

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ М. УЛУГБЕКА**

На правах рукописи

УДК 624.019

**Шарипов Акмал**

**Расчет и оптимизация стальных стержневых  
пространственных плит покрытий с использованием  
компьютерной программы «SteelTruss»**

**Специальность 5А 580201**

**Строительные конструкции, здания и сооружения**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**для получения степени магистра**

Научный руководитель:  
к.т.н., доцент Фридман Г.С.

---

Самарканд – 2013 г

Работа рассмотрена  
разрешена к защите на кафедре

«Строительные конструкции,  
здания и сооружения»:

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Зав. кафедрой  
к.т.н., доцент Шомурадов Б.Ш.

Магистрант Шарипов Акмал

---

---

## Оглавление

## Введение

Стальные стержневые пространственные конструкции покрытий (структурные плиты) в силу ряда положительных качеств, в том числе универсальности, возможности изготовления на поточных высокопроизводительных технологических линиях, простоты транспортирования и удобства монтажа, широко применяются в покрытиях промышленных и гражданских зданий различного назначения.

История их развития началась еще в 30-40 г.г. XX века, но с 70-х они получили мощный импульс к широкому применению благодаря большой проделанной работе в области проектирования, исследования и создания производственных мощностей по изготовлению таких конструкций. В настоящее время структурные конструкции выпускаются массово, причем имеется тенденция к увеличению объемов их применения уже в XXI веке.

Структурные конструкции получили широкое распространение и в Узбекистане, где налажено их заводское производство, и имеется нормативная база для их проектирования. С целью дальнейшего совершенствования методов расчета и проектирования подобных конструкций в настоящей диссертационной работе рассмотрены вопросы применения современных компьютерных программ для оптимизации структур.

При этом в качестве основного инструмента для расчета и анализа конструктивных решений принята компьютерная программа «SteelTruss» (Стальные фермы), которую разработал в СамГАСИ научный руководитель данной диссертации доцент Фридман Г.С. Отметим, что существует чисто расчетная программа «WinTruss», применимая для ферм из любых материалов, и ее расширенная версия «SteelTruss», в которой имеется дополнительная возможность подбора сечений стержней ферм из прокатных профилей.

Эта программа реализует метод конечных элементов (МКЭ), который применительно к стержневым системам (плоским и пространственным) дает точные значения усилий в стержнях и перемещений узлов. В отличие от современных универсальных программных комплексов эта программа предназначена

только для расчета шарнирно-стержневых систем (ферм), и поэтому отличается компактностью и простотой применения. Она имеет удобный пользовательский интерфейс и включает в себя блоки определения расчетных сочетаний усилий (PCY) и подбора сечений стальных элементов из стандартных прокатных профилей.

Названные особенности делают программу «SteelTruss» весьма удобным средством расчета, анализа и оптимизации структурных конструкций, что и показано в настоящей диссертационной работе.

**Обоснование и актуальность** темы диссертации определяется большой потребностью строительной отрасли Узбекистана в пространственных стальных стержневых плитах покрытий, и необходимостью совершенствования методов их расчета и проектирования с применением компьютерных программ.

**Преметы исследование.**

**Основные проблемы и исследование**

**Краткий анализ литература**

**Цель и задачи данной работы состоит в том,** чтобы показать методику расчета структурных плит с различными геометрическими и конструктивными параметрами, а также провести анализ различных решений с целью определения оптимальных параметров структур. При этом будут выработаны рекоменда-

дации по областям применения, а также расчету и оптимизации стальных структурных конструкций различного назначения.

**Научная новизна диссертации** заключается в методике расчета и анализа стальных структурных конструкций с применением компьютерной программы «Стальные фермы», а также в результатах проведенного анализа различных конструктивных решений подобных систем.

**Научная новизна исследование.**

**Практическая значимость** работы состоит в апробированной методике расчета и анализа структурных конструкций с применением компьютерных программ, а также полученных результатах по анализу конструктивных решений и рекомендациях по выбору конструктивных схем в зависимости от заданных условий проектирования.

**Диссертация состоит из введения**, 3 глав, общих выводов и рекомендаций, списка литературы и приложения. Основной текст размещен на ... страницах; в приложении 1 приводится пример распечатки результатов расчета структурной плиты, выполненного по программе «Стальные фермы».

**В 1-ой главе** рассмотрена классификация стальных пространственных стержневых плит покрытий по геометрическим схемам, способам опирания, типам стержневых и узловых элементов. Приведены примеры типовых решений, даны области применения структур различных типов. Здесь же дан обзор методов расчета структур, в том числе методом конечных элементов с применением компьютерных программ. Дано общее описание программы «Стальные фермы». В конце главы сформулированы основные задачи исследований в настоящей диссертации.

**Во 2-ой главе** с помощью программы «Стальные фермы» выполнены многочисленные расчеты структурных плит пролетами 18-84 м и проведен анализ

их металлоемкости по таким параметрам, как пролеты и консоли, высота, способы опирания, типы сечений стержней и типы узлов. Определена эффективность различных профилей сортамента и пределы их применимости в таких конструкциях.

**В 3-ей главе** рассмотрены вопросы оптимальной компоновки покрытий разной формы плана и разных размеров в плане. Определена эффективность применения большепролетных однопролетных и многопролетных неразрезных систем, изучено влияние нагрузок от подвешенного транспорта и сейсмических воздействий.

**В общих выводах** приведены основные результаты исследований и даны рекомендации по выбору геометрических конструктивных параметров структурных конструкций различного назначения и последующему их расчету по программе «Стальные фермы».

## Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследований

### 1.1. Классификация и области применения стальных стержневых пространственных плит покрытий

Такие конструкции, называемые также «структурными плитами», стали применяться в строительстве в 50-60-х годах XX века. Они могут быть образованы путем пересечения плоских ферм в двух, трех и более направлениях с разбиением плиты на квадратные, треугольные и шестиугольные ячейки (рис. 1.1). В показанных на рисунке схемах верхние и нижние пояса плоских ферм расположены в одинаковых вертикальных плоскостях.

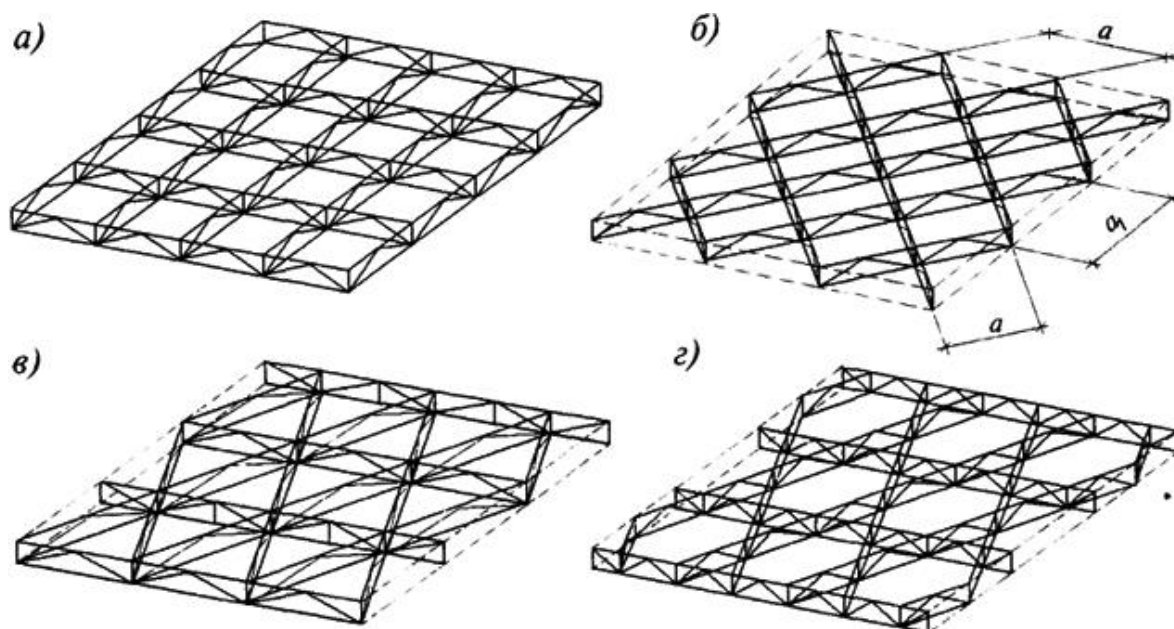


Рис. 1.1. Схемы структурных плит из вертикальных перекрестных ферм: а, б - при расположении ферм в двух направлениях; в, з - то же, в трех направлениях.

Если нижние пояса ферм, например, в схеме рис. 1.1, а, мы сместим на полшага относительно нижних поясов, и разместим раскосы в наклонных плоскостях, то будет получена структура, показанная на рис. 1.2. Аналогично могут быть построены системы иных конфигураций.

В таких системах всегда можно выделить многократно повторяющийся пространственный элемент "кристалл", например, в виде параллелепипеда, пирамиды и т.д. (рис. 1.3). Структуры, собранные из разных кристаллов, показаны на рис. 1.4.

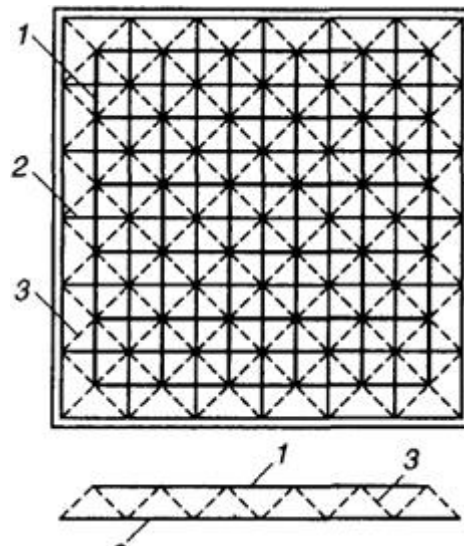


Рис. 1.2. Структурная плита: 1- верхние пояса; 2- нижние пояса; 3- наклонные раскосы.

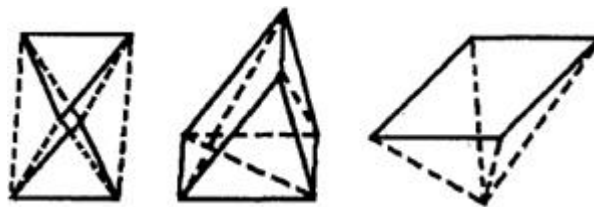


Рис. 1.3. Кристаллы структур

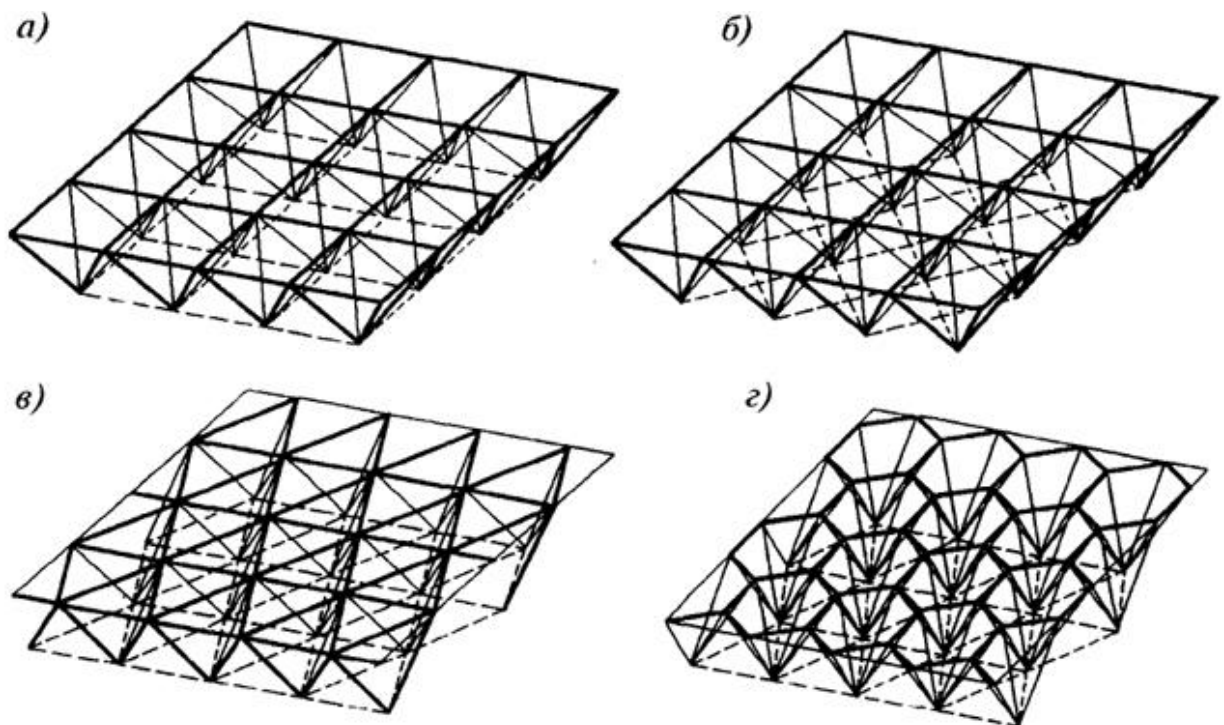


Рис. 1.4. Схемы структурных плит из решетчатых пирамид:  
*а, б* - с квадратным основанием (пентаэдров или "полуоктаэдров"); *в* - с треугольным  
 основанием (тетраэдров); *г* - с шестиугольным основанием (гептаэдров)

**Преимущества структурных конструкций.**

Пространственные системы регулярной структуры формируют исходя из принципа многосвязности. Это определяет целый ряд их преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями, скомпонованными из стропильных и подстропильных ферм, а также связей и прогонов.

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 подвешенного транспорта.

Кроме того, к преимуществам этого класса конструкций можно отнести повышенную надежность, определяемую той же многосвязностью (многократной статической неопределимостью). Резерв живучести многосвязных систем заключается в возможности перераспределения усилий после выхода из строя или после перехода в пластическую стадию деформирования отдельных перегруженных элементов.

Архитекторов структурные конструкции привлекают своеобразием и многообразием рисунков кристаллической структуры, возможностью варьирования формы поверхностей в плане и в разрезах зданий или, иными словами, архитектурной выразительностью.

Структурные конструкции благодаря многосвязности и пространственной работе более жесткие, чем плоские, что позволяет проектировать покрытия с высотой  $1/15-1/25$  пролета, что примерно вдвое меньше высоты традиционных плоских ферм.

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

Удобство транспортирования структур, состоящих из отдельных стержней и узловых элементов, определяется возможностью упаковки в ящики или ком-

пактные пакеты. При компоновке конструкций из укрупненных элементов типа пирамид возможно использование "принципа матрешки" для их транспортирования, т.е. можно вкладывать их одна в другую с образованием также довольно компактного пакета из пирамид. Монтаж пространственно жестких конструкций осуществляется крупными блоками, конвейерным способом и без всякого усиления для устойчивости при монтаже.

### Узловые сопряжения.

Важное значение для структурных конструкций имеет конструкция узлов, которая определяет, трудоемкость сборки конструкций на монтажной площадке. Наиболее характерные узлы показаны на рис. 1.5.

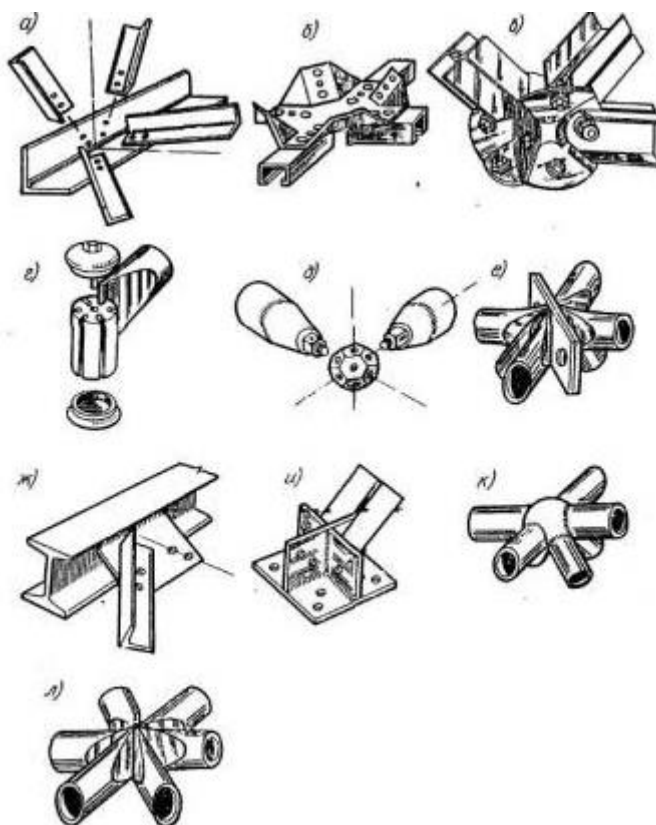


Рис. 1.5. Наиболее характерные узловые сопряжения стержней структурных плит:  
*а, б, в, г* – болтовые; *д, е, ж, и* – комбинированные; *к, л* – сварные.

Приведем краткую характеристику этих узлов:

а) Соединение уголковых стержней на болтах внахлест; применяется в нижних узлах структурных конструкций системы «ЦНИИСК» (Россия), работающих преимущественно в одном направлении (рис. 1.5, *а*);

б) Соединение типа «Юнистрат», разработанное фирмой «Unistrul Corporation» совместно с лабораторией стальных конструкций Мичиганского универ-

ситета (США). Узловая фасонка выполнена штамповкой с отверстиями и шпонками для соединения на болтах стержней из гнутого профиля (рис. 1.5, б).

в) Соединение системы «Сокол» (Россия), состоящее из шести тонкостенных пирамидальных деталей, изготовленных из листов с помощью штамповки. Эти детали между собой и с элементами составного гнутого профиля соединяются с помощью болтов нормальной точности (рис. 1.5, в).

г) Узловое соединение «Триодетик» фирмы «Fentiman» (Канада). Узловой элемент представляет собой цилиндр, вдоль образующих которого имеются пазы с рифлеными стенками. Концы стержней опрессовываются по профилю пазов, вставляются в цилиндр и фиксируются в прорезях узла двумя крышками, соединенных болтом (рис. 1.5, г).

д) Узловые соединения системы «МЕРО», разработанные в Германии (система «Веймар» и др.). Аналогичные системы «МАрхИ» и «Кисловодск» разработаны в России (рис. 1.5, д).

е) Соединение на фланцах. Разработано в ЦНИИПСК и ЛенЗНИИЭП (Россия) применительно к структурным конструкциям, собираемым из пирамид. Основания стержневых пирамид образуют сжатую поясную сетку, узловое соединение которой состоит из двух фланцев с приваренными стержнями поясов и раскосов. Фланцы на монтаже объединяются с помощью болтов (рис. 1.5, е).

ж) Соединение уголковых профилей на болтах при помощи листовых фасонки, приваренных в заводских условиях к длинноразмерным поясам. Соединение применяется в верхних узлах конструкций системы «ЦНИИСК» (Россия), работающих преимущественно в одном направлении (рис. 1.5, ж);

и) Соединение на болтах при помощи пространственных фасонки, свариваемых в заводских условиях из отдельных листов (рис. 1.5, и).

к) Соединение конструкции «Октаплатт», разработано в Германии фирмой «Маннесман». К узловому элементу в виде полого шара привариваются по периметру трубчатые стержни (рис. 1.5, к);

л) Соединение системы «ЦНИИСК» (Россия). Концы трубчатых стержней сплющиваются и собираются в пространственном узле; образовавшееся между

концами стержней пространство заполняется расплавленным металлом с помощью ванной сварки (рис. 1.5, л).

### Опираие структурных конструкций.

Удачный выбор схемы опирания конструкции и правильное проектирование опорной зоны позволяют повысить ее технико-экономические показатели с учетом технологических и планировочных параметров проектируемого здания. Экономичные по расходу материалов решения могут быть получены как при расположении опор по контуру, так и внутри контура (рис. 1.6).

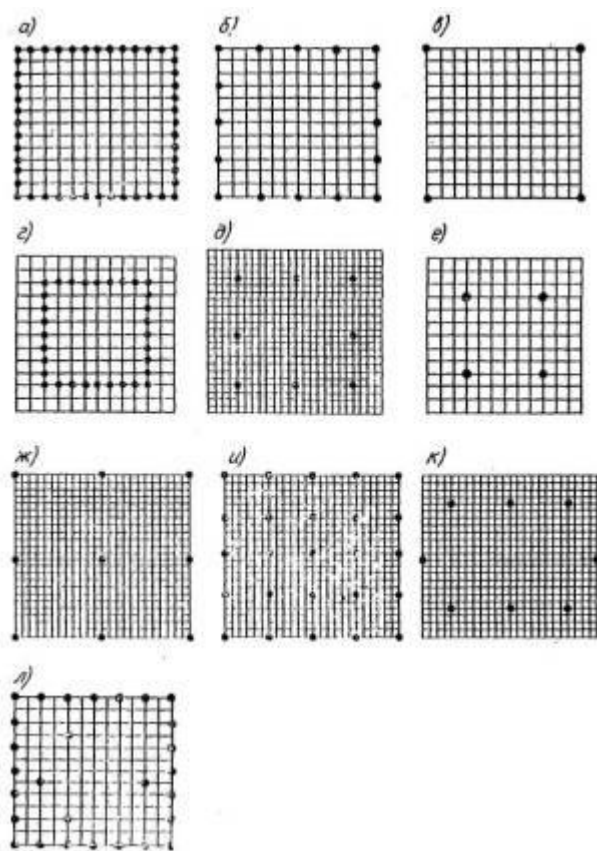


Рис. 1.6. Варианты опирания структурных плит: а, б, в - контурные; г, д, е - внутриконтурные; ж, и, к - смешанные; л - произвольные

В последнем случае консольные свесы разгружают пролетную часть конструкции; дополнительный пригруз консолей позволяет регулировать усилия в стержнях. Возможно также опирание через стержневые капителями.

Расположение опор структурных плит по отношению к контуру конструкции подразделяется на четыре основных класса (рис. 1.6):

- 1) контурное опирание, при котором опоры, поддерживающие конструкцию, расположены по периметру (рис. 1.6, а, б, в);

- 2) внутриконтурное опирание с консолями (рис. 1.6, г, д, е);
- 3) смешанное опирание при котором опоры расположены частично по контуру и частично внутри контура конструкции, образуя регулярную (рис. 2.2, ж, и) или нерегулярную сетку колонн (рис. 1.6, к);
- 4) свободное опирание, при котором внутренние опоры, а в некоторых случаях и наружные, ставятся произвольно в соответствии с технологическими особенностями проектируемого здания (рис. 1.6, л).

Опирание структурных плит на колонны осуществляется через выступающую опорную капитель в узлы верхнего или нижнего пояса и через встроенную в структурную плиту капитель в виде пирамиды или крестовины.

При необходимости более полного использования внутреннего габарита, а также наличии подвесных кран-балок рекомендуется безкапитальный вариант опирания непосредственно на узлы (без капителей). В гражданском строительстве, а также строительстве специальных промышленных сооружений можно для опирания структурных плит использовать имеющиеся внутренние стены или опоры технологического оборудования (рис. 1.6, л). Этот прием может быть рекомендован при одинаковой податливости этих опор и основных колонн сооружения.

### **Недостатки структурных конструкций.**

Недостатки структурных систем вытекают из их основных особенностей, связанных с наличием большого числа стержней и узлов. В узлах структур сходятся шесть, а иногда и более стержней. От конструкции узла, от того, сколь высокую точность при изготовлении она предполагает, зависит и сложность, а значит и трудоемкость изготовления.

Отметим, что в узлах с использованием монтажной сварки не требуется столь высокая точность изготовления элементов, но при этом в конструкции развиваются значительные сварочные напряжения, снижающие ее несущую способность.

Наличие большого числа стержней во многих случаях ведет к неполному использованию несущей способности элементов, многие стержни недогружены

и их сечения 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, которые не всегда имеются в наличии по приемлемым ценам.

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

### **Области применения структурных конструкций.**

Области применения структурных конструкций довольно разнообразны. Они широко применяются как в промышленных, так и в гражданских зданиях с пролетами 24-84 м. Наиболее распространенными являются структурные плиты на квадратном плане размерами 24x24, 30x30 и 36x36 м. В меньшей степени применяются структуры на прямоугольном или многоугольном плане, хотя примеры таких конструкций также имеются.

Структурные плиты хорошо вписываются в уникальные строительные объекты большепролетных зданий с различной, иногда сложной компоновкой основных строительных объемов. Здесь возможны пролеты до 84 м при самой разнообразной форме плана. Назначение таких зданий – это объекты транспорта, торговли, зрелищные и спортивные сооружения.

Отметим, что структурные конструкции широко применяются и в Узбекистане. Например, крытые рынки и автовокзалы в Ташкенте и Самарканде, целый ряд производственных и спортивных зданий в различных городах Республики построены с применением таких конструкций покрытий.

Перспективы дальнейшего применения таких конструкций в нашей Республике также весьма хорошие ввиду отмеченных выше достоинств таких си-

стем. Здесь следует также иметь в виде повышенную жесткость и, вследствие этого, повышенную сейсмостойкость структур.

## 1.2. Структурные конструкции серийного изготовления

### Структурные конструкции типа «Кисловодск»

Структурные плиты типа «Кисловодск» изготавливаются из круглых труб, имеют высоту 2,12 м и соединения стержней, показанные на рис. 1.5, д. Они предназначены для перекрытия секций зданий размерами в плане 30×30 м и 36×36 м при внутриконтурном опирании на четыре колонны, расположенные для секции 30×30 м с шагом 18×18 м и для секции 36×36 м с шагом 24×24 м (рис. 1.7)

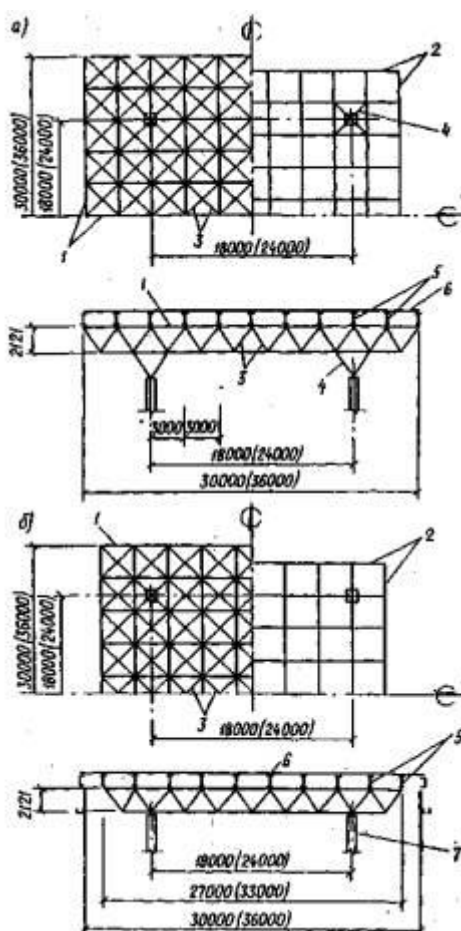


Рис. 1.7. Схемы структурных плит типа «Кисловодск»: а - с капитальным опиранием; б - с опиранием в нижние узлы; 1 - верхние пояса; 2 - нижние пояса; 3 - раскосы; 4 – выносная капитель; 5 - прогоны; 6 - профилированный настил; 7 – колонна.

Изготовление этих конструкции осуществляется серийно на специализированных заводах (в том числе и в Узбекистане), поставка их осуществляется комплектно на одну секцию, т.е. вместе со структурной плитой поставляется

профилированный настил, колонны, фахверк, стеновое ограждение и в ряде случаев специальное оборудование.

Эти конструкции рекомендуется применять в зданиях павильонного типа, однопролетных промышленных зданиях на одну секцию (30×30 м или 36×36 м) без светоаэрационных фонарей (допускается применение только зенитных фонарей); бескрановых с подвесными кран-балками грузоподъемностью до 2 т в пролетах 18 м; с расчетной сейсмичностью до 9 баллов.

Структурные плиты запроектированы в двух вариантах. В первом варианте опирание плит на колонны осуществляется посредством внутренних капителей (рис. 1.7, а), во втором – через нижние узлы, при этом размеры структурных плит оказываются несколько меньше секции зданий и составляют 27×27 м и 33×33 м.

Учитывая, что во втором варианте количество узловых и стержневых элементов примерно на 25 % меньше, чем в первом, а также и то, что при безкапительном решении представляется возможным в ряде случаев понизить высоту здания, рекомендуется при проектировании отдавать предпочтение структурным плитам с непосредственным опиранием в узлы нижних поясов.

### **Структурные конструкции системы «МАрХИ»**

Предприятия, изготавливающие конструкции «МАрХИ» поставляют отдельные элементы конструкций по унифицированному сортаменту, разработанному Московским архитектурным институтом, что позволяет проектировщику в более широких пределах использовать структурные системы при различных конфигурациях плана и характера опирания.

Составные отправочные марки унифицированного сортамента включают трубчатые стержни длиной 1,5, 2 и 3 м с различным диаметром и толщиной стенки, и узловые элементы различных размеров, отличающиеся диаметром резьбовых отверстий и назначением (рис. 1.8).

Минимальный расход стали и трудозатраты при изготовлении и монтаже представляется возможным получить при длине стержня 3 м. Меньшие высоты структурной плиты при длине 2 м и тем более 1,5 м приводят к перерасходу

стали и трудозатрат при изготовлении и монтаже, при этом не способствуют снижению приведенных затрат. Вследствие этого рекомендуется уменьшенные длины стержней применять только в особых случаях, оправданных архитектурными требованиями или производственной необходимостью.

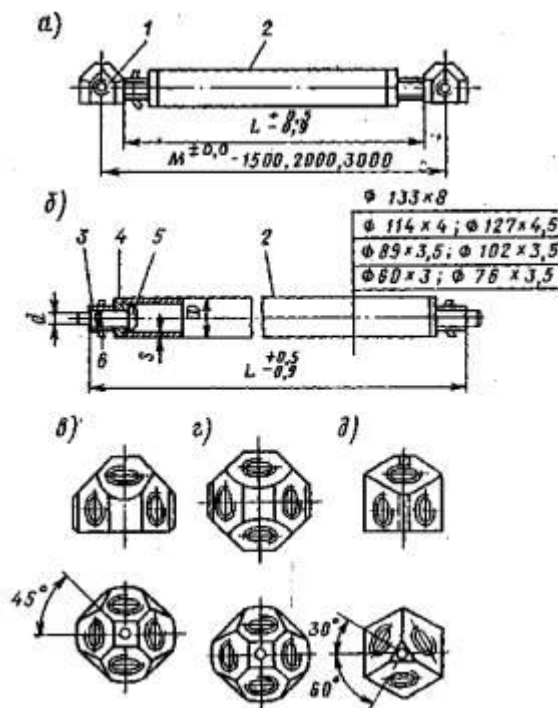


Рис. 1.8. Элементы унифицированного сортамента: а - модульная привязка; б - общий вид стержня; в - полусферический элемент для конструкций с квадратной ячейкой поясных сеток; г - то же сферический элемент; д - сферический элемент для конструкций с треугольной ячейкой поясных сеток 1 - узловой элемент; 2 - трубчатый элемент; 3 - специальная втулка; 4 - цилиндрический вкладыш; 5 - специальный болт; 6 - штифт

Конструкции системы «МАрХИ» рекомендуется применять: в покрытиях общественных здании, крытых рынков, спортивных залов, выставочных павильонов и т.п., а также в покрытиях промышленных зданий, сооружений специального назначения, в зданиях и сооружениях временного назначения, и при реконструкции зданий и сооружений.

### **Типовые структурные конструкции системы «ЦНИИСК»**

К типовым конструкциям из прокатных профилей относятся структурные плиты системы «ЦНИИСК» размерами в плане 12×18 м и 12×24 м, опирающиеся по углам в уровне верхних поясов. Оптимизационный расчет, проведенный на основе приведенных затрат (с учетом стоимости структурной плиты кровельного и стенового ограждения, эксплуатационных расходов и пр.), позволил

установить оптимальную высоту плиты, которая при принятых пролетах составила порядка 1,5 м, а также профили элементов в виде проката и расстояние между поясами - 3 м.

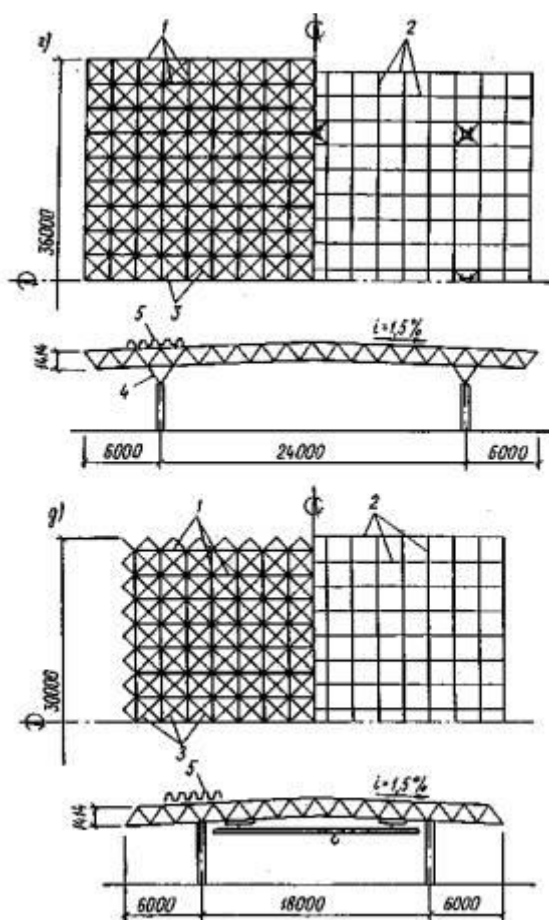


Рис. 1.9. Пример применения конструкции «МарХИ» в промышленном здании

Конструкции разработаны в ЦНИИСК (Россия) применительно к современным способам изготовления на поточных технологических линиях и крупноблочному монтажу. Данные конструкции рекомендуется применять: в однопролетных и многопролетных производственных зданиях при наличии как зенитных, так и светоаэрационных фонарей, высотой до низа конструкции до 18 м. При этом возможно применение подвесных кранов грузоподъемностью до 3 тс, мостовых кранов грузоподъемностью до 50 тс при возведении зданий в районах с расчетной сейсмичностью до 9 баллов включительно.

Конструкции представляют собой складчатую систему с длинноразмерными поясами, расположенными вдоль блока. Верхние продольные пояса запро-

ектированы из двутавров и выполняют также функции прогонов, остальные элементы – из равнобоких уголков.

Все элементы структуры, кроме расположенных по торцам, соединяются на монтажной площадке болтами (рис. 1.10). С целью сокращения монтажных узлов элементы, расположенные по торцам, свариваются в ферму в заводских условиях и доставляются на строительную площадку в виде ферм из одиночных уголков.

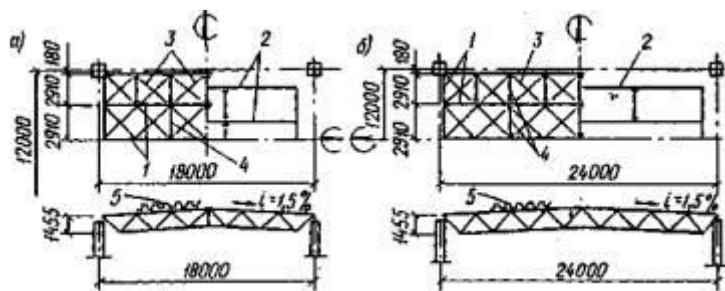


Рис.1.10. Схемы структурных плит «ЦНИИСК»: а - размеры в плане 12×18 м; б - размеры в плане 12×24 м; 1 - верхние пояса; 2 - нижние пояса; 3 - раскосы; 4 - распорки; 5 - профилированный настил.

Пространственная жесткость верхних поясов и структурного блока в целом обеспечивается профилированным настилом, скрепленным с поясами, и поперечными элементами в уровне верхних и нижних поясов. При использовании в качестве покрытия асбоцементных панелей жесткость верхних поясов обеспечивается приваркой к верхней полке двух.

### ***1.3. Обзор методов расчета и оптимизации структурных плит***

Структурные конструкции в расчетном отношении гораздо сложнее, чем традиционные плоские конструкции. Это объясняется пространственным характером работы, большим количеством узлов и стержней, а также высокой степенью статической неопределимости. Поэтому до появления ЭВМ и компьютерных программ расчеты велись приближенно с различной степенью достоверности.

#### **Приближенный расчет.**

Наиболее распространенным подходом была замена дискретной стержневой плиты сплошной ортотропной плитой с соответствующими упругими характеристиками. В зависимости от геометрической схемы по формулам определяются жесткостные параметры эквивалентной плиты, затем производится статический расчет плиты, затем через усилия в плите определяются усилия в стержнях структуры.

Понятно, что такой расчет был доступен только для регулярных плит с простой формой опирания (чаще всего по контуру). О его точности судили по экспериментальным данным, которые показывали хорошее совпадение для пролетных стержней, и большие расхождения для приконтурных стержней.

Учет опирания на отдельные точки, или сложная форма плана, или отступления от регулярности, вызывали непреодолимые трудности в расчете плиты. Кроме того, численное решение дифференциальных уравнений изгиба плит также требовали применения машинных программ для решения систем алгебраических уравнений высокого порядка, что в ту пору не везде было возможно.

Тем не менее указанный метод пластинчатой аппроксимации был достаточно хорошо разработан, и им довольно долгое время пользовались на практике. Были разработаны компьютерные программы, реализующие этот метод в режиме разового прогона. Это означало, что для каждой задачи требовалась подготовка числовых исходных данных определенного формата, после чего данные вводились в задачу, происходил процесс решения, который заканчивался выдачей результата. Элементы интерактивного процесса решения и анализа результатов, а также графическая наглядность в таких программах практически отсутствовали.

С развитием метода конечных элементов (МКЭ) указанный метод пластинчатой аппроксимации полностью утратил свое значение.

### **Использование МКЭ.**

Этот метод строительной механики был разработан еще в 30-40-е годы XX века, но его практическое применение ограничивалось ввиду отсутствия быстродействующих ЭВМ. Между тем МКЭ имеет значительные преимущества пе-

ред другими методами строительной механики. Прежде всего это универсальность, т.к. единый подход можно использовать для любых конструкций – плоских и пространственных, дискретных, континуальных и комбинированных. Для МКЭ не имеют значения статическая определимость или неопределимость, формы опирания и сопряжения, а также формы нагрузок.

В отличие от метода пластинчатой аппроксимации МКЭ для стержневых систем является точным, что делает его надежным средством расчета структурных конструкций любого очертания и при любых нагрузках.

Поэтому с появлением ЭВМ и средств программирования МКЭ получил мощный импульс к развитию, что привело к появлению универсальных программных комплексов для расчета любых строительных конструкций. При этом современные системы позволяют не только определять перемещения и усилия в конструкциях, но и выполнять динамические расчеты, составлять расчетные сочетания усилий и перемещений, выполнять конструктивные расчеты для железобетонных и металлических конструкций.

При использовании любой программы, основанной на МКЭ, расчет конструкций осуществляется в следующие этапы:

- 1) Составление расчетной схемы с разбивкой системы на конечные элементы определенного типа, нумерацией узлов и элементов;
- 2) Создание в программе нового файла задачи с вводом определенных параметров расчетной схемы;
- 3) Ввод данных об узлах (координаты в выбранной системе координат, связи по заданным направлениям перемещений);
- 4) Ввод данных об элементах (ограничивающие узлы, шарниры, тип КЭ, жесткости);
- 5) Ввод данных о нагрузках на узлы и элементы по загрузениям;
- 6) Ввод дополнительных данных в зависимости от особенностей задачи и программы;
- 7) Выполнение расчета, просмотр и анализ результатов, корректировка расчетной схемы;

8) Составление и печать выходных данных задачи.

Рассмотрим в качестве примера выполнение расчета структурных плит в программном комплексе (ПК) «ЛИРА». Этот комплекс наиболее популярен в странах СНГ, в том числе в Узбекистане; разработан в НИИАСС (Киев, Украина).

Основой ПК «ЛИРА» является графический редактор для создания и корректировки расчетной схемы конструкции. Здесь имеется множество возможностей ввода узлов и элементов, задания типов КЭ и жесткостных характеристик, различных нагрузок и таблиц РСУ.

На рис. 1.11 показана главная экранная форма программы с созданной в графическом редакторе схемой структурной конструкции 18x18 м с консолями по 6 м, опертую в 4-х узлах через стержневые капители (рис. 1.12). С помощью функции копирования объектов были получены верхняя и нижняя поясные сетки с ячейками 3x3 м, при этом расстояние между сетками по вертикали (высота структуры) – 1,2 м, а в горизонтальной проекции узлы сеток смещены на пол-ячейки, т.е. 1,5 м.

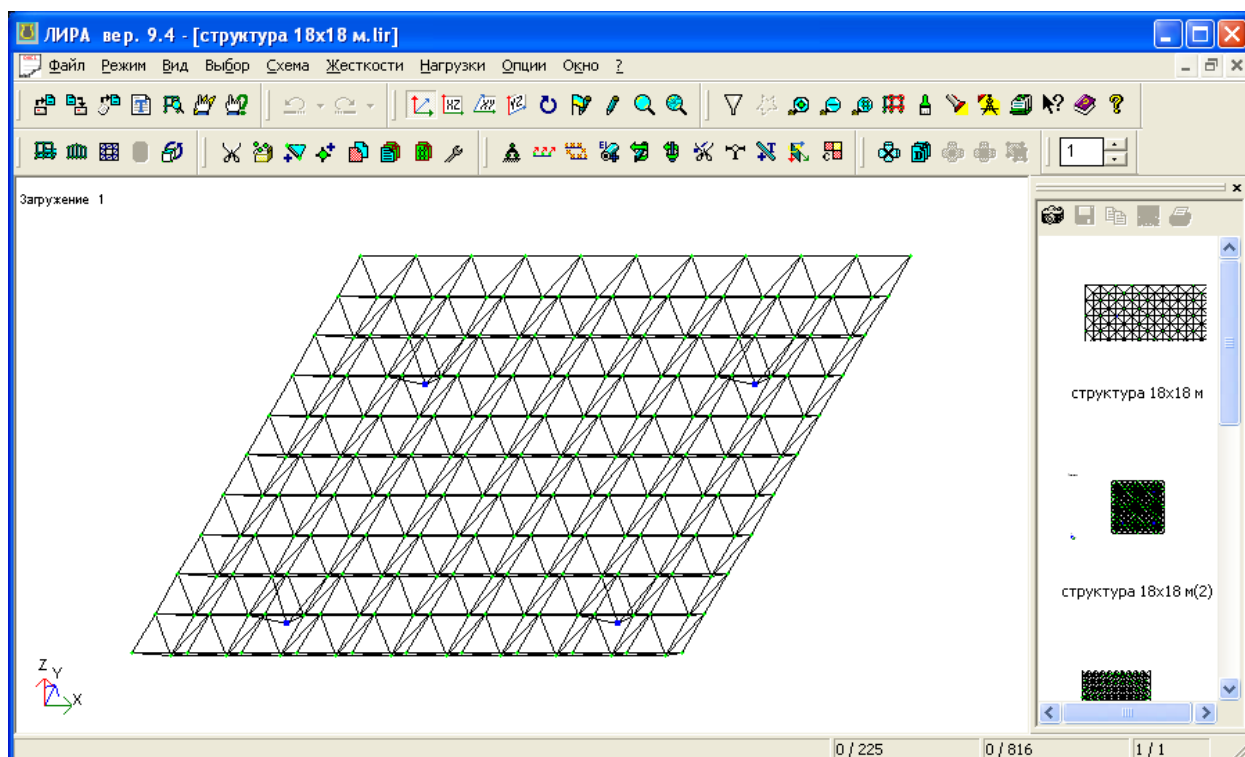


Рис. 1.11. ПК «ЛИРА»; графический редактор с аксонометрической проекцией структуры

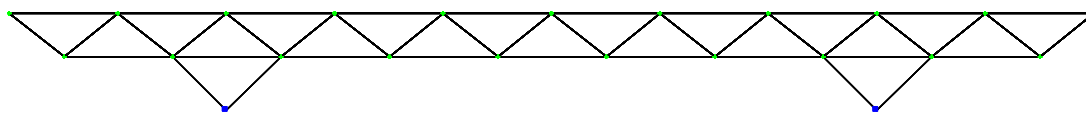


Рис. 1.12. Разрез структурной конструкции, полученной в ПК «ЛИРА»

После ввода схемы необходимо задать жесткости стержней (сечения стальных элементов), и узловые нагрузки. Далее выполняется расчет, после чего можно просматривать и анализировать его результаты. В частности, можно найти продольные силы в каждом стержне, или перемещения любого узла, просматривать деформированные схемы, строить мозаики параметров и эпюры усилий. Система документирования позволяет создавать выходной документ с включением в него данных о расчетной схеме и результатах расчета с необходимыми рисунками и схемами.

Приложение «ЛИР-СТК» позволяет проверять и подбирать сечения стержней из стандартных прокатных профилей на основе норм проектирования стальных конструкций. В целом ПК «ЛИРА» является наиболее надежным и детально разработанным программным средством для расчета любых строительных конструкций.

Имеются и другие аналогичные программные системы, основанные на применении МКЭ. К ним относятся MicroFE (Россия и Германия), SCAD Office (Россия), SAP-4 (США) и др. Существуют также специализированные программы, рассчитанные на определенный класс конструкций. К ним относится, в частности, программа «SteelTruss» или «Стальные фермы», которую разработал доцент Фридман Г.С.

### **Оптимизация структурных конструкций.**

Целью оптимизации является уменьшение расхода стали и стоимости конструкций за счет конструктивных мероприятий и/или использования внутренних резервов расчетным путем. В целом к мероприятиям по оптимизации конструкции относятся следующие:

- 1) Выбор рациональной геометрической схемы, высоты и условий опирания конструкции (расположение колонн, наличие капителей);

- 2) Выбор рациональных профилей проката для стержней (трубы, уголки, швеллеры и др.) и соответствующих узловых сопряжений;
- 3) Использование средств регулирования усилий в стержнях структуры (предварительно напряженные затяжки, смещение опор и т.п.).
- 4) Определение оптимальной схемы унификации стержней по размерам сечений (распределение материала по конструкции).

Некоторые из этих способов оптимизации применительно к условиям Узбекистана будут детально рассмотрены в последующих главах диссертации.

### ***1.3. Использование программы «SteelTruss» для расчета пространственных стержневых плит***

**Общие сведения о программе.** В данной программе также используется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий определить линейные перемещения всех узлов по направлениям осей координат, а затем усилия в стержнях.

В отличие от универсального ПК «ЛИРА» программа «SteelTruss» является специализированной и предназначенной для расчета только плоских и пространственных ферм. Достоинством специализированных программ является их компактность и простота использования при наличии тех же возможностей, что и в универсальных программах. Для авторов подобных разработок наличие собственных программ имеет и то преимущество, что их коды открыты и понятны - поэтому возможно совершенствование программ и экспериментирование с ними.

Данная программа имеет блоки ввода данных и расчета, позволяет учесть все виды нагрузок (статические, сейсмические и предварительное напряжение), а также определять расчетные сочетания усилий (PCY). Кроме того, имеется возможность осуществлять подбор сечений стальных ферм из стандартных (прокатных) профилей с учетом унификации типоразмеров. При этом в программу включен электронный сортамент прокатных профилей.

Программа написана на языке программирования «Object Pascal» в среде программирования «Delphi 7.0» для операционной системы Microsoft Windows.

По набору возможностей применительно к расчету стальных ферм она не уступает ПК «Лира»; при этом достоверность результатов многократно проверена путем их сопоставления с данными, полученными в ПК «Лира».

Данная программа подробно описана в руководстве [9]. Ее главная экранная форма представлена на рис. 1.9; здесь мы видим главное меню и панель инструментов, а в клиентской области – многостраничный двухуровневый блокнот с таблицами данных и результатов расчета.

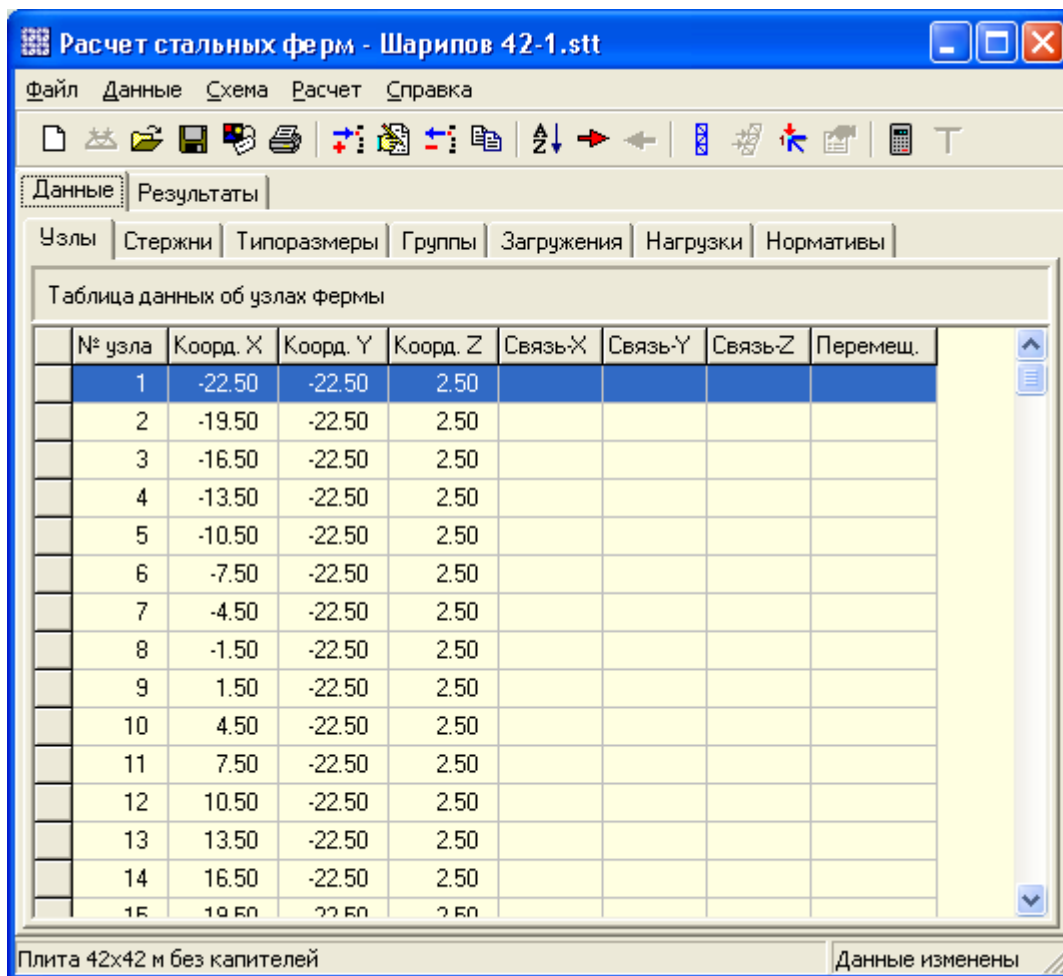


Рис. 1.13. Главная экранная форма программы.

Таблицы данных заполняются пользователем с использованием диалоговых окон для добавления, исправления и удаления элемента активной таблицы. При наличии регулярности данных возможно копирование одной или нескольких выделенных строк таблицы с заданием приращений данных. Возможно также выделение группы строк таблицы для одновременного исправления общих данных.

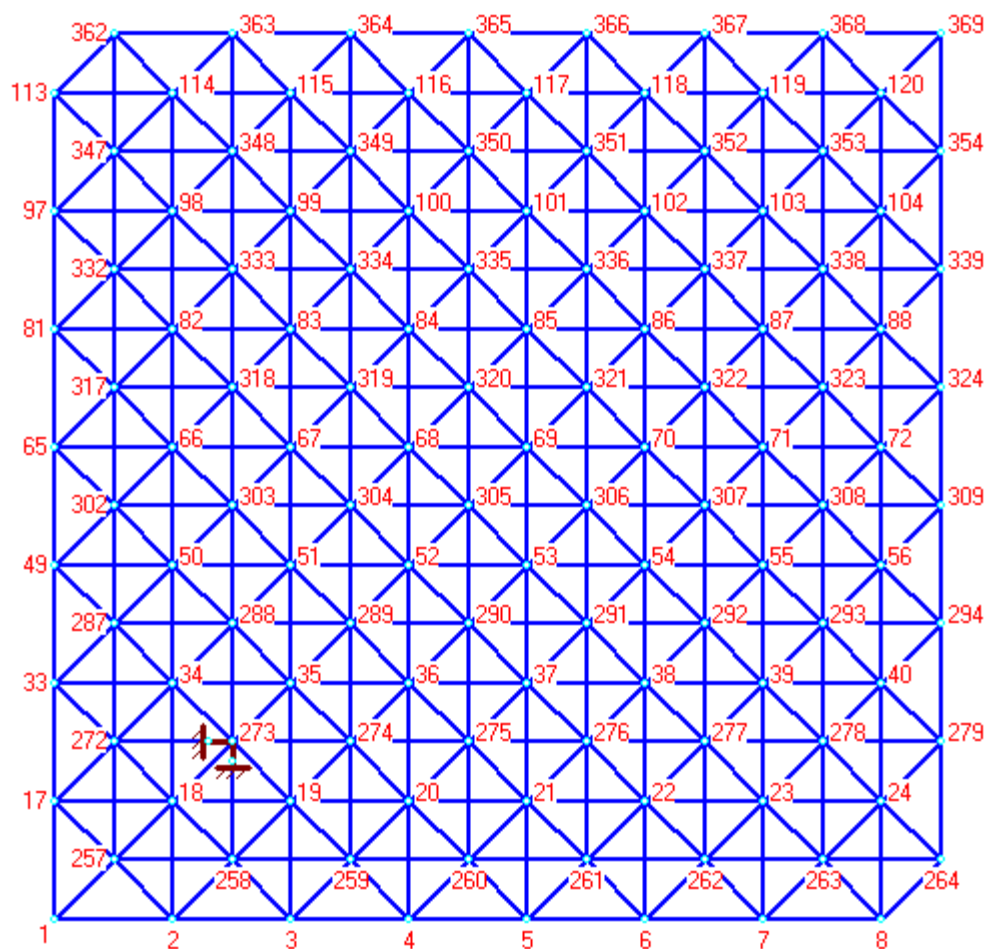


Рис. 1.14а. Недеформированная схема структуры (горизонтальная проекция)

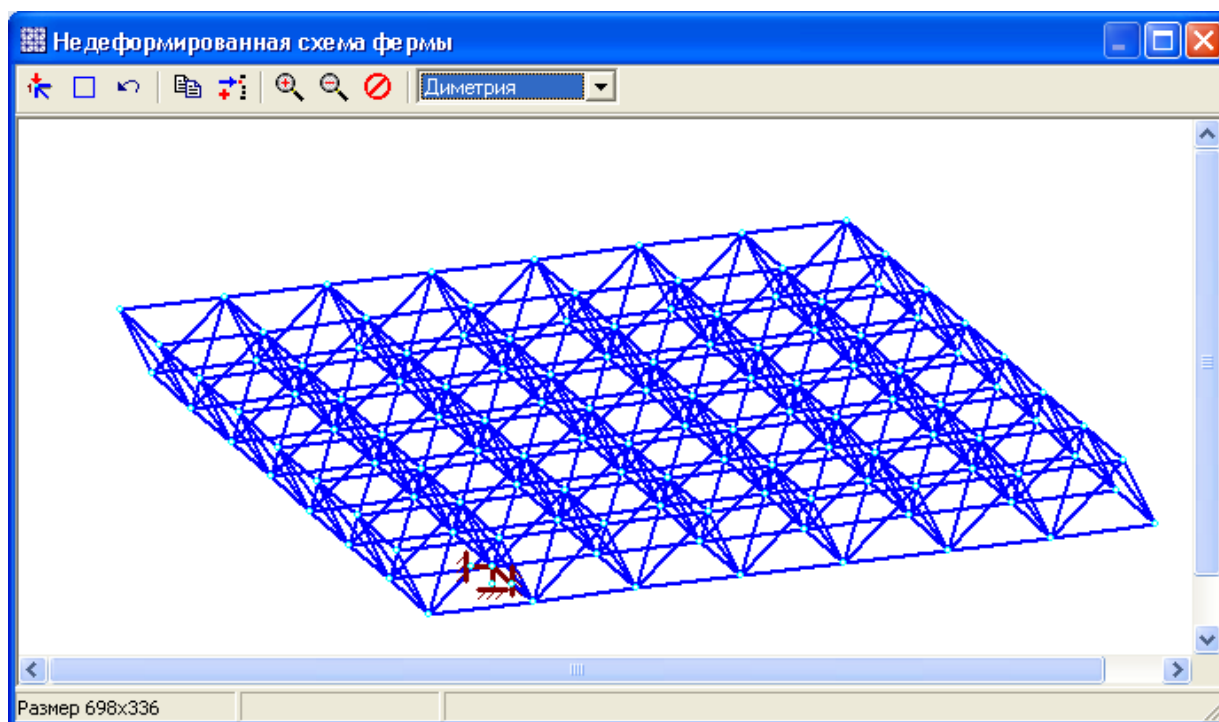


Рис. 1.14б. Недеформированная схема структуры (аксонометрия)

После ввода всех данных можно просматривать недеформированные схемы конструкции (рис. 1.14 а,б), определяя с помощью панели инструментов вид схемы. Эти схемы можно сохранять в отдельных файлах, копировать в буфер обмена и включать в отчет для печати.

Программа имеет блок формальной проверки правильности исходных данных, который используется перед просмотром схем или выполнением расчета. При наличии ошибки выводится соответствующее сообщение, а выполнение заданной команды отменяется.

На геометрической схеме можно обнаружить и неформальные ошибки в данных (например, неверные координаты узла, неверное положение стержня, лишние стержни и др.). Что касается геометрической неизменяемости системы, то ее можно проверить только в процессе расчета. При недостаточном количестве связей или неправильной конфигурации фермы ее узлы будут иметь большие перемещения. В этом случае расчет прерывается и выдается сообщение об ошибке.

Основным расчетным блоком программы является процедура определения перемещений узлов по МКЭ. Матрица жесткости формируется как двумерный ленточный массив, при этом ширина ленты зависит от нумерации узлов и весьма существенно влияет как на размер матрицы, так и на время счета. При многих загрузениях векторы нагрузок объединяются в матрицу нагрузок.

Далее производятся исключение неизвестных путем сведения матрицы жесткости к треугольному виду (прямой ход по Гауссу) и определение перемещений (обратный ход по Гауссу). Обратный ход выполняется для каждого столбца матрицы нагрузок отдельно, при этом вычисленные перемещения сохраняются в другой матрице. По завершении расчета матрицы жесткости и нагрузок удаляются из памяти, а матрица перемещений сохраняется и может использоваться для определения усилий в стержнях и просмотра деформированных схем.

Определение перемещений узлов производится одновременно с решением динамической задачи (если задано сейсмическое нагружение). Для этого путем

определения перемещений от единичных нагрузок формируется матрица податливости, которая используется для определения собственных чисел и векторов методом итераций. Далее по нормам расчета на сейсмические воздействия определяются сейсмические нагрузки по каждой заданной форме колебаний, от которых снова вычисляются перемещения. При этом всякий раз используется одна и та же матрица жесткости, приведенная после исключения неизвестных к треугольному виду. Далее – если это задано пользователем - вычисляются усилия, РСУ и производится подбор сечений стержней.

Расчет стальных ферм - Шарипов 42-1.stt

Файл Данные Схема Расчет Справка

Данные Результаты

Сочетания Сечения Спецификация

Сечения типоразмеров и их теоретические массы (кг)

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	219x5	219x5	37981.44	37981.44	100.00
2	Труба круглая	219x4,5	219x4,5	29969.73	29969.73	100.00
3	Труба круглая	133x4	133x4	36858.80	36858.80	100.00
4	Труба круглая	273x5	273x5	1733.71	1733.71	100.00
Всего:				106543.68	106543.68	100.00

Плита 42x42 м без капителей

Рис. 1.15. Результаты расчета фермы (таблица проверок сечений).

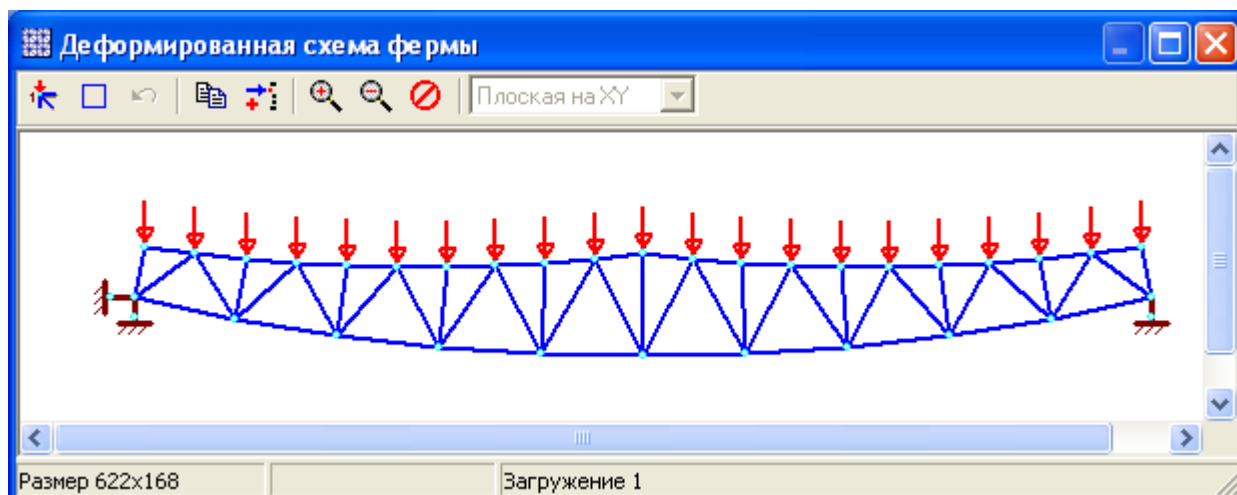


Рис. 1.16. Деформированная схема фермы при загрузении 1.

Если расчет выполнен до конца, то программа заполняет таблицы результатов (рис. 1.15) и делает доступным просмотр деформированных схем (рис. 1.16). В отчет для печати пользователь может включать нужные таблицы исходных данных и результатов, а также заранее сгенерированные деформированные и недеформированные схемы фермы.

В последней версии программы добавлена возможность генерации исходных данных для заданных прототипов ферм. Для пространственных ферм можно генерировать структурные плиты, опертые на 4 колонны через капители и без них. Для них задаются размер панелей и их количество по осям X и Y (в пролете и на консолях), а также высота структуры и распределенные нагрузки (рис. 1.17).

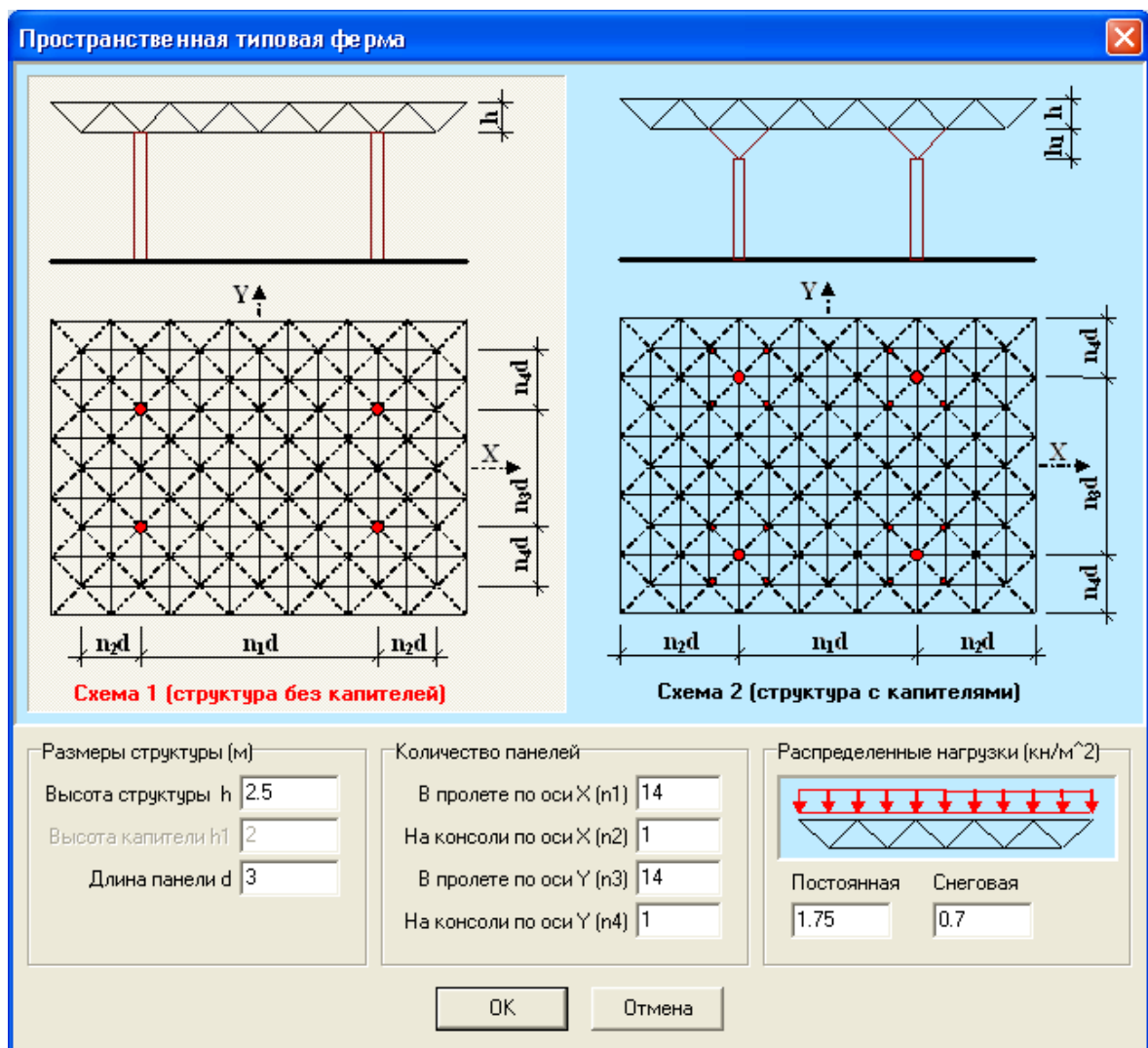


Рис. 1.17. Экранная форма для генерации типовой структуры.

По заданным параметрам типовых ферм программа формирует все исходные данные, включая узловые нагрузки (постоянные и снеговые). Пользователю остается только ввести данные о типоразмерах и нормативах, после чего ферму можно рассчитывать. При необходимости данные можно корректировать путем ввода или удаления элементов, а также ввода дополнительных загрузений.

Ограничений по количеству узлов и стержней в программе практически нет, хотя формально введен наибольший номер элемента – 9999. Количество загрузений – до 40, количество сосредоточенных масс при расчете на сейсмические нагрузки – до 99, количество форм колебаний – до 12.

При вводе данных о стержнях каждому элементу присваивается номер типоразмера и номер норматива. Типоразмер определяет свойства материала (модуль упругости и расчетное сопротивление), а также тип сортамента и размер профиля. Объединяя группы стержней в один типоразмер, мы тем самым осуществляем унификацию стержней, от способа которой зависят расход стали и трудоемкость изготовления. Экранная форма для ввода данных о типоразмерах показана на рис. 1.18.

Добавление типоразмера

№ типа жесткости	5	Характеристики сечения	
Характеристики стали (МПа)		Тип (сортамент)	<input type="checkbox"/> Замкнутый ГСП
Модуль упругости	206500	Профиль	125x7
Расч. сопротивл.	230	Площадь (см <sup>2</sup> )	30.90

OK Отмена

Рис. 1.18. Экранная форма для ввода данных о типоразмерах.

Отметим, что профиль сортамента вначале вводится произвольно; можно использовать данные аналогичных проектов или руководствоваться интуицией.

Но после первого расчета можно воспользоваться программными средствами по оптимизации и корректировке сечений.

Норматив – это набор данных для подбора сечений стержней по действующим нормам проектирования стальных конструкций [2]. В него входят коэффициенты приведенной длины в плоскости и из плоскости фермы, предельные гибкости по сжатию или растяжению и коэффициенты условий работы. Для стержней из одиночных уголков можно задать подбор сечений по минимальному радиусу инерции, для стержней из других профилей эта опция не имеет значения.

Для вычисления расчетных сочетаний усилий от многих загружений (PCY) вводятся данные о группах зависимых загружений, в которых указывают тип нагрузки и коэффициенты сочетаний. В соответствии с требованиями норм проектирования [1,3] учитываются основные сочетания с одной временной нагрузкой (тип 1), основные сочетания с двумя и более временными нагрузками (тип 2), а также особые сочетания (с сейсмической нагрузкой). При наличии сейсмической нагрузки с высшими формами колебаний совместный учет усилий от всех форм колебаний производится по рекомендациям норм проектирования [1].

В целом блок подбора сечений программы «SteelTruss» позволяет определять минимально необходимые профили типоразмеров и производить проверки заданных профилей на основе норм проектирования стальных конструкций [2]. Результаты расчетов позволяют судить о применимости и экономичности принятых профилей, а также корректировать их как в целях экономии материала, так и по конструктивным соображениям.

Отметим, что при возможности генерации расчетной схемы расчет сложной многосвязной системы выполняется очень быстро, что делает данную программу незаменимым средством при анализе различных вариантов и оптимизации структурных конструкций.

#### ***1.4. Выводы по главе***

1. Стальные пространственные стержневые плиты покрытий (структуры) широко применяются в покрытиях гражданских и промышленных зданий средних и больших пролетов, их конструкции достаточно хорошо разработаны, имеются типовые решения конструкций.

2. Расчет структур ввиду большого количества элементов весьма сложен; при этом приближенные методы расчета, основанные на замене стержневой плиты сплошной, утратили свое значение в связи с разработкой метода конечных элементов и основанных на нем компьютерных программ.

3. На основе анализа существующих компьютерных программ, основанных на МКЭ, для дальнейших расчетов и анализа структурных конструкций принята программа «SteelTruss». Она хорошо адаптирована к расчету стальных пространственных ферм, что удобно для выполнения многочисленных примеров расчета структур и их оптимизации.

4. Цель данной работы состоит в том, чтобы разработать методику расчета и анализа структурных плит с применением программы «SteelTruss», а также провести анализ различных конструктивных решений и выработать рекомендации по назначению оптимальных параметров конструкций.

## Глава 2. Методика компьютерных расчетов стальных стержневых плит покрытий (структур)

### 2.1. Общие данные для расчета структур

Анализ конструктивных решений структур будем проводить на основе результатов реальных расчетов, выполненных с помощью программы «SteelTruss» (Стальные фермы).

Определим нагрузки на структуру, приняв утепленную кровлю из стального профилированного настила по прогонам, а снеговую нагрузку – для 1-го района (Узбекистан). По аналогии с [7] постоянная нагрузка равна  $q_n = 1,75$  кН/м<sup>2</sup>, средний коэффициент надежности для определения перемещений от нормативной нагрузки  $\gamma_{cp} = 1,75/1,5 = 1,16$ .

В соответствии с [3] нормативная снеговая нагрузка 0,5 кПа (50 кг/м<sup>2</sup>), расчетная снеговая нагрузка  $q_{сн} = 0,5 \cdot 1,4 = 0,7$  кН/м<sup>2</sup>. Распределенная нагрузка для определения сейсмических масс равна:

$$S_n = 0,9 \cdot q_n + 0,5 \cdot q_{сн} = 0,9 \cdot 1,75 + 0,5 \cdot 0,7 = 1,925 \text{ кН/м}^2.$$

Для первоначального анализа примем сечения стержней из круглых труб, а расчетное сопротивление стали  $R_y = 230$  МПа.

### 2.2. Расчет структур с типовой расчетной схемой

Типовая схема для программы «SteelTruss» (рис. 1.17) может быть сгенерирована автоматически путем задания минимального числа параметров (рис. 1.17). Рассмотрим в качестве примера структуру размерами в плане 24x30 м. Примем вначале опирание через капители с 6-метровыми консолями по всем сторонам; высота структуры 2 м.

Загрузим программу «SteelTruss», создадим новую задачу для пространственной фермы, затем выберем в панели инструментов «Генерацию схемы». Здесь выберем правую схему и зададим все параметры. В результате получим заполненные таблицы исходных данных, которые при необходимости можно корректировать. На рис. 2.1 показаны скопированные из программы схемы структуры.

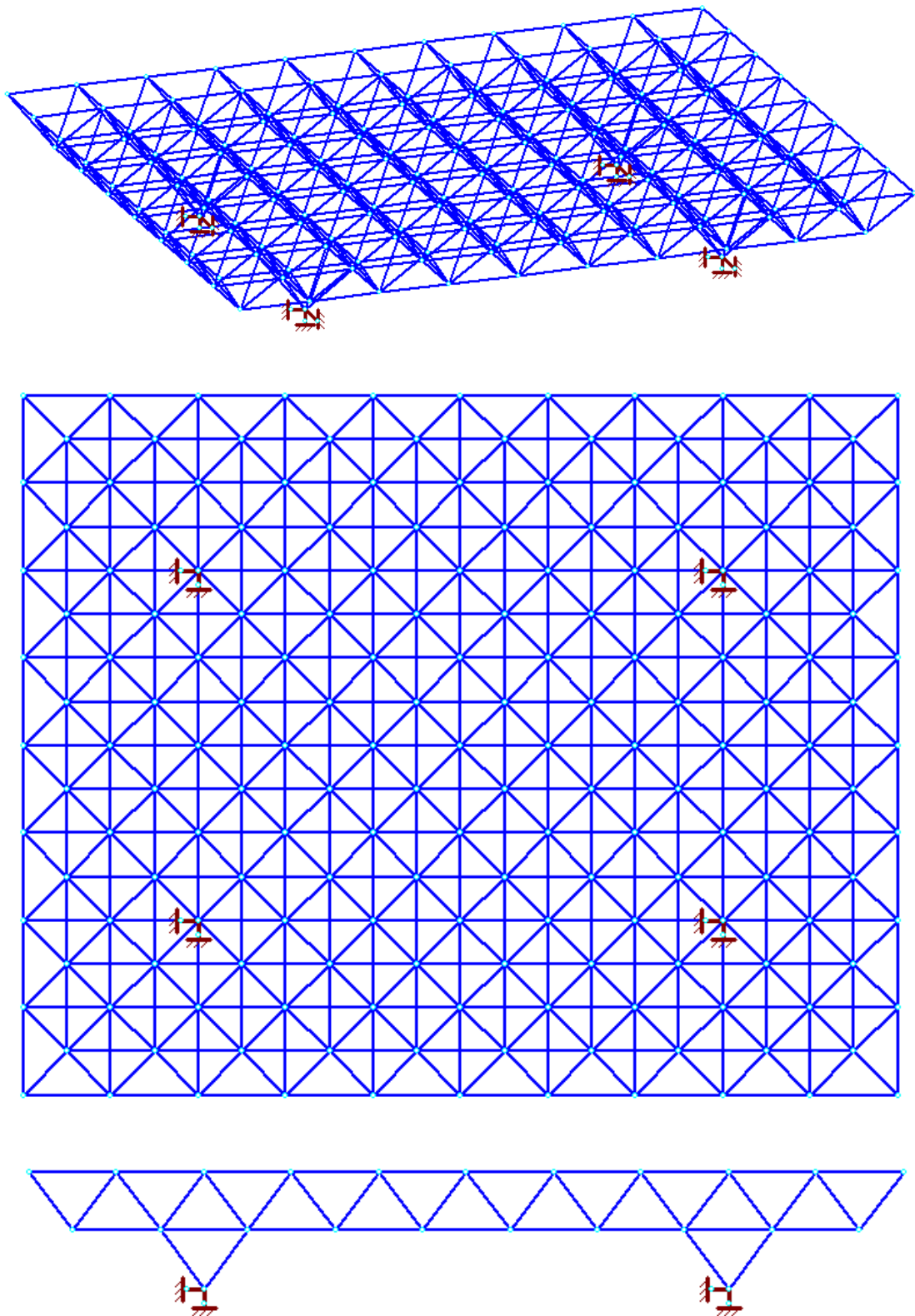


Рис. 2.1. Схемы структуры 24x30 м с капителями:  
аксонометрия, план и продольный разрез.

По команде «Расчет» будет выполненены все этапы расчета, включая подбор сечений стержней. Однако первоначально заданные сечения могут оказаться перегруженными или неоптимальными, поэтому с помощью меню «Рас-

чет-Замена профилей» нужно повторить расчет до полного совпадения заданных и расчетных профилей (обычно требуются 2-5 попыток). Протокол расчета последнего приближения показан на рис. 2.2.

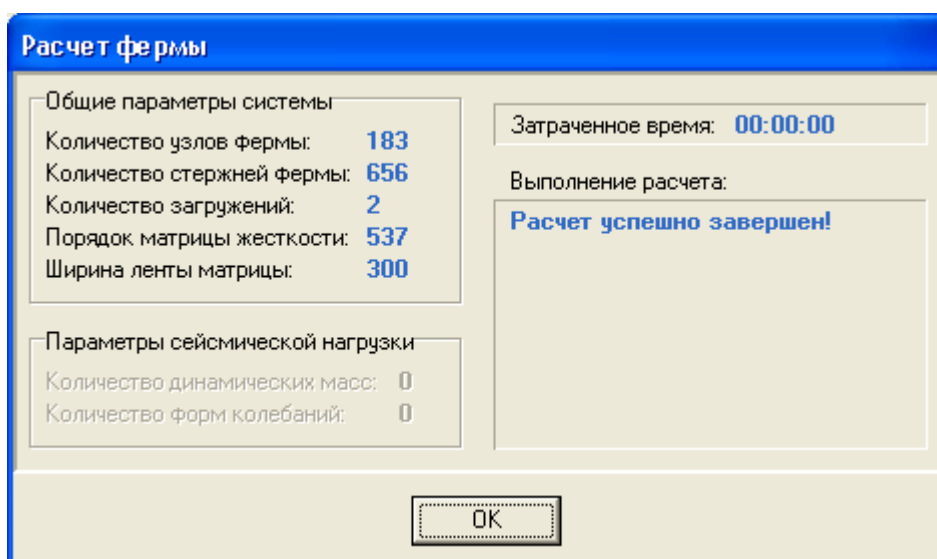


Рис. 2.2. Протокол расчета структуры

Здесь видно, что решаемая структура имеет 183 узла и 656 стержней, порядок матрицы жесткости, равный количеству неизвестных перемещений – 537, ширина ленты матрицы 300. Время расчета на обычном компьютере с процессором 3,2 ГГц и оперативной памятью 1 Гб не составило даже 1 секунды.

Таблица окончательных результатов (спецификация) показана на рис. 2.2.

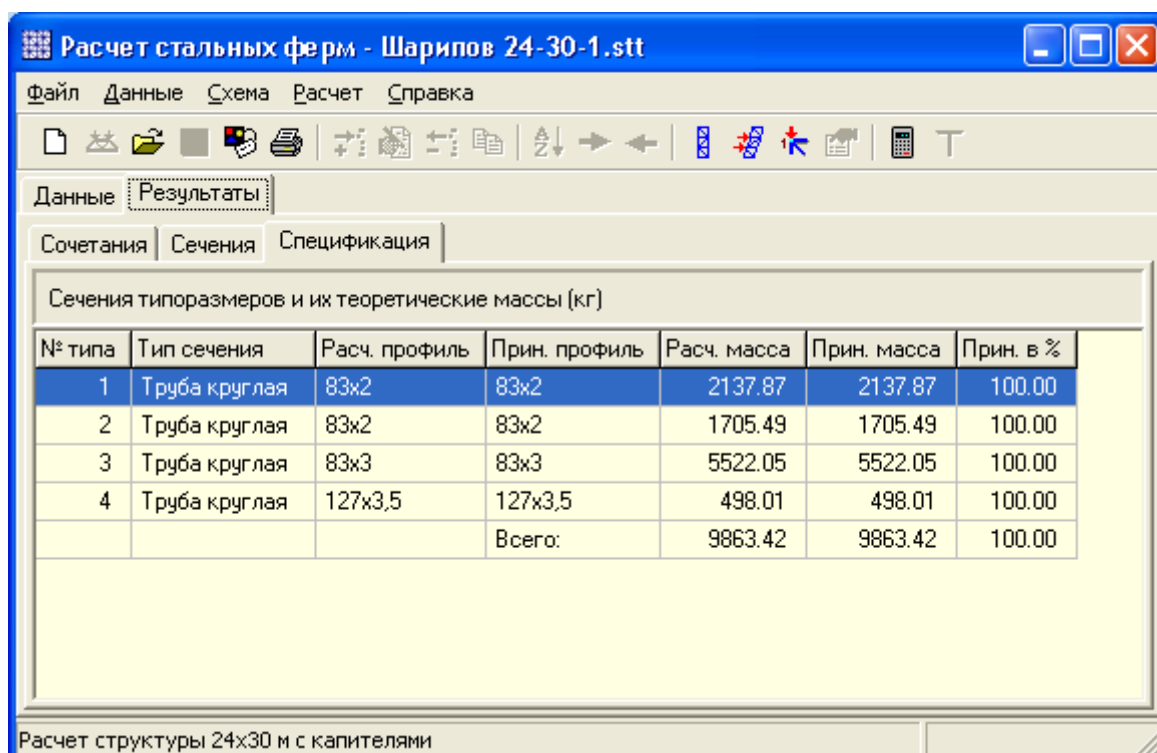


Рис. 2.3. Окончательные сечения типоразмеров и их массы

Общая масса структуры равна 9863,42 кг, а приведенная масса равна

$$9863,42/(24 \cdot 36) = 11,42 \text{ кг/м}^2.$$

Анализ таблицы подбора сечений показывает, что при заданной унификации стержней значительная их часть недогружена, к тому же сечение труб одно из наименьших в сортаменте. Отсюда вытекают два вывода:

- 1) для уменьшения массы необходима более детальная унификация стержней;
- 2) с увеличением пролета удельная масса структуры должна расти медленнее пролета, т.е. эффективность структур должна возрастать.

### ***2.3. Расчет структуры с нетиповой расчетной схемой***

Если геометрическая схема структуры допускает автоматическую генерацию, но при этом некоторые параметры не соответствуют типовой схеме, то после генерации ее можно корректировать. Это требуется в следующих случаях:

- 1) Необходимо ввести в структуру дополнительные стержни или удалить существующие стержни;
- 2) Необходимо переместить опоры структуры или ввести дополнительные опоры;
- 3) Необходимо ввести дополнительные загрузки (сейсмические, крановые и др.).

Все перечисленные действия по изменению схемы производятся в обычном режиме с использованием таблиц данных. Рассмотрим некоторые примеры.

#### **Перемещение опор и введение дополнительных опор.**

Рассмотрим предыдущий пример структуры пролетом 18x12 м с опиранием на колонны без капителей; при этом консольные свесы со всех сторон будут равны 4,5 м, а общие размеры структуры – 27x21 м. Полученные схемы структуры показаны на рис. 2.4.

Допустим, что полученная в результате генерации схема опирания в 4-х точках при консольных свесах по 4,5 м неприемлема. Необходимо уменьшить

консоли до 1,5 м, а опоры поставить по всему контуру через 6 м. Тогда пролет структуры составит 24x18 м, т.е. за счет уменьшения консолей увеличено внутренне пространство здания. Колонны с шагом 6 м могут использоваться для навески стеновых панелей или панелей остекления.

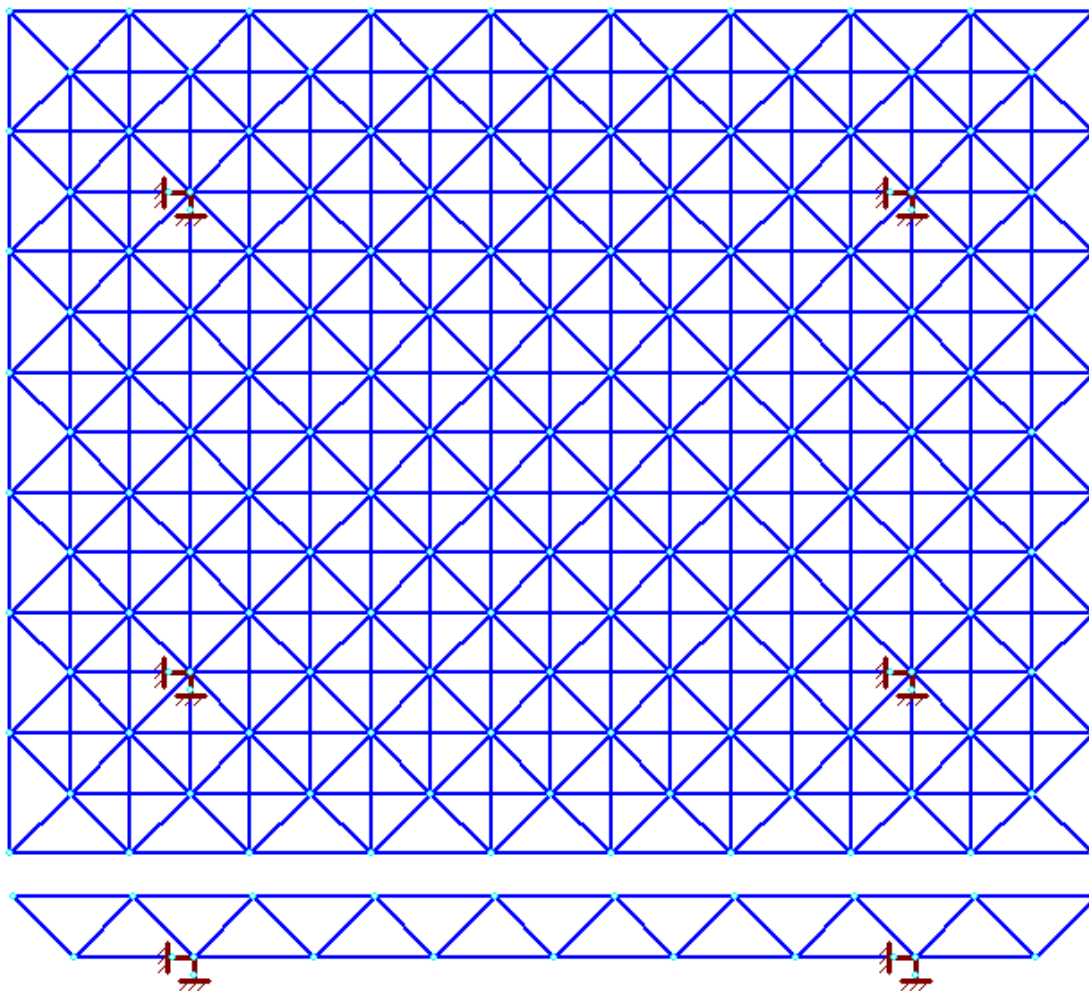


Рис. 2.4. Схема структуры 27x21 м без капителей

На вкладке «Данные-Узлы» удалим связи по первоначальной схеме, затем зададим связи в соответствующих узлах нового контура. Полученная схема структуры показана на рис. 2.5. Далее можно произвести расчет структуры. Масса структуры в данном случае составила 13,31 кг/м<sup>2</sup>.

Отметим также, что при генерации схемы все 4 опорных узла принимаются несмещаемыми, т.е. на них наложены связи по осям X, Y, Z. Однако для геометрической неизменяемости достаточно только одного несмещаемого узла, и еще не менее 3-х узлов должны иметь вертикальные связи по оси Z.

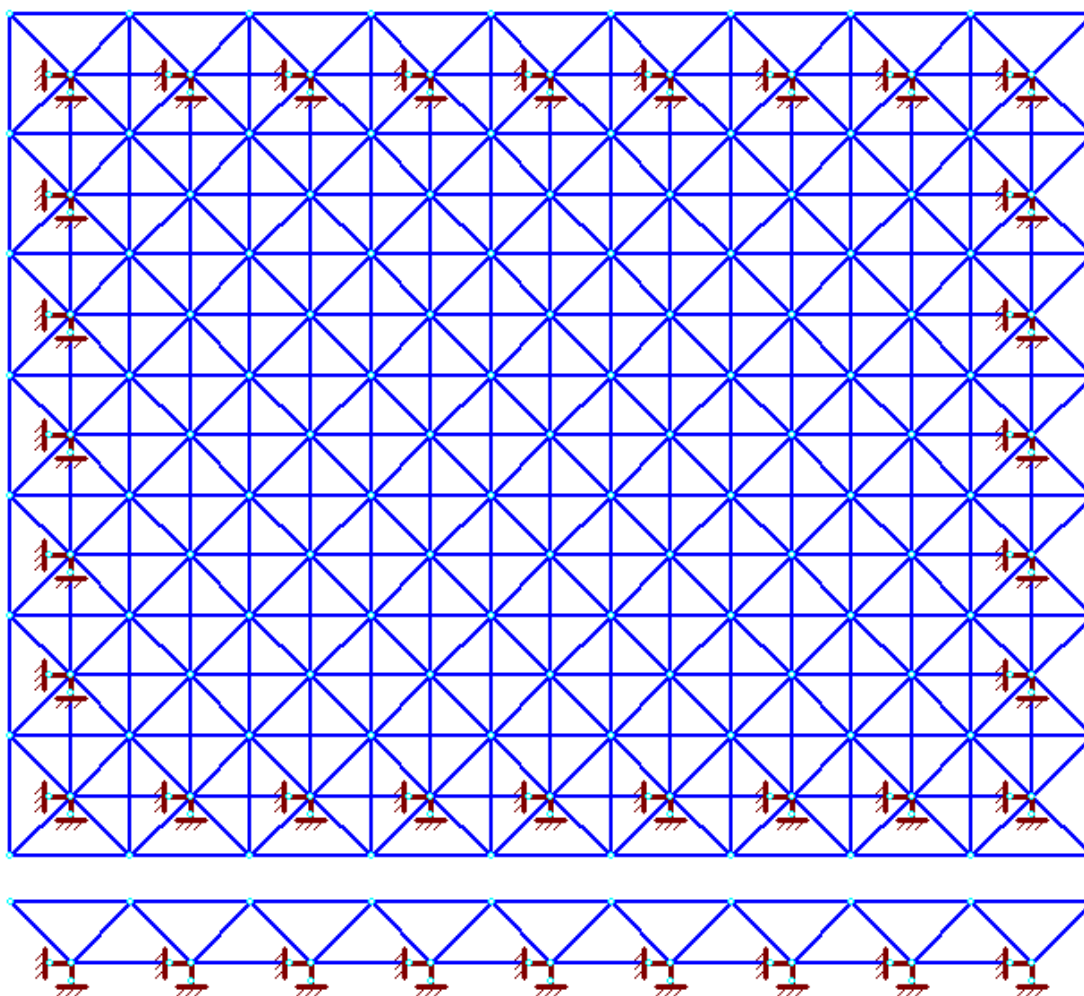


Рис. 2.5. Схема структуры 27x21 м с опиранием по контуру

В частности, для рассматриваемого примера можно оставить только один угловой несмещаемый узел, а в остальных опорных узлах оставить только вертикальные связи, то картина усилий изменится. Проведенный расчет показал, что сечения типоразмеров несколько изменились и масса структуры составила 14,16 кг/м<sup>2</sup>, т.е. увеличилась на  $(14,16 - 13,31)/13,31 = 6,4\%$ .

В реальных расчетах нужно принимать такие опорные закрепления, которые соответствуют конструктивным решениям опорных узлов. Отметим также, что уменьшение числа несмещаемых узлов приводит к снижению общей жесткости и увеличению прогибов структуры.

### **Введение дополнительных нагрузок.**

Допустим, что кроме постоянной и снеговой нагрузок, заданных при генерации схемы, нужно еще ввести дополнительно вертикальную сейсмическую нагрузку. Рассмотрим ранее решенный пример структуры 24x30 м с капителя-

ми; в меню «Файл-Параметры» введем параметры сейсмической нагрузки, интенсивность нагрузки примем 7,8 и 9 баллов.

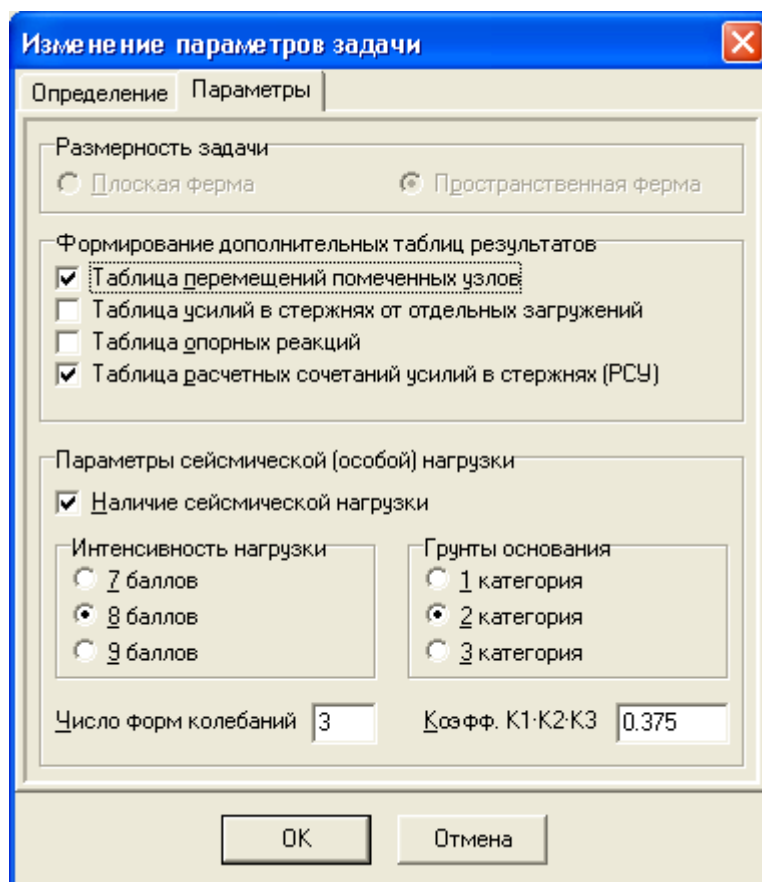


Рис. 2.6. Ввод параметров сейсмической нагрузки

Распределенную сейсмическую нагрузку приложим в узлах верхнего пояса через один (рис. 2.7), при этом сосредоточенные силы для средних узлов, узлов вдоль контура и угловых узлов составят соответственно

$$\begin{aligned}m_1 &= 1,925 \cdot 6 \cdot 6 = 69,3 \text{ кН;} \\m_2 &= 1,925 \cdot 3 \cdot 6 = 34,65 \text{ кН;} \\m_3 &= 1,925 \cdot 3 \cdot 3 = 17,325 \text{ кН.}\end{aligned}$$

На вкладке «Данные» введем новую группу загрузений и исправим коэффициенты сочетаний с учетом наличия особой нагрузки. Затем введем загрузение вертикальной сейсмической нагрузкой и сами узловые нагрузки. Схема расположения сосредоточенных сил показана на рис. 2.7.

Результаты расчета показали, что при интенсивности сейсмической нагрузки 7,8 и 9 баллов увеличения массы структуры не происходит – это объясняется незначительным пролетом конструкции. Периоды собственных коле-

баний структуры для заданных 3-х форм составили соответственно 0,304, 0,281 и 0,267 секунды.

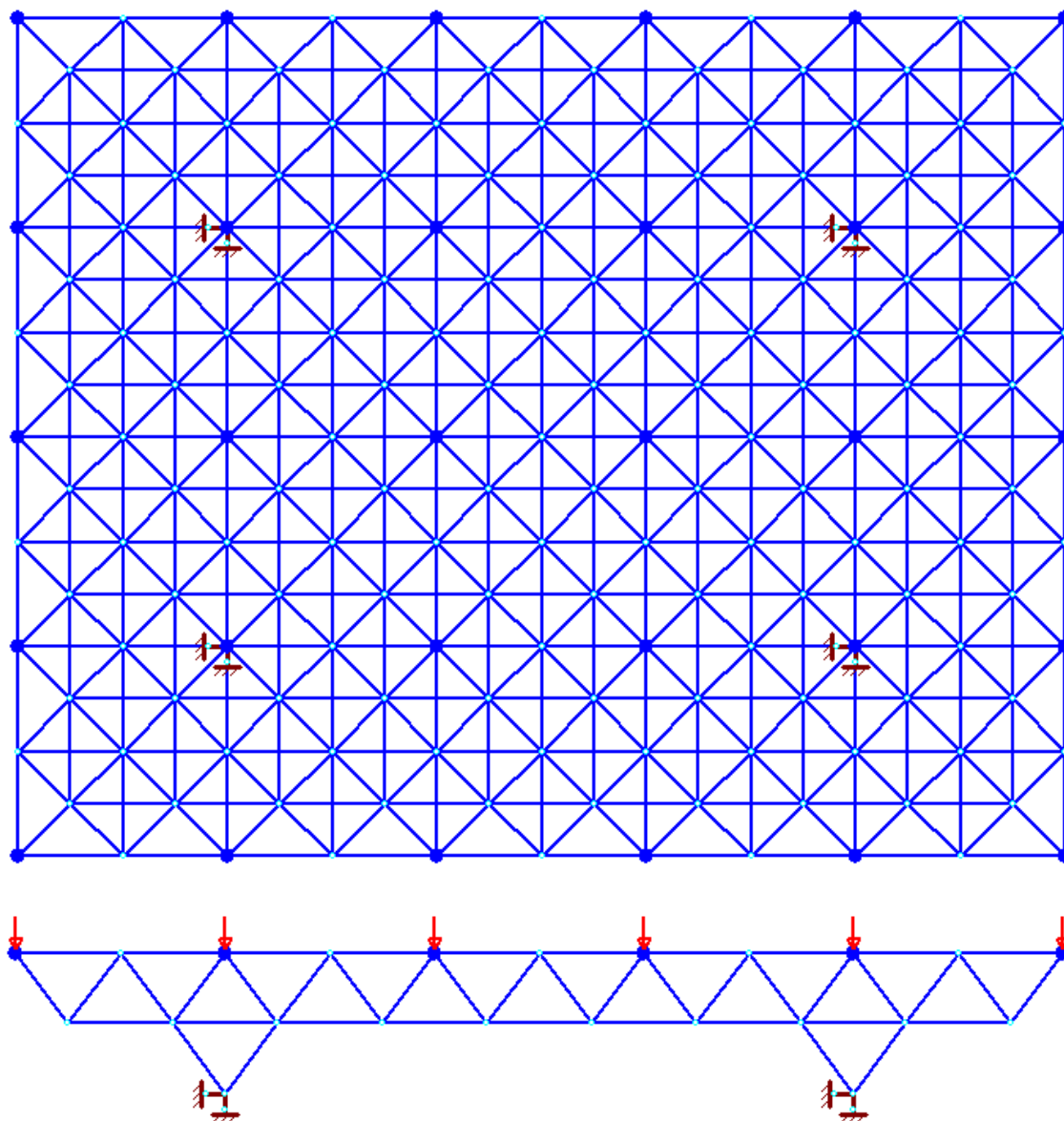


Рис. 2.7. Схема расположения сосредоточенных сил для расчета на сейсмическую нагрузку

#### ***2.4. Сравнительный анализ структур типовых пролетов***

Рассмотрим квадратные в плане структуры размерами 24x24, 30x30 и 36x36 м с капителями и без капителей. Структуры имеют консольные свесы и опираются на 4 колонны. При наличии капителей пролеты структур в осях колонн составляют соответственно 12x12, 18x12 и 24x24 м. При отсутствии капителей пролеты составят 15x15, 21x21 и 27x27 м.

Такие конструкции могут использоваться в покрытиях промышленных зданий различного назначения, а также в гражданских зданиях зрелищного,

спортивного и торгового назначения. При этом расположение колонн и величины консольных свесов могут отличаться от предложенных выше.

При анализе структур с типовыми схемами рассмотрим влияние таких факторов, как наличие капителей, различные типы сечений стержней и конструкции узлов, а также использование различных марок стали.

### **Структуры 24x24 м.**

Создадим задачи и сгенерируем схемы структур 24x24 м с капителями и без капителей, высота структуры – 1,5 м (рис. 2.8, 2.9). Первоначально примем сечения стержней из круглых труб, а расчетное сопротивление стали – 230 МПа. Далее эти параметры будем варьировать.

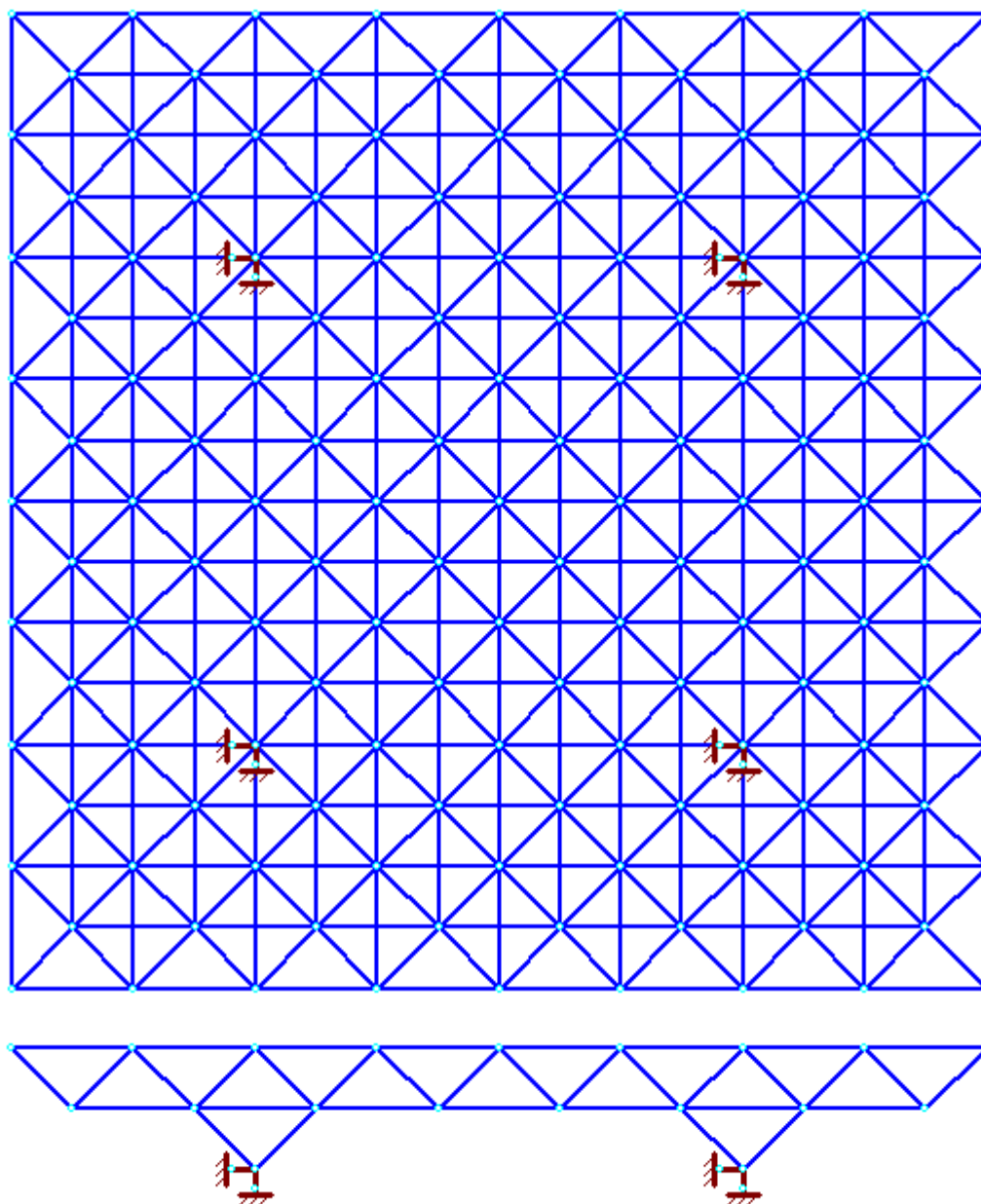


Рис. 2.8. Схема структуры 24x24 м с капителями

Выполнив расчет, получим массу 6312 кг, или 11 кг/м<sup>2</sup>. Наибольшее сечение имеют стержни капителей – из трубы 127x3 мм; пояса имеют сечение 83x2, а раскосы – 89x2 мм. Отметим, что ввиду малого пролета большинство стержней недогружены.

Аналогично выполним расчет для структуры без капителей (рис. 2.9). Масса получилась равной 10646 кг, или 18,48 кг/м<sup>2</sup>. Столь значительная разница с предыдущим примером объясняется тем, что теперь опорные раскосы имеют максимальной сечение из трубы 127x3 мм, но поскольку все раскосы выполнены из одного типоразмера, то масса структуры почти вдвое больше, чем при наличии капителей.

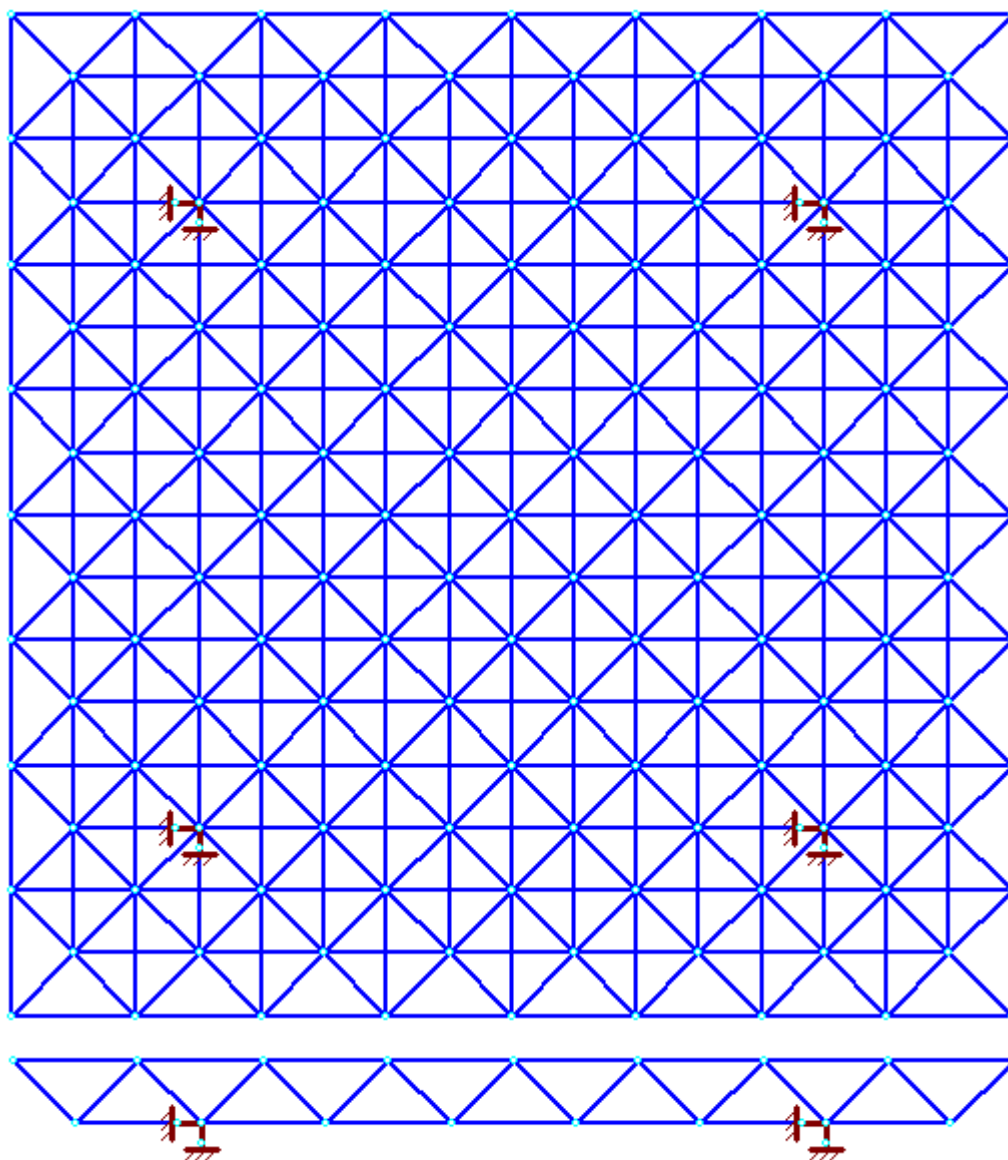


Рис. 2.9. Схема структуры 24x24 м без капителей

Поэтому в случае отсутствия капителей опорные раскосы нужно выделять в отдельный типоразмер. Присвоив каждой четверке раскосов над колоннами типоразмер 4, после расчета получим массу 7292 кг, или 12,66 кг/м<sup>2</sup>. При этом опорные раскосы имеют максимальное сечение 127х3 мм, а остальные раскосы – 83х2 мм. Тем не менее, структура без капителей оказалась тяжелее на 13,1%.

Структуры из круглых труб имеют наилучшие показатели расхода металла, но по конструктивным соображениям могут применяться описанные в гл. 1 системы из уголков, швеллеров и гнутых профилей. Сравним показатели трубчатых и уголковых структур, для чего в примере без капителей на вкладке «Данные-Типоразмеры» заменим трубы на одиночные уголки. На вкладке «Нормативы» установим расчет по минимальному радиусу инерции.

Масса уголковой структуры получилась равной 20056 кг, что в 2,75 раза больше, чем у трубчатой структуры. Понятно, что использование такой системы нецелесообразно, но уголки можно использовать для малонагруженных стержней при использовании в поясах более жестких профилей – например, из швеллеров или двутавров.

При замене одиночных уголков на спаренные, без учета минимального радиуса инерции, масса структуры снижается до 17654 кг, но и этот показатель превышает массу трубчатой структуры в 2,42 раза. Поэтому замена труб на другие профили может быть оправдана только соображениями доступности профилей и упрощения узловых соединений.

Рассмотрим также влияние прочности стали на показатели структурных конструкций. Примем расчетное сопротивление стали равным 270 МПа – в 1-ом случае для всех типоразмеров, а во втором случае – только для поясов.

Результаты расчета следующие. При использовании стали повышенной прочности во всех типоразмерах удельная масса структура составила 10,9 кг/м<sup>2</sup>, а при использовании обычной стали 11 кг/м<sup>2</sup>, т.е. масса практически не изменилась. Если же сталь повышенной прочности используется только в поясах, то масса составит 11,73 кг/м<sup>2</sup>, т.е. увеличилась на 6,6%. Объясняется это тем, что

многие стержни недогружены, поэтому повышение прочности стали для них не имеет значения.

### Структуры 30х30 м.

Создадим задачи и сгенерируем схемы структур 30х30 м с капителями и без капителей, высота структуры также 1,5 м (рис. 2.10, 2.11). По результатам предыдущего примера рассматриваем только сечения стержней из круглых труб, а расчетное сопротивление стали – 230 МПа.

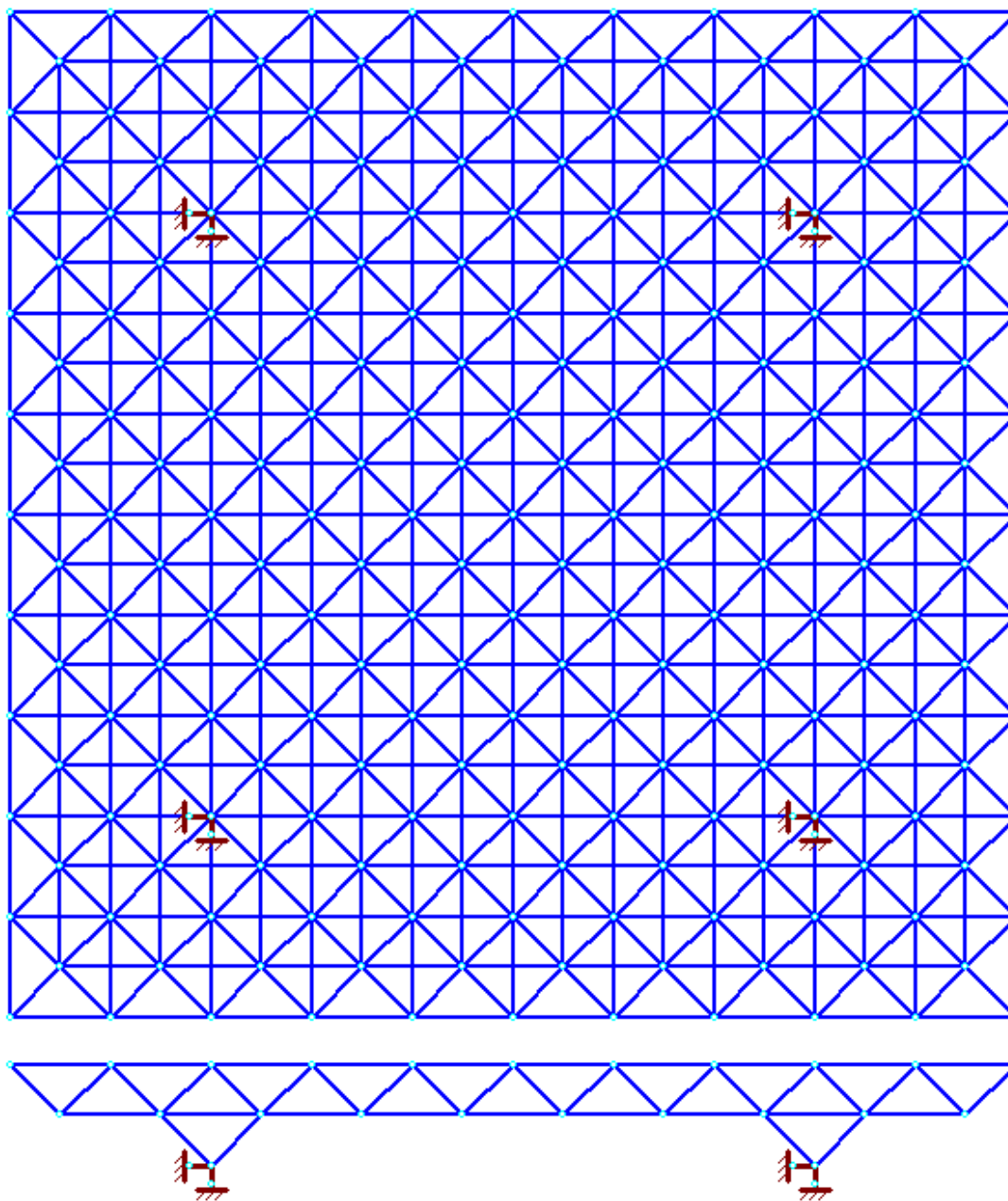


Рис. 2.10. Схема структуры 30х30 м с капителями

Выполнив расчет, получим массу 16248 кг, или 18,05 кг/м<sup>2</sup>. Наибольшее сечение имеют стержни капителей – из трубы 152x4 мм; пояса имеют сечение 89x3, а раскосы – 114x3 мм. Здесь также большинство стержней недогружены.

Аналогично выполним расчет для структуры без капителей (рис. 2.11). При этом сразу выделим опорные раскосы в отдельный типоразмер. Масса получилась равной 20552 кг, или 22,84 кг/м<sup>2</sup>. Увеличение массы по сравнению со структурой без капителей составило 26,5%.

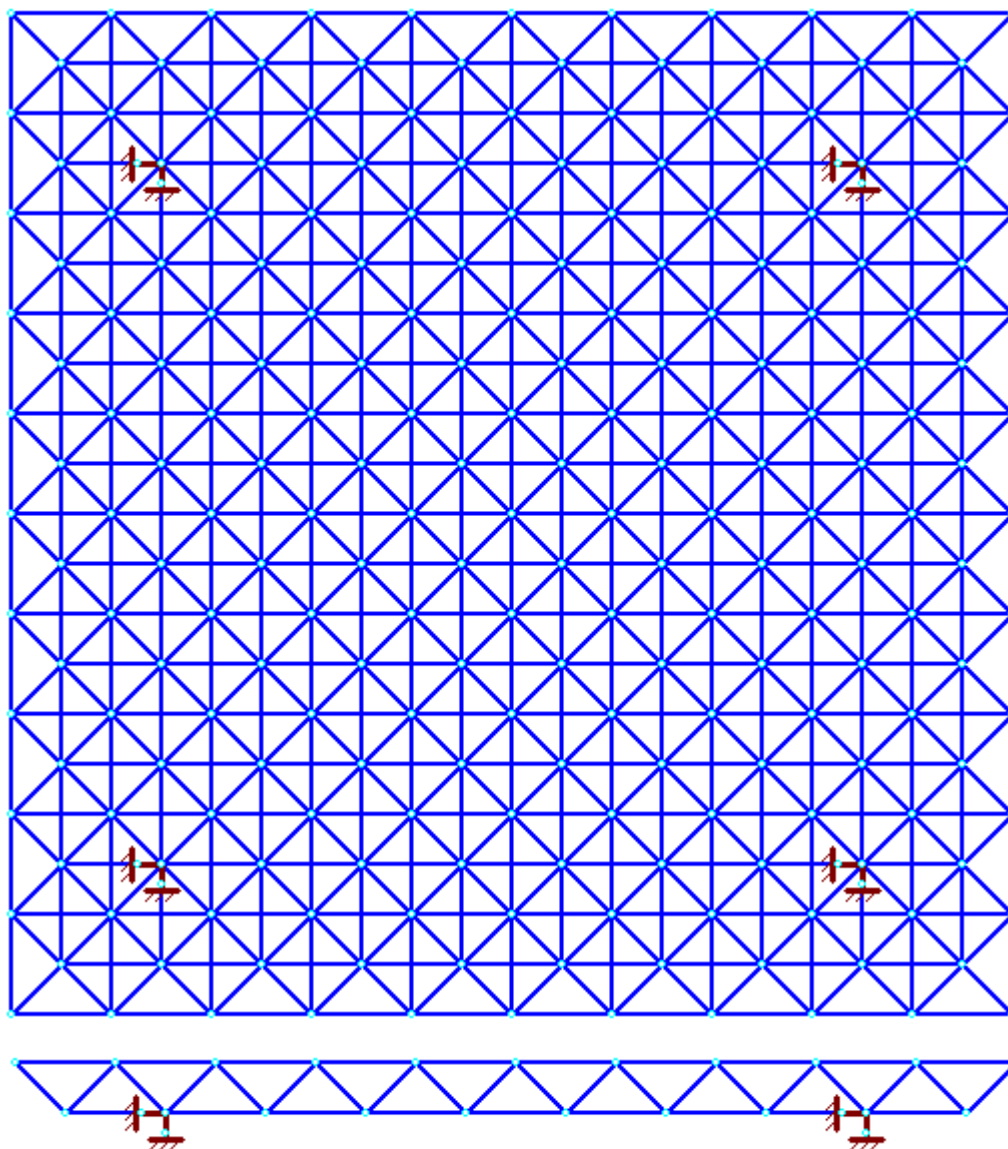


Рис. 2.11. Схема структуры 30x30 м без капителей

### **Структуры 36x36 м.**

Создадим задачи и сгенерируем схемы структур 36x36 м с капителями и без капителей, высота структуры 1,8 м (рис. 2.12, 2.13). По результатам преды-

дущих примеров рассматриваем только сечения стержней из круглых труб, а расчетное сопротивление стали – 230 МПа.

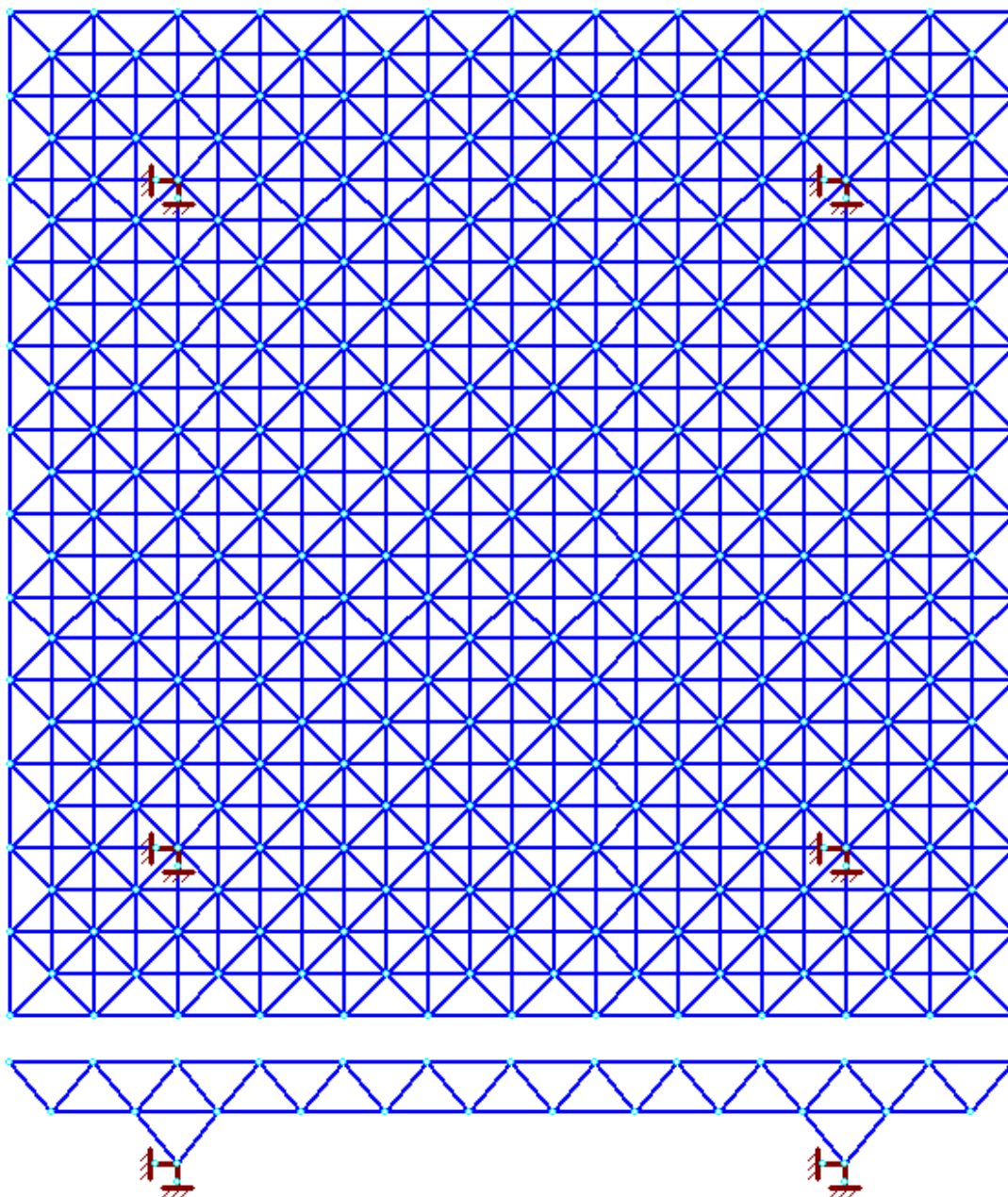


Рис. 2.12. Схема структуры 36x36 м с капителями

Выполнив расчет, получим массу 38556 кг, или 29,75 кг/м<sup>2</sup>. Наибольшее сечение имеют стержни капителей – из трубы 219x5 мм; пояса имеют сечение 127x3, а раскосы – 159x3,5 мм. Здесь также большинство стержней недогружены.

Аналогично выполним расчет для структуры без капителей (рис. 2.13). При этом сразу выделим опорные раскосы в отдельный типоразмер. Масса получи-

лась равной 42976 кг, или 33,16 кг/м<sup>2</sup>. Увеличение массы по сравнению со структурой без капителей составило 11,46%.

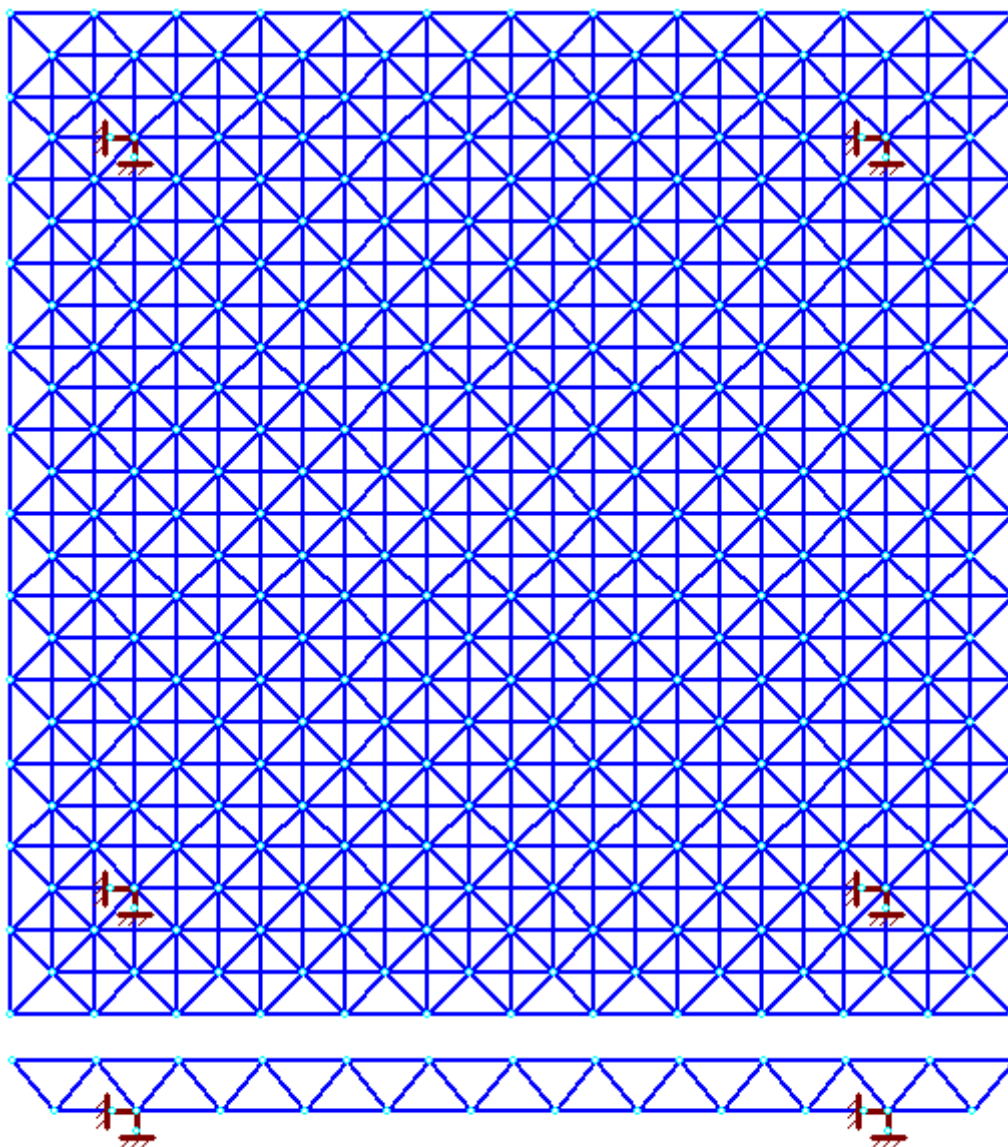


Рис. 2.12. Схема структуры 36x36 м без капителей

Полученные данные сведем в таблицу.

Размеры структуры (м)	Высота (м)	Наибольший профиль	С капителями		Без капителей	
			кг/м <sup>2</sup>	%	кг/м <sup>2</sup>	%
24x24	1,5	Труба 127x3	11,0	100	12,66	113,1
30x30	1,5	Труба 152x4	18,1	100	22,84	126,5
36x36	1,8	Труба 219x5	29,8	100	33,16	111,5

Как видно по результатам проведенного анализа, структуры с опиранием через капители экономичнее по сравнению с непосредственным опиранием через нижние пояса на 11-26%, поэтому при отсутствии каких-либо ограничений

следует применять капители, тем более что и с архитектурной точки зрения такое опирание выглядит привлекательнее.

С увеличением размеров структуры в плане расход стали нарастает быстрее, чем пролет, к тому же профили стержней становятся очень большими. Поэтому дальнейшее увеличение пролетов без специальных мероприятий, рассмотренных в гл. 3, нецелесообразно.

Кроме того, нецелесообразно применение уголковых профилей в стержнях, а также сталей повышенной и высокой прочности.

## ***2.5. Выводы по главе***

## Глава 3. Оптимизация структур больших пролетов

Как показано в главе 2, структуры типовых пролетов (до 36 м) имеют небольшую металлоемкость, поэтому для них оптимизация дает незначительную экономию и можно принимать те параметры, которые рекомендуются в литературе или генерируются программой. Учет вертикальной сейсмической нагрузки при таких пролетах также не требуется.

Однако при больших пролетах (48 м и более) оптимизация параметров структур может дать значительную экономию стали, при этом необходимо учитывать влияние собственного веса и вертикальной сейсмической нагрузки. К числу варьируемых параметров следует отнести высоту структуры, схему опирания и схему унификации стержней. Примем для анализа структуры размерами в плане 57х57 и 69х69 без капителей и с консолями по 4,5 м; пролеты структур составят соответственно 48х48 м и 60х60 м.

При генерации расчетной схемы принимается опирание структуры в 4-х точках, однако при столь больших пролетах оно неэффективно и приводит к большому расходу стали. Поэтому примем дополнительные опоры вдоль контура с шагом 12 м.

### *3.1. Учет собственного веса структур*

Для учета собственного веса расчет структуры приходится выполнять дважды – 1-ый раз для определения веса и добавления его в постоянную нагрузку, и 2-ой раз с уточненной постоянной нагрузкой. При этом имеем в виду то, что первоначально собственный вес принят равным 30 кг/м<sup>2</sup>.

#### **Структура 57х57 м.**

Примем высоту структуры 3 м. После генерации расчетной схемы добавим опорные крепления, после чего получим окончательную схему (рис. 3.1). Выполнив расчет с заменой профилей, получим сечения типоразмеров и массу структуры (рис. 3.2). Наибольший полученный профиль – труба 168х4,5 мм, общая масса – 151547 кг, удельная масса  $151547/(57 \cdot 57) = 46,64$  кг/м<sup>2</sup>.

Уточненная постоянная нагрузка будет равна:

$$1,75 - 0,3 + 0,4664 * 1,05 = 1,94 \text{ кН/м}^2.$$

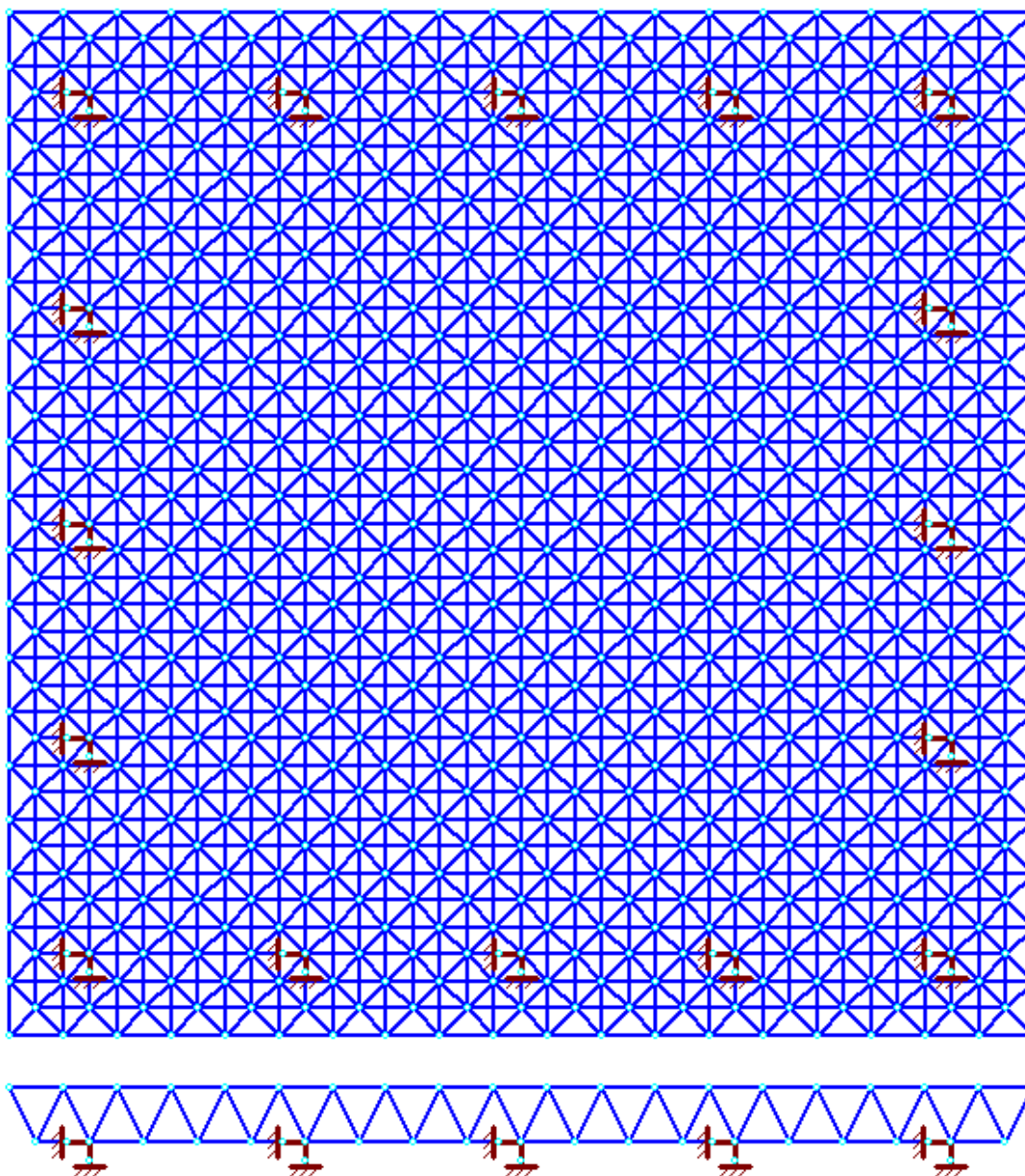


Рис. 3.1. Схема структуры 57x57 м

Выполним расчет повторно с уточненной постоянной нагрузкой. Удельная масса составила  $52 \text{ кг/м}^2$ , однако следующее приближение делать не будем, так как при оптимизации масса фермы уменьшится.

### **Структура 69x69 м.**

Примем высоту структуры  $3,75 \text{ м}$  и выполним все процедуры по аналогии с предыдущим примером. На рис. 3.3 показан протокол расчета – в данном случае порядок матрицы жесткости равен  $3255$ , время расчета –  $13 \text{ секунд}$ . Наибольший профиль – труба  $194 \times 5$ , удельная масса равна  $64,06 \text{ кг/м}^2$ . Уточненная постоянная нагрузка будет равна:

$$1,75 - 0,3 + 0,6406 * 1,05 = 2,12 \text{ кН/м}^2.$$

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	168x4	168x4	36869.88	36869.88	100.00
2	Труба круглая	168x4,5	168x4,5	37209.94	37209.94	100.00
3	Труба круглая	152x4	152x4	77466.99	77466.99	100.00
Всего:				151546.81	151546.81	100.00

Рис. 3.2. Сечения типоразмеров и масса структуры

Выполним расчет повторно с уточненной постоянной нагрузкой. Удельная масса составила  $71,3 \text{ кг/м}^2$ .

**Расчет фермы**

Общие параметры системы

- Количество узлов фермы: **1105**
- Количество стержней фермы: **4232**
- Количество загружений: **2**
- Порядок матрицы жесткости: **3255**
- Ширина ленты матрицы: **1731**

Параметры сейсмической нагрузки

- Количество динамических масс: **0**
- Количество форм колебаний: **0**

Затраченное время: **00:00:13**

Выполнение расчета:

**Расчет успешно завершен!**

OK

Рис. 3.3. Протокол расчета структуры 69x69 м

### 3.2. Оптимальная высота структурных плит

Для структурных плит рекомендуется высота  $h = (1/15-1/20)L$ , однако более точное значение можно найти только путем сравнения вариантов конструк-

ции с разной высотой. С помощью программы «SteelTruss» этот процесс становится реально возможным. Итак, продолжим анализ рассмотренных выше структур.

### Структура 57x57 м.

Пролет структуры равен  $L = 48$  м, поэтому за основу примем уже решенный пример с высотой 3 м ( $L/16$ ). Далее изменяем высоту в обе стороны до тех пор, пока масса структуры не начнет возрастать; при этом будем определять и проверять прогиб структуры в центре.

Чтобы не создавать всякий раз новую задачу, будем использовать групповое изменение координаты  $Z$  в уже решенной задаче. Для этого выделяем все узлы верхнего пояса и вызываем окно «Изменение данных» (рис. 3.4).

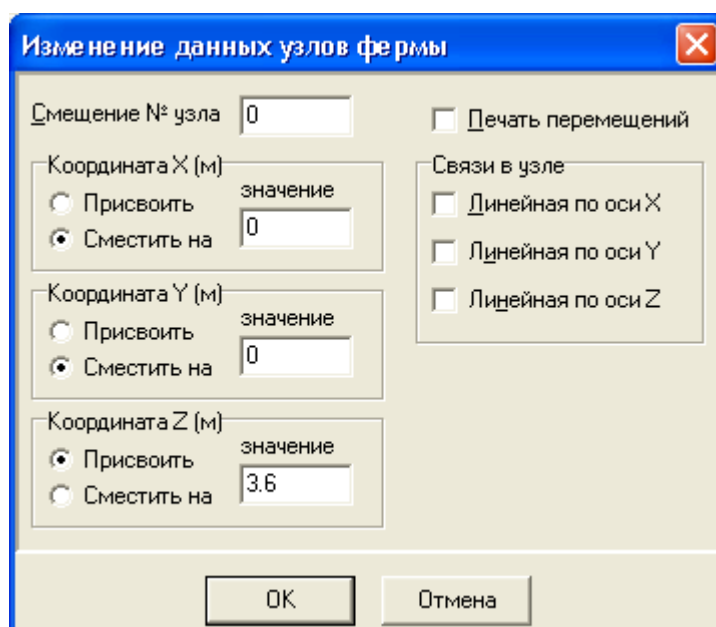


Рис. 3.4. Групповое изменение данных (координаты  $Z$ )

Результаты расчетов сведем в таблицу 3.1. Здесь следует иметь в виду, что масса структуры определяется по реально подобранным сечениям стержней, поэтому из-за дискретности сортамента зависимость масса/высота не является непрерывной функцией.

Таблица 3.1. Зависимость параметров структуры 57x57 м от высоты

Высота, м	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Высота, $h/L$	1/18,5	1/17,1	1/16	1/15	1/14,1	1/13,3	1/12,6	1/12
Масса, кг/м <sup>2</sup>	53,05	51,96	51,92	49,46	50,06	49,38	49,52	49,44
Масса, %	102,2	100,1	100	95,3	96,4	95,1	95,4	95,1
Прогиб, см	12,59	11,77	10,89	10,72	9,79	9,46	9,02	8,83

Прогиб, $f/L$	1/381	1/408	1/441	1/448	1/490	1/507	1/532	1/544
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Как видно из таблицы, при высоте структуры 3,2-4 м масса изменяется незначительно, но при высоте менее 3 м она возрастает, к тому же прогиб становится больше допустимого ( $L/400$ ). Поэтому в данном случае можно принять в качестве оптимальной высоту 3,2 м ( $L/15$ ), увеличение высоты сверх этого значения нецелесообразно ввиду неоправданного увеличения площади стенового ограждения по торцам структуры.

### **Структура 69х69 м.**

Пролет структуры равен  $L = 60$  м, поэтому за основу примем уже решенный пример с высотой 3,75 м ( $L/16$ ). По аналогии с предыдущим примером будем варьировать высоту в обе стороны, а результаты сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. Зависимость параметров структуры 69х69 м от высоты

Высота, м	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Высота, $h/L$	1/17,6	1/16,7	1/15,8	1/15	1/14,3	1/13,6	1/13	1/12,5
Масса, кг/м <sup>2</sup>	73,2	70,98	71,71	70,67	71,96	71,57	73,2	74
Масса, %	102	99	100	98,5	100,3	99,8	102	103,2
Прогиб, см	16,43	15,56	14,39	14,36	13,3	12,96	12,06	11,53
Прогиб, $f/L$	1/365	1/386	1/417	1/418	1/451	1/463	1/497	1/520

Здесь видно, что наименьшая масса будет при высоте 4 м ( $L/15$ ). При высоте 3,6 м и меньше прогиб структуры превышает допустимый, а при высоте 4,6 м и более масса начинает возрастать.

Таким образом, оптимальная по массе высота структуры равна  $L/15$ - $L/16$ ; при определении высоты путем сравнения вариантов необходимо проверять прогибы структуры.

### ***3.3. Оптимальная унификация типоразмеров стержней***

При генерации схемы структуры принимаются только 3 типоразмера стержней – для верхнего пояса, нижнего пояса и раскосов. При наличии капителей их стержни являются 4-ым типоразмером.

Однако при больших пролетах усилия в стержнях одного типоразмера сильно различаются, поэтому многие стержни являются недогруженными. Для

экономии стали желательно разбить каждый типоразмер на два – центральный и приконтурный. Выполним эту процедуру для наших примеров и оценим получаемую экономию.

### Структура 57x57 м.

Примем оптимальную высоту структуры 3,2 м, и сделаем только одну опору несмещаемой, а остальные будут только вертикальными. Выполним расчет такой структуры – соответствующая спецификация приведена на рис. 3.5. Удельный расход стали будет равен 40,02 кг/м<sup>2</sup>.

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	168x4	168x4	36869.88	36869.88	100.00
2	Труба круглая	127x4,5	108x5,5	27867.19	28511.51	102.31
3	Труба круглая	140x3,5	140x3,5	65279.50	65279.50	100.00
Всего:				130016.57	130660.90	100.50

Рис. 3.5. Результаты расчета для базовых типоразмеров

Для верхних поясов выделим центральную зону 27x27 м и присвоим всем стержням этой зоны типоразмер 4; для периферийных стержней остается типоразмер 1 (рис. 3.6). Для выполнения этой процедуры выделим все стержни центральной зоны и используем групповое изменение данных.

Аналогично для нижних поясов выделим центральную зону и присвоим ее стержням типоразмер 5. Для раскосов также выделим центральную зону, ограниченную узлами поясов с типоразмерами 4 и 5, и присвоим ее стержням типоразмер 6.

Отметим, что расчет структуры с измененной расчетной схемой всегда

лучше начинать с минимальных сечений типоразмеров – это обеспечивает лучшую сходимость итерационного процесса решения.

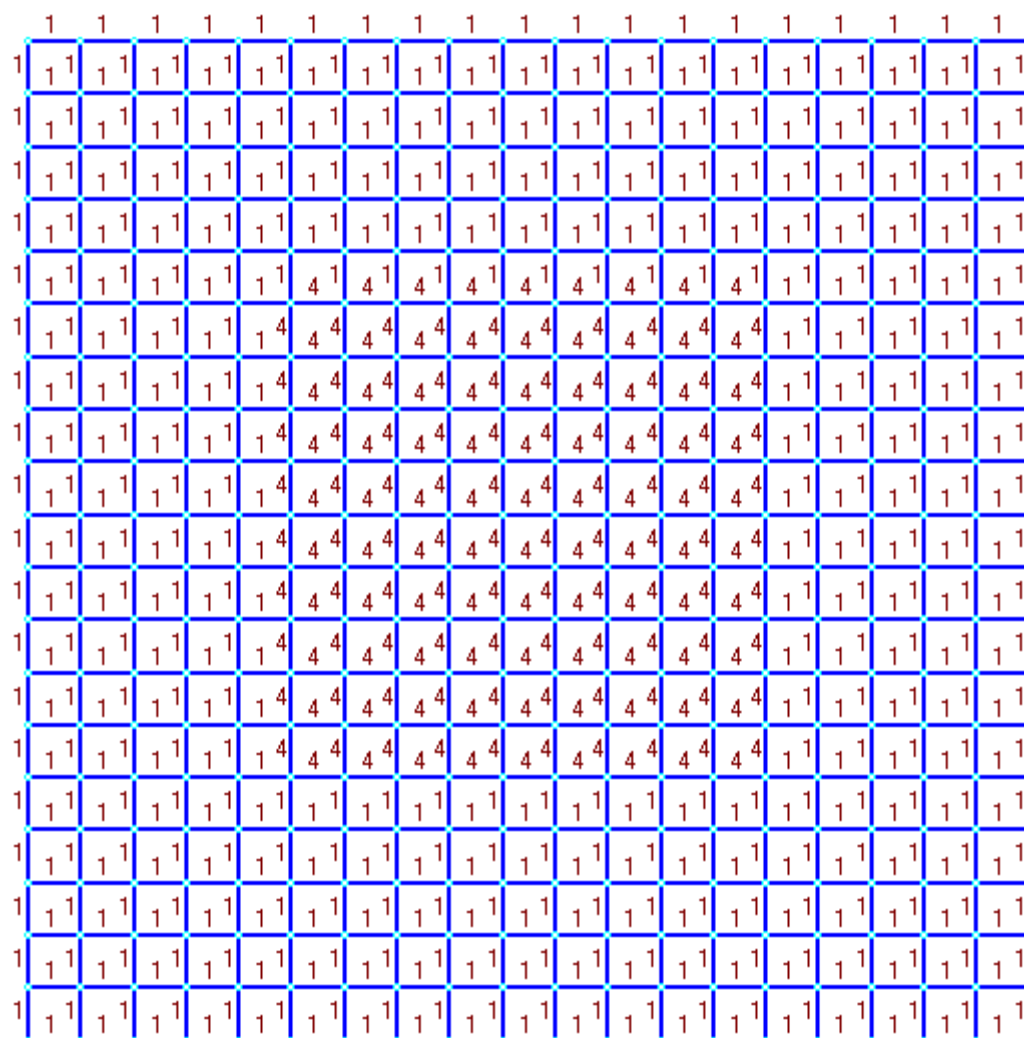


Рис. 3.6. Разбивка стержней верхнего пояса на типоразмеры

Результаты расчета структуры с оптимизированной унификацией стержней показаны на рис. 3.7. Удельный расход стали равен 33,12 кг/м<sup>2</sup>. Экономия стали за счет унификации составит  $(40,02 - 33,12) / 40,02 = 17,2\%$ , что является очень хорошим результатом.

Процесс унификации можно продолжить, добавляя новые типоразмеры, однако дополнительная экономия будет уже незначительной, а трудоемкость изготовления будет возрастать. Поэтому достаточно назначить по два типоразмера на верхние пояса, нижние пояса и раскосы.

Сравнение результатов по рис. 3.5 и 3.7 показывает, что типоразмеры 4-6 для центральной зоны структуры отличаются от первоначальных, что объясняется перераспределением жесткостей структурной плиты.

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	140x3,5	140x3,5	20488.50	20488.50	100.00
2	Труба круглая	95x4,5	95x4,5	16277.76	16277.76	100.00
3	Труба круглая	140x3,5	140x3,5	50632.30	50632.30	100.00
4	Труба круглая	159x4,5	159x4,5	9241.02	9241.02	100.00
5	Труба круглая	108x5,5	108x5,5	6002.42	6002.42	100.00
6	Труба круглая	83x2	83x2	4980.05	4980.05	100.00
			Всего:	107622.06	107622.06	100.00

Рис. 3.7. Результаты расчета для оптимизированных типоразмеров

### **Структура 69x69 м.**

Примем оптимальную высоту структуры 4 м, и сделаем только одну опору несмещаемой, а остальные будут только вертикальными. Выполним расчет такой структуры – соответствующая спецификация приведена на рис. 3.8. Удельный расход стали будет равен 53,87 кг/м<sup>2</sup>.

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	219x4	219x4	70197.84	70197.84	100.00
2	Труба круглая	159x5	159x5	57674.89	57674.89	100.00
3	Труба круглая	159x3,5	159x3,5	128605.15	128605.15	100.00
			Всего:	256477.88	256477.88	100.00

Рис. 3.8. Результаты расчета для базовых типоразмеров

Для верхних поясов выделим центральную зону 33x33 м и присвоим всем стержням этой зоны типоразмер 4. Аналогично для нижних поясов выделим центральную зону и присвоим ее стержням типоразмер 5. Для раскосов также выделим центральную зону, ограниченную узлами поясов с типоразмерами 4 и 5, и присвоим ее стержням типоразмер 6.

Результаты расчета структуры с оптимизированной унификацией стержней показаны на рис. 3.9. Удельный расход стали равен 45,88 кг/м<sup>2</sup>. Экономия стали за счет унификации составит  $(53,87 - 45,88) / 53,87 = 14,8\%$ , что примерно соответствует результату для структуры 57x57 м.

№ типа	Тип сечения	Расч. профиль	Прин. профиль	Расч. масса	Прин. масса	Прин. в %
1	Труба круглая	168x4	168x4	40750.92	40750.92	100.00
2	Труба круглая	108x5,5	108x5,5	33013.33	33013.33	100.00
3	Труба круглая	159x3,5	159x3,5	99188.85	99188.85	100.00
4	Труба круглая	194x5	194x5	18465.08	18465.08	100.00
5	Труба круглая	152x5,5	152x5,5	13107.93	13107.93	100.00
6	Труба круглая	89x3	89x3	13934.04	13934.04	100.00
			Всего:	218460.15	218460.15	100.00

Рис. 3.9. Результаты расчета для оптимизированных типоразмеров

### 3.4. Учет влияния сейсмической нагрузки

Далее будем рассматривать оптимизированные структуры размерами 57x57 и 69x69 м. Сосредоточенные сейсмические силы будем находить по ранее найденной распределенной сейсмической нагрузке 1,925 кн/м<sup>2</sup> с приложением их узлы по сетке 9x9 или 12x12 м. Интенсивность сейсмической нагрузки будем принимать равной 7,8 и 9 баллов.

### Структура 57x57 м.

Сейсмические силы прикладываем в узлах нижнего пояса, распределив общую нагрузку на 25 узлов. Узловые сейсмические силы будут равны

$$m_1 = 1,925 \cdot 57 \cdot 57 / 25 = 250,17 \text{ кн.}$$

Расположение сейсмических масс показано на плане нижнего пояса структуры (рис. 3.10). Для сейсмической нагрузки примем 5 форм колебаний и 2-ю категорию грунта.

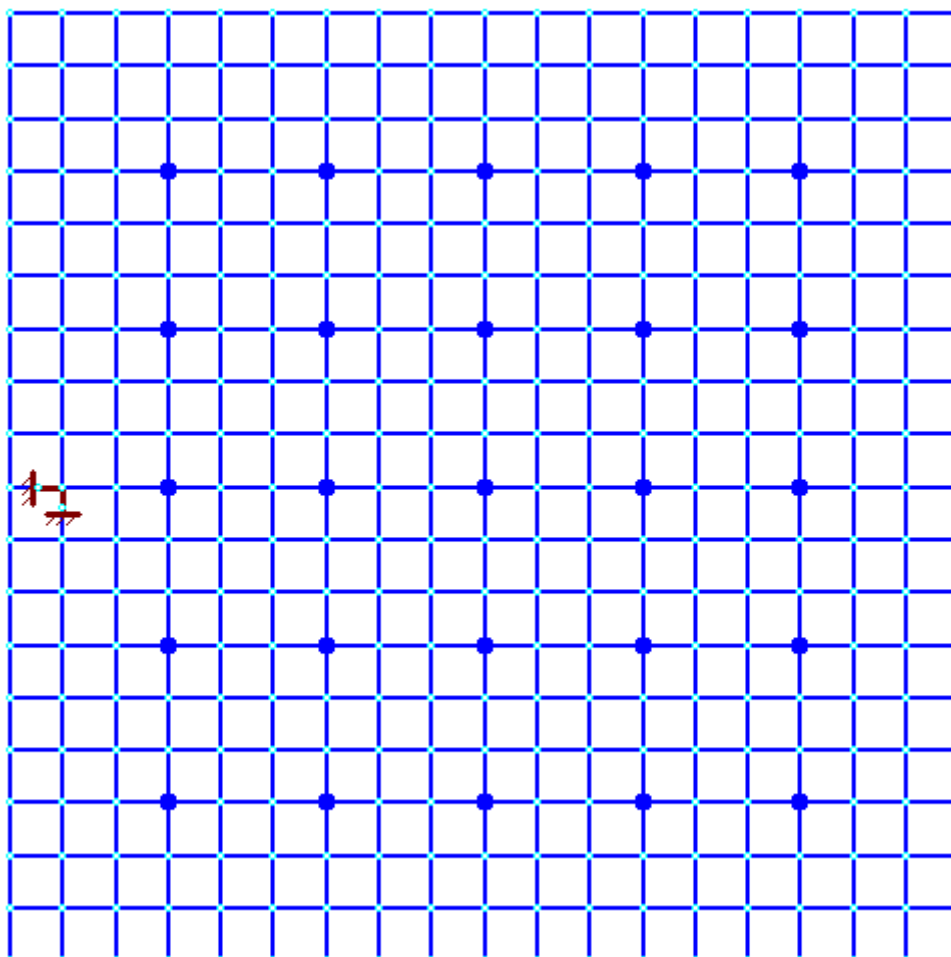


Рис. 3.10. Расположение сейсмических масс в узлах

Результаты расчета с учетом сейсмического нагружения следующие. При сейсмичности 7 и 8 баллов изменения сечений типоразмеров не произошло. Хотя в некоторых стержнях расчетными являются особые сочетания нагрузок, но за счет имеющихся запасов несущей способности сечения не увеличились. Период 1-го тона собственных колебаний составил 0,769 секунды.

При сейсмичности 9 баллов сечения некоторых типоразмеров увеличились, при этом общая масса структуры возросла на 4,6%. Период 1-го тона собственных колебаний при изменившихся жесткостях составил 0,731 секунды.

### Структура 69х69 м.

Узловые сейсмические силы будут равны

$$m_1 = 1,925 \cdot 69 \cdot 69 / 25 = 366,6 \text{ кн.}$$

Расположение сейсмических масс показано на плане нижнего пояса структуры (рис. 3.11).

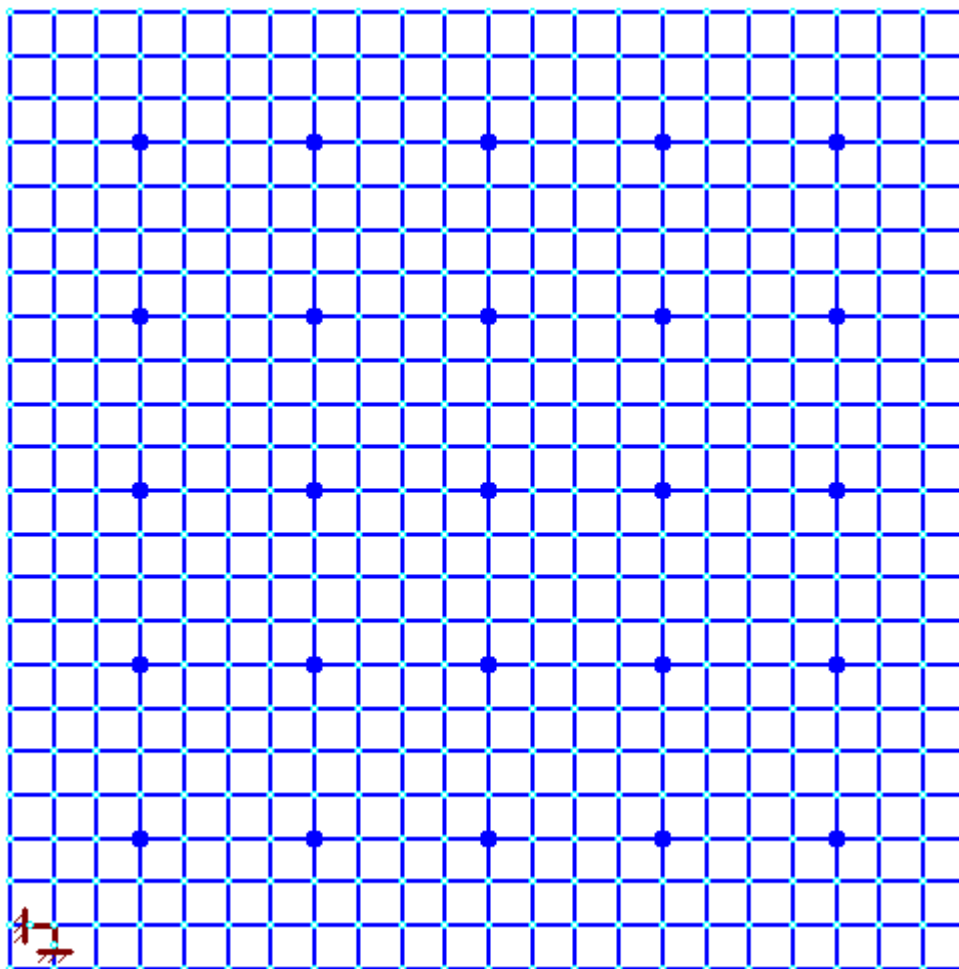


Рис. 3.11. Расположение сейсмических масс в узлах

Протокол расчета данной структуры показан на рис. 3.12. Время расчета с учетом сейсмического нагружения увеличилось с 13 до 24 секунд, при этом обработано 25 динамических масс при 5 формах колебаний.

В данном случае сечения типоразмеров также не изменились при сейсмичности 7 и 8 баллов, хотя расчетными для некоторых стержней оказались особые сочетания нагрузок. Период 1-го тона собственных колебаний составил 0,746 секунды. При сейсмичности 9 баллов некоторые сечения типоразмеров изменились, увеличение массы структуры составило 1,2%. Период 1-го тона собственных колебаний составил 0,739 секунды.

Отметим, что в составе пространственного каркаса (структура вместе с колоннами) следует производить расчет и на горизонтальные сейсмические воздействия. Это необходимо для расчета креплений структуры к колоннам, а также самих колонн.

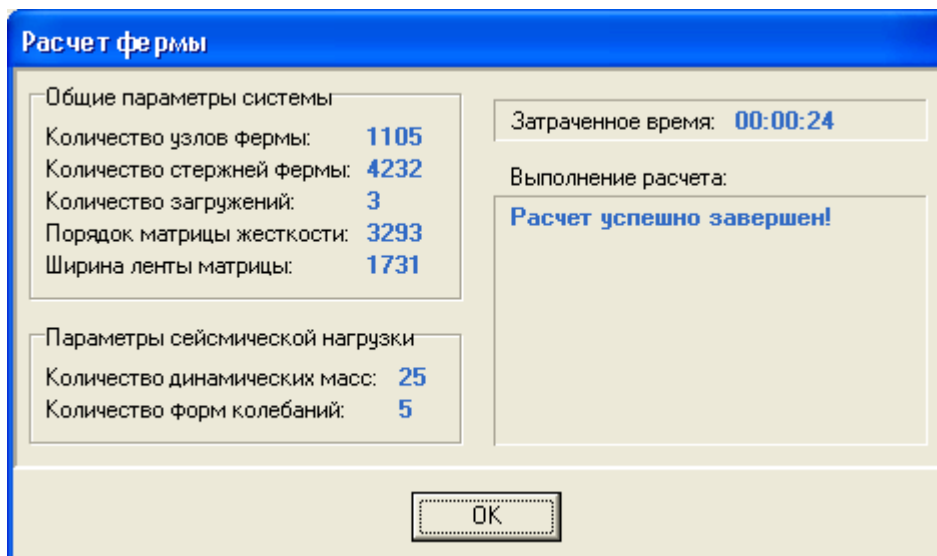


Рис. 3.12. Протокол расчета структуры 69х69 м с учетом сейсмических воздействий

### ***3.5. Многопролетные структуры***

В ряде случаев структуры, перекрывающие большую площадь, могут иметь промежуточные опоры. Например, структура может состоять из 4-х или 9-и структур, образующих единую большую систему. При этом многопролетная структура может быть разрезной или неразрезной.

Разрезная структура состоит несвязанных между собой секций, каждая из которых рассчитывается отдельно. Если же структура неразрезная, то она представляет собой единую конструкцию с опорами как по контуру, так и впролете. В этом случае неразрезность способствует более благоприятному распределению усилий и, соответственно, снижению расхода стали.

Для иллюстрации рассмотрим предыдущие примеры, добавляя одну центральную опору, т.е. превращая большепролетную конструкцию в многопролетную со значительно меньшим пролетом. При этом высота структуры должна соответствовать уменьшенному пролету.

#### **Структура 57х57 м.**

Пролет такой структуры равен 48 м, а оптимальная высота - 3,2 м. При наличии средней опоры пролет каждой из 4-х секций составит 24 м, поэтому высоту примем равной  $24/15 = 1,6$  м. Сделаем среднюю опору несмещаемой, а опоры по контуру будут только вертикальными (рис. 3.13). Унификацию типоразмеров примем вначале минимальной, затем выделим в отдельные типоразмеры приопорные элементы поясов и раскосов.

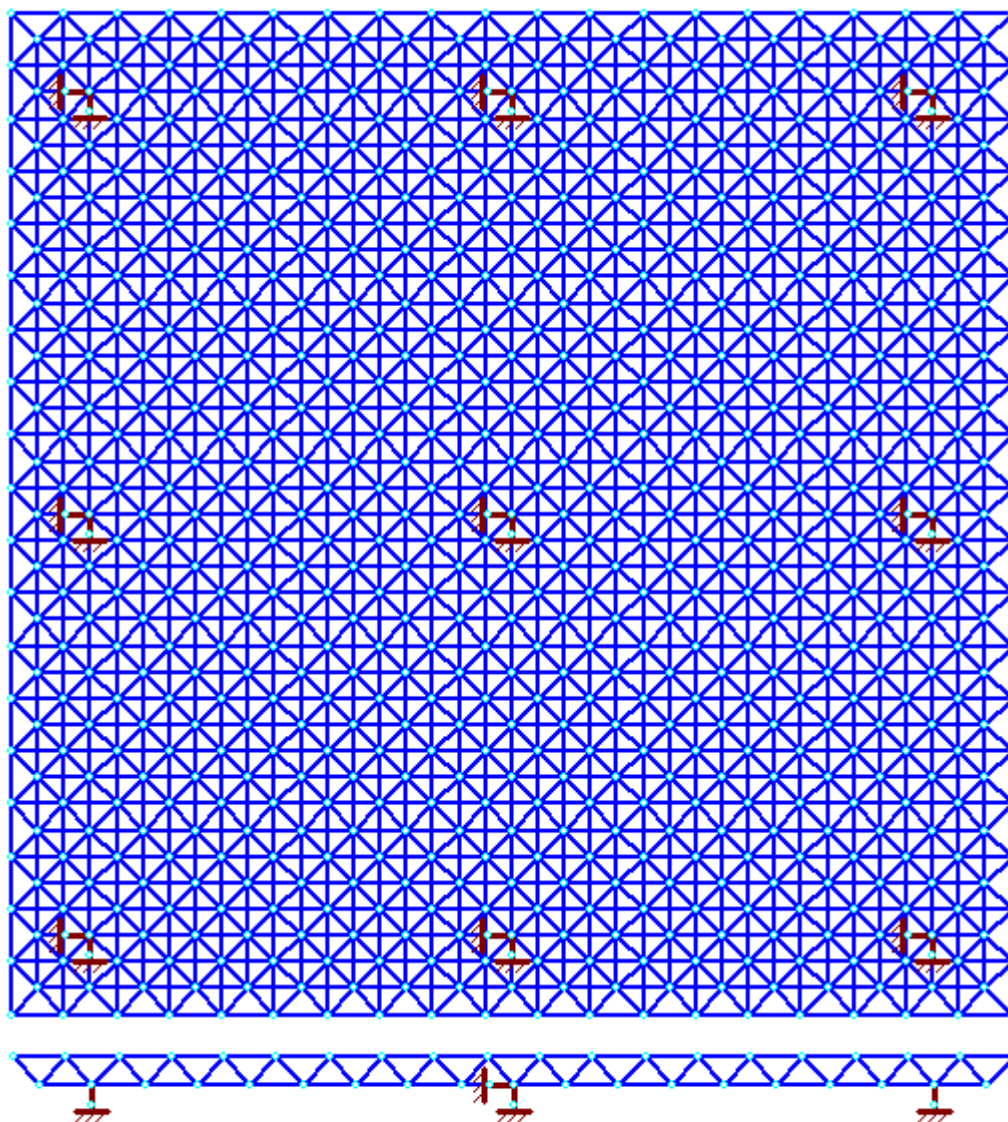


Рис. 3.13. Неразрезная структура из 4-х секций 24x24 м

Выполним расчет такой структуры – соответствующая спецификация приведена на рис.. Удельный расход стали будет равен  $\text{кг/м}^2$ .

### ***3.6. Выводы по главе***

## **Общие выводы и рекомендации**

## **Список использованной литературы:**

### **1. нормативные документы**

### **2. учебник и учебный методический пособия**

### **3. Статьи в научных журналах**

### **4. исполнитель сайтные интернет**

1. Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности проектно-изыскательских организаций». – Проблемы архитектурно-строительной школы, №2, 2008. – 4 с.
2. Каримов И.А. «Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана». – Изд. «Узбекистан», Ташкент, 2009. – 48 с.
3. КМК 2.01.03-96. Строительство в сейсмических районах / Госкомархитекстрой. – Ташкент. 1996. – 127 с.
4. КМК 2.03.05-97. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госкомархитекстрой. – Ташкент. 1997. – 118 с.
5. КМК 2.01.07-96. Нагрузки и воздействия / Госкомархитекстрой. – Ташкент. 1996. – 126 с.
6. Металлические конструкции: Специальный курс. / Под ред. Е.И. Беленя. – М., Стройиздат, 1991. - 687 с.
7. Алдашев М.Б. Исследование оптимальных конструктивных решений металлических ферм с применением компьютерных программ. / Магистерская диссертация. Самарканд, 2009.
8. Металлические конструкции: Учебник для ВУЗов / Под ред. Ю.И. Кудишина. – М., Academia, 2006. - 675 с.
9. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. В 3-х томах. / Под ред. В.В. Кузнецова. - М., изд. АСВ, 1998.
10. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. ЦНИИСК им. Кучеренко. / М., 1984.

11. Трофимов В.И., Бегун Г.Б. Структурные конструкции. / М., Строиздат, 1972.
12. Хисамов Р.И. Расчет и конструирование структурных покрытий. / Киев, Будівельник, 1981.
13. Пространственные конструкции покрытий типа структур. Библиографический указатель. / М., 1977.
14. Каталог легких несущих и ограждающих металлических конструкций и комплектующих металлоизделий для промышленных зданий. Минмонтажспецлегконструкция. / М., Внешторгиздат, 1983.
15. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие под ред. А.С. Городецкого. / Киев-Москва: 2003. – 464 с.
16. Фридман Г.С. Программа «SteelTruss» расчета плоских и пространственных ферм / Инструкция для пользователей и электронная справка. Самарканд, СамГАСИ, 2002.
17. Фридман Г.С. Расчеты стальных ферм с использованием компьютерной программы WinTruss. Строительная механика и расчет конструкций. Материалы международной научно-технической конференции, книга 3. Самарканд, СамГАСИ, 2007. – 6 с.
18. Фридман Г.С. Технико-экономический анализ стальных ферм с использованием компьютерной программы «WinTruss». Проблемы архитектуры и строительства (научно-технический журнал). Самарканд, 2007, №3. – 5 с.
19. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., Стройиздат, 1989. – 214 с.

### **Использованные информационно-технические средства**

- 1) Компьютерная программа «Ли́ра 9.4».
- 2) Компьютерная программа «SteelTruss» (Стальные фермы).
- 3) Компьютерная программа «Microsoft Word 2007».
- 4) Компьютерная программа «Microsoft Excel 2007».

