления конструктивных деталей (автоматизированных технологий).

В отличие от системы «Меро» в решении «Веймар» (рис. 12) узловой элемент имеет форму усеченного сферического многогранника, а вращательно-поступательное движение болту передается от взаимодействия тела винта, ввинченного в резьбовое отверстие специальной поводковой втулки, с поверхностью скольжения (лыской) на тело бол-

та. Преимущество данного решения – отсутствие сквозного отверстия в теле болта – повышает его надежность в растянутых соединениях. Однако наличие односторонней лыски на теле болта создает опасность появления изгибающего момента, особенно нежелательного в болтах классов 8.8, 10.9, 12.9, подверженных термоупрочнению.

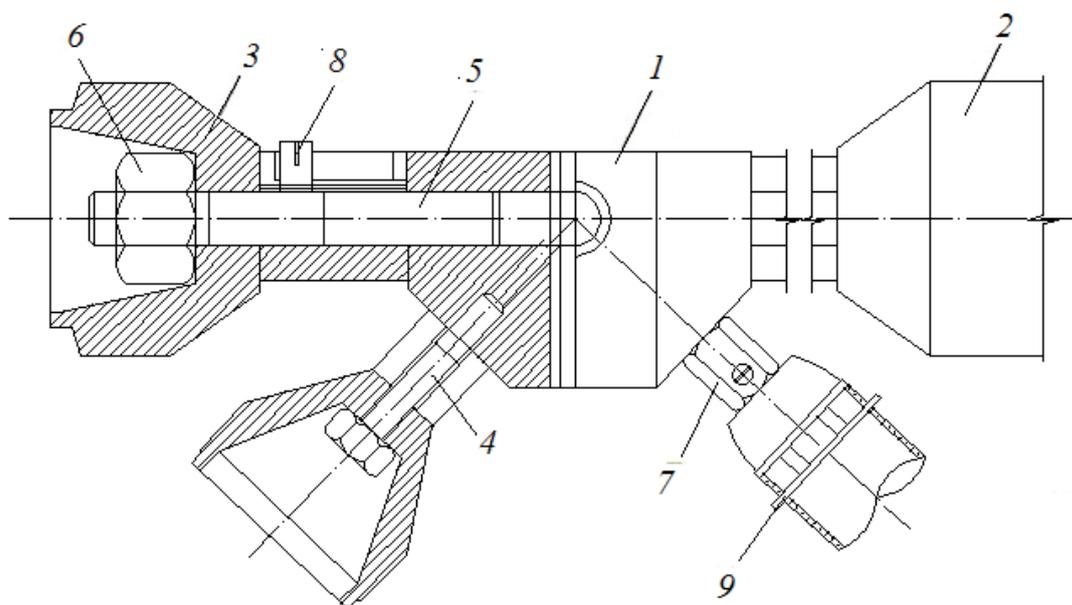


Рис. 12. Узловое соединение системы «Веймар»: 1 – узловой многогранник; 2 – трубчатый стержневой элемент; 3 – конический вкладыш; 4 – болт; 5 – шпилька; 6 – гайка; 7 – поводковая втулка; 8 – винт; 9 – фиксатор

В конструкциях системы «МАрХИ» на концевых участках стержней вместо конического вкладыша используется плоский цилиндрический вкладыш; вместо специальной втулки с глухим овальным отверстием – специальная втулка с продольной прорезью, выходящей на торец; в растянутых элементах вместо болта с поперечным отверстием под штифт (как в системе «Меро») или болта с односторонней плоской лыской (как в системе «Веймар») – болт или шпилька с гайками без каких-либо ослаблений.

В результате этого в конструкциях системы «МАрХИ» удалось снизить трудоемкость изготовления цилиндрического вкладыша и спецвтулки, металлоемкость деталей наконечника трубчатого стержня до 5 – 7 % от общей массы конструкции (в системе «Меро» эта величина составляет 15 – 20 %) и повысить несущую способность растянутого болта на 15 – 20 %.

Кроме того, в отличие от конструкций системы «Меро» в конструк-

циях системы «МАрхИ» трубчатый стержень не имеет технологических отверстий в стенках трубы, через которые в конструкциях системы «Меро» вставляются болты наконечников труб. Благодаря этому при прочих равных условиях несущая способность растянутых стержней в конструкциях системы «МАрхИ» повышается на 15 – 20 %, а при трубах малых диаметров и до 25 – 30 %.

Важное преимущество системы «МАрхИ» перед системами «Меро» и «Веймар» – использование специальных узловых элементов полусферического вида применительно к ортогональным и треугольным сеткам, а также несимметричных элементов под разные диаметры болтов по сравнению с универсальным сферическим многогранником, что позволяет дополнительно снизить металлоемкость и трудоемкость изготовления узлового элемента.

Кроме того, в системе «МАрхИ» (конструкции «МАрхИ», «Кисловодск», «Модуль») модульная длина стержневых элементов принята равной 1,5; 2,0; 3 и 4,5 м в соответствии с требованиями единой модульной системы проектирования и кратна укрупненным модулям 6,0; 9,0; 12,0 м и т.д., используемым при компоновке геометрических параметров зданий.

При этом каждая конструкция в системе «МАрхИ» собирается из стержней, имеющих одинаковую длину в осях узловых элементов.

Система «МАрхИ» разработана с учетом применения в качестве стержневых элементов профилей двутаврового сечения деревянных брусьев и др.

Для структур свойственно то же, что и для других конструктивных решений: их достоинства имеют и обратную сторону.

В целях унификации и удобства транспортирования трубы или прокатные профили длиной 12 м разрезают на короткие стержни, а затем из них (и узловых элементов) составляют поясные сетки.

Возможны и иные решения, в которых кристаллические структуры создают с использованием плоских ферм либо пространственных пирамид с основаниями в виде треугольника, прямоугольника (квадрата), шестиугольника и т.п.

Фермы (пирамиды) объединяют между собой в пространственную систему с помощью линейных элементов, длина которых также часто превышает размер ячейки поясной сетки (например кратна ей).

Интерес представляет узловое соединение системы «Варитек» (рис. 13, а), (г. Берн, Швейцария). Узловая деталь, состоящая из двух монтажных элементов, обеспечивает надежное, имеющее достаточно высокую несущую способность соединение стержней за счет того, что наконечники трубчатых стержней, выполненные в виде плоской пластины с отверстием, соосным со стержнем, охватываются парными ребрами узловой детали. При этом достигается центрирование стержневых элементов и регулирование толщин несущих листов как со стороны узловой детали, так и со стороны стержневого элемента при соответствующем увеличении достижения их геометрической точности, а следовательно, и надежности эксплуатации.

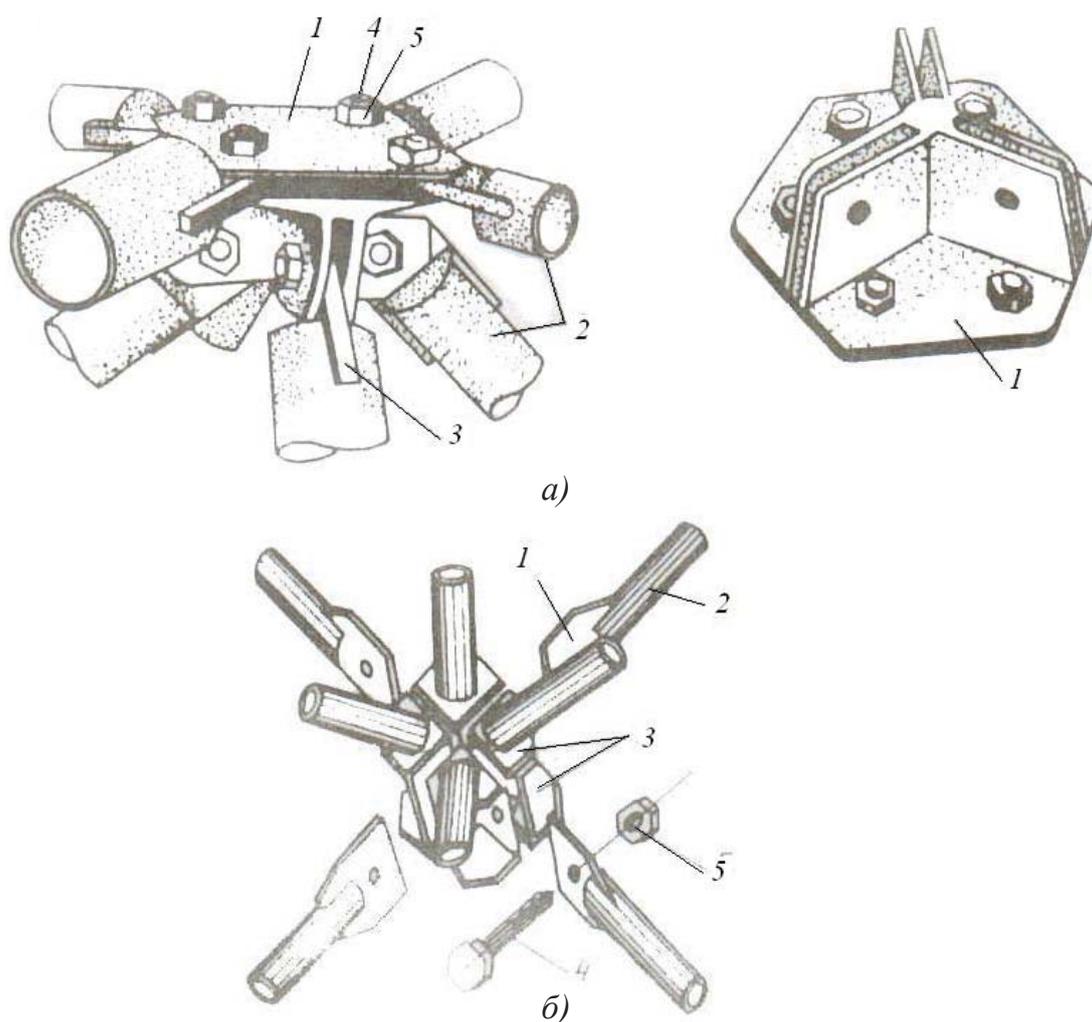


Рис. 13. Узловые соединения систем: а – «Варитек»; б – «Премит»;
 1 – узловая деталь; 2 – трубчатый стержень; 3 – наконечник трубчатого
 стержня; 4 – болт; 5 – гайка

Оригинальное решение узлового соединения под названием «Сокол» было разработано в СССР (рис. 14).

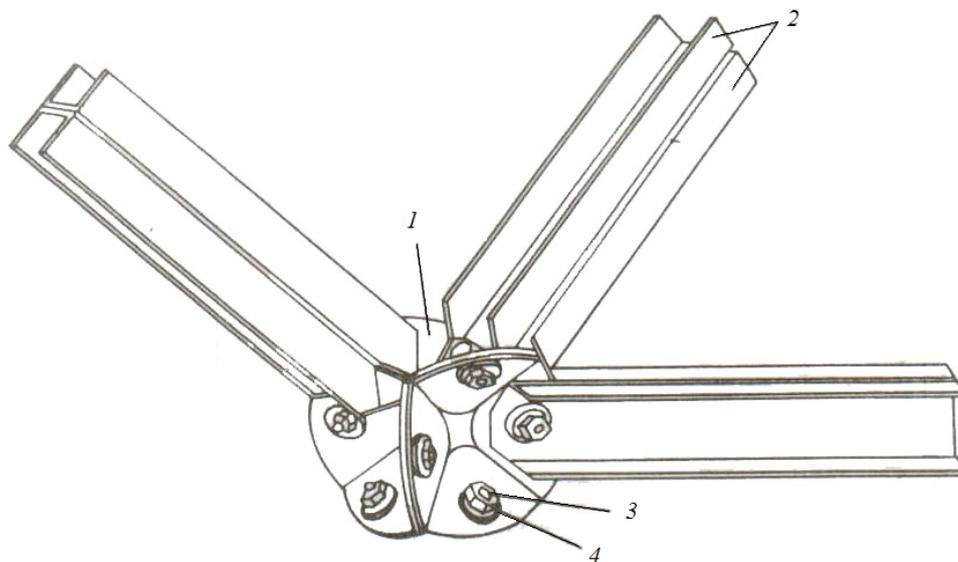


Рис. 14. Узловое соединение системы «Сокол»: 1 – листовая штамповая пирамидообразная деталь; 2 – стержневые швеллерные элементы; 3 – болт; 4 – гайка

Система состоит из шести одинаковых листовых штамповых пирамидообразных деталей с выступами вокруг отверстий для соединения деталей между собой и одновременного прикрепления к ним стержневых элементов посредством средних болтов нормальной точности. В качестве стержневых элементов здесь используется гнутый швеллерный или деревянный клееный профиль. Данное узловое соединение отличается низкой трудоемкостью изготовления, более высокой несущей способностью по сравнению с узловым соединением системы «Юнистрэт». Основной недостаток – повышенная металлоемкость, связанная с необходимостью присоединения к узлу стержневых элементов с развитым поперечным сечением.

В Московском архитектурном институте разработано узловое соединение стержней, относящееся к группе I B, которое позволяло по сравнению с системой «Юнистрэт» использовать в качестве стержневых элементов наиболее массовые профили проката – равнополочный уголок. Узловая штампованная листовая фасонка выполнялась с треугольными гранями (рис. 15), причем их число соответствовало числу присоединяемых к узлу стержней, в то время как в узловой фасонке системы «Юнистрэт» число граней вдвое превышало число стержней, сходящихся в узле.

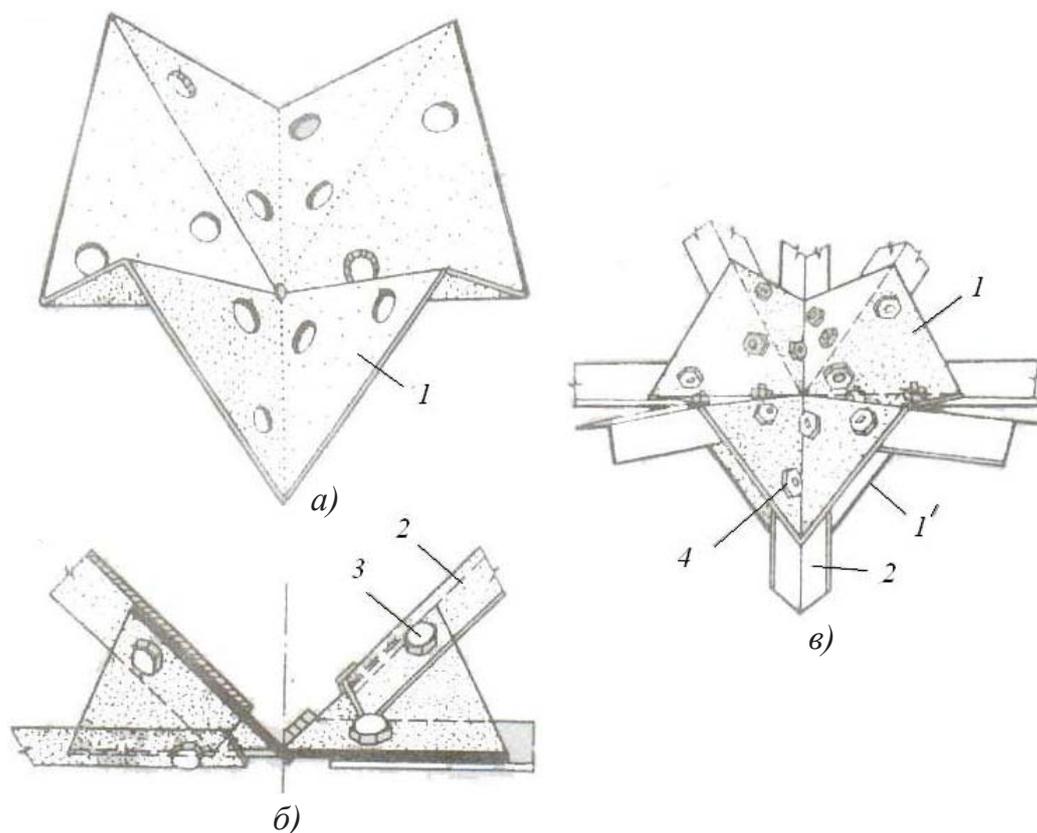


Рис. 15. Узловое соединение для стержней в виде равнополочных уголков «МарХИ»: а – узловая фасонка; б – соединение с одинарной фасонкой; в – то же с парной фасонкой; 1, 1' – фасонка; 2 – уголкового элемента; 3 – болт; 4 – гайка

Достоинство этого соединения в том, что присоединяемые стержни располагались не вдоль граней, а вдоль ребер между ними. Следовательно, устойчивость узловой фасонки и ее несущая способность возрастали при прочих равных условиях по сравнению с узловой фасонкой системы «Юнистрэт».

В зависимости от требуемой геометрии конструкции грани узловой фасонки можно было отгибать как для ортогональных, так и для треугольных сеток поясов, можно было менять угол наклона граней и тем самым регулировать длину стержней поясов и раскосов и строительную высоту конструкции.

Стержневые элементы к узловой фасонке крепились минимум двумя высокопрочными болтами. Для увеличения несущей способности узлового соединения в каждом узле рекомендовалось использовать две штампованные фасонки, между которыми вводились уголкового стержневые элементы.

Несмотря на очевидные достоинства данного узлового соединения и конструкции на его основе в России они до сих пор не получили применения в строительстве.

Полностью освободиться от узловой детали позволило сварное узловое соединение, разработанное в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко под руководством В.И. Трофимова. Суть его в том, что сопряжение труб осуществляется с помощью ванной сварки без каких-либо промежуточных соединительных деталей (рис. 16).

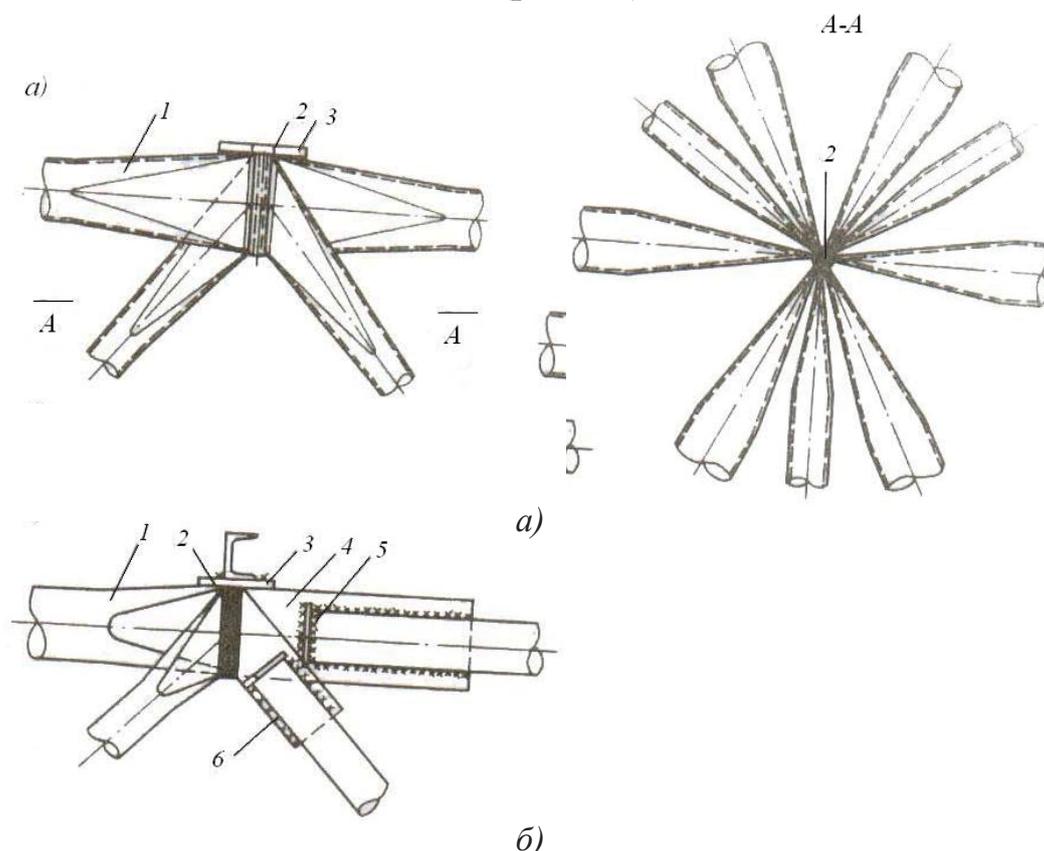


Рис. 16. Узловое соединение системы «ЦНИИСК»: а – со сплюснутыми трубчатыми стержнями; б – комбинированное; 1 – трубчатый стержень; 2 – наплавленный металл; 3 – опорный лист; 4 – узловая фасонка; 5 – заглушка; 6 – ребро

Для изготовления данного соединения концы труб сминаются и обрезаются под заданным углом. В процессе сборки пространственной конструкции на строительной площадке концы труб сводятся в узле, удерживаются с помощью специального кондуктора и прихватываются друг к другу электродуговой сваркой. При этом между сплюснутыми торцами труб образуется пространство, в которое вводится электрод и производится ванная сварка. Масса наплавленного металла составляет

около 1,5 – 2 % массы всей конструкции, что в три-четыре раза меньше, чем в конструкциях с узловыми фасонками. Таким образом, общая металлоемкость конструкций также уменьшается на 5 – 10 %. С применением данных узловых соединений в России построены несколько объектов. Однако трудоемкость сборки и сложность контроля прочности ванной сварки пока приостановили дальнейшее использование этого прогрессивного способа соединения.

Представляет интерес структурная конструкция из стержневых пирамид с фланцевыми узловыми сопряжениями.

Решение предусматривает укрупнение стержневых и узловых сборочных элементов в пирамидальные модули, что снижает трудозатраты на изготовление и монтаж структурных конструкций.

На Урале разработаны и получили применение ряд типов конструкций регулярной структуры, собираемых из пирамид с фланцевыми узловыми сопряжениями под названием «Исеть» и «Тагил» [10].

Конструктивное решение «Исеть» включает пирамиды с квадратным основанием, расположенные в шахматном порядке вершинами вниз, и стержни нижней поясной сети, соединяющие вершины пирамид (рис. 17).

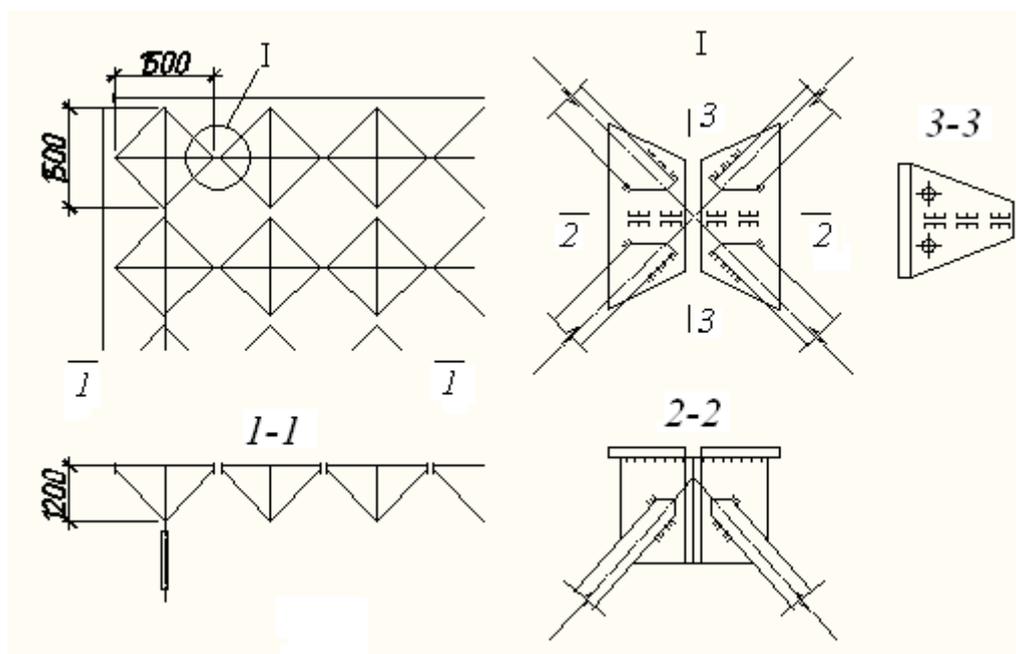


Рис. 17. Схема структуры «Исеть» и узел сопряжения стержней

Нижние поясные стержни ориентированы под углом 45° по отношению к верхним поясам (основаниям пирамид) и имеют большую

длину в 1,41 раза. Таким образом, верхние стержни короче и работают на сжатие, а нижние – длинные – растянуты.

Сопряжение пирамид на уровне оснований запроектировано с помощью сварных фланцевых узловых элементов.

Основной модульный элемент – решетчатая пирамида – тетраэдр.

Неизменяемость системы обеспечивается раскреплением верхней поясной сетки профнастилом и введением в ячейки нижней поясной сетки тяжей, которые расчленяют основные шестиугольные ячейки на треугольники.

Узловой элемент в вершине – сварной крестообразный коннектор.

Нахлесточное присоединение стержней к узлам снижает требования к точности изготовления элементов.

Нижние пояса выполняют длиномерными из полосы сплошного или составного швеллера и в узлах крепят болтами.

В целях сокращения числа монтажных элементов при малой длине сжатых стержней в системе «Тагил» использована треугольно-гексогональная схема с треугольными и шестиугольными ячейками в верхней сетке и с шестиугольными ячейками в нижней сетке (рис. 18).

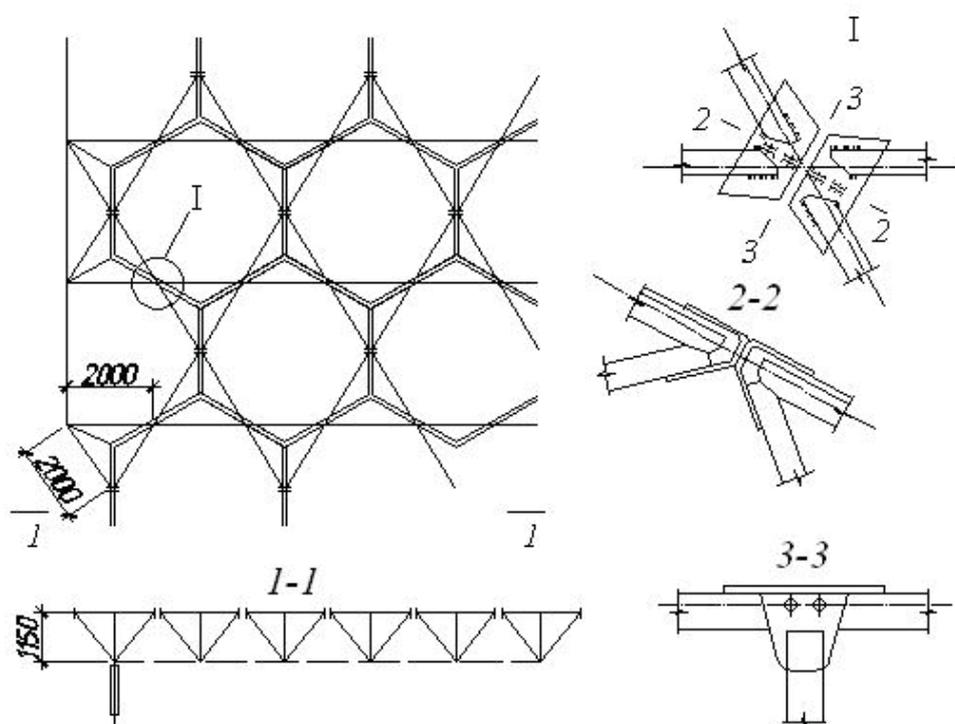


Рис. 18. Схема структуры «Тагил» и узел сопряжения стержней

Пирамиды в уровне оснований соединяются между гнутыми фланцевыми угловыми элементами.

Узловой элемент в вершине пирамиды решен в виде гнутой трехлепестковой розетки. Описанные конструкции были исследованы экспериментально.

Наиболее широкое распространение в покрытиях зданий получила в свое время конструкция структурных блоков «ЦНИИСК» с размерами в плане 12×18 и 12×24 м и высотой около 1,5 м, ориентированная на использование прокатных профилей (рис. 19).

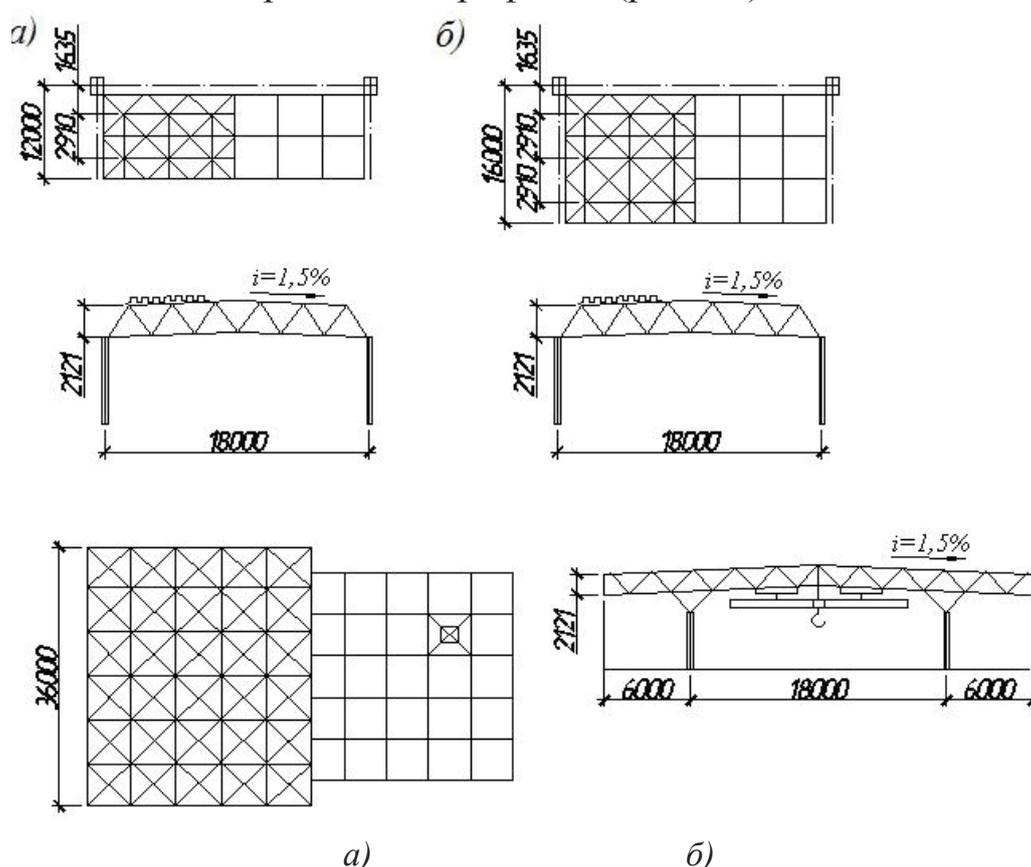


Рис. 19. Схемы структурных плит системы «ЦНИИСК» с элементами, изготовленными по унифицированному сортаменту размерами: а – 12×18 мм; б – 16×18 мм

По конструктивной схеме – это складчатая система с поясами из двутавров и остальными элементами из одиночных равнополочных уголков. По верхним поясам, как по прогонам, на монтаже укладывают профилированный настил, служащий одновременно связевой системой. Элементы пространственной решетки крепят к поясам с помощью фасонки (рис. 20).

Для повышения пространственной жесткости и надежности работы блоков «ЦНИИСК» в них предусмотрены наклонные торцевые фер-

мы по короткой стороне. Для сокращения расхода металла и снижения трудозатрат при изготовлении и монтаже применялось разрежение решетки средней части плиты. Блоки с разреженной решеткой получили название «Москва» (рис. 21 – 22).

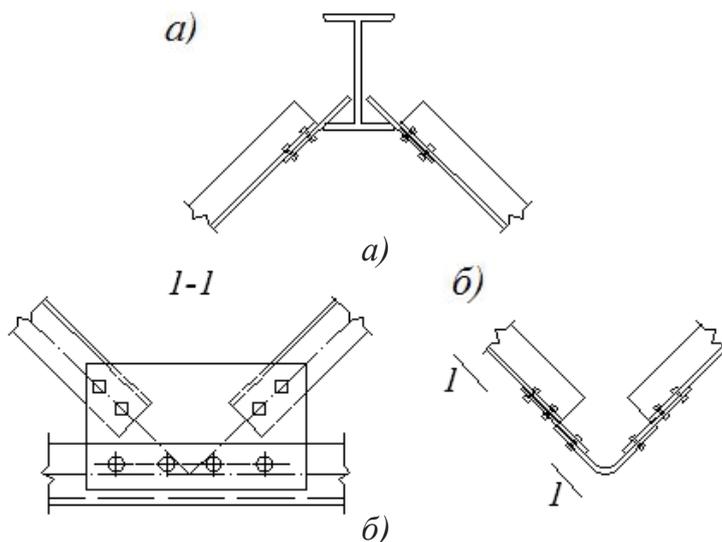


Рис. 20. Узлы структуры ЦНИИСК: а – узел верхнего пояса; б – узел нижнего пояса

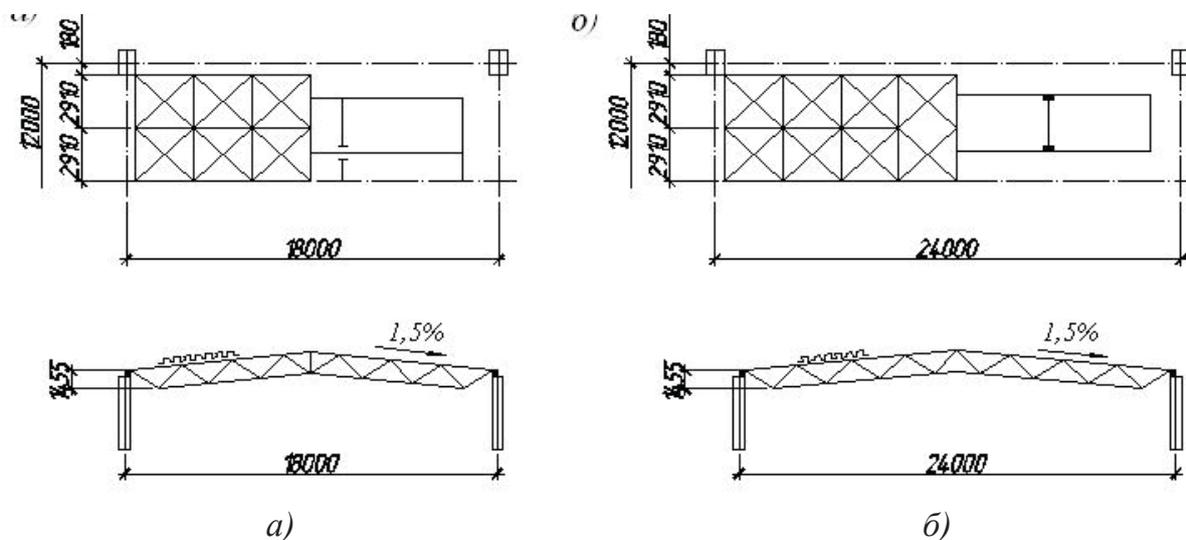


Рис. 21. Структурные блоки типа «Москва» с разреженной сеткой стержней

Пример системы, где основная конструктивная единица – пирамида – система «Спэйс Дэк», разработанная еще в 1950-е годы в Великобритании. Квадрат в основании пирамиды выполняют из одиночных уголков, ориентированных полками внутрь, а раскосы, образующие наклонные грани пирамиды, могут быть выполнены из труб либо также из уголков (рис. 23). Основания пирамид, поставленных ря-

дом, соединяют болтами, образуя ортогональную сетку одного из поясов, другую сетку образуют линейными элементами.

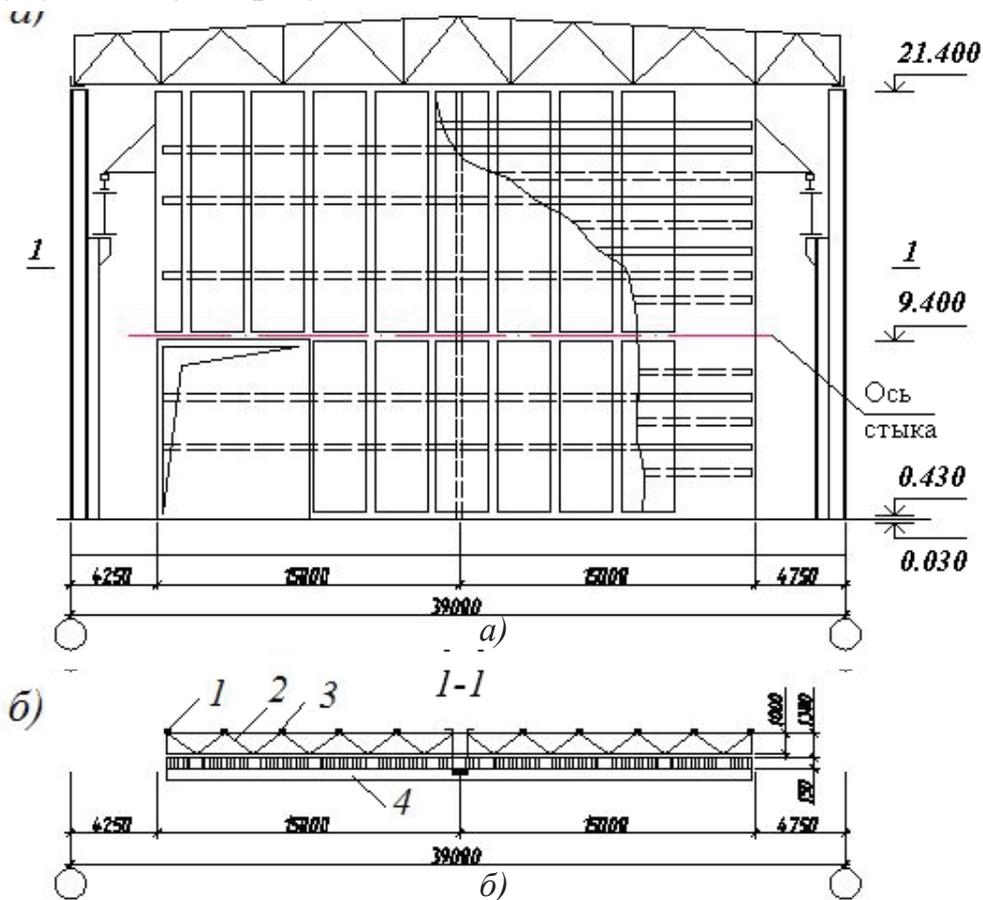


Рис. 22. Панельно-структурный торец машинного зала ТЭЦ:
 а – фасад; б – горизонтальный разрез; 1 – продольная (вертикальная) ферма; 2 – поперечная (наклонно расположенная) ферма;
 3 – линейные элементы; 4 – облегченная панель ограждения

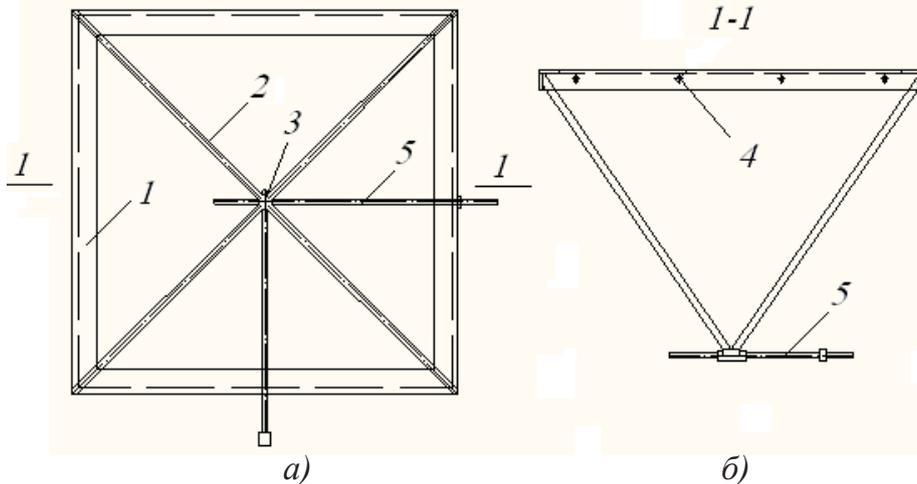


Рис. 23. Пирамида системы «Спейс Дэк»: 1 – рама из уголков;
 2 – трубчатые раскосы; 3 – узловой элемент с отверстиями
 и внутренней резьбой; 4 – отверстия для монтажных болтов;
 5 – стержни нижних поясов с правой и левой резьбой на концах

Существует много других вариантов подобных конструкций, разработанных в отечественной практике, в том числе с пирамидами из тонколистовой стали.

Достоинство таких конструкций – удобство компактной упаковки при транспортировании пирамид.

Наибольшее применение в гражданских и одноэтажных промышленных зданиях в нашей стране нашли стандартные секции на основе модулей 30×30 и 36×36 м (рис. 24 – 25).

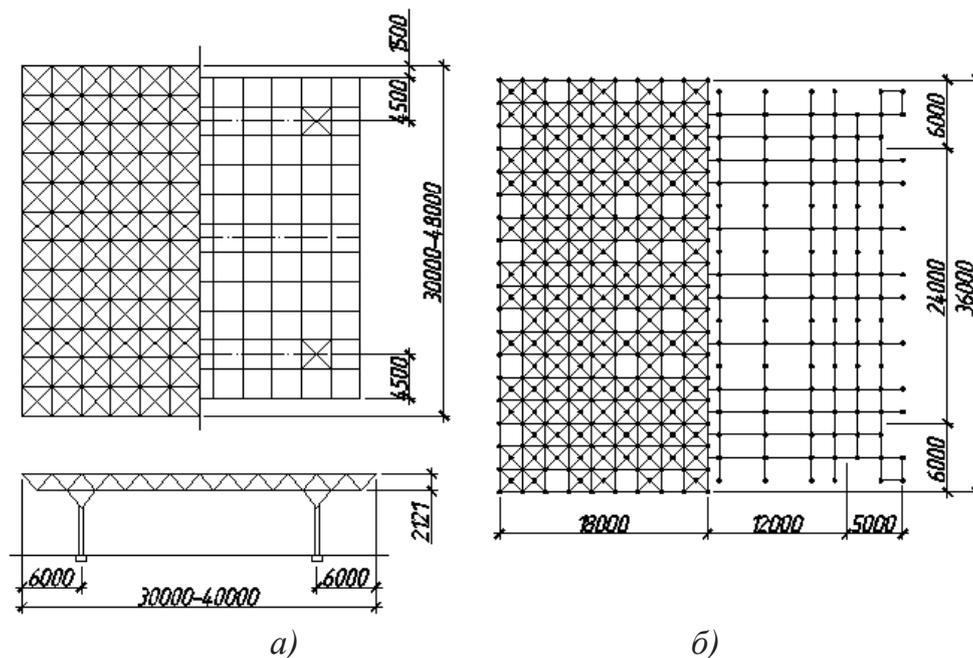


Рис. 24. Схемы стандартных секций размерами 30×30 и 36×36 м: а – без разрежения; б – с разрежением решетки

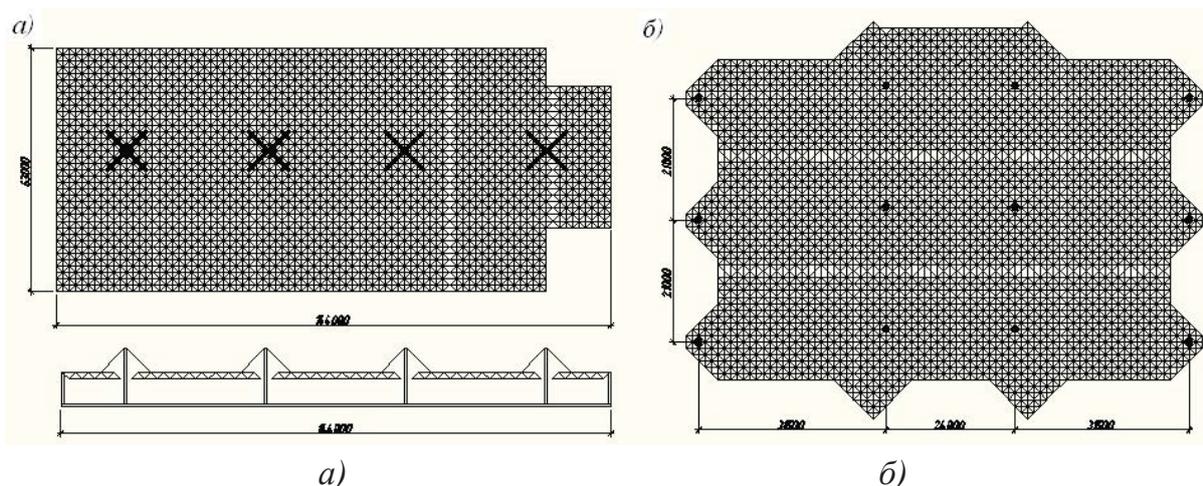


Рис. 25. Пространственные конструкции покрытия системы «МАРХИИ»: а – производственного корпуса автобусного парка; б – покрытие здания детской спортивной школы

Варианты этих секций отличаются друг от друга длиной модульного стержня (1,5-2-3 м), расположением опор внутри контура и по периметру, их количеством (4 или 8) и решением узла опирания на колонны – с выступающей опорной капителью, встроенной капителью или без капители. Кроме того, несущая способность конструкций рассчитана на I – II и III – IV снеговые районы, грузоподъемность подвесного кранового оборудования составляет 10, 20 и 32 кН.

При проектировании одноэтажных промышленных зданий «модульные» секции применяются в виде отдельно стоящих блоков, а также в виде спаренных, строенных, учетверенных и других их комбинаций, удовлетворяющих габариту и объемно-планировочному решению сооружения.

Как правило, в таких зданиях каждая «модульная» секция работает независимо от соседних примыкающих, а граница между ними решается в виде температурно-деформационного шва.

Первая конструкция системы «МАрхИ» представляла собой пространственный блок с размерами в плане 30×30 м на четырех внутриконтурных опорах с развитыми капителями, размещенными на сетке 18×18 м. Она собирается из стержней длиной 1,5 м. Дальнейшее усовершенствование этой конструкции заключалось в увеличении длины стержневого элемента до 2 – 3 м, что позволяло сократить количество монтажных элементов и, следовательно, трудоемкость изготовления и монтажа. Разрезание стержней поясов и решетки (см. рис. 24, б; рис. 25) способствовало более благоприятному перераспределению усилий в элементах конструкции и соответственно сокращению типоразмеров сечений трубчатых стержней.

Конструкция размером 30×30 м из стержней длиной 3 м на четырех внутриконтурных опорах с развитыми опорными капителями, получившая название «Кисловодск» (по названию первого завода, освоившего ее выпуск), была утверждена Госстроем СССР в качестве типовой.

3. Системы опор и опорные узлы структурных плит

Опирание структурных плит может быть предусмотрено в различных зонах плиты как по контуру, так и в пролете плиты, с тем чтобы разгрузить поясные сетки в центральной зоне. При этом следует иметь в виду, что непосредственное опирание на стойки или другие поддерживающие конструкции в небольшом числе точек вызывает значительные усилия в примыкающих к опоре стержнях

(рис. 26, а). Для того чтобы избежать значительных всплесков усилий в приопорных стержнях, используют разгружающие конструкции в виде пучков стержней, пространственных стержневых опор или балочных элементов (рис. 26, б, в). Общий вид опорных узлов с разгружающими элементами показан на рис. 27.

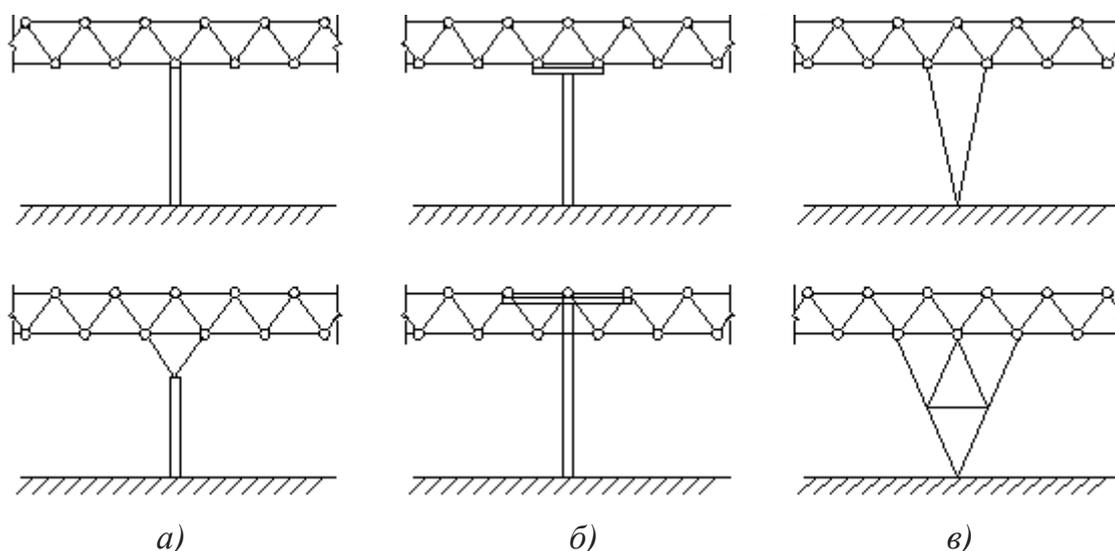


Рис. 26. Варианты решения опор для структурных плит: а – обычные колонны и колонны с решетчатыми капителями; б – колонны с жесткими капителями (разгрузочными балками); в – пространственно-стержневые опоры

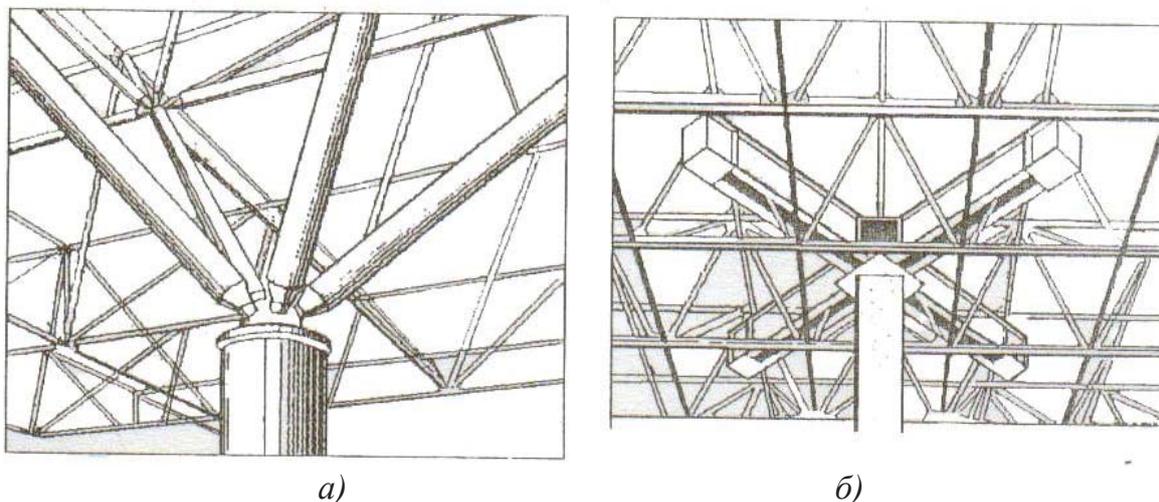


Рис. 27. Общий вид капителей колонн: а – решетчатая капитель; б – жесткая капитель из перекрестных балок

При ограниченном числе колонн рациональное распределение усилий может быть обеспечено распределительными опорными конструкциями в виде контурных ферм, рам, арок либо с использованием вант и канатных подвесок (рис. 28).

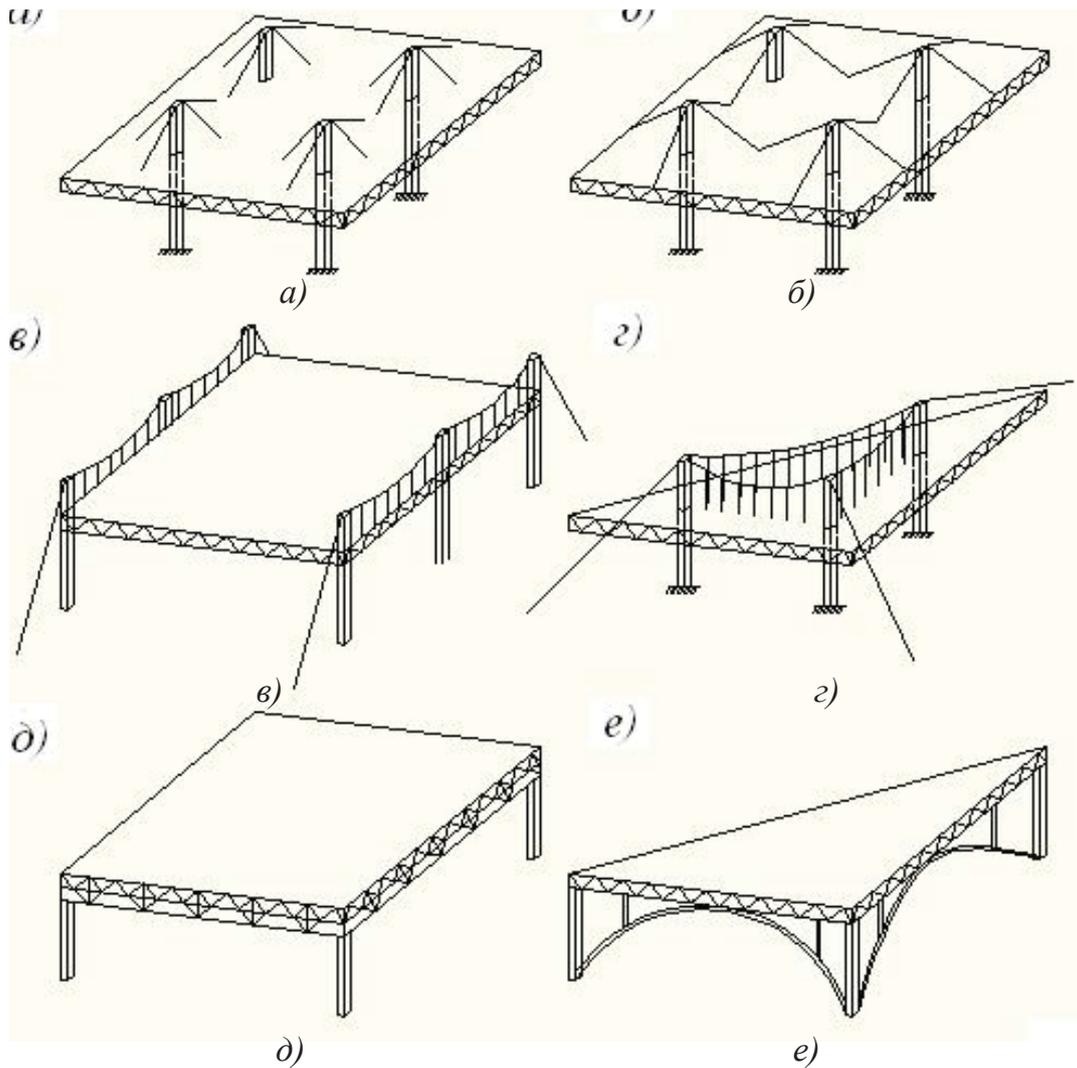


Рис. 28. Варианты комбинированных опор для структурных плит покрытий:
а...г – применение вант; *д* – использование подстропильных ферм; *е* – опирание на контурные арки

Для того чтобы обеспечить частое расположение подвесок при небольшом количестве колонн, иногда возможно использование висячих систем с несущими опорными тросами, которое создают упругоподатливые системы опор (рис. 28, *в, з*).

4. Устройство кровли по структурным плитам

С помощью структурных плит, как правило, устраивают облегченную кровлю, аналогичную обычно применяемой в покрытиях с металлическими фермами или в рамных конструкциях с прогонами. Несущим элементом кровли здесь также служит металлический профилирован-

ный настил по прогонам. Ввиду ограниченности размеров ячеек поясных сеток достаточно использовать легкие прогоны, опирающиеся на узлы плит непосредственно либо через специальные столики (рис. 29). В покрытиях с плитами из прокатных профилей и в некоторых системах с поясами из замкнутых гнутых профилей прямоугольного сечения профилированный настил опирают непосредственно на верхний пояс, который в этом случае работает не только на продольные усилия, но и на местный изгиб (рис. 29, з).

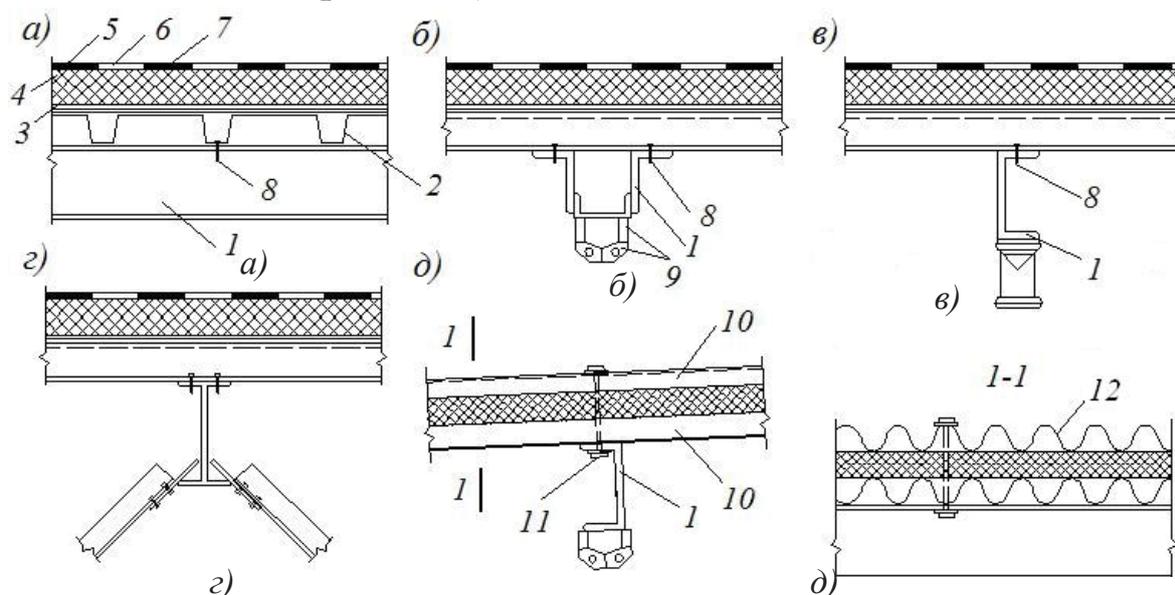


Рис. 29. Варианты теплой кровли по структурным плитам покрытий: а – общая конструкция кровли; б, в – варианты прогонов; г – беспрогонное устройство кровли (по плите ЦНИИСК); д – пример вентилируемой кровли; 1 – прогоны; 2 – профилированный настил; 3 – рулонная пароизоляция; 4 – плитный утеплитель; 5 – защитный слой из рубероида; 6 – трехслойный рулонный ковер; 7 – гравийная защита; 8 – самонарезающие болты; 9 – опорный столик; 10 – профилированный алюминиевый лист; 11 – оцинкованные стальные болты; 12 – вентилируемые воздушные прослойки

В качестве утеплителя используют минераловатные и другие легкие плиты, по которым укладывают гидроизоляционный ковер, в необходимых случаях с гравийной защитой по мастике. Для предотвращения перегрева внутренней поверхности ограждения кровлю можно выполнить вентилируемой (рис. 29, д). Применяют и другие варианты размещения кровли. В покрытиях зданий общественного значения можно применять холодную кровлю с теплым подвесным потолком. Надстроенную кровлю применяют в тех случаях, когда при использовании плоской горизонтальной плиты требуется обеспечить определенный уклон кровли.

Иногда из эстетических соображений устраивают подвеску кровли к нижним поясам плиты, достигая необходимый эффект в экстерьере здания.

5. Особенности расчета структурных плит

Расчет структурных плит в первые годы их применения вели приближенно по схеме двойного перехода: сначала от стержневой модели к континуальной модели сплошной плиты, в которой определяли внутренние усилия (изгибающие и крутящие моменты, поперечные силы в пределах ширины полосы, равной регулярному размеру кристалла), а затем от континуальной модели плиты снова переходили к дискретной (стержневой) модели. Хотя в настоящее время актуальность этого подхода не столь значительна в связи с тем, что в распоряжении проектировщика теперь есть мощные универсальные вычислительные комплексы, позволяющие вести расчет конструкций с помощью персональных компьютеров, мы все-таки рассмотрим кратко суть метода двойного перехода и последовательность расчета плит этим методом.

5.1. Метод двойного перехода для приближенного расчета структурных плит

Необходимость использования приближенных методов расчета может возникнуть в эскизном проектировании, при оценке эффективности различных структур и выборе их генеральных размеров (условий опирания, высоты плиты и т.п.).

Учитывая соотношение размеров структурных плит, а также относительно небольшие размеры ячеек при большом общем количестве стержней, структурную плиту можно аппроксимировать эквивалентной по упругим характеристикам сплошной тонкой пластинкой. Напряженное состояние пластинки описывается известным дифференциальным уравнением:

$$D_x \frac{d^4 w}{dx^4} + 2D_{xy} \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + D_y \frac{d^4 w}{dy^4} = q(x, y), \quad (1)$$

где $D_{xy} = D_x \nu_{xy} + 2D_{xy}$; D_x и D_y , ν_{xy} – цилиндрические жесткости на изгиб и коэффициент Пуассона в направлениях главных осей упругой симметрии

структуры x и y ; D_p – жесткость на кручение. В частном случае ортотропии, когда крутящие моменты не воспринимаются структурной плитой, $D_{xy} = 0$; равенство жесткостей $D_{xy} = D_x = D_y$ – следствие изотропности плиты; q – нагрузка.

Для определения характеристик плиты, эквивалентной по жесткости рассчитываемой структуре, а также адекватного коэффициента Пуассона, можно использовать формулы, приведенные в [8, 9]; там же приведены и формулы для определения усилий в стержнях наиболее распространенных видов кристаллов при обратном переходе от усилий в плите к усилиям в элементах дискретной стержневой модели.

Для наиболее распространенных систем структурных плит без большой погрешности в величине, определяемых приближенным расчетом усилий, можно использовать таблицы для расчета тонких пластин.

С помощью таблиц определяют усилия (изгибающие моменты, поперечные силы) в той или иной точке плиты для полоски единичной ширины, которые легко пересчитать на ширину ячейки регулярной структуры. После определения изгибающих моментов M_x и M_y , соответствующих шагу стержней поясной сетки, усилия в поясах можно найти точно так же, как в ферме с параллельными поясами: $N_x = M_x/h$, $N_y = M_y/h$, где N_x , N_y – продольные усилия в стержнях поясной сетки соответствующего направления, h – высота (толщина) структурной плиты. Усилия в раскосах, соединяющих узлы верхней и нижней поясной сеток, определяются главным образом величиной поперечных сил в сечениях полосок плиты обоих направлений (Q_x , Q_y). Проектируя поперечные силы в узле на направление раскосов, можно найти значения усилий. Если крутящие моменты в рассматриваемой зоне невелики, то можно принять найденные таким образом величины усилий в раскосах за приближенные значения расчетных усилий.

В противном случае правильнее было бы выполнить полный расчет по схеме двойного перехода.

Усилия в опорных раскосах структурных плит определяются, главным образом, величиной опорной реакции стоек (подвесок, вант и т.п.). При опирании структурного блока (плиты) на четыре точки в углах задача определения усилия в опорном раскосе становится предельно простой: достаточно лишь спроектировать опорную реакцию на направление раскоса (с учетом угла его примыкания к оси стойки или к вертикали) и найти усилие в нем.

Для наглядности ниже будут приведены некоторые простые при-

меры приближенного расчета усилий в элементах и подбора сечений стержней структурных плит.

5.2. Определение усилий в сечениях плиты с помощью справочных таблиц

Рассмотрим для определенности пластину, свободно опертую по контуру под действием нагрузки, равномерно распределенной по всей поверхности (рис. 30).

Расчетные формулы для такой пластины имеют вид:

а) прогиб пластины в центре

$$w = \alpha_1 \frac{qa^4}{D}, \quad (2)$$

где d_1 – коэффициент, принимаемый по табл. 1; a – длина пластины; D – цилиндрическая жесткость плиты;

б) изгибающие моменты

$$M_x = \alpha_2 qa^2; \quad M_y = \alpha_3 qa^2; \quad (3)$$

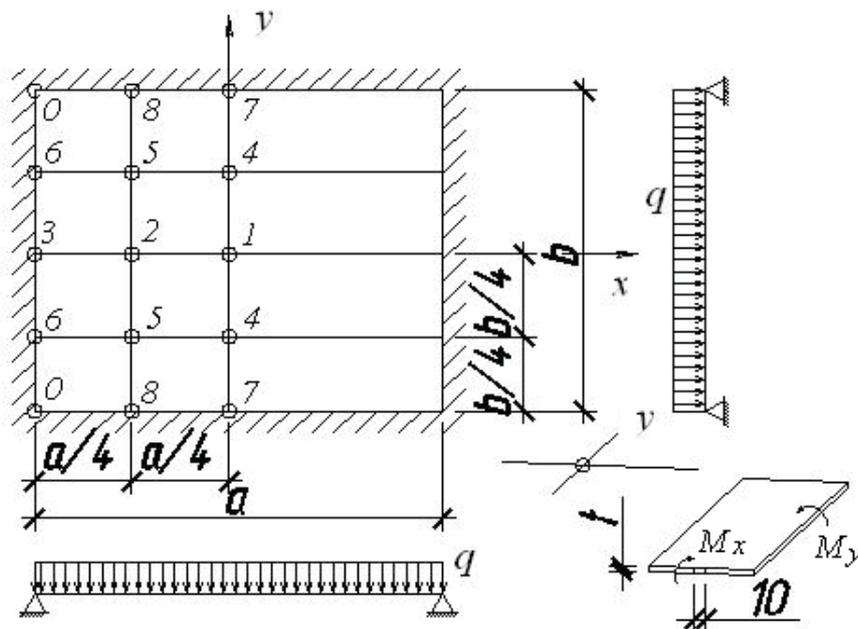


Рис. 30. Расчетная схема пластины с указанием точек, соответствующих данным таблиц

в) поперечная сила

$$Q = \alpha_4 qa; \quad (4)$$

г) опорные реакции на единицу длины опорных кромок

$$V = \alpha_5 qa, V_0 = \alpha_5 qab, \quad (5)$$

где b – ширина пластины

Индексы при моментах означают направление, перпендикулярное соответствующей оси; V_0 – реакции, сосредоточенные в вершинах прямоугольного опорного контура пластины.

Значения коэффициентов $\alpha_1 \dots \alpha_6$ в зависимости от соотношения сторон b/a приведены в табл. 1 – 3 для указанных на рис. 30 точек пластины (при $\nu = 1/6$).

Цилиндрическая жесткость плиты

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)},$$

где E – модуль упругости; t – эквивалентная толщина плиты; ν – коэффициент Пуассона.

В первом приближении D может быть определена как для пластины с такой толщиной, чтобы она оказалась эквивалентной по изгибной жесткости полоске единичной ширины, вырезанной из структурной плиты.

Практически это можно сделать так: определить приближенно момент инерции поясных сеток (по ширине ячейки) и разделить на ширину ячейки. Предположим, что пояса ортогональной структуры расположены с шагом $s = 3$ м.

Момент инерции структуры для полоски шириной 3 м определим по формуле

$$J_x = 0,9 \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} h^2, \quad (6)$$

где A_1, A_2 – площади сечения стержней верхней и нижней сеток; h – высота (толщина) структурной плиты.

Значение этого момента инерции, деленное на 300 см, и даст величину момента инерции J для полоски из плиты единичной ширины (1 см). Эквивалентная толщина плиты, таким образом, равна $t = \sqrt[3]{12J}$.

Таким образом, приближенное общее выражение для эквивалентной цилиндрической жесткости ортогональной структурной плиты может быть записано следующим образом:

$$D = \frac{0,9EA_1A_2h^2}{b(A_1 + A_2)(1 - \nu^2)}, \quad (7)$$

где b – ширина ячейки структуры, см.

Для некоторых типов структур известны и более точные выражения для упругих характеристик [8, 9]. Так, для ортогональной системы с перекрестным расположением диагоналей в обеих поясных сетках при однородных упругих свойствах верхней и нижней сеток цилиндрическую жесткость плиты определяют выражением

$$D = D_x = D_y = \frac{EA_{1s} \operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \cdot \frac{1 + \nu}{1 + n}, \quad (8)$$

где A_1 – площадь сечения стержня верхнего пояса; α – угол наклона раскосов, соединяющих пояса, к вертикали; n – соотношение площадей сечения поясов A_1/A_2 .

Модули упругости плиты относительно главных осей и коэффициент Пуассона при этом находят по формулам

$$E_x = E_y = \frac{EA_f}{s} (1 + \nu), \quad \nu = \frac{1}{1 + m\sqrt{2}}, \quad (9)$$

где A_f – площадь сечения пояса; $m = A_f/A_d$, здесь A_d – площадь сечения диагонали в сетке.

Таблица 1

Значения коэффициента α_1

Соотношение сторон $\mu = a/b$	Значения α_1 для точек			
	1	2	4	5
0,50	0,01013	0,00725	0,00781	0,00560
0,60	0,00865	0,00618	0,00659	0,00472
0,70	0,00726	0,00520	0,00545	0,00395
0,80	0,00603	0,00435	0,00446	0,00325
0,90	0,00498	0,00363	0,00359	0,00264
1,00	0,00406	0,00295	0,00295	0,00217

Таблица 2

Значения коэффициентов α_2 и α_3

$\mu = a/b$	Значение для точек							
	α_2				α_3			
	1	2	4	5	1	2	4	5
0,5	0,0994	0,0776	0,0775	0,0600	0,0335	0,0246	0,0357	0,0262
0,6	0,0860	0,0665	0,0681	0,0517	0,0380	0,0277	0,0372	0,0273
0,7	0,0730	0,0570	0,0550	0,0443	0,0422	0,0299	0,0379	0,0278
0,8	0,0617	0,0489	0,0456	0,0368	0,0427	0,0313	0,0375	0,0276
0,9	0,0516	0,0415	0,0380	0,0315	0,0435	0,0318	0,0365	0,0271
1,0	0,0429	0,0355	0,0316	0,0264	0,0429	0,0316	0,0355	0,0262

Таблица 3

Значения коэффициентов $\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$

$\mu = a/b$	Значения для точек								
	α_4				α_5				α_6
	7	8	3	6	7	8	3	6	0
0,5	0,370	0,303	0,465	0,412	0,526	0,437	0,512	0,474	0,0562
0,6	0,366	0,301	0,441	0,388	0,511	0,420	0,506	0,459	0,0646
0,7	0,362	0,296	0,415	0,357	0,496	0,408	0,494	0,444	0,0711
0,8	0,355	0,291	0,388	0,326	0,481	0,398	0,480	0,426	0,0760
0,9	0,348	0,285	0,363	0,304	0,461	0,394	0,460	0,409	0,0782
1,0.	0,337	0,281	0,337	0,281	0,439	0,393	0,439	0,393	0,0788

При значительном отличии коэффициента Пуассона от табличного для уточнения значений изгибающих моментов можно воспользоваться приближенной формулой:

$$M_1 = \frac{1}{1 - \nu_1^2} [(1 - \nu\nu_1) M_{it} + (\nu - 1)M_{2t}], \quad (10)$$

где $M_2 = M_y$, если $M_1 = M_x$ и $M_2 = M_x$, если $M_1 = M_y$; M_{it} – значение момента, определенное с помощью таблицы моментов.

Регулярная система с квадратной ячейкой и диагоналями малого сечения ($A_d \rightarrow 0$; $m \rightarrow \infty$) превращается в систему, не воспринимающую кручения, близкую к обычным перекрестным фермам, у которой жесткость на кручение $D_1 = 0$ и $\nu = 0$. Цилиндрическую жесткость плиты в этом случае определяют по формуле

$$D = \frac{EA_1 s}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{1 + n}. \quad (11)$$

При $m \rightarrow \infty$ ($A_f \rightarrow 0$, т.е. поясные сетки вырождаются) система приближается к перекрестным фермам, развернутым под углом 45° к осям x и y , для которой $\nu = 1$, а цилиндрическая жесткость плиты

$$D = D_1 \frac{EA_{1d} s}{2\sqrt{2}} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{1 + n}, \quad (12)$$

где A_{1d} – площадь сечения верхней диагонали; n – соотношение площадей верхней и нижней диагоналей.

При необходимости приближенного расчета структурных плит с другими вариантами кристаллического строения необходимо обратиться к специальной литературе, например [8, 9].

5.3. Особенности автоматизированного расчета структурных плит

В автоматизированном расчете, как правило, используют программы, основанные на методе конечного элемента. В пространственно-стержневой системе – это стержень, причем сопряжение стержней в структурах принимают шарнирным.

В действительности, в некоторых узлах наблюдается частичное защемление стержней, не исключена полностью и вероятность работы стержней с эксцентриситетом.

Использование современных программных комплексов для расчета структур позволяет учесть и упругое защемление стержней, и эксцентриситеты в узлах сопряжения, и, при необходимости, податливость сопряжений, которая может вызвать перераспределение усилий в стержнях. Расчет может быть выполнен с учетом физической нелинейности работы материала и геометрической нелинейности работы системы в целом. Учет геометрической нелинейности деформирования осуществляется, как правило, при пошаговом приложении внешней нагрузки, разделенной на части, с отслеживанием и корректировкой геометрической схемы на каждом шаге. Иногда в расчетных предпосылках допускается развитие пластических деформаций в условно необходимых стержнях, но в этом случае должна быть система оценки геометрической неизменяемости как в большом (для всей системы), так и малом (местной неизменяемости положения узлов) пространстве.

Иногда при сравнительной оценке различных структур может оказаться уместным использование универсальных программных комплексов типа «Ли́ра», «Аврора», «Спринт», «Стаав-III» и им подобных для статического расчета и подбора сечений стержней.

В таких комплексах, как правило, предусмотрены средства упрощения информации о системах регулярной структуры, и формирование расчетной схемы конструкции выполняется чрезвычайно быстро. Статический расчет таких систем можно существенно упростить при учете симметрии структуры. Так, для квадратной структурной плиты, рассчитываемой на симметричную нагрузку, достаточно выполнить расчет для 1/4 части плиты или даже для 1/8 ее части (рис. 31).

Необходимо лишь правильно выбрать систему связей, имитирующих взаимодействие с «отрезанными» частями конструкции. Правила установки связей перпендикулярно плоскостям симметрии определяют

характером возможных перемещений узлов и концов «разрезанных» стержней, размещенных на этих плоскостях. Если узел лежит на плоскости симметрии и соединен с конструкцией тремя стержнями или более, то достаточно поставить одну связь, ограничивающую смещение узла перпендикулярно плоскости симметрии. Если стержень оказался рассеченным по длине пополам плоскостью симметрии, то на его конце (на плоскости симметрии) необходимо поставить связи по числу степеней свободы системы, т.е. три – для пространственной шарнирно-стержневой системы (по осям X , Y и Z). В любом случае связи должны имитировать возможность свободного смещения в плоскости симметрии при отсутствии угла поворота плиты в сечении этой плоскостью. Для стержней, расположенных в плоскости симметрии, жесткость принимают половинной.

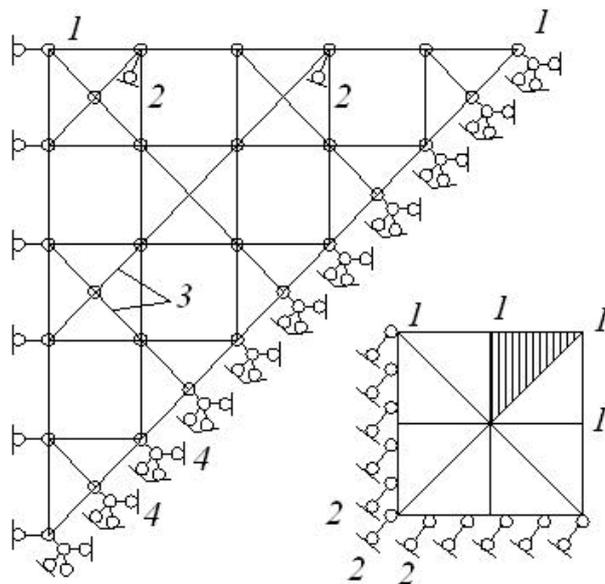


Рис. 31. Расчетная схема квадратной плиты, рассчитываемой с учетом четырех плоскостей симметрии

5.4. Последовательность и особенности проектирования структурных плит

Проектирование структурных плит включает следующий ряд вопросов, которые необходимо решить для выбора обоснованного рационального решения ввиду того, что неразрезные плиты более чувствительны к различной осадке опор, чем разрезные.

Генеральными размерами структурных плит называют общую ширину B , пролет (длину) l и высоту (толщину плиты) h . Важная характеристика – размер ячейки поясных сеток (стороны основания кристалла) a . Наиболее распространены квадратные плиты с ортогональными ячейками поясных сеток, и это вполне оправдано тем, что пространственный эффект проявляется полнее всего при отношении $l/b = 1$. Весьма эффективны структурные плиты на гексагональном плане при использовании

треугольных и шестиугольных сеток поясов. При отношении $l/b \geq 2$ прямоугольная плита по своей работе близка к работе линейной протяженной конструкции. Конструкции с таким соотношением сторон обычно называют пространственными блоками (например, пространственный блок покрытия), хотя по конструктивному решению они могут быть выполнены совершенно аналогично структурным плитам.

Высоту (толщину) структурной плиты выбирают с учетом технологических требований и по экономическим соображениям. Если нет особых технологических ограничений, связанных с размещением систем оборудования в пределах покрытия и т.п., то может быть выбрана оптимальная высота по критерию минимальных приведенных затрат, минимальной стоимости или минимума затрат металла. Первый из критериев наиболее предпочтителен, так как он позволяет учесть эксплуатационные затраты.

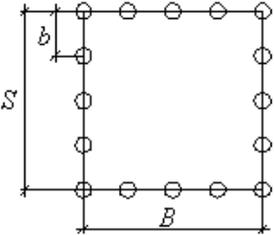
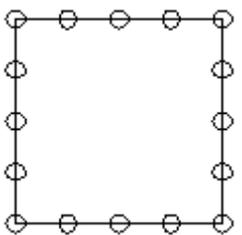
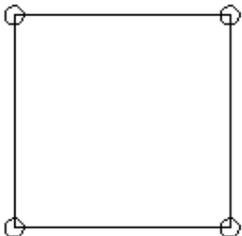
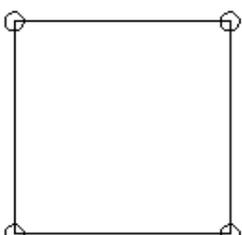
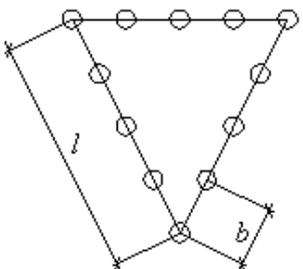
Так, оптимальная высота для разрезных структурных плит системы «МАрхИ» для средней полосы России и районов Урала и Сибири составляет $1/14 \dots 1/16$ пролета, и с ростом пролета она уменьшается. При выборе высоты проверяют также минимально необходимое ее значение по требованиям жесткости. Нормативное требование к жесткости связано с прогибом плиты в середине пролета, который можно найти лишь после назначения всех параметров, в том числе и сечений стержней. Приближенное значение минимально необходимой высоты может быть найдено по формуле, аналогичной тем, что используются для отыскания минимальной требуемой высоты балочных конструкций [4]:

$$h_{min} = 4\xi \frac{R_y}{y_f E(1 + \varphi)} \left[\frac{1}{f} \right] kl, \quad (13)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий форму плиты и условия опирания; y_f – осредненный коэффициент надежности по нагрузке; φ – осредненный коэффициент продольного изгиба для сжатых стержней поясов; k – коэффициент, учитывающий влияние податливости решетки ($k = 1,2 \dots 1,1$ для относительной высоты шипы $M - 1/12 \dots 1/24$). Значение l/f принимают по нормативным требованиям 250 или 300 (при $l \geq 36$ м).

С помощью табл. 4 легко оценить влияние граничных условий для плиты: при опирании на колонны, расположенные с шагом не более $1/4$ пролета, коэффициент ξ на 27 % меньше, чем у протяженного блока ($\xi = 1/9,6$), а это значит, что требуется и меньшая высота структуры.

Значение коэффициента ξ

Схема структурной плиты и размещение опор	Форма плиты	
	квадрат	прямоугольник
 <p>Разрезная $b \leq B/4$</p>	1/12,9	$\frac{1}{12,9} (0,32 + 0,92\mu - 0,24\mu^2)$
 <p>Неразрезная</p>	1/15,5	$\frac{1}{15,5} (0,32 + 0,92\mu - 0,24\mu^2)$
 <p>Разрезная</p>	1/4,3	$\frac{1}{4,3} (4,48 + 8,32\mu - 4,84\mu^2)$
 <p>Неразрезная</p>	1/5,5	$\frac{1}{5,5} (2,16 + 2,04\mu - 0,88\mu^2)$
 <p>Разрезная $b \leq l/4$</p>	Для равностороннего треугольника 1/30	—

Окончательное значение высоты плиты выбирают из области, ограниченной указанными выше значениями. Практика проектирования показывает, что иногда оптимальная высота (найденная без учета ограничения по жесткости) оказывается меньше минимально необходимой по требованиям жесткости и тогда последняя рассматривается как определяющая.

Структурными плитами перекрывают обычно пролеты 18 ... 30 м. При выборе схемы плиты приходится учитывать ее назначение, величину перекрываемого пролета, опорных конструкций, конструкции кровли, условия размещения и характеристики технологического оборудования, возможности изготовления (на специализированных или универсальных заводах металлоконструкций).

Выбор схемы структурной плиты прежде всего существенно зависит от условий ее опирания. Различают три наиболее часто встречающиеся схемы опирания структурных плит: контурное – при размещении опор по всему контуру (рис. 32, а); внутриконтурное – со смещением опор внутрь и образованием консолей (рис. 32, б); смешанное опирание, когда опоры располагают не только по контуру, но и внутри него (рис. 32, в).

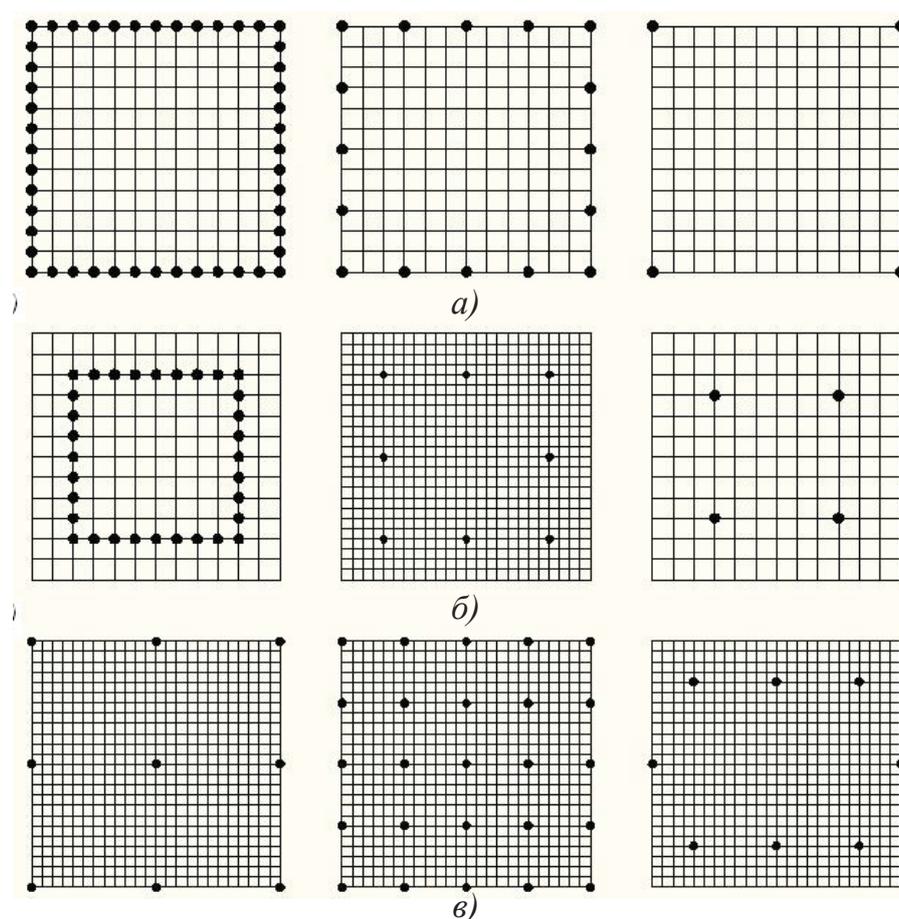


Рис. 32. Варианты опирания структурных плит:
а – контурные; б – внутриконтурные; в – смешанные

Для симметричных по структуре плит, как правило, применяют и симметричное расположение опор. Но не исключены и другие схемы размещения опор, например смешанное опирание с несимметричным размещением дополнительных опор внутри контура. При относительно больших пролетах структурных плит иногда используют схемы опирания с подвеской на ванты в нескольких внутриконтурных точках. Ванты при этом крепят к пилонам, пропущенным сквозь структурную плиту либо к тросам-подборам. Это создает некоторые проблемы в оформлении узлов пересечения вант с кровлей, но зато позволяет перекрывать структурами пролеты 60 м и более.

Металлоемкость структурных плит в значительной мере зависит от условий их опирания. Опоры на контуре целесообразно ставить не реже, чем на расстоянии, равном $1/4$ пролета. При опирании квадратной плиты только в угловых точках расход металла увеличивается примерно в два раза, а прогиб в середине пролета возрастает в три раза. Для плит пролетом 18 м вполне допустимо контурное опирание на стойки, размещенные с шагом 6 м. Обычно применяемый вылет консолей плиты составляет 0,1 ... 0,3 пролета, оптимальный вылет консолей квадратной плиты близок к $1/4$ пролета.

Кроме описанных выше разрезных и консольных плит применяют и неразрезные структурные плиты. Неразрезность плит позволяет снизить расход металла на 15 ... 20 % и повысить их жесткость.

В конструктивных решениях, где за основу принят стержень унифицированной длины, высота структуры и размер ячейки взаимосвязаны, поскольку все размеры определены конструкцией кристалла и стандартной длиной стержня. Так, в структурных плитах «МАрхИ» при длине стержня, примерно равной 3 м, высота структуры равна 2,12 м.

В тех случаях, когда размер ячейки подлежит выбору, приходится учитывать целый ряд факторов: размеры плит ограждения, транспортные габариты (например, при перевозке пирамид), модульность размеров, кратность пролета размеру ячейки. Наиболее приемлемый размер ячейки поясных сеток для плит пролетом до 36 м – 3 м.

После выбора размеров плиты составляют расчетную схему, уточняют нагрузки и выполняют статический расчет, особенности которого рассмотрены выше. Предполагается, как уже было сказано, шарнирное сопряжение элементов в узлах и узловое приложение нагрузки. Таким образом, стержни структурной плиты работают на центральное растя-

жение или сжатие. Небольшие изгибающие моменты, возникающие в стержнях структуры от их частичного защемления в узлах или внецентренности соединений, как правило, не учитывают. Расчетные длины стержней в структурах обычно одинаковы при проверке устойчивости относительно обеих главных осей сечения, поэтому здесь рационально использовать равноустойчивые круглые или квадратные трубчатые тонкостенные сечения. В структурах, заведомо рассчитанных на применение более дешевых прокатных профилей, выбор их определяется конструкцией узлов.

Проверку прочности и устойчивости стержней выполняют в соответствии с действующими нормами проектирования. Узлы структурных плит и оболочек рассматривают как пространственные шарниры, поэтому расчетные длины стержней равны их геометрической длине или близки к ней.

В случае непосредственного опирания профилированного кровельного настила на пояса структур и прикрепления настила к поясам расчетная длина поясных стержней может быть уменьшена вдвое. Но при этом необходимо рассчитать пояс не только на продольные усилия, но и на местный изгиб. В некоторых конструктивных решениях используют кровельные панели, ширина которых меньше расстояния между узлами поясной сетки, а на пояса передаются местные сосредоточенные нагрузки. Проверка на одновременное воздействие продольных усилий и местного изгиба здесь также необходима.

Кроме проверки устойчивости и прочности стержней выполняют проверку по предельной гибкости, значения которой для сжатых и растянутых элементов структур приведены в табл. П9.1, П9.2 [1].

В заключение отметим, что конструктивные формы чрезвычайно многообразны, однако инженерное творчество в этой области вряд ли следует считать законченным. Учитывая практически неисчерпаемое богатство кристаллических структур, можно надеяться, что нас ожидает еще немало изобретений в этой области.

6. Примеры приближенного расчета структурных плит

Пример 1. Для ортогональной структурной плиты размером в плане 30×30 м, свободно опертой по контуру на часто расположенные стойки и нагруженной равномерно распределенной расчетной нагруз-

кой 3 кПа, определить приближенно усилия в наиболее нагруженных стержнях поясных сеток и подобрать сечения стержней.

Шаг сеток принят 3 м; нижние узлы смещены по отношению к верхним на половину шага; поясные диагонали отсутствуют; плита опирается на стойки верхними узлами; высота (толщина) структуры равна 2,12 м (т.е. длина раскосов равна длине стержней поясной сетки – 3 м).

Поскольку система представляет собой две ортогональные группы перекрестных (наклонных) ферм и при отсутствии поясных диагоналей не сопротивляется кручению, то $D_t = 0$; $\nu = 0$.

1. Определим приближенно значения изгибающих моментов в характерных точках плиты, используя расчетную схему, изображенную на рис. 30. Для определения изгибающих моментов в центре плиты в табл. 2 находим значения коэффициентов α_2 и α_3 , которые, естественно, для квадратной плиты равны между собой $\alpha_2 - \alpha_3 = 0,0429$ (для точки 1, см. рис. 30). Находим табличные значения изгибающих моментов для полосы шириной 1 м: $M_{xt} = M_{yt} = \alpha_2 qa^2 = 0,0429 \cdot 3 \cdot 30^2 = 115,83$ кН · м.

2. Скорректируем значение изгибающего момента с учетом разницы между действительным и табличным значениями коэффициента Пуассона по формуле

$$M_x = M_y = \frac{1}{1 - 0,15^2} [(1 - 0)M_{xt}] = \frac{1}{1 - 0,15^2} 2M_{xt} = 2,04M_{xt}.$$

Таким образом, для полосы шириной 3 м значение расчетного изгибающего момента будет равно $3 \cdot 2,04 \cdot 115,83 = 708,88$ кН · м.

3. Приближенные значения расчетных продольных усилий в стержнях поясных сеток найдем делением изгибающего момента на высоту плиты:

$$N_x = N_y = 708,88 / 2,12 = 334,38 \text{ кН.}$$

4. Подберем сечения стержней поясных сеток. В нижнем (растянутом) поясе мы можем сразу же вычислить необходимую площадь сечения стержня и подобрать по сортаменту необходимое и достаточное по условию прочности сечение.

Примем для определенности, что материал несущих элементов структурной плиты – сталь класса С245 с расчетным сопротивлением $R_y = 24$ кН/см²; $\gamma_c = 1$. Тогда требуемая площадь сечения стержня равна $334,38 / (24 \cdot 1) = 13,93$ см². По сортаменту (П 11.13 [1]) находим сечение трубы $\text{Ø} 108 \times 4,5$ с площадью сечения $A = 14,6$ см². Для подбора сечения сжатого пояса необходимо задаться коэффициентом продольного

изгиба φ (обычно значения φ находятся в пределах 0,6 ... 0,8). Примем в первом приближении $\varphi = 0,7$. Тогда требуемая площадь сечения сжатого пояса при учете коэффициента условий работы $\gamma_c = 1$ будет равна

$$A_1 = N / (\varphi R_y \gamma_c) = 334,78 / (0,7 \cdot 24 \cdot 1) = 19,9 \text{ см}^2.$$

По сортаменту находим необходимое сечение трубы $\text{Ø}127 \times 5,5$. Площадь сечения $A = 21 \text{ см}^2$. Проверка устойчивости стержня $N / A_\varphi = 334,38 / (0,754 \cdot 21) = 21,12 \text{ кН/см}^2 < R_y \gamma_c = 24 \text{ кН/см}^2$; значение φ здесь найдено по фактической величине гибкости $\lambda = l_0 / i = 300 / 4,3 = 69,8$; ($l_0 = 300 \text{ см}$; $i = 4,3 \text{ см}$). Условие предельной гибкости для сжатого элемента $\lambda \leq 180 - 60 \alpha$ (табл. П9.1 [1]) выполняется: в данном случае $\lambda = 300 / 4,3 = 69,8 < 127 = 180 - 60 (21,12/24)$.

Пример 2. Для структурной плиты, описанной в примере 1, определить приближенно усилия в наиболее нагруженных раскосах и подобрать их сечение.

Усилия в наиболее нагруженных раскосах найдем приближенно с помощью табл. 3. Наибольшее значение коэффициента 0,5 существует для точек 3 и 7 и равны 0,439. По формуле (5) находим значение погонной опорной реакции (силы, приходящейся на единицу длины опорной линии):

$$v = \alpha_s q a = 0,439 \cdot 3 \cdot 30 = 39,51 \text{ кН/м}.$$

Примем для определенности, что стойки на контуре плиты расставлены с шагом 6 м. Тогда нагрузку на одну стойку надо собрать с длины опорной линии, равной 6 м. На одну стойку приходится сила $V \cdot 2b = 39,51 \cdot 2 \cdot 3 = 237,06 \text{ кН}$. Эта сила проектируется на направление двух примыкающих к стойке раскосов. В рассматриваемой системе принято, что длина раскоса равна длине стержня поясной сетки. В этом случае раскосы примыкают к вертикали под углом 45° . Тогда усилие в одном из раскосов будет равно $N_{d3} = V \cdot 2b / 2 \cos 45^\circ = 237,06 / 2 \cdot 0,707 = 167,64 \text{ кН}$.

Сечение растянутого раскоса подбираем по требуемой площади сечения из условия прочности $N_{d3} / R_y \gamma_c = 167,64 / 24 \cdot 1 = 6,985 \text{ см}^2$. По сортаменту находим трубу $\text{Ø}70 \times 4 \text{ мм}$ с площадью сечения $A_d = 8,3 \text{ см}^2$; радиус инерции $i = 2,3 \text{ см}$.

Условие предельной гибкости $\lambda \leq 400$ (см. табл. П9.2[1]) выполняется: $300 / 2,3 < 400$.

Пример 3. Для рассмотренной выше структурной плиты дать оценку значения прогиба в центре плиты под указанной выше нагрузкой.

При определении прогиба конструкций пользуются нормативными величинами нагрузок, однако для упрощения процедуры расчета вначале можно дать оценку с запасом по расчетным нагрузкам, и если жесткость не обеспечена, то повторить расчет по нормативным нагрузкам.

Предварительно найдем с помощью табл. 1 цилиндрическую жесткость плиты по формуле (11):

$$D = \frac{EA_1 s}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{1+n} = \frac{2,06 \cdot 10^4 \cdot 21 \cdot 300}{2} 10^{-2} \frac{1}{1 + 21 / 14,6} = 266160 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

В табл. 1 находим значение $\alpha_1 = 0,00406$ (для точки 1) и по формуле (2) определяем приближенное значение прогиба в центре плиты:

$$w = \alpha_1 \frac{qa^4}{D} = 0,00406 \frac{3 \cdot 30^4}{26660} = 0,03706 \text{ м} \approx 3,71 \text{ см}.$$

Фактический прогиб структурной плиты окажется несколько больше этой величины по следующим причинам: во-первых, при определении цилиндрической жесткости принята в расчет наибольшая жесткость плиты в ее центре; во-вторых, на значении прогиба скажется сдвиговая податливость решетки; и наконец, в-третьих, прогиб увеличится из-за податливости узлов (например, в моделях структур с болтовыми соединениями, работающими на смятие и сдвиг). Неточность в оценке цилиндрической жесткости составляет 15 ... 20 %, влияние остальных факторов может дать увеличение прогиба еще на 20 ... 25 %. В данном случае, если даже принять наибольшие значения коэффициентов (1,20 и 1,25), получаем окончательную оценку прогиба в центре плиты, равной $3,71 \cdot 1,20 \cdot 1,25 = 5,6$ см, что составляет $\approx 1 / 540$ от пролета.

Таким образом, во второй группе предельных состояний рассматриваемая структурная плита будет иметь запас, что вполне естественно, так как для обеспечения требуемой нормами жесткости квадратных плит достаточна высота плиты $1 / 20 \dots 1 / 24$ от пролета, а в нашем случае она составляет $2,12 / 30 \approx 1 / 14$.

7. Техничко-экономические показатели структурных (перекрестно-стержневых) конструкций

Экономическая эффективность структур оценивается сравнением вариантов конструктивных решений покрытия для конкретного объекта по стоимости, расходу стали и трудоемкости изготовления.

Для дипломного проектирования (вариантного проектирования) рассмотрим показания по расходу стали и трудоемкости изготовления для ряда типов структур.

В табл. 5 приведены технико-экономические показатели (ТЭП) и эффект от замены конструкций размерами в плане 30×30 секцией размерами 27×27 м. Из табл. 5 следует, что замена при равных условиях позволяет увеличить выпуск конструкций типа «Кисловодск» почти на 34 %.

Таблица 5

Сравнительные характеристики ТЭП конструкций

Показатель	Киреевский ЗСК		Выксунский ЗЛМК	
	Марки			
	СП-30-300	СП-27-350	СП-30-400	СП-30-350-А
Масса стали секции, кг	11981	10551	16509	11204
Масса стали приведенная, кг/м ²	13,31	11,72	18,34	12,45
Трудоемкость изготовления одной секции, чел.-ч.	553,65	499,32	716,96	509,09
Приведенная трудоемкость изготовления, чел.-ч/м ²	0,615	0,555	0,797	0,556
Планируемый выпуск, тыс. м ²	501,3	501,3	340,2	340,2
Планируемая общая трудоемкость, чел.-ч.	308300	278222	271140	192553
Экономия трудозатрат, чел.-ч	–	30078	–	78587
Дополнительно производимое количество секций за счет снижения трудоемкости, шт.	–	60,2	–	154,4
Общая планируемая металлоемкость, т	6672	5875	6239	4236
Экономия стали, т	–	797	–	2003
Дополнительно производимое количество секций за счет снижения металлоемкости, шт.	–	75,5	–	178,7

Примечание. СП-30-300 – первое число в обозначении определяет размер стороны квадратной секции, м; второе – расчетной равномерно распределенной нагрузки, кг/м².

В табл. 6 приведены показатели конструкций типа «МАрхИ», из которых видно, что консольные системы более экономичны по сравнению с конструкциями размерами 24×12 и 18×18 м. Расход металла на секции под нагрузку 2,7 кН/м² меньше на 30 – 35 %, а нагрузку 3,7 кН/м² – на 30 – 40 %.

Таблица 6

Варианты покрытий

Показатель	Размеры покрытий, м					
	консольных			бесконсольных		
	30×30	36×36	48×48	18×18	18×12	24×12
1. Расход стали, кг/м ²						
I снеговой район:						
– бескрановые	12,42	14,00	13,46	17,01	13,63	17,15
– крановые	13,29	14,90	–	18,60	14,35	19,19
IV снеговой район:						
– бескрановые	13,54	15,66	17,03	21,06	16,69	21,06
– крановые	14,42	16,75	–	22,90	18,37	24,00
2. Стоимость изготовления, руб./м ²						
I снеговой район:						
– бескрановые	8,18	8,64	7,67	9,94	8,43	9,22
– крановые	8,49	8,93	–	10,36	8,70	10,69
IV снеговой район:						
– бескрановые	8,49	9,29	9,93	11,91	9,66	11,45
– крановые	8,85	9,66	–	12,27	10,32	12,62
3. Стоимость «в деле», руб./м ²						
I снеговой район:						
– бескрановые	12,69	13,18	12,20	13,80	12,97	14,32
– крановые	13,02	13,49	–	14,99	13,25	15,32
IV снеговой район:						
– бескрановые	13,10	13,86	14,53	16,59	14,25	16,13
– крановые	13,41	14,26	–	16,98	14,94	17,35
4. Приведенная трудоемкость изготовления чел.-ч/м ²						
I снеговой район						
– бескрановые	0,61	0,62	0,62	0,71	0,63	0,72
– крановые	0,64	0,64	–	0,72	0,64	0,76
IV снеговой район						
– бескрановые	0,63	0,65	0,68	0,77	0,68	0,76
– крановые	0,64	0,67	–	0,79	0,71	0,80

В табл. 7 приведены показатели расхода на секции поэлементной сборки размером 18×12 м, выполненные в системе «МАрхИ», и на секции типа «ЦНИИСК», собираемые из укрупненных элементов в виде длинномерных поясных стержней и коротких раскосов.

Таблица 7

Показатели расхода стали

Показатель	Величина p расчетной нагрузки, кН/м ²						Усред. показат.
	2,4	3,16	4,18	4,83	5,2	6,3	
Масса секции: «МАрхИ»	2962	3179	3446	3779	4117	4665	–
	4817	5206	5832	6350	6934	7636	–
Приведенная масса, кг: «МАрхИ»	13,71	14,72	15,95	17,50	19,06	21,13	–
	22,3	24,10	28,90	29,4	32,1	35,5	–
Общая масса с учетом прогонов, кг	3588	3805	4072	4405	4743	5191	–
Масса с учетом прогонов, кг/м ²	16,61	17,62	18,85	20,4	21,96	24,03	–
Экономия стали системы «МАрхИ», %	25	27	32	30	32	32	29,7

В табл. 8 даны для сравнения основные показатели секционных конструкций системы «Веймар», аналогичных по конструктивному решению системе «МАрхИ».

Таблица 8

Показатели секционных конструкций системы «Веймар»

Размеры секции, м	Длина стержня	Высота конструкции, мм	Расчетная нагрузка, кН/м ²		Приведенная масса конструкции на 1 м ² /кг
12 × 12	1500	1060	6,05	0,95	31,99
12 × 12	2000	1414	6,05	0,95	27,64
12 × 12	2000	2121	7,00	–	20,87
12 × 12	2400	1697	6,05	0,95	23,60
12 × 12	2400	1697	6,05	0,95	16,71
12 × 12	2400	1697	6,05	0,95	14,73
12 × 12	2400	1697	6,05	0,95	12,81
18 × 18	2000	1414	6,05	0,95	40,85
24 × 24	2400	1697	6,05	0,95	43,58
			0,90	0,40	17,18
24 × 24	2400	1697	6,05	0,95	35,87
			0,90	0,40	13,68

В табл. 9 даны показатели секций 18×12 м, выполненных из полноразборных систем «Берлин» и «Кипсер».

Таблица 9

Показатели секций систем «Берлин» и «Кипсер»

Система, размер секции 18×12 , м	Расчетная нагрузка, кН/м ²	Расход стали, кг/м ²			Трудоемкость, чел.-ч/м ²		
		на конструкции	на прогоны	всего	изготовления	монтажа	всего
«Берлин»	2,2	17,9	2,64	20,54	0,88	0,68	1,56
«Кипсер»	2,2	–	–	30	–	–	2,8

Расход стали в системе «МАрХИ» составляет $13,63 \text{ кг/см}^2$, трудоемкость $1,14 \text{ ч/м}^2$ и экономичнее по расходу стали на 33 и 54 % по общей трудоемкости на 27 и 60 % систем «Берлин» и «Кипсер» соответственно.

Контрольные вопросы

1. Принцип построения структур.
2. Основные виды кристаллических решёток, применяемых в структурах.
3. Конструктивные решения структурных плит.
4. Виды узловых соединений.
5. Разновидности модульных секций.
6. Варианты решения опор для структурных плит.
7. Варианты теплой кровли по структурам.
8. Метод двойного перехода для приближенного расчета структурных плит.
9. Определение усилий в сечениях плиты с помощью справочных таблиц.
10. Особенности автоматизированного расчета структурных плит.
11. Последовательность и особенности проектирования структурных плит.
12. Порядок определения усилий в стержнях.
13. Подбор сечения стержней.
14. Определение прогиба структурных плит.
15. Наиболее актуальные условия применения структурных плит.

Заключение

Структурные конструкции позволяют создавать различные композиции пространственных каркасов на разных планах, используя при этом ограниченный набор унифицированных стержневых и узловых элементов полной заводской готовности.

Наибольшее широкое применение в мировой практике строительства получили одноболтовые узловые соединения с осевыми болтами, работающими на растяжение или сжатие («МАрхИ» и др.).

Основные области применения структурных пространственных конструкций (СПК) – сложные по форме и большие по пролетам пространственные покрытия общественных и промышленных зданий, где другие конструкции неприемлемы или неэкономичны.

Экономическая эффективность стальных СПК существенно зависит от технологичности конструктивной формы и наличия высокопроизводительной базы.

Из изложенного следует, что применение структурных систем в дипломном проектировании целесообразно для зданий различного назначения.

Библиографический список

1. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2 / В. В. Горев [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 424 с. – ISBN 5-06-003698-9.
2. Трофимов, В. И. Структурные конструкции / В. И. Трофимов, Г. Б. Бегун. – М. : Стройиздат, 1972. – 155 с.
3. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1984. – 298 с.
4. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 215 с.
5. Файбишенко, В. К. Металлические конструкции / В. К. Файбишенко. – М. : Стройиздат, 1984. – 336 с.
6. Расчетно-теоретический справочник проектировщика. Т. 1 / под ред. А. А. Уманского. – М. : Стройиздат, 1973.
7. Клячин, А. З. Пространственные стержневые металлические конструкции регулярной структуры / А. З. Клячин – Екатеринбург: Диамант, 1995. – 276 с.
8. *Он же*. Исследование структурных конструкций из пирамид с фланцевыми узловыми сопряжениями / А. З. Клячин. // Строительство и архитектура. – 1991, № 7. – С. 14 – 18.
9. Беляев, В. Ф. Стальные каркасные конструкции одноэтажных производственных зданий (обзор) / В. Ф. Беляев. – М. : ВНИИТПИ, 1989. – 82 с.
10. Проектирование металлических конструкций / В. В. Биркелев [и др.]. – Л. : Стройиздат, 1990. – 432 с.
11. Bulletin of international association for shell and spational structures. – 1986. – № 90. – S. 21 – 43.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	6
2. КОНСТРУКЦИИ СТРУКТУРНЫХ ПЛИТ. РЕШЕНИЕ УЗЛОВ	12
2.1. Виды кристаллических решеток, применяемые в структурах	12
2.2. Конструкции структур и узлы сопряжений	13
3. СИСТЕМЫ ОПОР И ОПОРНЫЕ УЗЛЫ СТРУКТУРНЫХ ПЛИТ	30
4. УСТРОЙСТВО КРОВЛИ ПО СТРУКТУРНЫМ ПЛИТАМ	32
5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СТРУКТУРНЫХ ПЛИТ	34
5.1. Метод двойного перехода для приближенного расчета структурных плит	34
5.2. Определение усилий в сечениях плиты с помощью справочных таблиц	36
5.3. Особенности автоматизированного расчета структурных плит	40
5.4. Последовательность и особенности проектирования структурных плит	41
6. ПРИМЕРЫ ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА СТРУКТУРНЫХ ПЛИТ	46
7. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТРУКТУРНЫХ (ПЕРЕКРЕСТНО-СТЕРЖНЕВЫХ) КОНСТРУКЦИЙ	49
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	55