

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

И.С. БОРИСОВА, И.А. ПОТЕХИН, А.А. САПУНОВА

**Проектирование и расчёт  
пространственных конструкций в деревянном исполнении  
с применением программного комплекса «Лира»**

Учебное пособие  
по курсовому и дипломному проектированию  
для студентов специальностей 270102.65  
«Промышленное и гражданское строительство»,  
270114.65 «Проектирование зданий»  
и направления подготовки 270100.62 «Строительство»  
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО  
Костромская ГСХА  
2013

УДК [624.011.1 + 624.011.78] (075.8)

ББК 38.5

Б 82

*Авторы:* сотрудники кафедры строительных конструкций Костромской ГСХА доцент *И.С. Борисова*; к.т.н., доцент *И.А. Потехин*; преподаватель *А.А. Сапунова*; студенты 4 курса архитектурно-строительного факультета *Н.А. Гончаров, Д.Е. Кириллов, А.В. Лазарёнок, А.Е. Луц.*

*Рецензенты:* к.т.н., профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Московского ГСУ *А.И. Бедов*; генеральный директор завода фахверковых конструкций домов и пространственных несущих конструкций «РусБрус» г. Костромы *А.Е. Иванов.*

*Рекомендовано к изданию*

*методической комиссией архитектурно-строительного факультета,  
протокол № 6 от 11 октября 2012 г.*

**Б 82** **Борисова, И.С.** Проектирование и расчёт пространственных конструкций в деревянном исполнении с применением программного комплекса «Лира» : учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 270102.65 «Промышленное и гражданское строительство», 270114.65 «Проектирование зданий» и направления подготовки 270100.62 «Строительство» очной и заочной форм обучения / И.С. Борисова, И.А. Потехин, А.А. Сапунова и др. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 136 с.

Издание содержит примеры проектирования и расчета пространственных конструкций в деревянном исполнении: коноидной пространственной конструкции, оболочки положительной гауссовой кривизны на эллиптическом плане, сетчатого и ребристого куполов; моделирование этих конструкций разными способами с учётом разных нормативных документов в зависимости от конструктивных особенностей.

Учебное пособие предназначено для студентов 4 и 5 курсов специальностей 270102.65 «Промышленное и гражданское строительство», 270114.65 «Проектирование зданий» направления подготовки 270100.62 «Строительство» очной и заочной форм обучения.

УДК [624.011.1 + 624.011.78] (075.8)

ББК 38.5

© ФГБОУ ВПО Костромская ГСХА, 2013

© И.С. Борисова, И.А. Потехин, А.А. Сапунова и др., 2013

© Оформление, РИО Костромской ГСХА, 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |            |
|---|------------|
| <b>Введение .....</b>   | <b>4</b>   |
| <b>1. Проектирование и расчёт коноидной пространственной конструкции .....</b>                          | <b>8</b>   |
| 1.1. Конструктивное решение .....   | 8          |
| 1.2. Порядок введения расчетной конструкции в программный комплекс «Лира» .....                         | 9          |
| 1.3. Составление карты нагрузок на конструкцию .....  | 11         |
| 1.4. Задание нагрузок на конструкцию .....  | 21         |
| 1.5. Определение расчетных усилий .....   | 29         |
| 1.6. Сравнение вариантов .....  | 32         |
| 1.7. Проверка всех требований к конструкции .....   | 34         |
| 1.8. Расчет сегментной дощатоклеенной арки .....  | 43         |
| <b>2. Проектирование и расчёт оболочки положительной гауссовой кривизны на эллиптическом плане.....</b> | <b>48</b>  |
| 2.1. Конструктивное решение и геометрический расчёт .....   | 48         |
| 2.2. Задание геометрии конструкции в программном комплексе «Лира» .....                                 | 49         |
| 2.3. Кровельный материал-мембрана ЭПДМ .....  | 53         |
| 2.4. Теплотехнический расчёт плиты покрытия оболочки.....   | 54         |
| 2.5. Сбор нагрузок на конструкцию.....  | 56         |
| 2.6. Задание нагрузок на конструкцию.....   | 63         |
| 2.7. Определение расчётных усилий .....   | 69         |
| 2.8. Расчёт оболочки.....   | 73         |
| <b>3. Проектирование и расчёт сетчатого купола.....</b>   | <b>77</b>  |
| 3.1. Конструктивное решение .....   | 77         |
| 3.2. Построение модели конструкции в программном комплексе «Лира» .....                                 | 77         |
| 3.3. Сбор нагрузок на конструкцию.....  | 83         |
| 3.4. Задание нагрузок на конструкцию .....  | 93         |
| 3.5. Определение расчётных усилий .....   | 95         |
| 3.6. Расчёт купола .....  | 102        |
| <b>4. Проектирование и расчёт ребристого купола .....</b>   | <b>106</b> |
| 4.1. Конструктивное решение .....   | 106        |
| 4.2. Порядок введения расчетной конструкции в программный комплекс «Лира» .....                         | 106        |
| 4.3. Сбор нагрузок на конструкцию.....  | 114        |
| 4.4. Определение расчётных усилий .....   | 125        |
| 4.5. Расчёт купола .....  | 131        |
| <b>Список используемых источников .....</b>   | <b>136</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений прогресса строительства является производство и применение лёгких и эффективных строительных конструкций. Повышение качества строительства, ускорение его темпов, снижение материалоемкости, трудоёмкости и стоимости имеют огромное значение. Широкое применение в строительстве эффективных лёгких сборных конструкций заводского изготовления позволит существенно ускорить сооружение строительных объектов, упростить и снизить трудоёмкость работ по сооружению фундаментов, транспортированию и монтажу зданий и сооружений и получить благодаря этому значительный технико-экономический эффект.

Конструкции из дерева относятся к классу легких строительных конструкций, применение которых в строительстве является одним из важнейших направлений на пути повышения эффективности и ускорения строительного производства. Древесина относительно легкой и прочный материал, особенно в направлении вдоль ее волокон, где действуют наибольшие усилия от внешних нагрузок. Плотность сухой сосновой и еловой древесины равна всего  $500 \text{ кг/м}^3$ . Это позволяет возводить деревянные конструкции пролетом до 100 м и более. Древесина — микропористый материал с хорошими теплоизоляционными и санитарно-гигиеническими свойствами.

Древесина — малотвердый материал и легко обрабатывается, что облегчает и упрощает изготовление деревянных конструкций. Древесина стойко сопротивляется разрушительному воздействию слабых химических агрессивных сред, и поэтому деревянные конструкции успешно эксплуатируются в зданиях химической промышленности, где быстро разрушаются металлические конструкции. Древесина хорошо выдерживает ударные и циклические нагрузки, и поэтому деревянные конструкции достаточно стойкие в мостах и при землетрясениях.

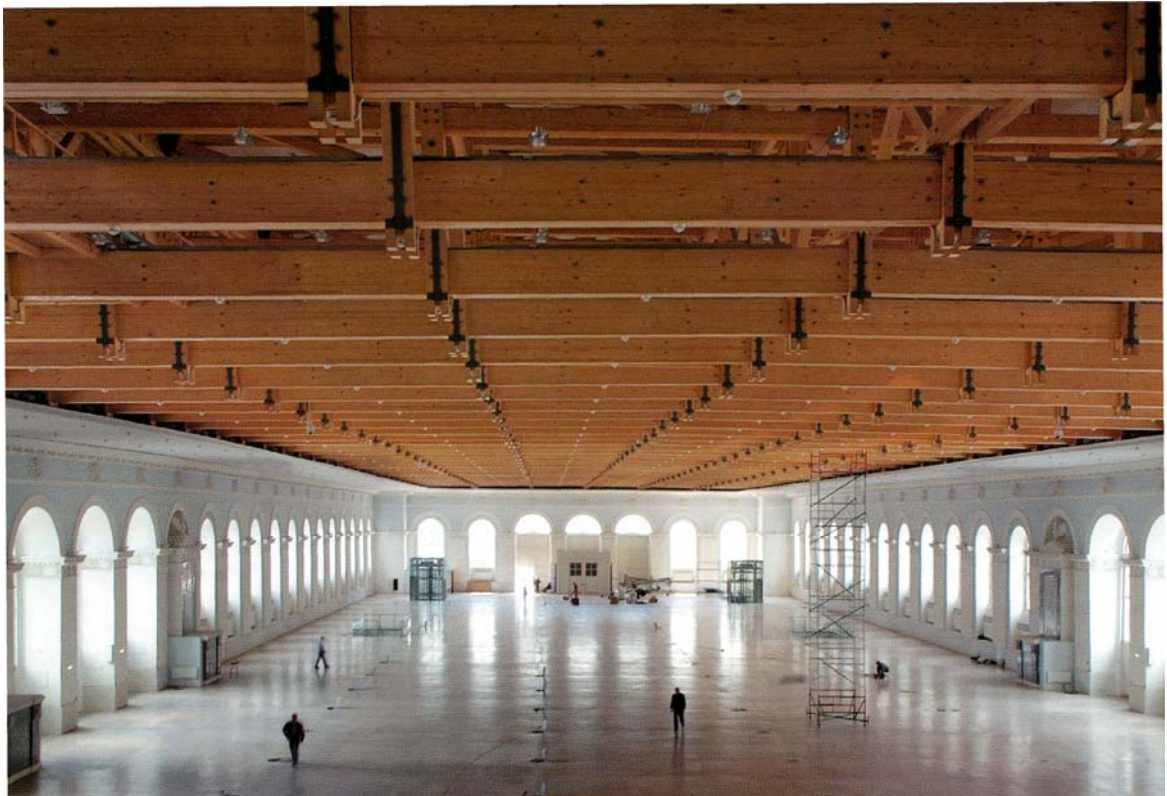
Деревянные конструкции являлись основными в течение многих веков и имеют широкие перспективы применения в современном облегченном капитальном строительстве. Огромные лесные богатства нашей страны являются надёжной сырьевой базой производства деревянных строительных конструкций. Деревянные конструкции характеризуются малой массой, малой теплопроводностью, повышенной транспортабельностью и их перевозки на значительные расстояния вполне рациональны. Ценные строительные свойства древесины определяют и области её эффективного использования. Высокая прочность древесины позволяет создавать деревянные конструкции больших размеров для перекрытий зданий, имеющих свободные пролёты до 100 м и более (рис. 1-4).



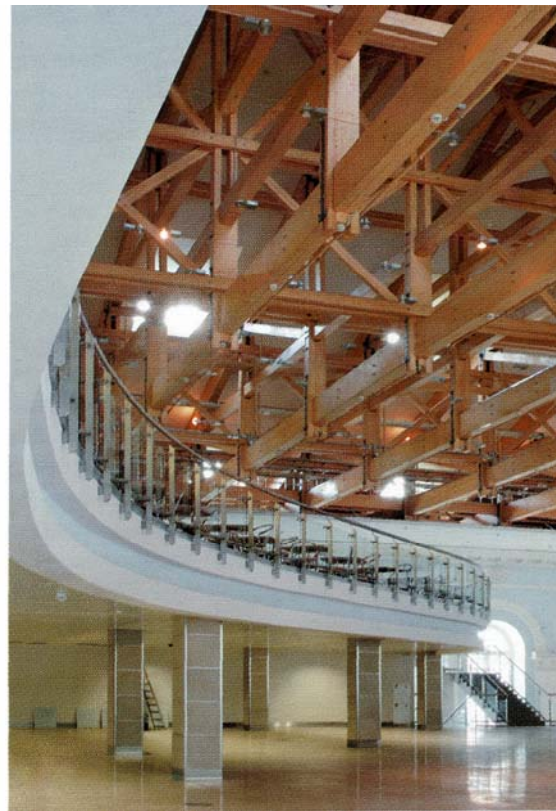
*Рис. 1. Ребристый купол*



*Рис. 2. Дощатоклеёные большепролётные балки*



*Рис. 3. Балочная клетка*



*Рис. 4. Большепролётные балочные клеёные фермы*

Деревянные конструкции подвержены загниванию. Однако современные методы конструктивной и химической защиты от загнивания позволяют снизить до минимума опасность их гнилостного поражения и обеспечить им необходимую долговечность в самых различных условиях эксплуатации.

Древесина является стойким материалом в ряде агрессивных по отношению к бетону и металлу сред. Кроме того, деревянные конструкции проявляют необходимую долговечность в ряде сооружений химической промышленности.

Создание высокопрочных и стойких синтетических полимерных клеев и разработка высокопроизводительной заводской технологии склеивания позволили из пиломатериалов ограниченных размеров создавать клееные элементы и конструкции практически любых размеров и форм, имеющих повышенную прочность и стойкость против загнивания и возгорания и при минимальном количестве отходов. Производство и применение клееных деревянных конструкций является одним из главных направлений прогресса в области строительства из дерева. Основной задачей промышленности клееных деревянных конструкций является строгое и точное выполнение всех операций технологического процесса, с целью обеспечения высокого качества и снижения стоимости этих прогрессивных конструкций. Наибольший технико-экономический эффект даёт их использование в следующих областях строительства: большепролётные общественные здания, промышленные здания с химически агрессивной средой, не действующей на древесину, сборные малоэтажные дома заводского изготовления, сельскохозяйственные производственные здания. Опыт зарубежного строительства показывает также всё возрастающий объём применения клееных деревянных конструкций.

Дальнейшее прогрессивное развитие производственной базы заводского изготовления деревянных строительных конструкций должно быть ориентировано на повышение их эксплуатационных качеств и капитальности, на ускорение темпов строительства и повышение производительности труда не только в процессе заводского изготовления укрупнённых элементов сборных сооружений, но и при их монтаже. Совсем недавно в городе Костроме открылся завод по производству фахверковых конструкций домов и пространственных несущих конструкций «РусБрус», оснащённый современными технологическими линиями по обработке и соединению элементов деталей из древесины.

# 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ КОНОИДНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

## 1.1. Конструктивное решение

Для рассмотрения была взята коноидная пространственная конструкция на основе каркаса, состоящего из трехшарнирных деревянных арок параболического очертания постоянного или переменного сечения с расчётным пролетом 30 м и шагом 3 м. Оболочка имеет нулевую гауссову кривизну. Поскольку в сечениях, совпадающих по образующей, один из радиусов кривизны равен бесконечности, сама кривизна равна нулю; следовательно, и произведение обеих кривизн будет равно нулю. Размеры в плане — прямоугольник 30×30 м. В направлении, перпендикулярном пролету, спроектирован перепад предельных высотных отметок арок с 7 м на первой арке до 3 м на последней. Шаг несущих арок обусловлен материалом покрытия, выполненного из монолитного (прозрачного/без ребер) поликарбоната, по прогонам в продольном направлении и несущим аркам (в одном уровне с ними). ОпираНИЕ несущих конструкций выполнено шарнирно на монолитные отдельностоящие фундаменты индивидуальной конструкции, которые воспринимают и передают на грунт основания все усилия от конструкций. Для обеспечения жесткости и устойчивости каркаса введены металлические связи в крайних пролётах, образующие систему треугольных плоскостей устойчивости. Торцевые стены выполнены самонесущими из тех же материалов, что и конструкция покрытия, в расчете не учитывались.

Модель пространственного устройства и формы приведены на рисунке 5, эскиз — на рисунке 6.



Рис. 5. Модель конструкции



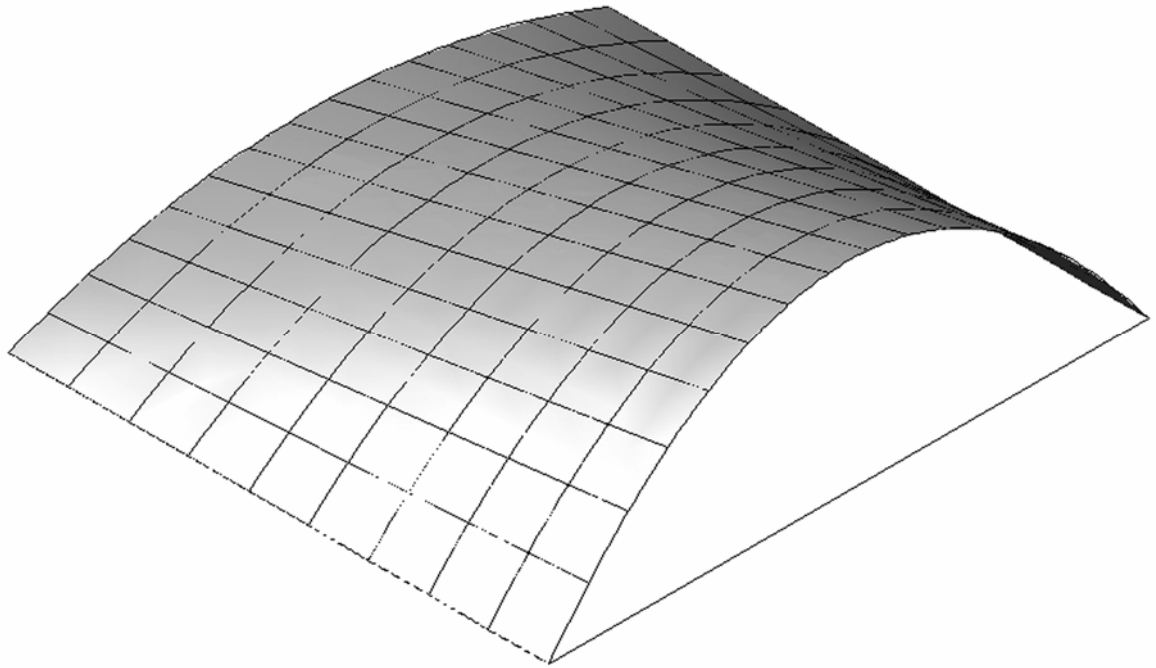


Рис. 6. Эскиз конструкции

## 1.2. Порядок введения расчетной конструкции в программный комплекс «Ли́ра»

### 1. Создание файла для расчета [1]

Файл – Новый – Признак схемы 5 – ОК (рис. 7).

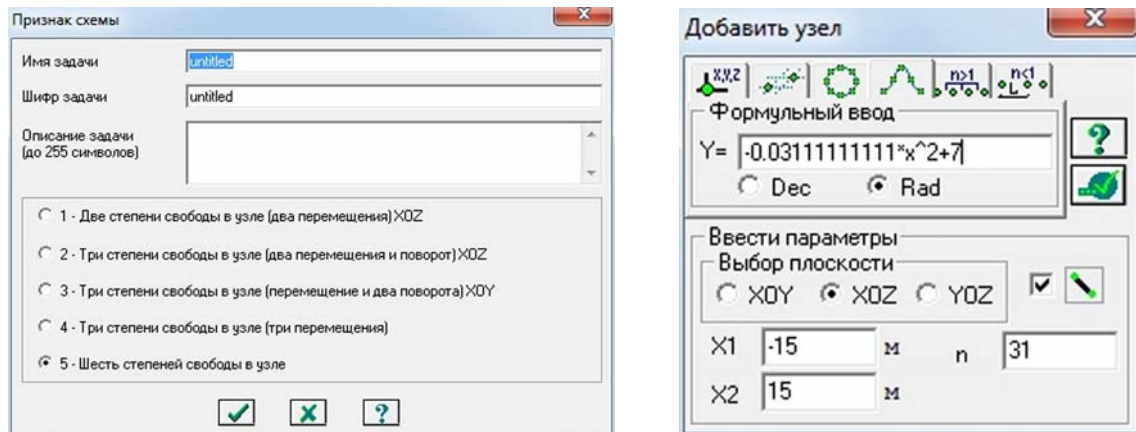


Рис. 7. Создание основы конструктивной схемы узлами

### 2. Создание основы конструктивной схемы узлами

Схема – Корректировка – Добавить узел – 4-я вкладка (см. рис. 7).

Узлы задавались по функции параболы с разным коэффициентом и свободным членом для каждой арки. Параметры каждой функции были вычислены в MS Excel.

### Пример

Пролет № 1: высота арки  $h = 7$  м, пролет арки  $L = 30$  м;

$Y = -kX^2 + h$ , где  $k = h/L^2 = 7/15^2 = 0,031111111$ .

Соответственно:

$Y = -0,0311111X^2 + 7$ ;

плоскость —  $XOZ$ ;  $X1 = -15$  м,  $X2 = 15$  м,  $n = 31$  (кол-во узлов).

3. Задание характеристик материалов конструкции (жёсткостей)

*Жесткости – Жесткости элементов – Добавить* (далее задать необходимые конструкции с определенными параметрами (рис. 8)).

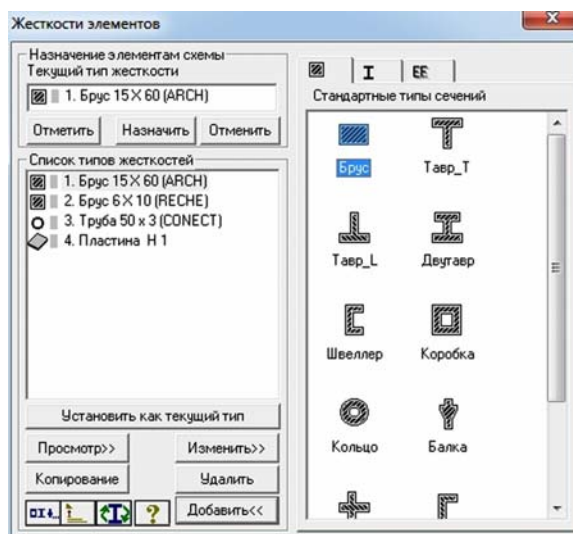


Рис. 8. Диалоговое окно для задания жёсткостей

4. Задание закреплений опорных узлов несущих элементов

*Схема – Связи в узлах* — далее задание закреплений по каждой из опор несущих конструкций (закрепления по  $X$ ,  $Z$  — так как необходимо обеспечение пространственной работы по всем направлениям) (рис. 9).

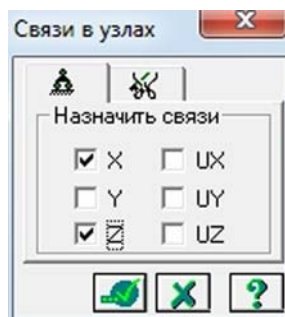


Рис. 9. Диалоговое окно для задания закреплений опорных узлов

## 5. Задание шарниров в узлах несущих элементов

*Жесткости – Шарниры* — задание шарниров по конечным элементам каждой из арок справа и слева, а также в центральном узле арки (3-шарнирная система). Данная система была выбрана исходя из технологий монтажа подобных конструкций на строительной площадке из конечных отправочных марок (полуарок) с установленными необходимыми деталями стыков в заводских условиях для последующего простейшего сборного монтажа непосредственно на строительной площадке, а также из условия наиболее удобной, безопасной и экономически выгодной доставки данных крупногабаритных конструкций на объект строительства (рис. 10).

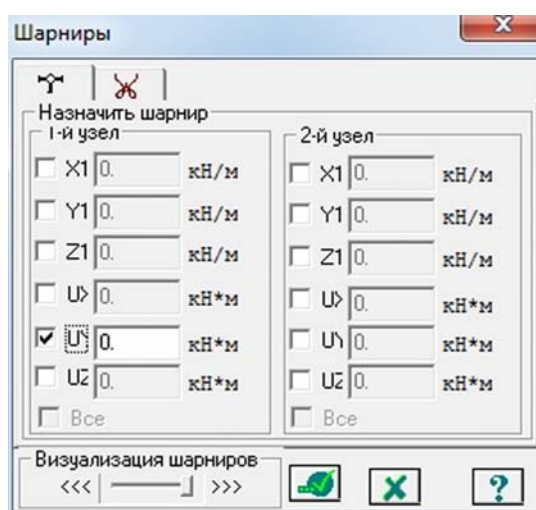


Рис. 10. Диалоговое меню для задания шарниров в узлах

## 6. Задание всех расчетных нагрузок на пространственную поверхность покрытия

*Нагрузки – Выбор загрузки – Задание необходимых для дальнейшего расчета вариантов приложения нагрузок на пластины покрытия* [разделы 1.3, 1.4 учебного пособия].

### 1.3. Составление карты нагрузок на конструкцию

Составление карты нагрузок на конструкцию в соответствии с СП 20.1330.2011 СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия (с картами)». Актуализированная редакция [2].

В данном разделе приведены выдержки из СП «Нагрузки и воздействия» с пояснительными отметками и расчетами. Приведены только те пункты, которые непосредственно относятся к расчету данной конструкции, при расчетах других аналогичных конструкций пункты и их содержание может отличаться.

## 1. Вес конструкций и грунтов

Коэффициенты надежности по нагрузке  $\gamma_f$  для веса строительных конструкций и грунтов приведены в таблице 1 [2, п. 7.2].

Таблица 1. Коэффициенты надежности по нагрузке  $\gamma_f$

| Конструкции сооружений и вид грунтов   | Коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f$ |
|--|---|
| Конструкции: бетонные (со средней плотностью свыше 1 600 кг/м <sup>3</sup> ), железобетонные, каменные, армокаменные, деревянные | 1,1   |

## 2. Снеговые нагрузки

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле

$$S_0 = 0,7 c_e c_t \mu S_g = 0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 1,8 = 0,86 \text{ кПа}, \quad (1)$$

где  $c_e$  — коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов, принимаемых в соответствии с [2, п. 10.5];

$c_t$  — термический коэффициент, принимаемый в соответствии с [2, п. 10.6];

$\mu$  — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с [2, п. 10.4];

$S_g$  — вес снегового покрова на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли, принимаемый в соответствии с [2, п. 10.2].

Вес снегового покрова  $S_g$  на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли следует принимать в зависимости от снегового района РФ по данным таблицы 2 [2, п. 10.2].

Таблица 2. Вес снегового покрова

| Снеговые районы (принимаются по карте 1 приложения Ж) | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $S_g$ , кПа   | 0,8 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 5,6  |

**Пример:** для г. Красноярск: снеговой район III —  $S_g = 1,8$  кПа.

Схемы распределения снеговой нагрузки и значения коэффициента  $\mu$  для покрытий, имеющих наибольший характерный размер в плане не более 100 м, следует принимать в соответствии с [2, п. 10.4, приложение Г], при этом промежуточные значения коэффициента  $\mu$  определяются линейной интерполяцией.

*Примечания:*

1. Нормативное значение снеговой нагрузки  $S_0$  на схемах [2, прил. Г] следует принимать без учета коэффициентов  $c_e$ ,  $c_t$  и  $\mu$ .
2. При расчетах конструкций допускается применение упрощенных схем снеговых нагрузок, эквивалентных по воздействию схемам нагрузок, приведенных в [2, прил. Г].

Для покрытий с уклонами от 12 до 20% однопролетных и многопролетных зданий без фонарей, проектируемых в районах с  $V \geq 4$  м/с [2, см. схемы на рисунках Г.1 и Г.5 приложения Г], следует установить коэффициент сноса  $c_e = 0,85$  [2, п. 10.6].

По СНиП «Строительная климатология» [3]  $V = 6,2$  м/с, а для Красноярска по [2]  $V$ , определяемая с 10-минутным интервалом осреднения и превышаемая в среднем один раз в 50 лет, нормативное значение ветрового давления  $w_0$  равно 0,38 кПа.

Термический коэффициент  $c_t$  [2, п. 10.10] следует применять для учета понижения снеговых нагрузок на покрытия с высоким коэффициентом теплопередачи ( $> 1$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) вследствие таяния, вызванного потерей тепла. При определении снеговых нагрузок для неутепленных покрытий зданий с повышенными тепловыделениями при уклонах кровли свыше 3% и обеспечении надлежащего отвода талой воды следует вводить термический коэффициент

$$c_t = 0,8.$$

*Примечание.* Допускаемые пониженные значения  $c_t$ , основанные на теплоизоляционных свойствах материалов и форме конструктивных элементов, могут быть заданы в специальных рекомендациях.

Для районов со средней температурой января  $-5$  °С и ниже [2, по карте 5 приложения Ж] пониженное нормативное значение снеговой нагрузки [2, п. 4.1] определяется умножением ее нормативного значения на коэффициент 0,7 [2, п. 10.11].

Коэффициент надежности по снеговой нагрузке  $\gamma_f$  следует принимать равным 1,4 [2, п. 10.11].

### *3. Ветровые нагрузки*

Для зданий и сооружений необходимо учитывать следующие воздействия ветра [2, п. 11]:

- а) основной тип ветровой нагрузки (в дальнейшем — «ветровая нагрузка»);
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления.

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, у которых  $h/d > 10$ , где  $h$  — высота,  $d$  — характерный поперечный размер.

Нормативное значение ветрового давления  $w_0$  принимается в зависимости от ветрового района по таблице 3 [2, п. 11.1.4].

Таблица 3. Нормативное значение ветрового давления

| Ветровые районы<br>(принимаются по карте 3) | Ia   | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $w_0$ , кПа                                 | 0,17 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,48 | 0,60 | 0,73 | 0,85 |

Нормативное значение ветрового давления допускается определять в установленном порядке на основе данных метеостанций Росгидромета [2, см. п. 11.1.4].

В этом случае  $w_0$ , Па, следует определять по формуле

$$w_0 = 0,43 v_{50}^2, \quad [2, \text{формула (11.3)}]$$

где  $v_{50}^2$  — давление ветра, соответствующее скорости ветра, м/с, на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А [2, п. 11.1.6], определяемой с 10-минутным интервалом осреднения и превышаемой в среднем один раз в 50 лет.

Для г. Красноярск: ветровой район III —  $w_0 = 0,38$  кПа.

Эквивалентная высота  $z_e$  определяется следующим образом [2, 11.1.5] для зданий при  $h \leq d$

$$z_e = h,$$

где  $z$  — высота от поверхности земли;

$d$  — размер здания (без учета его стилобатной части) в направлении, перпендикулярном расчетному направлению ветра (поперечный размер);

$h$  — высота здания.

Коэффициент  $k(z_e)$  определяется по таблице 4 [2, п. 11.1.6] или [2, формула (11.4)], в зависимости от местности  $B$ .

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии  $30h$  — при высоте сооружения  $h$  до 60 м и на расстоянии 2 км — при  $h > 60$  м.

*Примечание.* Типы местности могут быть различными для разных расчетных направлений ветра.

Таблица 4. Коэффициент  $K(z_e)$

| Параметр<br>$z_e, \text{ м}$ | Значение $K(z_e)$ для типов местности |      |      |
|------------------------------|---------------------------------------|------|------|
|                              | А                                     | В    | С    |
| $\leq 5$                     | 0,75                                  | 0,5  | 0,4  |
| 10                           | 1,0                                   | 0,65 | 0,4  |
| 20                           | 1,25                                  | 0,85 | 0,55 |
| 40                           | 1,5                                   | 1,1  | 0,8  |
| 60                           | 1,7                                   | 1,3  | 1,0  |
| 80                           | 1,85                                  | 1,45 | 1,15 |
| 100                          | 2,0                                   | 1,6  | 1,25 |
| 150                          | 2,25                                  | 1,9  | 1,55 |
| 200                          | 2,45                                  | 2,1  | 1,8  |
| 250                          | 2,65                                  | 2,3  | 2,0  |
| 300                          | 2,75                                  | 2,5  | 2,2  |
| 350                          | 2,75                                  | 2,75 | 2,35 |
| $\geq 480$                   | 2,75                                  | 2,75 | 2,75 |

По источнику [2, формула (11.4)]

$$k(z_e) = k_{10} (z_e/10)^{2\alpha}.$$

Значения параметров  $k_{10}$  и  $\alpha$  для различных типов местностей приведены в таблице 5 [2, п. 11.1.6].

Таблица 5. Коэффициенты  $k_{10}$ ,  $\alpha$ ,  $\zeta_{10}$

| Параметр     | Тип местности |      |      |
|--------------|---------------|------|------|
|              | А             | В    | С    |
| $\alpha$     | 0,15          | 0,20 | 0,25 |
| $k_{10}$     | 1,00          | 0,65 | 0,40 |
| $\zeta_{10}$ | 0,76          | 1,06 | 1,78 |

При определении компонентов ветровой нагрузки  $w_e$ ,  $w_f$ ,  $w_i$ ,  $w_x$ ,  $w_y$  и  $w_z$  следует использовать соответствующие значения аэродинамических коэффициентов: внешнего давления  $c_e$ , трения  $c_f$ , внутреннего давления  $c_i$  и лобового сопротивления  $c_x$ , поперечной силы  $c_y$ , крутящего момента  $c_z$ , принимаемых по [2, приложение Д.1], где стрелками показано направление ветра. Знак «плюс» у коэффициентов  $c_e$  или  $c_i$  соответствует направлению давления ветра на соответствующую поверхность (активное давление), знак «минус» — от поверхности (отсос). Промежуточные значения нагрузок следует определять линейной интерполяцией [2, 11.1.7].

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки  $w_p$  на эквивалентной высоте  $z_e$  следует определять по [2, п. 11.1.8] для сооружений (и их конструктивных элементов), у которых первая частота собственных колебаний  $f_1$ , Гц, больше предельного значения собственной частоты  $f_1$  по [2, п. 11.1.10] или по формуле [2, (11.5)]

$$w_p = w_m \zeta(z_e) v,$$

где  $w_m$  — определяется в соответствии с [2, п. 11.1.3];

$\zeta(z_e)$  — коэффициент пульсации давления ветра, принимаемый по таблице 6 [2, п. 11.1.8] или формуле [2, (11.6)] для эквивалентной высоты  $z_e$  [2, п. 11.1.5];

$v$  — коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра [2, п. 11.1.11].

Таблица 6. Коэффициент пульсаций давления ветра

| Высота, $z_e$ , м | Значения коэффициента $\zeta$ для типов местности |      |      |
|-------------------|---|------|------|
|                   | А   | В    | С    |
| $\leq 5$          | 0,85  | 1,22 | 1,78 |
| 10                | 0,76  | 1,06 | 1,78 |
| 20                | 0,69  | 0,92 | 1,50 |
| 40                | 0,62  | 0,80 | 1,26 |
| 60                | 0,58  | 0,74 | 1,14 |
| 80                | 0,56  | 0,70 | 1,06 |
| 100               | 0,54  | 0,67 | 1,00 |
| 150               | 0,51  | 0,62 | 0,90 |
| 200               | 0,49  | 0,58 | 0,84 |
| 250               | 0,47  | 0,56 | 0,80 |
| 300               | 0,46  | 0,54 | 0,76 |
| 350               | 0,46  | 0,52 | 0,73 |
| $\geq 480$        | 0,46  | 0,50 | 0,68 |

По источнику [2, формула (11.6)]

$$\zeta(z_e) = \zeta_{10}(z_e/10)^{-\alpha}.$$

Значения параметров  $\zeta_{10}$  и  $\alpha$  для различных типов местностей приведены в таблице 5. Предельное значение частоты собственных колебаний  $f_1$ , Гц, следует определять по таблице 7 [2, п. 11.1.10].

Так для Красноярска: ветров. р-н III:  $f_1 = 1,2$  Гц при  $\delta = 0,3$ ;  $\rho = b = 30$  м [2, рис. 11.2];  $\chi = a = 30$  м, тогда  $-v = 0,715$  (табл. 8), где  $\delta$  — логарифмический декремент колебаний,  $a, b$  — стороны прямоугольника [2, п. 11.1.10].



Таблица 7. Предельное значение частоты собственных колебаний

| Ветровые районы<br>(принимаются по карте 3 приложения Ж) | $f_1$ , Гц     |                 |
|--|----------------|-----------------|
|  | $\delta = 0,3$ | $\delta = 0,15$ |
| Ia   | 0,85           | 2,6             |
| I  | 0,95           | 2,9             |
| II   | 1,1            | 3,4             |
| III  | 1,2            | 3,8             |
| IV   | 1,4            | 4,3             |
| V  | 1,6            | 5,0             |
| VI   | 1,7            | 5,6             |
| VII  | 1,9            | 5,9             |

Таблица 8. Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра

| $\rho$ , м | Коэффициент $\nu$ при $\chi$ , м, равном |      |      |      |      |      |      |
|------------|--|------|------|------|------|------|------|
|            | 5  | 10   | 20   | 40   | 80   | 160  | 350  |
| 0,1        | 0,95                                     | 0,92 | 0,88 | 0,83 | 0,76 | 0,67 | 0,56 |
| 5          | 0,89                                     | 0,87 | 0,84 | 0,80 | 0,73 | 0,65 | 0,54 |
| 10         | 0,85                                     | 0,84 | 0,81 | 0,77 | 0,71 | 0,64 | 0,53 |
| 20         | 0,80                                     | 0,78 | 0,76 | 0,73 | 0,68 | 0,61 | 0,51 |
| 40         | 0,72                                     | 0,72 | 0,70 | 0,67 | 0,63 | 0,57 | 0,48 |
| 80         | 0,63                                     | 0,63 | 0,61 | 0,59 | 0,56 | 0,51 | 0,44 |
| 160        | 0,53                                     | 0,53 | 0,52 | 0,50 | 0,47 | 0,44 | 0,38 |

Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления  $\nu$  следует определять для расчетной поверхности сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций. Расчетная поверхность включает в себя те части наветренных и подветренных поверхностей, боковых стен, кровли и подобных конструкций, с которых давление ветра передается на рассчитываемый элемент сооружения. Если расчетная поверхность близка к прямоугольнику, ориентированному так, что его стороны параллельны основным осям [2, рис. 11.2], то коэффициент  $\nu$  следует определять по таблице 8 [2, п. 11.1.11] в зависимости от параметров  $\rho$  и  $\chi$ , принимаемых по таблице 9 [2, п. 11.1.11].

Таблица 9. Параметры  $\rho$  и  $\chi$

| Основная координатная плоскость, параллельно которой расположена расчетная поверхность | $\rho$ | $\chi$ |
|--|--------|--------|
| $zoy$  | $b$    | $h$    |
| $zox$  | $0,4a$ | $h$    |
| $xoy$  | $b$    | $a$    |

При расчете сооружения в целом размеры расчетной поверхности следует определять по [2, с учетом указаний Д.1 прил. Д], при этом для решетчатых сооружений в качестве расчетной поверхности необходимо принимать размеры расчетной поверхности по его внешнему контуру.

Коэффициент надежности по ветровой нагрузке принимается равным 1,4 [2, п. 11.1.12]. Для элементов ограждения и узлов их крепления необходимо учитывать пиковые положительные  $w_+$  и отрицательные  $w_-$  воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по [2, формула (1.10)]

$$w_{+(-)} = w_0 k(z_e) [1 + \zeta(z_e)] c_{p+(-)} v_{+(-)},$$

где  $w_0$  — расчетное значение давления ветра [2, п. 11.1.4];

$z_e$  — эквивалентная высота ([2, п. 11.1.5]);

$k(z_e), \zeta(z_e)$  — коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте  $z_e$  [2, п. 11.1.6], [2, п. 11.1.8];

$c_{p+(-)}$  — пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (-);

$v_{+(-)}$  — коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-).

Значения этих коэффициентов приведены в таблице 10 [2, п. 11.2] в зависимости от площади ограждения  $A$ , с которой собирается ветровая нагрузка.

Таблица 10. Коэффициенты корреляции ветровой нагрузки

| $A, \text{м}^2$ | < 2 | 5    | 10   | > 20 |
|-----------------|-----|------|------|------|
| $v_+$           | 1,0 | 0,9  | 0,8  | 0,75 |
| $v_-$           | 1,0 | 0,85 | 0,75 | 0,65 |

Аэродинамические коэффициенты  $c_{p+}$  и  $c_{p-}$  определяются на основе результатов модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах. Для отдельно стоящих прямоугольных в плане зданий значения этих коэффициентов приведены на схеме [2, Д.1.17 приложения Д].

*Примечание:* При определении пиковой ветровой нагрузки [2, формула (11.10)] принято, что конструктивные элементы ограждения и узлы их крепления к зданию являются достаточно жесткими и в них не возникает заметных динамических усилий и перемещений. В случае если собственные частоты системы «элементы ограждения — их несущие конструкции — элементы их крепления» менее 1,5 Гц, расчетные значения пиковой ветровой нагрузки должны быть уточнены на основе результатов динамического расчета указанной системы конструктивных элементов.

Для стен прямоугольных в плане зданий пиковое положительное значение аэродинамического коэффициента  $c_{p+} = 1,2$  [2, прил. Д.1.17].

Пиковые значения отрицательного аэродинамического коэффициента  $c_{p-}$  для стен и плоских покрытий [2, рис.Д.24] приведены в таблице 11.

Таблица 11. Пиковое значение отрицательного аэродинамического коэффициента

|          |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|
| Участок  | А    | В    | С    | Д    | Е    |
| $c_{p-}$ | -2,2 | -1,2 | -3,4 | -2,4 | -1,5 |

Итоговая сводная карта-таблица всех ветровых составляющих нагрузок для первой и десятой (последней) образующих (табл. 12). Для промежуточных образующих значения вычисляются методом пространственного геометрического интерполирования самостоятельно в ПК «Лира» или AutoCAD.

Таблица 12. Ветровые составляющие нагрузок

|   |   |
|---|---|
| <b>7 м</b>  | <b>3 м</b>  |
| $h = 7; d = 30; z = 7;$   | $h = 3; d = 30; z = 3;$   |
| $Z_e = h$   | $Z_e = h$   |
| $K = 0,56$  | $k = 0,5$   |
| $k(z_e) = 0,65(7/10)^{0,4} = 0,5636$  | $k(z_e) = 0,65(3/10)^{0,4} = 0,4016$  |
| $\xi = 1,156$   | $\xi = 1,22$  |
| $\xi(z_e) = 1,156(7/10)^{-0,2} = 1,043$   | $\xi(z_e) = 1,22(3/10)^{-0,2} = 1,223$  |
| $\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{0,38 \cdot 0,5636 \cdot 1,4}}{940 \cdot 1,2} = 0,0005$ | $\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{0,38 \cdot 0,4016 \cdot 1,4}}{940 \cdot 1,2} = 0,0004$ |
| $\xi = 1$   | $\xi = 1$   |
| $w_p = w_m \cdot 1 \cdot 1,043 \cdot 0,715$   | $w_p = w_m \cdot 1 \cdot 1,223 \cdot 0,715$   |
| $w_m = 0,38 \cdot 0,5636 \text{ с}$   | $w_m = 0,38 \cdot 0,4016 \text{ с}$   |
| $w = w_m + w_p$   |   |
| <b>7 м</b>  | <b>3 м</b>  |
| $c_{e1} = 0,37$   | $c_{e1} = 0,16$   |
| $c_{e2} = -0,94$  | $c_{e2} = -0,8$   |
| $c_{e3} = -0,4$   | $c_{e3} = -0,4$   |
| <b>7 м</b>  | <b>3 м</b>  |
| $w_m(c_1) = 0,079$  | $w_m(c_1) = 0,024$  |
| $w_m(c_2) = -0,201$   | $w_m(c_2) = -0,122$   |
| $w_m(c_3) = -0,086$   | $w_m(c_3) = -0,061$   |
| $w_p(c_1) = 0,059$  | $w_p(c_1) = 0,021$  |
| $w_p(c_2) = -0,150$   | $w_p(c_2) = -0,107$   |
| $w_p(c_3) = -0,064$   | $w_p(c_3) = -0,053$   |
| $w(c_1) = 0,138$  | $w(c_1) = 0,045$  |
| $w(c_2) = -0,351$   | $w(c_2) = -0,229$   |
| $w(c_3) = -0,150$   | $w(c_3) = -0,114$   |
| <i>Пиковые ветровые нагрузки, <math>W_+</math>, <math>W_-</math></i>                |   |
| <b>7 м</b>  | <b>3 м</b>  |
| $W_+ = 0,38 \cdot 0,5636(1 + 1,043) \times 1,2 \cdot 0,75 = 0,394$                  | $W_+ = 0,38 \cdot 0,4016(1 + 1,223) \times 1,2 \cdot 0,75 = 0,305$                  |
| $W_- = 0,38 \cdot 0,5636(1 + 1,043) (-1,5) \times 0,65 = -0,427$                    | $W_- = 0,38 \cdot 0,4016(1 + 1,223) (-1,5) \times 0,65 = -0,331$                    |

В таблице 12:  $w$  — нормативное значение ветровой нагрузки;  $w_m$  — нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки;  $w_p$  — нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки;  $c_e$  — аэродинамический коэффициент [2, по приложению Д.1.3 «Прямоугольные в плане здания со сводчатыми или близкими к сводчатым по очертанию покрытиями»] (рис. 11).

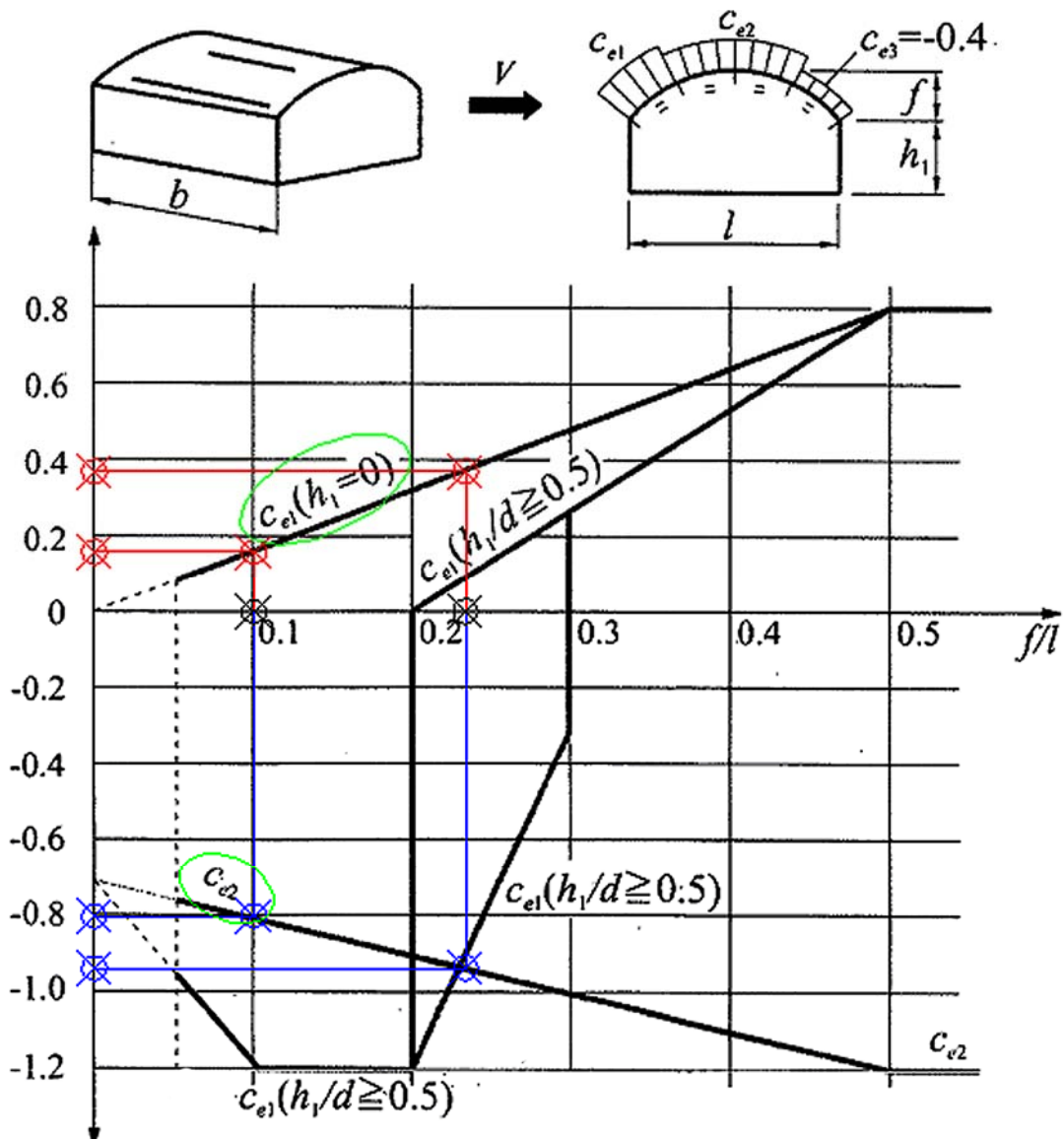


Рис. 11. Аэродинамические коэффициенты

## 1.4. Задание нагрузок на конструкцию

Производим задание нагрузок на конструкцию в расчетном программном комплексе «ЛИРА» [1] в соответствии со Строительными правилами СП 20.1330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07—85» [2].

Алгоритм задания нагрузок на конструкцию в соответствии с [1, п. 1.3] в расчетный программный комплекс «ЛИРА».

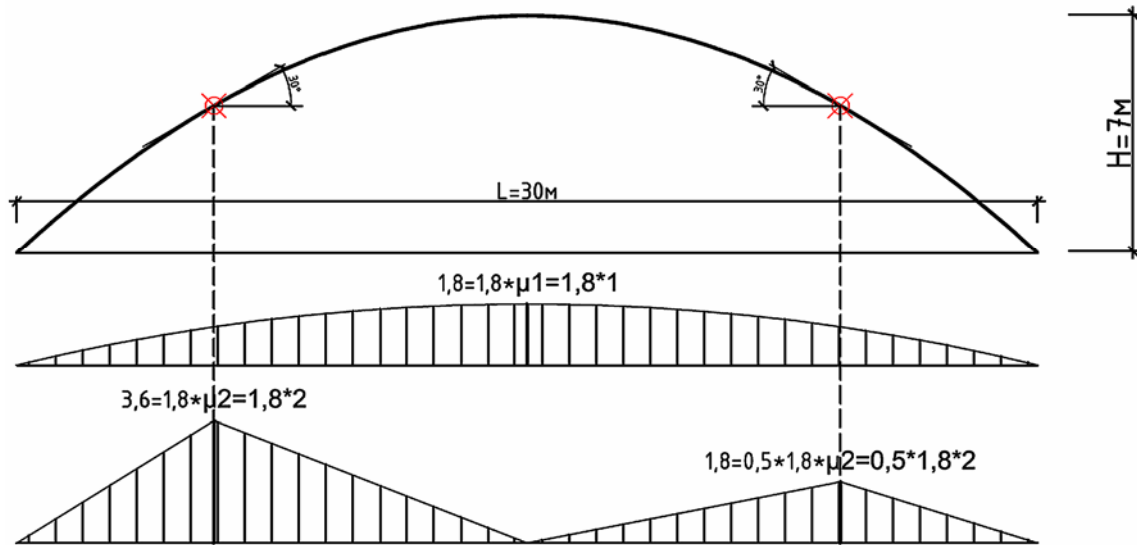
1. Созданы несколько загружений на основе требований к расчету:
  - 1 — собственный вес (нагрузки от собственного веса добавлены программным комплексом автоматически),  $\gamma_f = 1,1$ ;
  - 2 — расчетная снеговая нагрузка по виду 1,  $\gamma_f = 1,4$  (рис. 12, 13);
  - 3 — расчетная снеговая нагрузка по виду 2,  $\gamma_f = 1,4$  (рис. 12, 13);
  - 4 — расчетная ветровая нагрузка,  $\gamma_f = 1,4$  (рис. 14);
  - 5 — расчетная пиковая ветровая нагрузка,  $\gamma_f = 1,4$  (рис. 14).

В дальнейшем за основное сочетание данных нагрузок принято расчетное сочетание (РСН) № 6, т.е. (1 + 3 + 5).

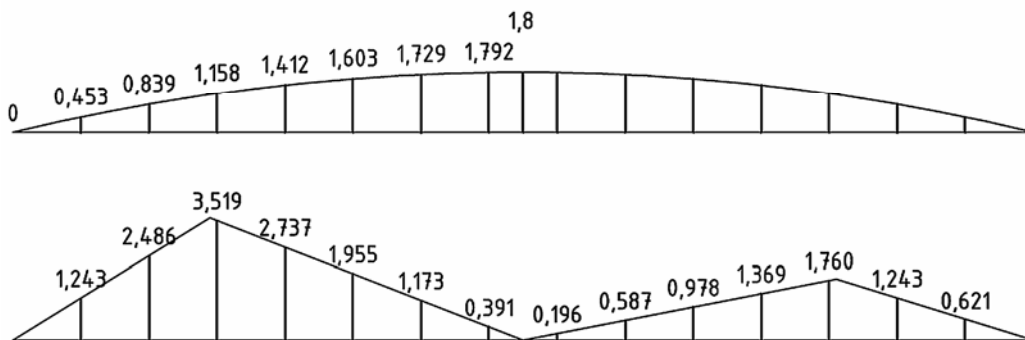
2. Приложение вычисленных нагрузок поэлементно к каждой пластине оболочки пространственной конструкции. Нагрузки в соответствии с СП «Нагрузки и воздействия» были рассчитаны для крайних пролетов конструкции, для остальных пролетов нагрузки получены из них методом пространственной интерполяции, которую позволяет произвести автоматизированный расчет пространственных конструкций в программном комплексе «Лири» и аналогичных.

Пример вида нагрузок, введенных в ПК «Лири», приведен на рисунках 15-18.

## Расчетная схема снеговой нагрузки (1й пролет)



## Схема распределения снеговой нагрузки по пластинам 1-ого пролета



### По приложению Г, п.Г.2.1 [2]

*Здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями:*

*коэффициент  $\mu_1 = \cos(1,5\alpha) = 1$  – т.к. угол покрытия  $\alpha$  в центральной точке арки равен  $0^\circ$*

*коэффициент  $\mu_2 = 2\sin(3\alpha) = 2$  – т.к. угол покрытия  $\alpha$  в искомых точках арки равен  $30^\circ$*

*Рис. 12. Схема распределения снеговой нагрузки по пластинам (1-й пролет)*

Расчетная схема снеговой нагрузки (10й пролет)

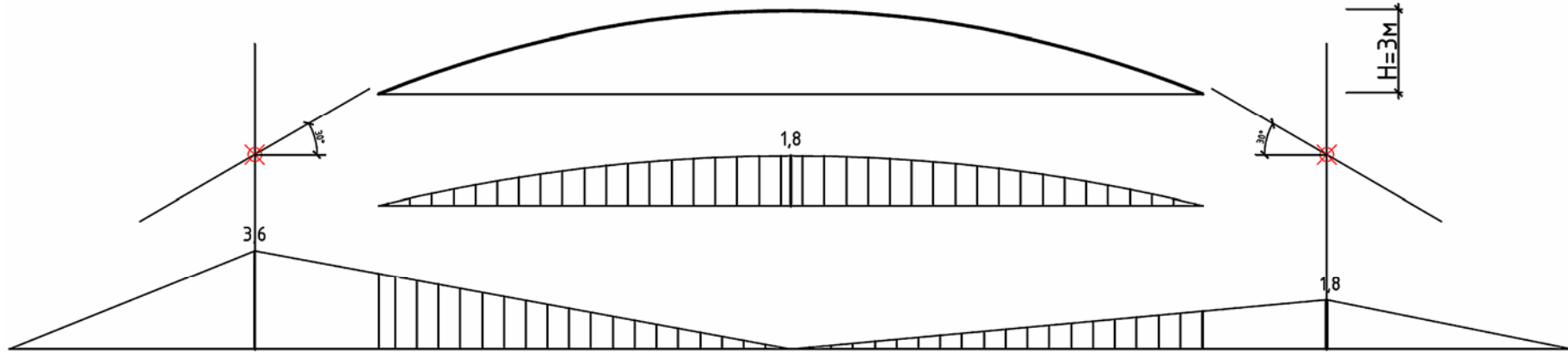


Схема распределения снеговой нагрузки по пластинам 10-ого пролета

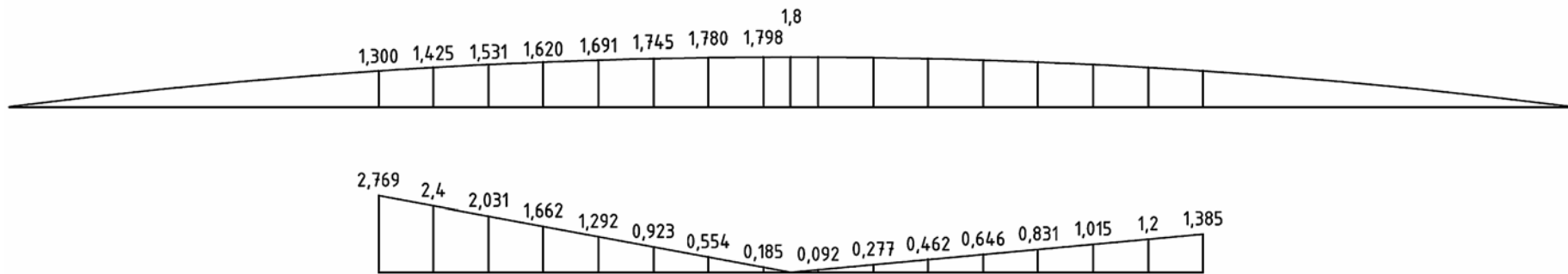


Рис. 13. Схема распределения снеговой нагрузки по пластинам (10-й пролет)

Схема распределения ветровой нагрузки по пластинам 1-ого пролета

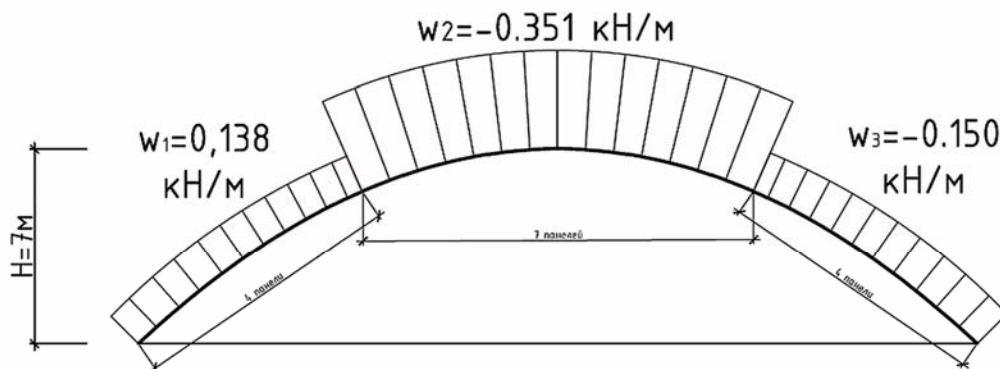


Схема распределения ветровой нагрузки по пластинам 10-ого пролета

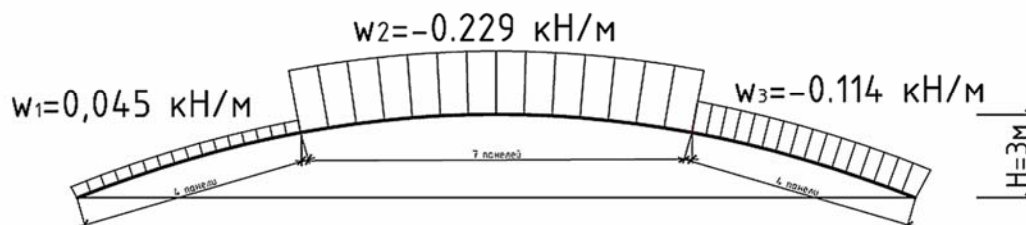


Схема распределения пиковой ветровой нагрузки по пластинам 1-ого пролета

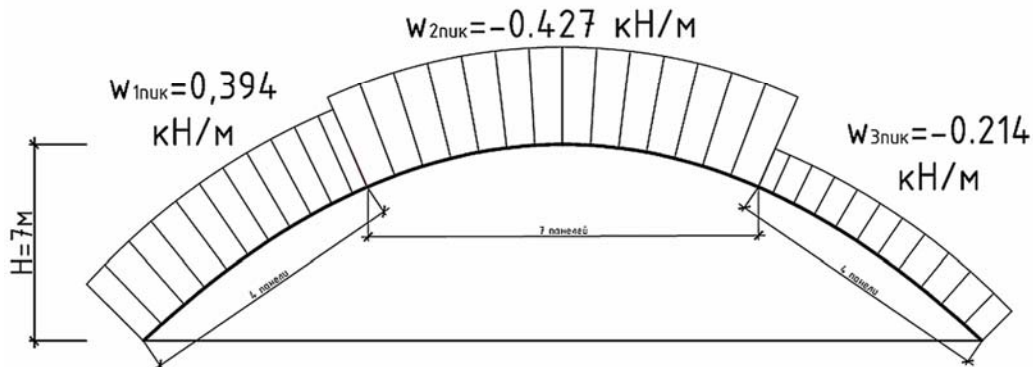


Схема распределения пиковой ветровой нагрузки по пластинам 10-ого пролета

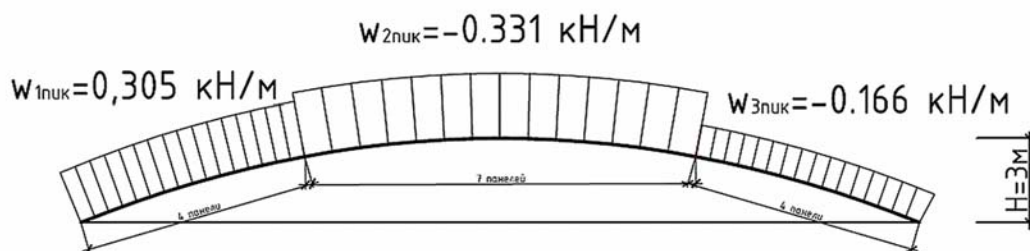


Рис. 14. Схемы распределения ветровой нагрузки по пластинам покрытия



SELF WEIGHT

25

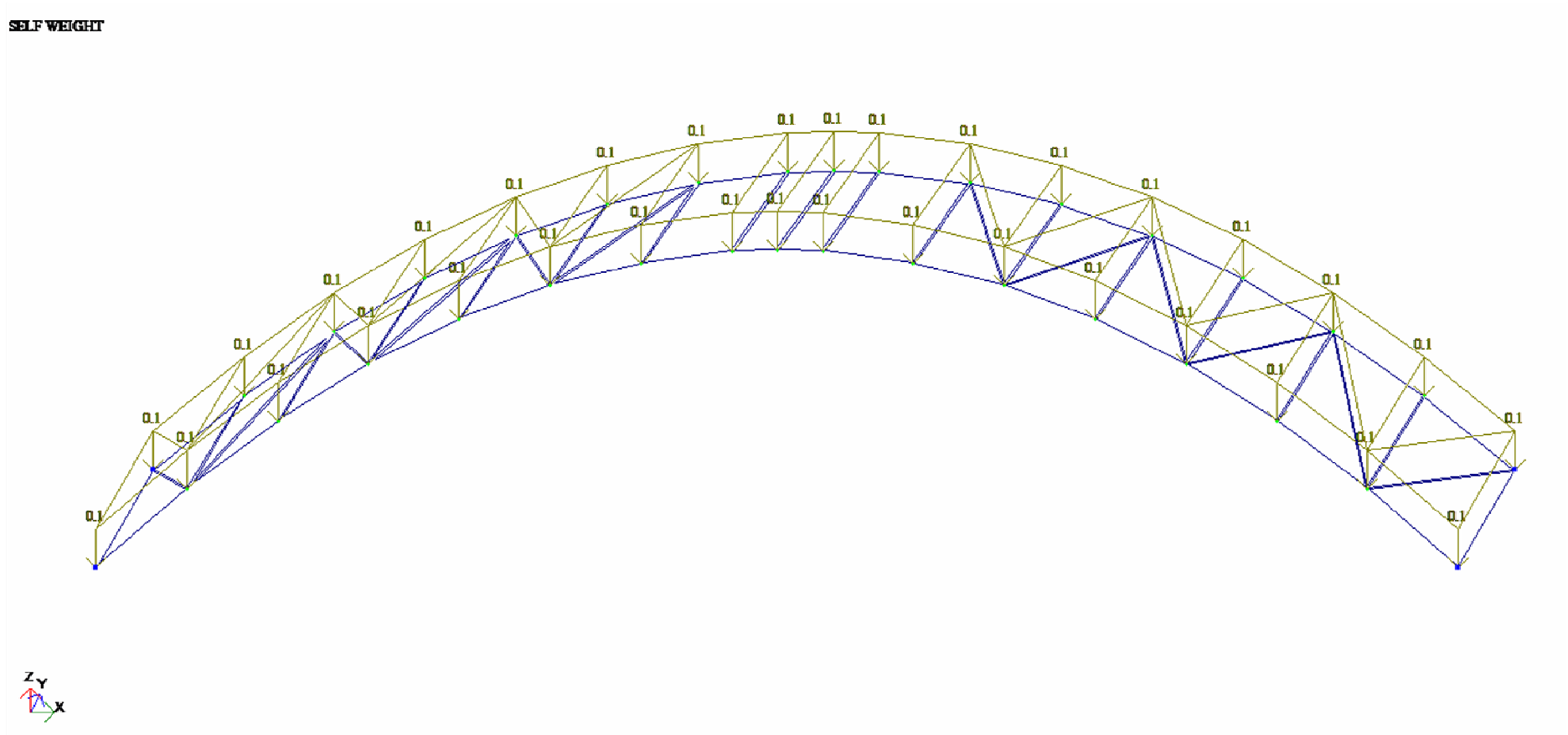


Рис.15. Пример общего нагружения по каждой пластине в первом пролете ( $h_1 = 7$  м) постоянной нагрузкой

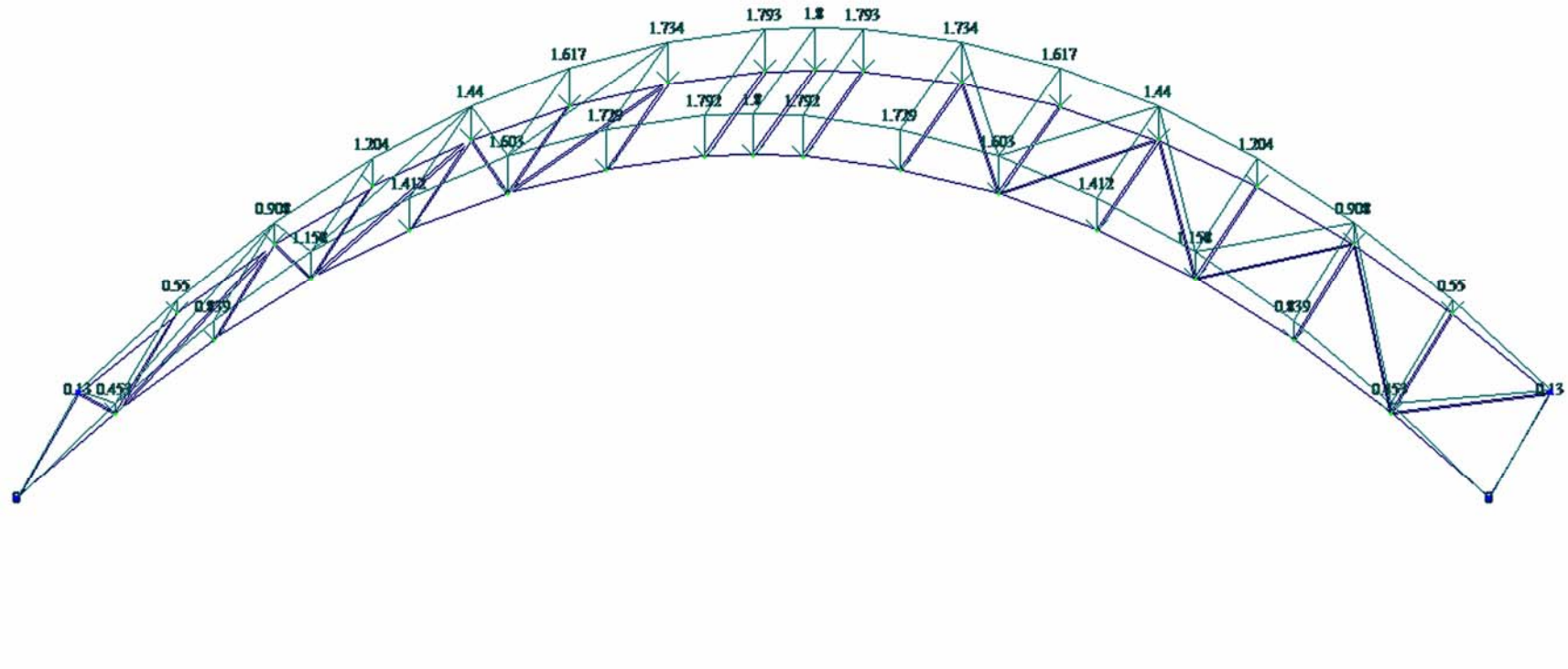


Рис. 16. Пример общего нагружения по каждой пластине в первом пролете ( $h_1 = 7$  м) снеговой по 1 варианту нагрузки

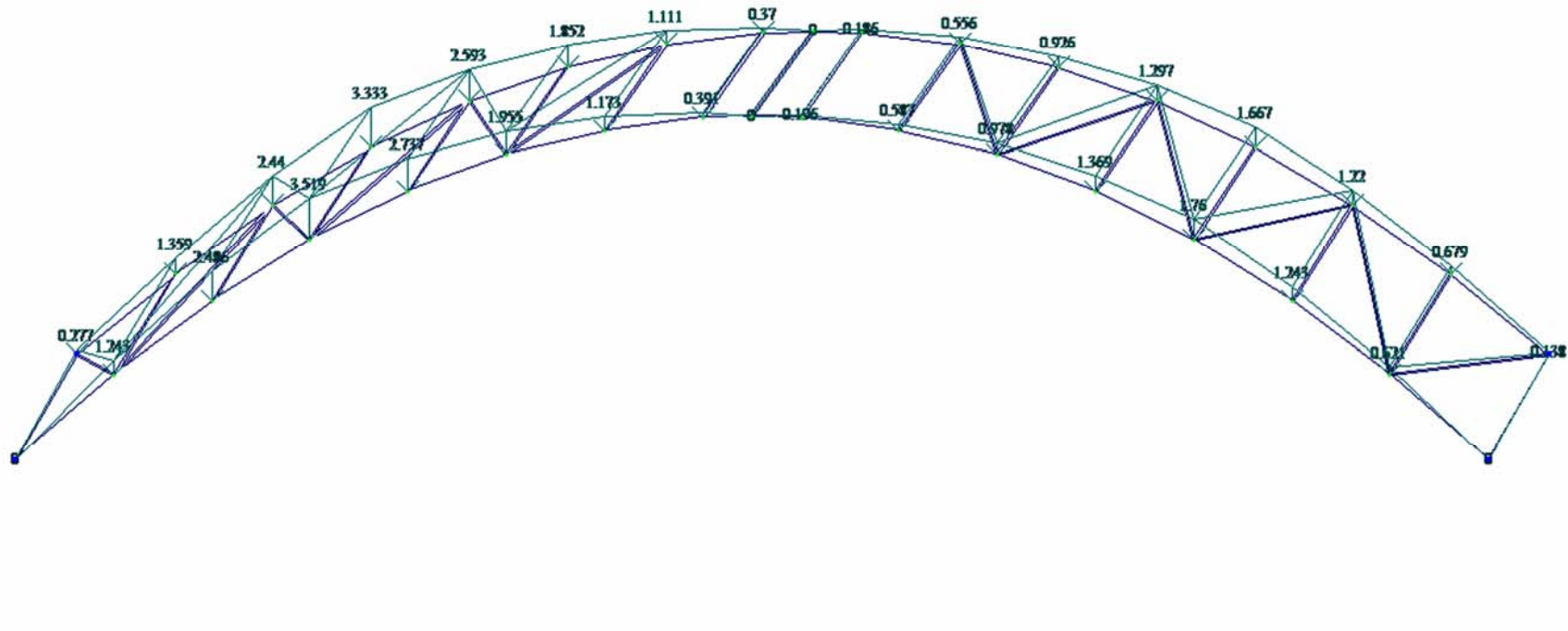


Рис. 17. Пример общего нагружения по каждой пластине в первом пролете ( $h_1 = 7$  м) снеговой по 2 варианту нагрузки

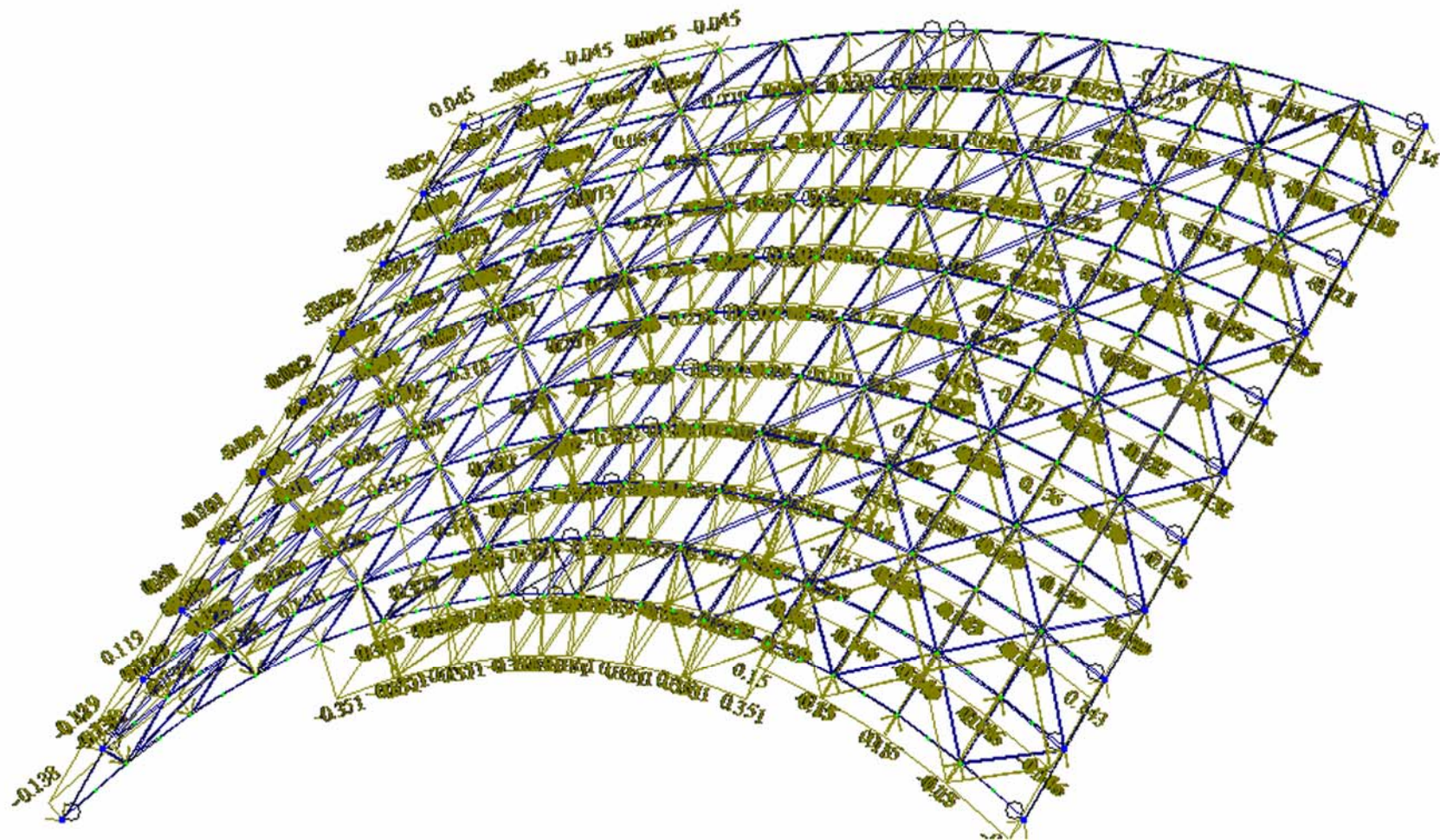


Рис. 18. Пример общего нагружения по всему покрытию, составленного из нагружений каждой из пластин (в данном случае: одно из шести нагружений — снеговая нагрузка по 2 варианту)

## 1.5. Определение расчетных усилий

Последний этап работы в программном комплексе это определение усилий: *Упаковка – Расчет – Расчет по РСН* → определение расчетных максимальных усилий в характерных сечениях/узлах конструкций (рис. 19-24).

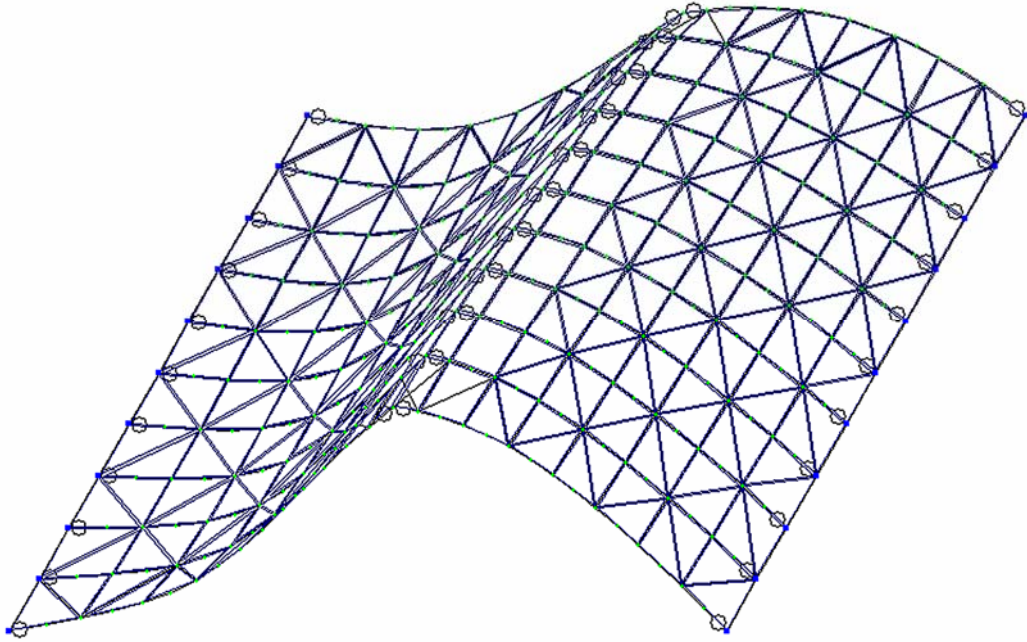


Рис. 19. Увеличенная в масштабе перемещений схема деформации при наихудшем сочетании нагрузок

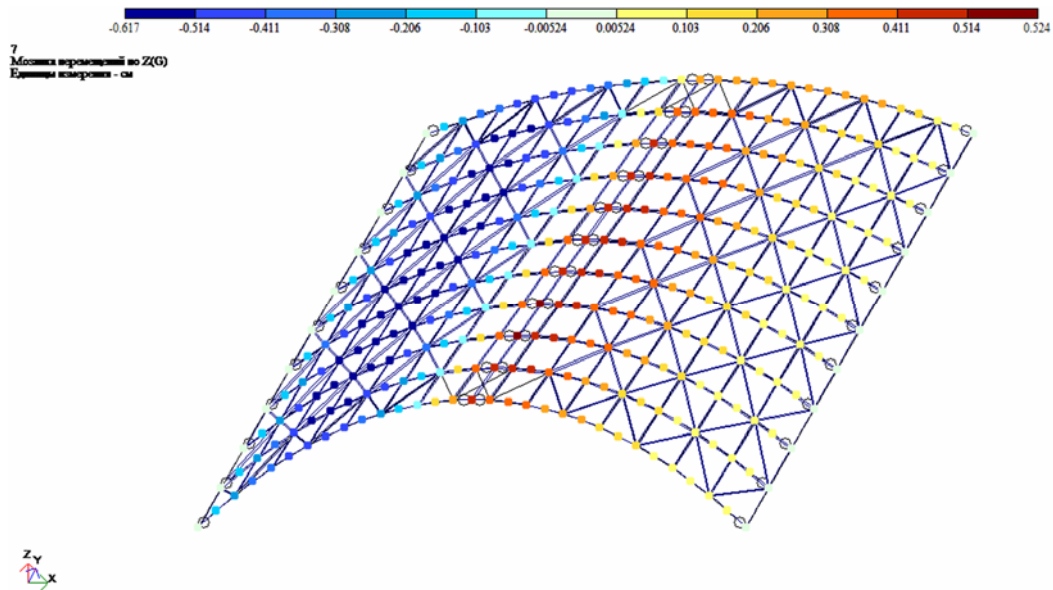


Рис. 20. Прогибы в характерных сечениях при наихудшем сочетании нагрузок

По результатам расчета получили предельные прогибы  $f = 0,62$  см, что ниже максимально допустимых прогибов  $[f] = 30 \text{ м}/300 = 1$  см по нормам [2, табл. Е1].

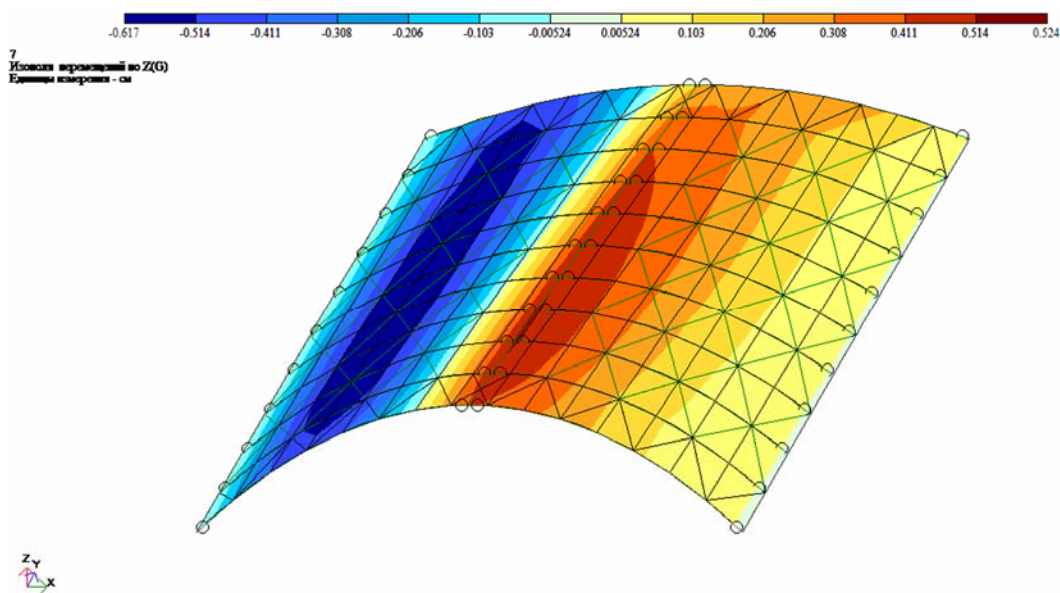


Рис. 21. Прогибы в пространственно-плоскостной модели при наихудшем сочетании нагрузок

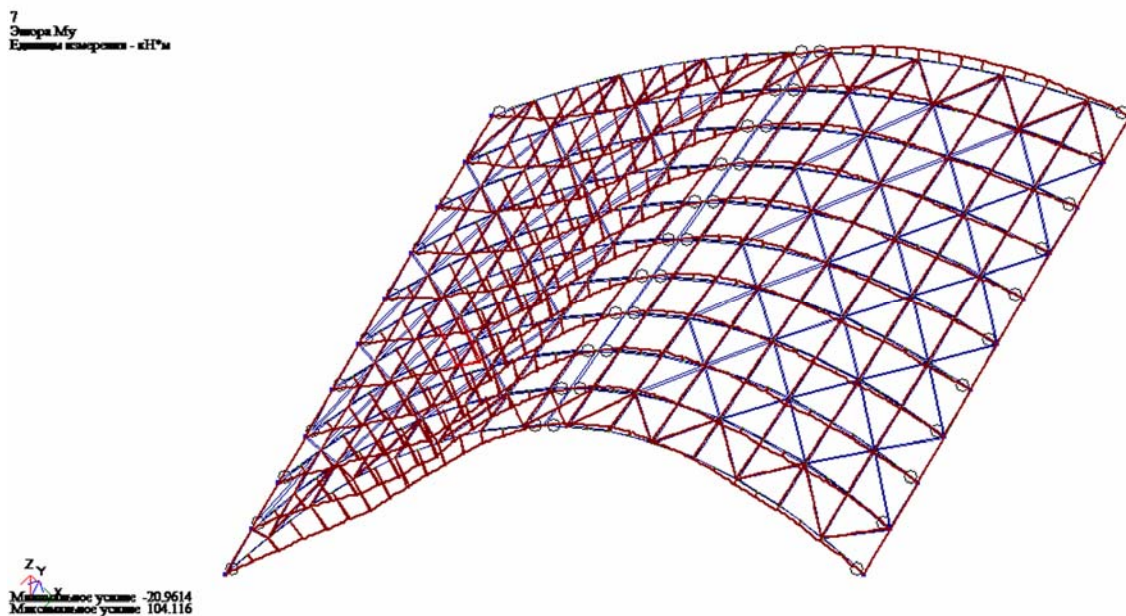


Рис. 22. Эпюра моментов в несущих арках пространственно-плоскостной модели при наихудшем сочетании нагрузок

Z-y  
Минимальное усилие: -131.24  
Максимальное усилие: 16.0113

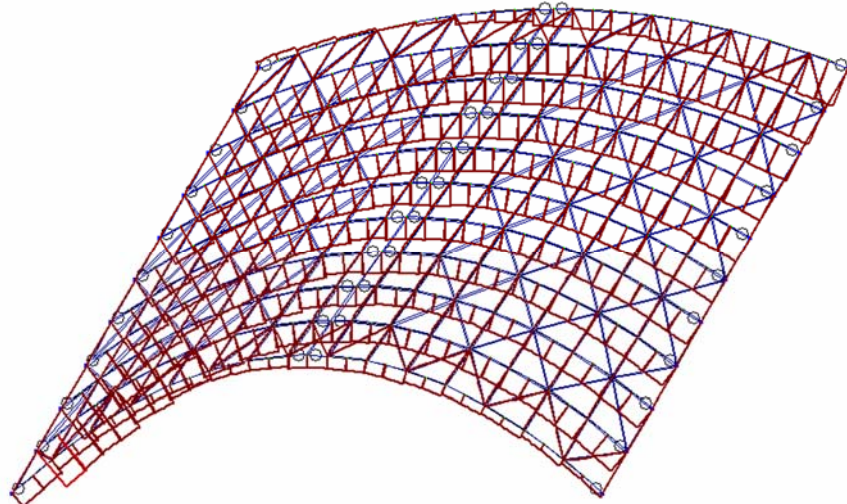


Рис. 23. Эпюра продольных усилий в несущих арках пространственно-плоскостной модели при наихудшем сочетании нагрузок

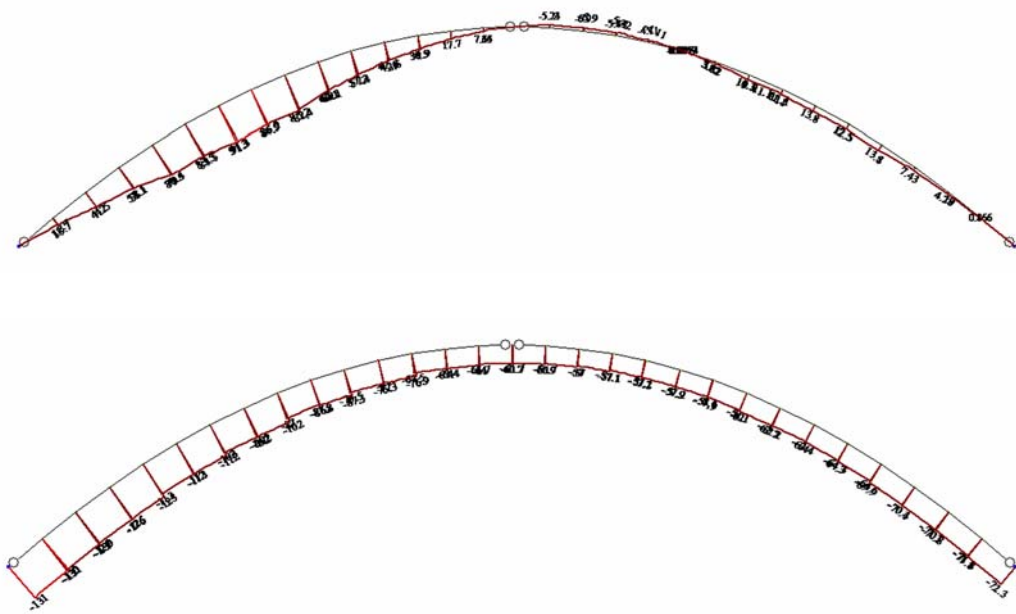


Рис. 24. Фрагментация эпюр на примере арки №2 с максимальными значениями на эпюрах по конструкции

## 1.6. Сравнение вариантов

Был проведен плоскостной расчет одной из несущих арок данной пространственной конструкции, с приведением пространственных нагрузок к плоскостным через грузовые площади. В результате автоматизированного программного расчета по тем же самым расчетным нагрузкам было получено сечение арки из тех же материалов размерами 20×120 см, что намного больше размеров сечений, вычисленных при пространственном расчете конструкции в целом. Таким образом, доказана целесообразность, эффективность, соответствие нормативным требованиям и экономическая целесообразность расчета конструкций как пространственных (рис. 25).

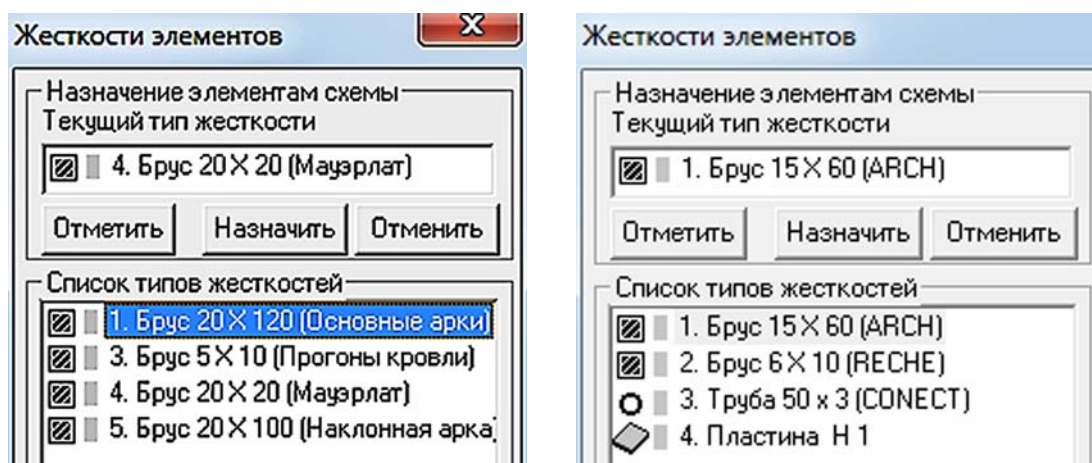


Рис. 25. Сравнительный анализ

Для сравнения был произведен дополнительный расчет арок переменного сечения. Расчет показал, что при одинаковом восприятии нагрузок экономия древесины составила 21,38%, клея — 6,11%, но трудоемкость, время и трудозатраты на изготовление одной полуарки выросли в 1,394 раза, что послужило принятием конструкции с постоянным сечением по контуру за исходную для дальнейшего расчета (рис. 26, 27).



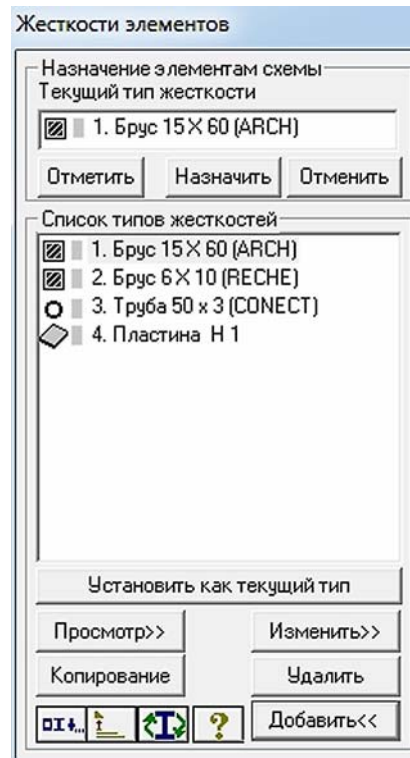
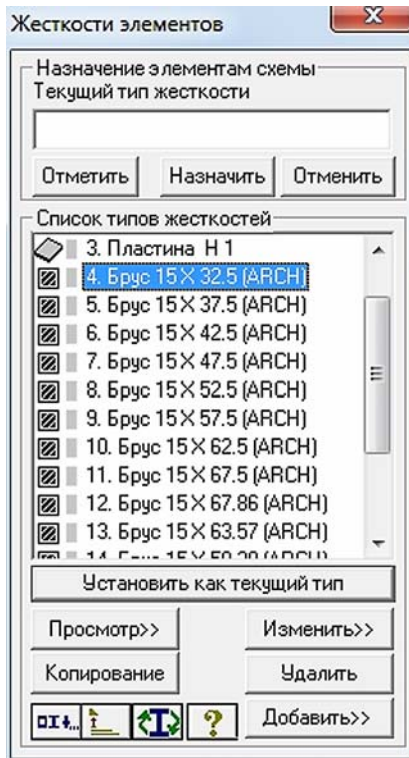


Рис. 26. Сравнительный анализ арок разного сечения

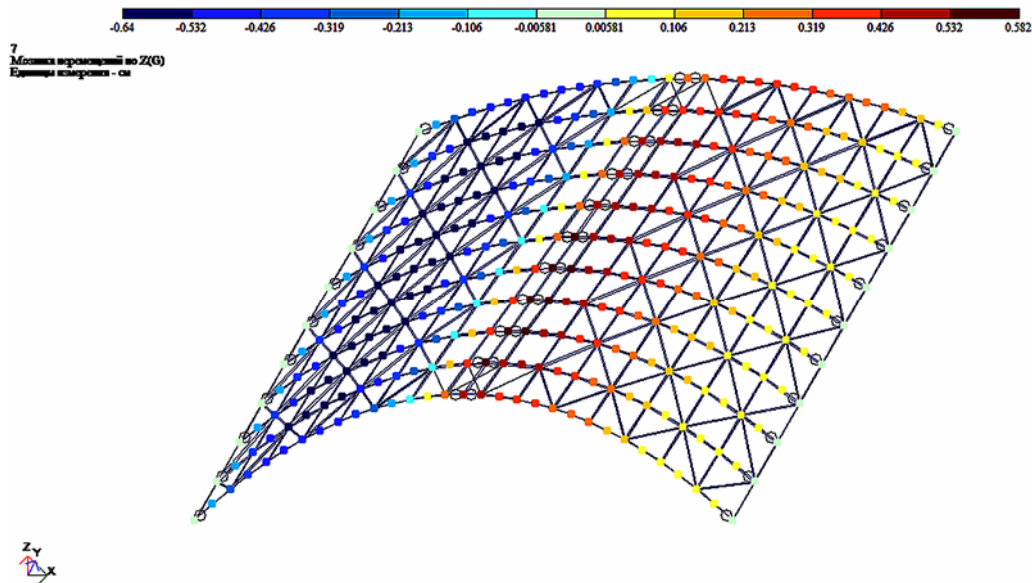


Рис. 27. Мозаика перемещений

## 1.7. Проверка всех требований к конструкции

Проверка всех требований к конструкции производится в соответствии с СТО 36554501-002-2006 «Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета» [4].

В данном разделе приведены выдержки из СТО «Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета» [4] с пояснительными отметками и расчетами.

Группы условий эксплуатации [4, табл. 1]: внутри отапливаемых помещений при температуре до 35 °С, относительной влажности воздуха, % до 60 — А1. Максимальная влажность древесины для конструкций — 9%.

Расчетные сопротивления древесины сосны (кроме веймутовой), ели, лиственницы европейской и японской приведены в таблице 13 [4, п. 3.1].

*Таблица 13. Расчетные сопротивления древесины*

| Напряженное состояние и характеристика элементов  | Расчетные сопротивления, МПа/кгс/см <sup>2</sup> , для сортов (классов) древесины |        |  |  |
|---|---|--------|--|--|
|   | обозначение   | 1/К26  |  |  |
| 1. Изгиб, сжатие и смятие вдоль волокон:<br>а) элементы прямоугольного сечения (за исключением указанных в подпунктах «б», «в») высотой до 50 см. При высоте сечения более 50 см см. п. 3.2, д текста | $R_{и}, R_{с}, R_{см}$  | 14/140 |  |  |
| 2. Скалывание вдоль волокон:<br>б) при изгибе клееных элементов   | $R_{ск}$  | 1,6/16 |  |  |
| в) в лобовых врубках для максимального напряжения   | $R_{ск}$  | 2,4/24 |  |  |
| г) местное в клеевых соединениях для максимального напряжения   | $R_{ск}$  | 2,1/21 |  |  |

Расчетные сопротивления, приведенные в таблице 12, следует умножать на коэффициенты условий работы [4, п. 3.2]:

- а) для различных условий эксплуатации конструкций — на коэффициент  $m_{в}$ , указанный в таблице 14,  $m_{в} = 1$ .

*Таблица 14. Коэффициент, учитывающий условия эксплуатации*

| Условия эксплуатации      | Коэффициент $m_{в}$ |
|---------------------------|---------------------|
| А1, А2, Б1, Б2 (С1, С2.1) | 1                   |

- б) для конструкций, эксплуатируемых при установившейся температуре воздуха до +35 °С — на коэффициент  $m_{т} = 1$ ;

в) для конструкций, рассчитываемых с учетом воздействия кратковременных (ветровой, монтажной или гололедной) нагрузок, а также нагрузок от тяжения и обрыва проводов воздушных ЛЭП и сейсмической — на коэффициент  $m_n$ , указанный в таблице 15,  $m_n = 1,2$ .

Таблица 15. Коэффициент, учитывающий температуру эксплуатации

| Нагрузка   | Коэффициент $m_n$  |                            |
|--|--|----------------------------|
|  | для всех видов сопротивлений, кроме смятия поперек волокон | Для смятия поперек волокон |
| 1. Ветровая, монтажная, кроме указанной в поз. 3 | 1,2  | 1,4                        |

г) для изгибаемых, внецентренно-сжатых, сжато-изгибаемых и сжатых клееных элементов прямоугольного сечения высотой более 50 см значения расчетных сопротивлений изгибу и сжатию вдоль волокон — на коэффициент  $m_b$ , указанный в таблице 16,  $m_b = 0,96$ .

Таблица 16. Коэффициент, учитывающий высоту сечения

|                    |      |
|--------------------|------|
| Высота сечения, см | 60   |
| Коэффициент $m_b$  | 0,96 |

д) для изгибаемых, внецентренно-сжатых, сжато-изгибаемых и сжатых клееных элементов в зависимости от толщины слоев значения расчетных сопротивлений изгибу, скалыванию и сжатию вдоль волокон — на коэффициент  $m_{cl}$ , указанный в таблице 17,  $m_{cl} = 1,02$ .

Таблица 17. Коэффициент, учитывающий толщину слоя

|                      |            |      |    |
|----------------------|------------|------|----|
| Толщина слоя, мм     | 19 и менее | 26   | 33 |
| Коэффициент $m_{cl}$ | 1,1        | 1,05 | 1  |

е) для гнутых элементов конструкций значения расчетных сопротивлений растяжению, сжатию и изгибу — на коэффициент  $m_{gn}$ , указанный в таблице 18,  $m_{gn} = 1$ .

Таблица 18. Коэффициент для гнутых элементов

| Напряженное состояние | Обозначение расчетных сопротивлений | Коэффициент $m_{gn}$ при отношении $r_k/a$ (= 17,4/0,6) |  |
|-----------------------|-------------------------------------|---|--|
|                       |                                     | 500 и более (= 540)                                     |  |
| Сжатие и изгиб        | $R_c, R_{in}$                       | 1   |  |
| Растяжение            | $R_p$                               | 1   |  |

Примечание:  $r_k$  — радиус кривизны гнутой доски или бруска;  $a$  — толщина гнутой доски или бруска в радиальном направлении.

Расчетные сопротивления, приведенные в таблице 12, следует разделить на коэффициенты надежности: для конструкций, отнесенных к классам ответственности [2, приложение И] — коэффициент  $\gamma_{н/о}$ , указанный в таблице 19.

Таблица 19. Коэффициент надежности

|  |      |
|--|------|
| Класс ответственности (по приложению И)                  | II   |
| Коэффициент надежности по ответственности $\gamma_{н/о}$ | 1,00 |

Модуль упругости древесины при расчете по предельным состояниям второй группы следует принимать равным [4, п. 3.5]:

$$E_{\text{вдоль волокон}} = 10\,000 \text{ МПа (100\,000 кгс/см}^2\text{)}.$$

Коэффициент Пуассона древесины при напряжениях, направленных вдоль волокон, следует принимать равным  $\nu_{90.0} = 0,5$ .

Таким образом, расчетные сопротивления:

$$R_{и}, R_{с \text{ (вдоль волокон)}} = 14\,1,2 \cdot 0,96 \cdot 1,02 / 1 = 16,453 \text{ МПа};$$

$$R_{ск} = 2,1 \cdot 1,2 \cdot 0,96 \cdot 1,02 / 1 = 2,47 \text{ МПа}.$$

*Для объективного расчета конструкции были использованы указания по расчету определенного вида конструкций, приведенные в примечаниях к СТО. В соответствии с ними выбраны необходимые формулы и условия для расчета конкретно арок.*

Арки и своды [4, п. 6.39] следует рассчитывать на прочность в соответствии с указаниями [4, п. 4.17] и на устойчивость в плоскости кривизны [4, п. 4.2, формула (6)] с учетом [4, п. 4.17], причем расчетную длину элементов  $l_0$  следует принимать:

а) при расчете на прочность по деформированной схеме:

– для трехшарнирных арок и сводов при симметричной нагрузке  $l_0 = 0,58S$ ;

– для двух- и трехшарнирных арок и сводов при кососимметричной нагрузке — по формуле

$$l_0 = \frac{\pi S}{2\sqrt{\pi^2 - \alpha}} = \frac{3,14 \cdot 33,6}{2\sqrt{3,14^2 - 0,0311}} = 16,83 \text{ м},$$

где  $\alpha$  — центральный угол полуарки, рад;

$S$  — полная длина дуги арки или свода.

б) при расчете на устойчивость в плоскости кривизны для двух- и трехшарнирных арок и сводов  $l_0 = 0,58S = 0,58 \cdot 33,6 = 19,49 \text{ м}$  (для второй арки с максимальным моментом).

Расчет трехшарнирных арок на устойчивость плоской формы деформирования следует производить по [4, п. 4.18].

При расчете трехшарнирных арок на несимметричную нагрузку расчетную длину допускается принимать равной  $l_0 = 0,58S$ .

При расчете арок на прочность по деформированной схеме и на устойчивость плоской формы деформирования величины  $N$  и  $M_d$  следует принимать в сечении с максимальным моментом (для проверяемого случая нагружения), а коэффициенты  $\zeta$  или  $\zeta_c$  и  $\zeta_k$  следует определять по [4, п. 6.40, формула (30)] с подстановкой в нее значения сжимающей силы  $N_0$  в ключевом сечении арки; расчет арок на устойчивость в плоскости кривизны следует производить по [4, формула (6), п. 4.2] на ту же сжимающую силу  $N_0$ .

Расчет центрально-сжатых элементов постоянного цельного сечения следует производить по формулам [4, п. 4.2]:

б) на устойчивость

$$\frac{N}{\varphi F_{рас}} \leq R_c,$$

$$\frac{N_0}{\varphi F_{рас}} = \frac{83,45}{0,237 \cdot 0,09} = 3,912 \text{ МПа} < 16,453 \text{ МПа},$$

где  $R_c$  — расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон;

$N_0$  — максимальная сжимающая сила в ключевом сеч.

$N_0 = 83,45$  кН (арка 2, коньков. узел);

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба, определяемый согласно [4, п. 4.3];

$F_{рас}$  — расчетная площадь поперечного сечения элемента, принимаемая равной при отсутствии ослаблений или ослаблениях в опасных сечениях, не выходящих на кромки, если площадь ослаблений не превышает 25%

$$E_{расч} = F_{бр},$$

где  $F_{бр}$  — площадь сечения брутто.

Коэффициент продольного изгиба  $\varphi$  [4, п. 4.3.] при гибкости элемента  $\lambda > 70$  следует определять по формулам:

$$\varphi = \frac{A}{\lambda^2} = \frac{3000}{112,46^2} = 0,237.$$

Гибкость элементов цельного сечения [4, п. 4.4] определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{l_0}{r} = \frac{19,5}{17,34} = 112,46;$$

$$r = 0,289 \cdot 60 = 17,34 \text{ см},$$

где  $l_0$  — расчетная длина элемента;

$r$  — радиус инерции сечения элемента с максимальными размерами брутто соответственно относительно осей  $X$  и  $Y$ .

Расчет изгибаемых элементов, обеспеченных от потери устойчивости плоской формы деформирования [4, п. 4.14 и 4.15], на прочность по нормальным напряжениям следует производить по формуле

$$\frac{M}{W_{\text{расч}}} \leq R_u,$$

где  $M$  — расчетный максимальный изгибающий момент (рис. 24);

$R_u$  — расчетное сопротивление изгибу (см. ранее);

$W_{\text{расч}}$  — расчетный момент сопротивления поперечного сечения элемента.

Подставив значения, получим:

$$\frac{105,219 \cdot 10^{-3}}{0,009} = 11,7 \text{ МПа} \leq 16,453 \text{ МПа},$$

следовательно, *условие выполняется.*

Для цельных элементов:

$$W_{\text{расч}} = W_{\text{нт}} = \frac{15 \cdot 60^2}{6} = 9\,000 \text{ см}^3 = 0,009 \text{ м}^3.$$

Расчет изгибаемых элементов на прочность по скалыванию [4, п. 4.10.] следует выполнять по формуле

$$\frac{QS'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} b_{\text{рас}}} \leq R_{\text{ск}},$$

где  $Q$  — расчетная поперечная сила; (на опоре)  $Q = 130,61 \text{ кН}$  (опора 2 арки слева);

$S'_{\text{бр}}$  — статический момент брутто сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси:

$$S'_{\text{бр}} = \frac{15 \cdot 0,6^2}{8} = 0,00675 \text{ м}^3;$$

$I_{бр}$  — момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси:

$$I_{бр} = \frac{15 \cdot 0,6^2}{12} = 0,0027 \text{ м}^4;$$

$b_{рас}$  — расчетная ширина сечения элемента;

$R_{ск}$  — расчетное сопротивление скалыванию при изгибе.

Подставив значения, получим:

$$\frac{130 \cdot 0,00675}{0,0027 \cdot 0,15} = 2,18 \text{ МПа} \leq 2,47 \text{ МПа},$$

следовательно, *условие выполняется.*

Устойчивость плоской формы деформирования изгибаемых элементов прямоугольного постоянного сечения [4, п. 4.14] следует рассчитывать по формуле:

$$\frac{M}{\varphi_M W_{бр}} \leq R_u,$$

где  $M$  — максимальный изгибающий момент на рассматриваемом участке  $l_p$ ;

$W_{бр}$  — максимальный момент сопротивления брутто на рассматриваемом участке  $l_p$ .

Подставив значения, получим:

$$\frac{105,219 \cdot 10^{-8}}{0,289 \cdot 0,009} = 4,045 \leq 16,453 \text{ МПа},$$

следовательно, *условие выполняется.*

Коэффициент  $\varphi_M$  для изгибаемых элементов прямоугольного постоянного поперечного сечения, шарнирно-закрепленных от смещения из плоскости изгиба и закрепленных от поворота вокруг продольной оси в опорных сечениях, следует определять по формуле

$$\varphi_M = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_\phi = 140 \frac{0,15^2}{19,5 \cdot 0,6} 1,075 = 0,289,$$

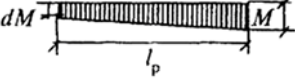
где  $l_p$  — расстояние между опорными сечениями элемента, а при закреплении сжатой кромки элемента в промежуточных точках от смещения из плоскости изгиба — расстояние между этими точками;

$b$  — ширина поперечного сечения;

$h$  — максимальная высота поперечного сечения на участке  $l_p$ ;

$k_\phi$  — коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке  $l_p$ , определяемый по таблице 20 [4, приложения Г].

Таблица 20. Значения коэффициентов  $k_\phi$  и  $k_{эс}$  для расчетов на устойчивость плоской формы деформирования

| Форма эпюры моментов  | $k_\phi$                                       |  |
|---|--|--|
|   | При закреплении только по концам участка $l_p$ | При закреплении по концам и растянутой от момента $M$ кромке |
|  | 1,75-0,75d (=1,075)<br>0 < d < 1 (=0,9)        | $\frac{3}{2+d}$ ; 0 ≤ d ≤ 1                                  |

Расчет на прочность внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов [4, п. 4.17] следует производить по формуле

$$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{M_\phi}{W_{расч}} \leq R_c,$$

где  $M_\phi$  — изгибающий момент от действия поперечных и продольных нагрузок, определяемый из расчета по деформированной схеме.

Подставив значения, получим:

$$\frac{79}{0,09} + \frac{138,45}{0,009} = 16,216 \leq 16,453 \text{ МПа},$$

следовательно, условие выполняется.

*Примечания* [4, п. 4.17]. Для шарнирно-опертых элементов при симметричных эпюрах изгибающих моментов синусоидального, параболического, полигонального и близких к ним очертаний, а также для консольных элементов  $M_\phi$  следует определять по формуле

$$M_\phi = \frac{M}{\xi}, = \frac{105,219}{0,76} = 138,45 \text{ кНм},$$

где  $\xi$  — коэффициент, изменяющийся от 1 до 0, учитывающий дополнительный момент от продольной силы вследствие прогиба элемента, определяемый по формуле

$$\xi = 1 - \frac{N}{\phi R_c F_{\phi p}} = 1 - \frac{83,45 \cdot 10^{-3}}{0,237 \cdot 16,453 \cdot 0,09} = 0,76,$$

$N_0$  — максимальная сжимающая сила в ключевом сеч.  $N_0 = 83,45$  кН (арка 2, коньков. узел);

$M$  — изгибающий момент в расчетном сечении без учета дополнительного момента от продольной силы;

$\phi$  — коэффициент, определяемый по [4, формула (8)].



Расчет на устойчивость плоской формы деформирования сжато-изгибаемых элементов [4, п. 4.18] следует производить по формуле

$$\frac{N}{\varphi R_c F_{бр}} + \left( \frac{M_d}{\varphi_M R_n W_{бр}} \right)^n \leq 1,$$

где  $F_{бр}$  — площадь брутто с максимальными размерами сечения элемента на участке  $l_p$ ;

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба, определяемый по [4, формула (8)] для гибкости участка элемента расчетной длиной  $l_p$  из плоскости деформирования;

$\varphi_M$  — коэффициент, определяемый по [4, формула (23)];

$W_{бр}$  — максимальный момент сопротивления поперечного сечения растянутой зоны;

$n$  — коэффициент,  $n = 1$  для элементов, имеющих закрепления.

Подставив значения, получим:

$$\frac{79}{0,237 \cdot 16,453 \cdot 10^3 \cdot 0,09} + \left( \frac{138,45}{18,42 \cdot 16,453 \cdot 10^3 \cdot 0,009} \right)^1 = 0,281 < 1,$$

следовательно, условие выполняется.

При наличии в элементе на участке  $l_p$  закреплений из плоскости деформирования со стороны растянутой от момента  $M$  кромки коэффициент  $\varphi_M$  следует умножать на коэффициент  $k_{нМ}$ , определяемый по [4, формула (24)], а коэффициент  $\varphi$  — на коэффициент  $k_{нN}$  по формуле:

$$k_{нN} = 1 + \left[ 0,75 + 0,06 \left( \frac{l_p}{h} \right)^2 + 0,6\alpha_p \frac{l_p}{h} - 1 \right] \frac{m^2}{m^2 + 1},$$

где  $\alpha_p$  — центральный угол;  $l_p$  — расчетная длина;  $h$  — максимальная высота поперечного сечения;  $m$  — количество закреплений.

В результате вычислений

$$k_{нN} = 63,75; \varphi_M = 0,289 \cdot 63,75 = 18,42.$$

В составных сжато-изгибаемых элементах следует проверять устойчивость наиболее напряженной ветви, если расчетная длина ее превышает семикратную толщину ветви [4, п. 4.19], по формуле

$$\frac{N}{F_{бр}} + \frac{M}{W_{бр}} \leq \varphi_1 R_c,$$

где  $\varphi_1$  — коэффициент продольного изгиба для отдельной ветви, вычисленный по ее расчетной длине  $l_0$  (см. [4, п. 4.6]);

$F_{бр}$ ,  $W_{бр}$  — площадь и момент сопротивления брутто поперечного сечения элемента.

Коэффициент для изгибаемых элементов:

$$\varphi_m = \frac{3000}{55,94^2} = 0,96 ; \lambda_I = 55,94; l_{0I} = 9,7.$$

Подставив значения, получим:

$$\frac{79}{0,09} + \frac{105,219}{0,009} = 12,57 \leq 0,96 \times 16,453 = 15,8 \text{ МПа}.$$

Устойчивость сжато-изгибаемого составного элемента из плоскости изгиба следует проверять по [4, формула (6)] без учета изгибающего момента.

Гибкость элементов и их отдельных ветвей в деревянных конструкциях не должна превышать значений, указанных в таблице 21 [4, п. 4.22].

Таблица 21. Предельная гибкость

| Наименование элементов конструкций                        | Предельная гибкость $\lambda_{\text{макс}}$ |
|---|---|
| Прочие сжатые элементы ферм и других сквозных конструкций | 150   |

Прогиб изгибаемых элементов следует определять по моменту инерции поперечного сечения брутто. Для составных сечений момент инерции умножается на коэффициент  $k_{ж}$ , учитывающий сдвиг податливых соединений и приведенный в таблице 22 [4, п. 4.33].

Таблица 22. Коэффициент  $k_{ж}$

| Пролет конструкции | Число слоев в элементе | Значение коэффициента |
|--------------------|------------------------|-----------------------|
| > 9 м              | 2                      | 0,8                   |
|                    | 3                      | 0,7                   |
|                    | 10                     | 0,4                   |

Прогиб изгибаемых элементов не должен быть больше предельного (табл. 23) [4, табл. Е.1].

Таблица 23. Предельный прогиб

| Элементы конструкций  | Предельные прогибы в долях пролета, не более |
|---|--|
| Покрытия (кроме ендов): фермы, клееные балки (кроме консольных) | $l/300$                                      |

## 1.8. Расчет сегментной дощатоклеенной арки

Исходные данные: арка постоянного прямоугольного сечения, пролет  $l = 30$  м, высота  $f_{\max} = 7$  м при шаге 3 м и является несущим элементом покрытия здания с температурно-влажностным режимом эксплуатации по группе А1;  $Sg = 1,8$  кПа. Древесина верхнего пояса — береза.

Максимальный изгибающий момент в сечении 2 равен

$$M = 105,219 \text{ кНм},$$

соответствующая продольная сила [см. п. 1.8. указаний]:

$$N = 83,45 \text{ кН}.$$

Приближенный момент сопротивления сечения (с учетом пластичности)  $W_{mp}$ ,  $\text{см}^3$ , определяем по формуле

$$W_{mp} = M/0,8 \cdot R_{II},$$

где  $M$  — максимальный изгибающий момент в сечении;

$R_{II}$  — расчетное сопротивление древесины при сжатии и изгибе,  $R_C = R_{II} = 1,4 \text{ кН/см}^2$ .

Подставляя значения, получим

$$W_{mp} = 105,219/0,8 \cdot 1,4 = 9394,6 \text{ см}^3.$$

Криволинейные блоки полуарки склеиваются из досок сечением  $33 \times 165$  мм, после фрезерования досок по пластикам и кромкам размеры досок  $30 \times 150$  мм.

Требуемая высота сечения  $h_{TP}$ , см, определяется по формуле

$$h_{TP} = \sqrt{\frac{6W_{TP}}{b}},$$

где  $W_{TP}$  — приближенный момент сопротивления сечения;

$b$  — принятая ширина сечения.

Подставляя значения, получим

$$h_{TP} = \sqrt{\frac{6 \cdot 9394,6}{15}} = 59,3 \text{ см}.$$

Принимаем 20 досок толщиной 30 мм и получаем высоту сечения

$$h = 20 \cdot 3 = 60 > 59,3 \text{ см}.$$

Площадь сечения:  $A = bh = 15 \cdot 60 = 900 \text{ см}^2$ .

Опорный узел выполнен с применением цилиндрического шарнира.

Действующее усилие  $N = 130,61 \text{ кН}$  (см. рис. 23).

Определяем требуемый диаметр цилиндрического шарнира  $d$ , см, по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4N\theta_c}{R_{sw}\pi}},$$

где  $N$  — действующее усилие, кН;

$R_{sw}$  — расчетное сопротивление смятию стали, кН/см<sup>2</sup>:

$$R_{sw} = 18,1 \text{ кН/см}^2 [5];$$

$\pi$  — число;

$\theta_c$  — коэффициент условия работы [5].

Подставляя значения, получим

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 130,61 \cdot 0,95}{18,1 \cdot 3,14}} = 2,96 \text{ см.}$$

Принимаем шарнир  $d = 4$  см из стали класса А-III.

Торец арки воспринимает сжимающее усилие  $N = 130,61$  кН на площади  $A = 15 \cdot 60 = 900$  см<sup>2</sup>.

Прочность торцевого сечения на сжатие определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{A} < R_c,$$

где  $\sigma$  — напряжение сжатия, кН/см<sup>2</sup>;

$N$  — сжимающее усилие, кН;

$A$  — площадь торцевого сечения, см<sup>2</sup>;

$R_c$  — расчетное сопротивление смятию древесины, кН/см<sup>2</sup>.

Подставляя значения, получим

$$\sigma = \frac{130,61}{900 \cdot 10^{-4}} = 15 \text{ МПа} = 1,5 \text{ кН/см}^2 < R_c = 1,6453 \text{ кН/см}^2.$$

Болты, крепящие стальной башмак к арке, воспринимают поперечную силу  $Q = 25,95$  кН, которая действует перпендикулярно продольным волокнам.

Принимаем: болты  $d = 24$  мм.

Коэффициент  $k_\alpha = 0,5$  при  $\alpha = 90^\circ$  [4, табл. 19].

Несущую способность болта в одном срезе по изгибу определяем по формуле:

$$T_u = 2,5d^2 \sqrt{k_\alpha},$$

где  $d$  — диаметр болтов, см;

$k_\alpha$  — коэффициент, зависит от угла среза.

Подставляя значения, получим

$$T_u = 2,5 \cdot 2,4^2 \sqrt{0,5} = 10,8 \text{ кН.}$$

Несущую способность древесины по пределу на смятие определяем по формуле:

$$T_{cm} = 0,5cdk_\alpha,$$

где  $c$  — ширина сечения, см.

Подставляя значения, получим

$$T_{cm} = 0,5 \cdot 15 \cdot 2,4 \cdot 0,5 = 9 \text{ кН.}$$

Требуемое число болтов определяем по формуле:

$$n_{mp} = \frac{Q}{2T_{min}},$$

где  $T_{min}$  — минимальная несущая способность древесины по пределу на смятие, кН;

$Q$  — поперечное усилие, кН.

Подставляя значения, получим

$$n_{mp} = \frac{25,95}{2 \cdot 9} = 1,44.$$

Принимаем: 2 болта  $d = 24$  мм.

Расстановка болтов не менее:

$$S_1 = 7d = 168 \text{ мм}; S_2 = 3,5d = 84 \text{ мм}; S_3 = 3d = 72 \text{ мм.}$$

Принимаем:  $S_1 = 170$  мм;  $S_2 = 90$  мм;  $S_3 = 80$  мм.

Коньковый узел в трехшарнирных арках можно выполнять с деревянными накладками на болтах, воспринимающими поперечную силу от временной нагрузки и обеспечивающими жесткость узла арки из ее плоскости.

Усилия, действующие в узле:

$$N = 83,45 \text{ кН}; Q = 7,82 \text{ кН}; [\text{см. п. 1.8. указаний}].$$

Расчетное сопротивление смятию  $R_{cm\alpha}$ , МПа, под углом  $\alpha = 90^\circ$  определяем по формуле

$$R_{cm\alpha} = \frac{R_{cm}}{1 + \left( \frac{R_{cm}}{R_{cm90}} - 1 \right) \sin^3 \alpha},$$

где  $R_{cm}$  — расчетное сопротивление сжатию вдоль волокон, МПа;

$R_{cm90}$  — расчетное сопротивление смятию поперек волокон, МПа;

$\alpha$  — угол смятия,  $^\circ$ .

Подставляя значения, получим

$$R_{сма} = \frac{16,453}{1 + \left( \frac{16,453}{3} - 1 \right) \sin^3 90^\circ} = 3 \text{ МПа.}$$

Расчетное сопротивление сжатию вдоль волокон определяется по формуле

$$R_{см} = \frac{R_{см,n} m_n}{\gamma_n},$$

где  $R_{см,n}$  — нормативное сопротивление сжатию вдоль волокон, МПа;  
 $m_n$  — коэффициент;  
 $\gamma_n$  — коэффициент надежности.

Подставляя значения, получим

$$R_{см} = \frac{14 \cdot 1,2 \cdot 1,02 \cdot 0,96}{1} = 16,453 \text{ МПа.}$$

Прочность сечения на сжатие определяем по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{A} < R_c,$$

где  $\sigma$  — напряжения сжатия, кН/см<sup>2</sup>;  
 $N$  — сжимающее усилие, кН;  
 $A$  — площадь сечения, см<sup>2</sup>;  
 $R_c$  — расчетное сопротивление смятию древесины, кН/см<sup>2</sup>.

Подставляя значения, получим

$$\sigma = \frac{83,45}{15 \cdot 60} = 0,927 < 1,645 \text{ кН/см}^2.$$

Количество болтов, воспринимающих усилие  $Q = 7,82$  кН при угле смятия древесины  $\alpha = 90^\circ$   $k_\alpha = 0,5$ .

Принимаем болты  $d = 24$  мм [5].

Несущую способность болта в одном срезе по изгибу определяем по формуле:

$$T_u = 2,5d^2 \sqrt{k_\alpha}.$$

Подставляя значения, получим

$$T_u = 2,5 \cdot 2,4^2 \sqrt{0,5} = 10,8 \text{ кН.}$$

Несущую способность древесины по пределу на смятие определяем по формуле:

$$T_{см} = 0,5cdk_\alpha.$$

Подставляя значения, получим

$$T_{см} = 0,5 \cdot 15 \cdot 2,4 \cdot 0,5 = 9 \text{ кН.}$$

Требуемое число болтов определяем по формуле:

$$n_{mp} = \frac{Q}{2T_{\min}},$$

где  $T_{\min}$  — минимальная несущая способность древесины по пределу на смятие, кН;

$Q$  — поперечное усилие, кН.

Подставляя значения, получим

$$n_{mp} = \frac{7,82}{2 \cdot 9} = 0,5.$$

Принимаем: 2 болта  $d = 24$  мм.

Расстановка болтов не менее:  $S_1 = 7d = 168$  мм;  $S_2 = 3,5d = 84$  мм;  $S_3 = 3d = 72$  мм [4].

Принимаем:  $S_1 = 170$  мм;  $S_2 = 130$  мм;  $S_3 = 100$  мм.

Усилие, воспринимаемое цилиндрическим шарниром,  $N_{\text{общ}}$ , кН, определяется по формуле:

$$N_{\text{общ}} = \sqrt{N^2 + Q^2},$$

где  $Q$  — поперечное усилие, кН;

$N$  — продольное усилие, кН.

Подставляя значения, получим

$$N_{\text{общ}} = \sqrt{83,45^2 + 7,82^2} = 83,82 \text{ кН.}$$

Диаметр шарнира из формулы напряжения в шарнире

$$\frac{N}{\pi d^2} \leq \frac{R_{sw}}{4\theta_c} \leq R_{sw}$$

определяется:

$$d = \sqrt{\frac{4N\theta_c}{R_{sw}\pi}},$$

где  $R_{sw}$  — расчетное сопротивление смятию стали, кН/см<sup>2</sup>:

$$R_{sw} = 18,1 \text{ кН/см}^2 \text{ [5].}$$

Подставляя значения, получим

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 83,82 \cdot 0,95}{18,11 \cdot 3,14}} = 2,4 \text{ см.}$$

Принимаем: шарнир  $d = 32$  мм из стали класса А-III.

### *Контрольные вопросы*

1. Что собой представляет коноидная оболочка?
2. Как задают жёсткости элементов?
3. По каким осям осуществляют закрепление опорных узлов?

## 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ОБОЛОЧКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ

### 2.1. Конструктивное решение и геометрический расчёт

Здание представляет собой ряд круговых арок различного радиуса, опертых на эллиптический пояс, который обеспечивает жесткость конструкции в горизонтальном направлении. Радиус круговых арок:

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f},$$

где  $L$  — пролёт арки;

$f$  — высота арки;

$R$  — радиус арки.

Данные расчёта сведены в таблицу 24.

*Таблица 24. Геометрические характеристики арок, мм*

| Номер арки | $f$   | $L$    | $R$            |
|------------|-------|--------|----------------|
| 1          | 611   | 13 077 | 35 290,755 524 |
| 2          | 1 182 | 18 000 | 34 854,959 391 |
| 3          | 1 711 | 21 424 | 34 387,628 580 |
| 4          | 2 201 | 24 000 | 33 812,903 453 |
| 5          | 2 650 | 25 981 | 33 165,205 708 |
| 6          | 3 060 | 27 495 | 32 411,332 721 |
| 7          | 3 430 | 28 618 | 31 561,571 574 |
| 8          | 3 760 | 29 394 | 30 603,644 814 |
| 9          | 4 051 | 29 850 | 29 519,405 826 |
| 10         | 4 303 | 30 000 | 28 296,050 314 |
| 11         | 4 516 | 29 850 | 26 920,934 566 |
| 12         | 4 691 | 29 394 | 25 368,502 452 |
| 13         | 4 826 | 28 618 | 23 625,959 076 |
| 14         | 4 923 | 27 495 | 21 656,478 291 |
| 15         | 4 981 | 25 981 | 19 430,179 808 |
| 16         | 5 000 | 24 000 | 16 900,000 000 |
| 17         | 4 732 | 21 424 | 14 490,571 429 |
| 18         | 3 899 | 18 000 | 12 336,778 789 |
| 19         | 2 404 | 13 077 | 10 093,843 230 |

Во фронтальной проекции конструкция представлена двумя сопрягающимися дугами окружностей радиусами 232,9 м и 16,9 м (рис. 28).



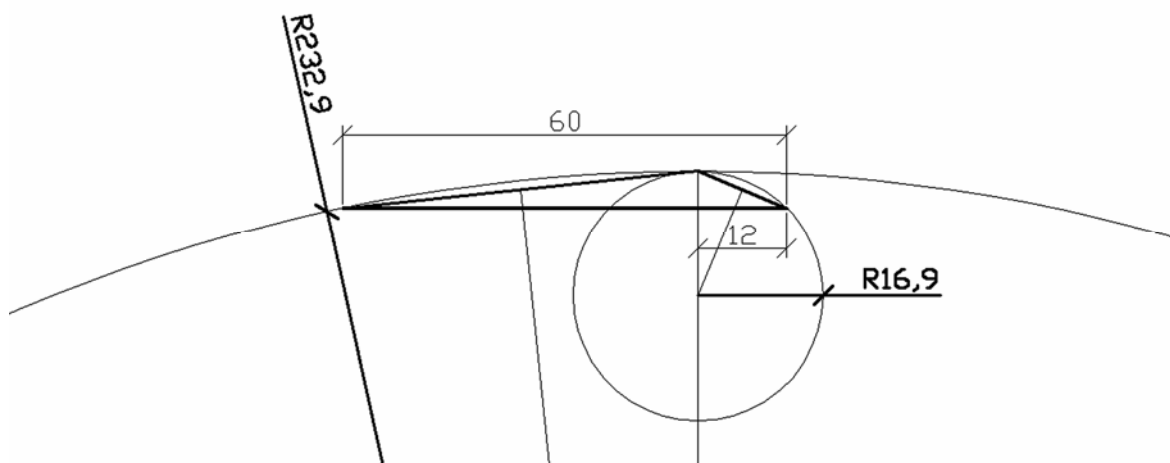


Рис. 28. Геометрия арок

Принимаем следующую нумерацию арок (рис. 29).

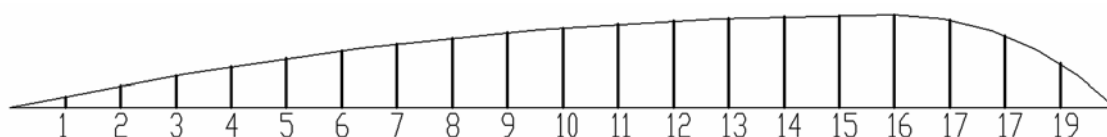


Рис. 29. Нумерация арок

Максимальная высота в точке сопряжения 5 м (16 арка).

## 2.2. Задание геометрии конструкции в программном комплексе «Лира»

Порядок построения модели конструкции в программном комплексе «Лира».

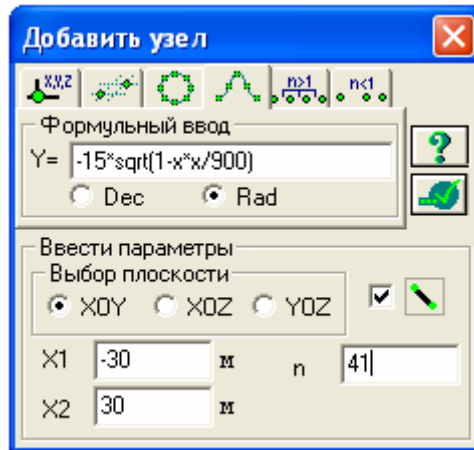
Выбор признака схемы — пятый (6 степеней свободы в узле).

Заведение нижнего эллиптического пояса с помощью функции *Добавить узлы* (рис. 30, а, б) по формуле:

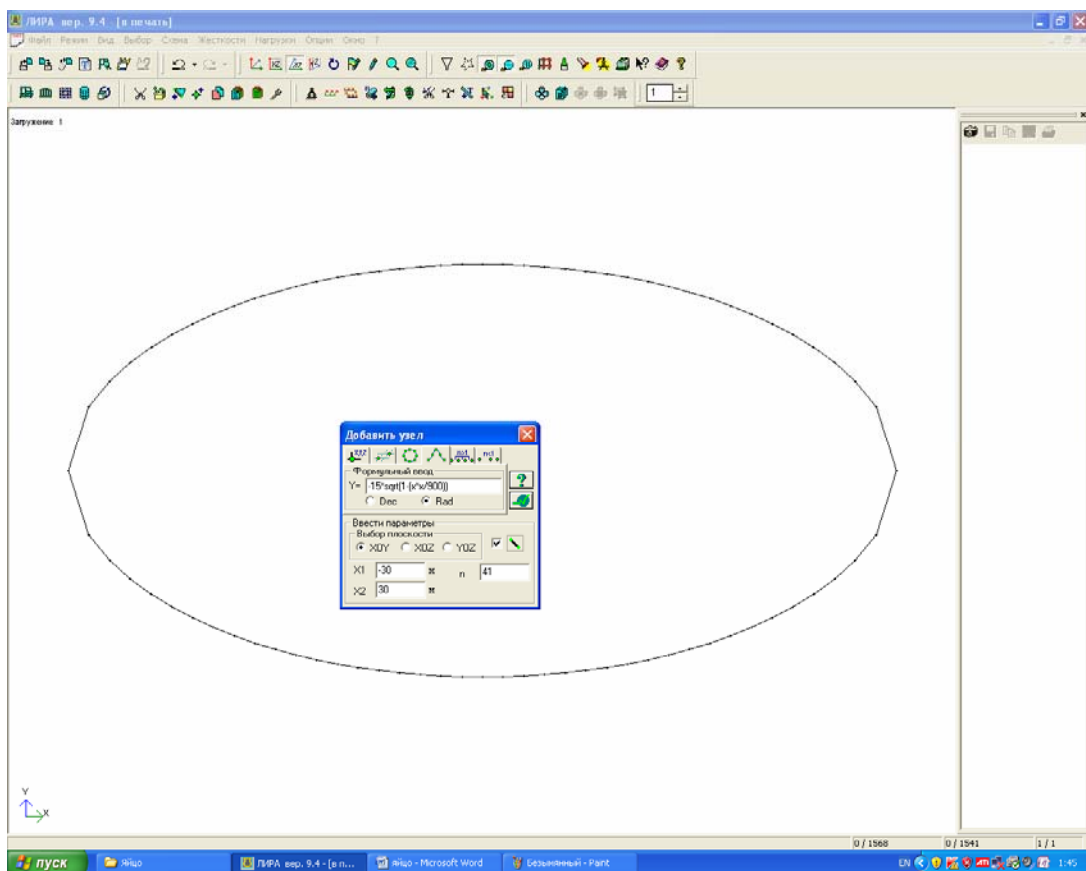
$$y = \pm 15 \sqrt{\left(1 - \frac{x^2}{900}\right)}, \quad (17)$$

где  $x, y$  — координаты оси эллипса ( $x = 30$  м,  $y = 60$  м).

Формула была введена как с положительным, так и с отрицательным знаком для отражения всего эллипса данной функцией.



a)



б)

*Рис. 30. Заведение эллиптического пояса:  
а — меню; б — вид рабочего окна*

Заведение круговых арки в плоскости перпендикулярной основанию с координатами центра и радиусом (рис. 31).

Определение точек пересечения арки с основанием. Лишние части круговой арки были обрезаны, а сама арка связана с основанием стержнями (см. рис. 31).

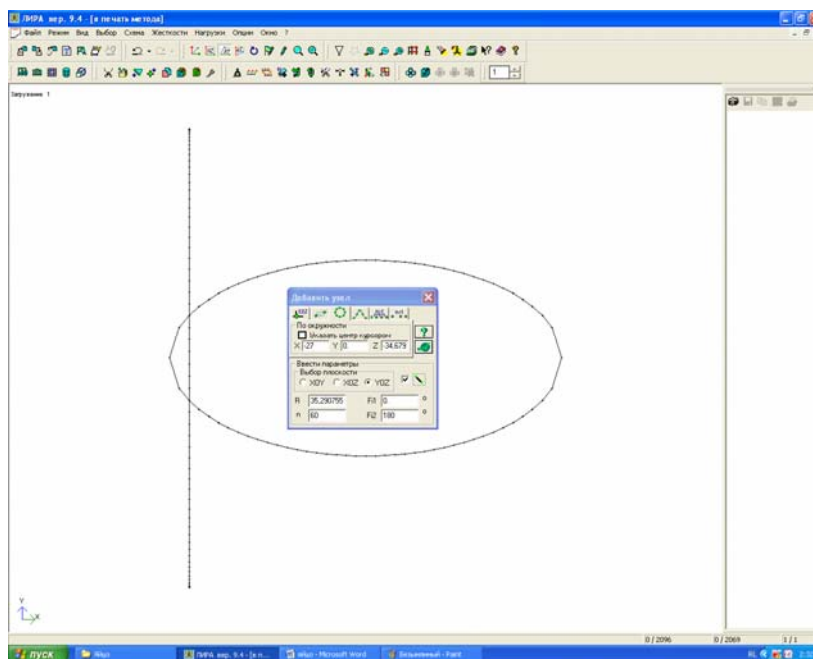


Рис. 31. Заведение круговых арок

Разбивка каждой арки на несколько узлов, к которым впоследствии крепились пластины связавшие их (рис. 32).

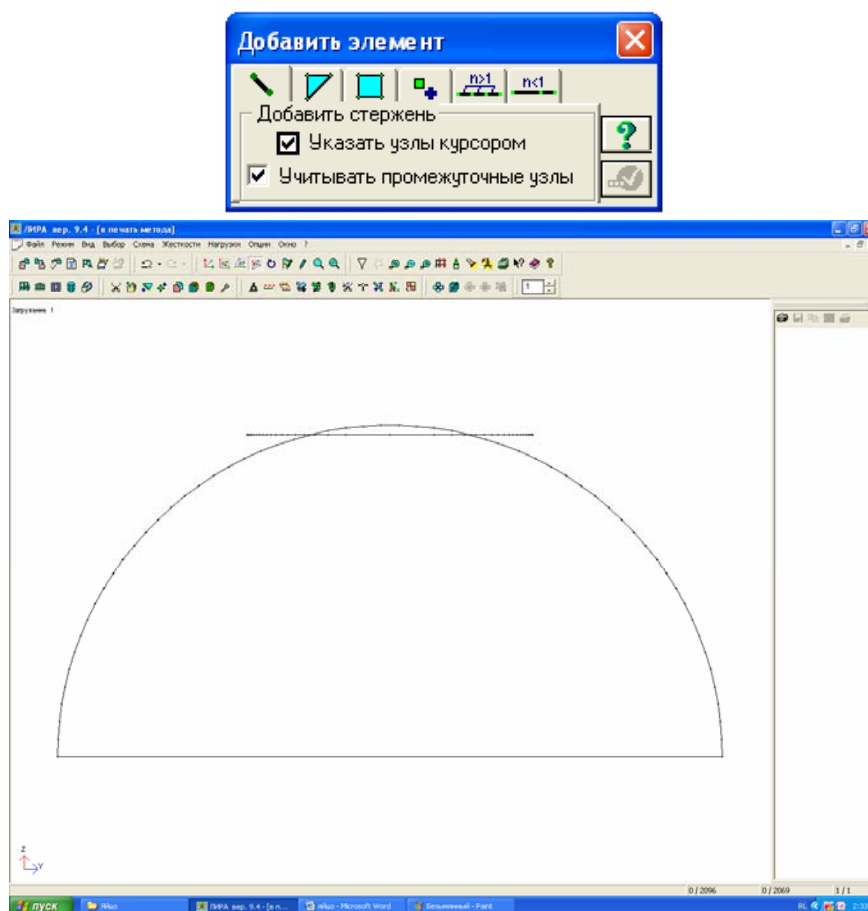


Рис. 32. Разбивка круговых арок на узлы

Определение координат центров окружностей (табл. 4).

Таблица 4. Координаты центров окружностей

| Координата Z   |
|----------------|
| 34 679,755 524 |
| 33 672,959 391 |
| 32 676,628 580 |
| 31 611,903 453 |
| 30 515,205 708 |
| 29 351,332 721 |
| 28 131,571 574 |
| 26 843,644 814 |

Закрепление нижнего пояса по оси X и Y.

Задание жёсткости арки — (сечение арки 20×30 см); характеристики пластин — модуль упругости —  $E = 9,8 \cdot 10^6$  Кн/м<sup>2</sup>;  $H = 20$  см.

После заведения всех арок они связываются друг с другом при помощи пластин. Пластины использовались как четырехузловые так и трехузловые (рис. 33).

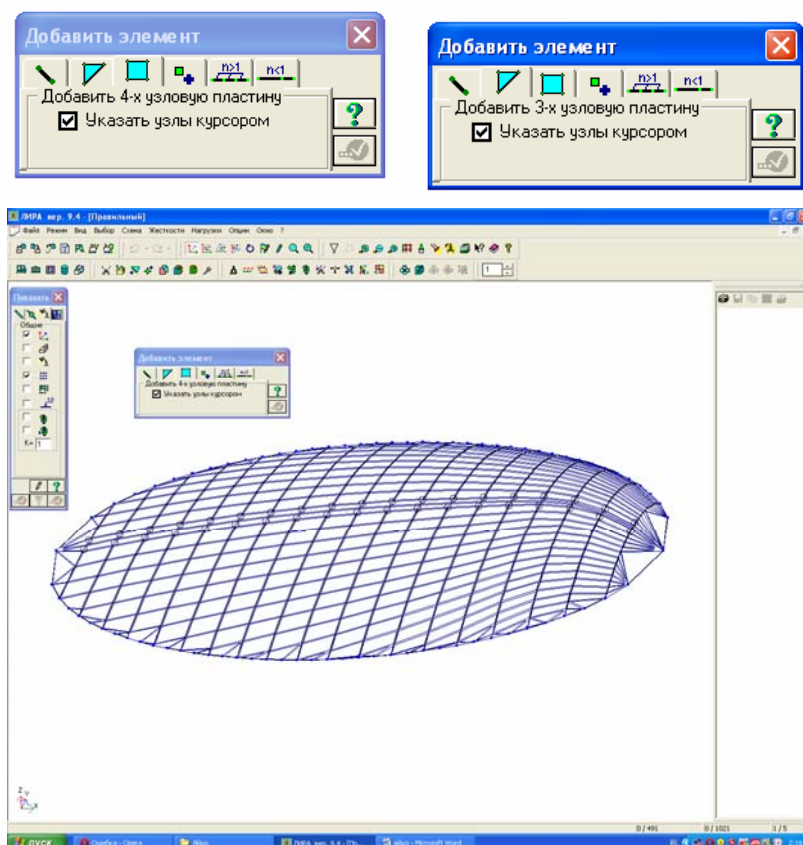


Рис. 33. Введение пластин

### 2.3. Кровельный материал-мембрана ЭПДМ

В качестве кровельного материала использована ЭПДМ мембрана. Мембрана ЭПДМ применяется для устройства кровли промышленных и общественных зданий, гидроизоляции подземных сооружений, водоемов, каналов, водохранилищ — везде, где требуется надежно и быстро гидроизолировать большую поверхность, на объектах, требующих долговечных и качественных материалов.

Мембрана ЭПДМ является одной из самых распространенных в России однослойных кровельных мембран. Отчасти это объясняется ее более длительным присутствием на рынке по сравнению с другими кровельными материалами (первые партии ЭПДМ поступили на рынок России почти 10 лет назад).

Кровельная мембрана позволяет в короткие сроки гидроизолировать большие поверхности — один рулон мембраны покрывает до 500 кв. м. площади.

ЭПДМ известен как один из самых долговечных полимеров. Может служить без признаков старения до 50 лет.

Мембрана ЭПДМ — самый «старый» из полимерных кровельных материалов, первые кровли в США и Канаде стоят уже более 50 лет.

Долговечность ЭПДМ проверена временем, а не климатической камерой.

Производитель и поставщик кровельной мембраны всегда предоставляют:

- проектно-монтажную документацию, технологию укладки для каждого конкретного объекта,
- техническую поддержку, расчеты, обучение специалистов, систему контроля качества работ.

Гарантии на материалы до 25 лет. Кровли на основе ЭПДМ — это не просто новый материал, это комплексная гидроизоляционная система, индивидуально ориентированная на каждый конкретный объект и способная удовлетворить самым взыскательным требованиям.

Применение специально разработанных самоклеящихся лент, клеев, герметиков, теплоизоляторов, материалов для дополнительной гидроизоляции мест примыканий, крепежных элементов позволяет эффективно сочетать быстроту исполнения работ с высочайшим качеством.

Легкость установки, удобство последующей эксплуатации, прочность и долговечность — вот основные причины лидирующего положения мембраны ЭПДМ среди различных кровельных систем.

Технология укладки ЭПДМ мембран разработана с учетом мельчайших деталей. В комплекте ЭПДМ материалов предусмотрены детали для дополнительной гидроизоляции сложных участков: герметики, крепеж для примыканий, труб, углов, усиления периметра.

Технология укладки ЭПДМ мембраны позволяет укладывать до 1 000 м<sup>2</sup> покрытия в день.

Швы мембраны ЭПДМ скрепляются специальными самоклеящимися лентами на основе ЭПДМ полимера. Такая технология позволяет получить равномерный прочный монолитный шов без применения дорогостоящего специального оборудования.

Технология устройства гидроизоляции детально разработана для всех кровельных систем:

- балластной;
- механически закрепляемой;
- полностью приклеенной;
- рейка в шве.

Стабильная эластичность при растяжении 10,5, МПа.

Относительное растяжение > 425, %.

Водопоглощение 0,15, %.

Прочность на разрыв 48,1, кН/м.

Гибкость на стержне  $d = 5$  мм, 60 °С.

Стабильность размеров 1, %.

Толщина — 1,14-1,52 мм.

Вес — менее 1,4, кг/м<sup>2</sup>.

Цвет — черный.

Растворитель отсутствует.

#### **2.4. Теплотехнический расчёт плиты покрытия оболочки**

Здание II класса ответственности, коэффициент надежности по назначению  $\gamma_{\alpha} = 0,95$ ; отапливаемое. Район строительства по снеговой нагрузке — IV. Кровля мембранная двухслойная (рис. 34). Шаг несущих конструкций — 3 м.

*Материалы плиты:* древесина ребер — сосна веймутова 2 сорта; обшивки из водостойкой фанеры марки ФСФ сорта В/ВВ; клей марки ФР-100; утеплитель — минераловатные плиты с  $\gamma_0 = 100$  кг/м<sup>3</sup>; пароизоляция — полиэтиленовая пленка толщиной 0,2 мм.

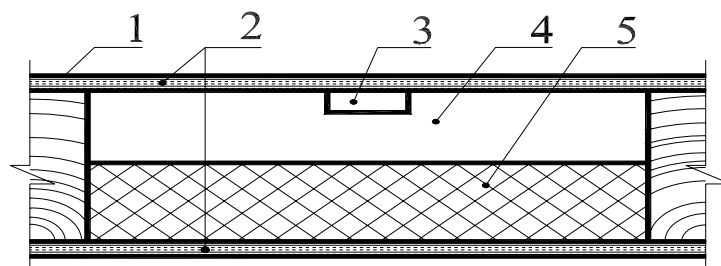


Рис. 34. Конструкция плиты покрытия:  
 1 — два слоя кровельной мембраны ЭПДМ; 2 — фанера ФК, I/III, Е1, Ш2, 1200×1500×10 (ГОСТ 3916.1—96); 3 — вентиляционный продух в торцах;  
 4 — воздушная прослойка; 5 — утеплитель (ГОСТ 9573—82•)

Состав плиты покрытия:

1 слой — верхняя фанерная обшивка

$$\delta_1 = 0,009 \text{ м}, \lambda_1 = 0,18 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С};$$

2 слой — маты минераловатные (определяем расчетом толщину в метрах  $\delta_2$ ,  $\lambda_2 = 0,06 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ );

3 слой — нижняя фанерная обшивка  $\delta_3 = 0,009 \text{ м}$   $\lambda_3 = 0,18 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}$ .

Строительство ведется в г. Орел.

Исходные данные:

$t_x = -30 \text{ } ^\circ\text{С}$  — расчетная зимняя температура наружного воздуха, равная средней температуре наиболее холодных суток обеспеченностью 0,92;

$z_{on} = 205 \text{ сут}$  — продолжительность периода со среднесуточной температурой наружного воздуха  $\leq 8 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;

$t_{on} = -2,7 \text{ } ^\circ\text{С}$  — температура периода со среднесуточной температурой наружного воздуха  $\leq 8 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;

$\Delta t_n = 6$  — нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции;

$n = 1$  — коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху;

$t_g = 20 \text{ } ^\circ\text{С}$  — расчетная температура внутреннего воздуха;

$\alpha_{в} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$  — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций;

$\alpha_{н} = 23 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С}$  — коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции.

Определяем требуемое термическое сопротивление  $R_0^{\text{тп}}$  по формуле

$$R_0^{\text{тп}} = \frac{n(t_g - t_n)}{\Delta t_n \alpha_g} = \frac{1 \cdot (18 - 30)}{6 \cdot 8,7} = 0,919 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Учет энергосбережения по формуле

$$\begin{aligned} ГСОП &= (t_g - t_{on}) z_{on} = \\ &= (20 - (-2,7)) \cdot 205 = 4465 \text{ °C} \cdot \text{сут}. \end{aligned}$$

Определяем точное значение методом интерполирования

$$R_0 = \frac{3 - 2,4}{6000 - 4000} (4465 - 4000) + 2,4 = 2,539 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$R_0 \geq R_0^{\text{тп}}.$$

Общее сопротивление теплопередачи многослойной конструкции вычисляем по формуле

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n}; \\ R_0 &= \frac{1}{8,7} + \frac{0,009}{0,18} + \frac{x}{0,06} + \frac{0,009}{0,18} + \frac{1}{23} = 2,54 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \\ 0,115 + 0,05 + \frac{x}{0,06} + 0,033 + 0,043 &= 2,54 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \\ x &= 0,138 \text{ м}. \end{aligned}$$

Принимаем утеплитель модульной толщиной 150 мм.

## 2.5. Сбор нагрузок на конструкцию

Производим сбор нагрузок на 1 м<sup>2</sup> поверхности по нижеприведенным формулам, результат расчёта сводим в таблицу 25.

Обрешетка:

– поперечные доски:

$$\frac{b_p h_n n \gamma}{B} = \frac{50 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,5} = 0,05 \text{ кН/м}^2;$$

– продольные ребра:

$$\frac{b_p h_n n \gamma}{B} = \frac{50 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{3} = 0,0125 \text{ кН/м}^2.$$

Вес фанерной обшивки:

$$\gamma \delta = 7 \cdot (9 + 9) \cdot 10^{-3} = 0,126 \text{ кН/м}^2.$$

Вес утеплителя:

$$\frac{b_p h_n n \gamma}{B} = \frac{450 \cdot 150 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{1490 \cdot 10^{-3}} = 0,41 \text{ кН/м}^2.$$



Таблица 25. Сбор нагрузок

| Наименование нагрузки   | Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> | Коэффициент надежности по нагрузке, $\gamma_f$ | Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup> |
|---|---|--|---------------------------------------|
| Вес кровельной мембраны   | 0,13                                    | 1,3  | 0,169                                 |
| Вес фанерной обшивки  | 0,126                                   | 1,1  | 0,1386                                |
| Вес обрешетки   | 0,0625                                  | 1,1  | 0,06875                               |
| Вес утеплителя  | 0,41                                    | 1,2  | 0,492                                 |
| Вес пароизоляции<br>$\gamma\delta = 0,0002 \cdot 9,7$ кН/м <sup>2</sup> | 0,002                                   | 1,3  | 0,003                                 |
| Постоянная  | 0,7305                                  |  | 0,8711                                |
| Временная снеговая  | см. ниже по тексту                      | 1,4  | см. расчётные схемы                   |
| Ветровая  | см. ниже по тексту                      | 1,4  | см. расчётные схемы                   |

Снеговые нагрузки вычисляем по [2, формула (10)] с учётом на 1 погонный метр.

Временная снеговая

$$S_0 = 0,7c_e c_t \mu S_g,$$

где  $c_e = 0,85$ , т.к. размер в поперечнике менее 60 м;  $c_t = 1$ ;  $\mu$  определяется расчетом для двух возможных случаев загрузки снегом.

В первом случае  $\mu_1 = \cos 1,5\alpha$ , во втором случае  $\mu_2 = 2 \sin 3\alpha$  рассчитывается для каждой арки в характерных точках. Значения коэффициента  $\mu$  представлены в таблице 26.

Подставив значения, получим:

$$S_0 = 0,7c_e c_t \mu S_g = 0,7 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,4 = 1,43 \mu.$$

Таблица 26. Расчёт коэффициентов  $\mu$

| арки № | 1    |         |         | 2    |         |         | 3    |         |         | 4    |          |          | 5    |         |         |
|--------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|----------|----------|------|---------|---------|
|        | углы | коэф. 1 | коэф. 2 | углы | коэф. 1 | коэф. 2 | углы | коэф. 1 | коэф. 2 | углы | коэф. 1  | коэф. 2  | углы | коэф. 1 | коэф. 2 |
| 16     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 15     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 14     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 13     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 12     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 11     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 10     |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 9      |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          |      |         |         |
| 8      |      |         |         |      |         |         |      |         |         |      |          |          | 23   | 0,82429 | 1,86672 |
| 7      |      |         |         |      |         |         |      |         |         | 20   | 0,866158 | 1,73152  | 20   | 0,86615 | 1,73152 |
| 6      |      |         |         |      |         |         | 17   | 0,90268 | 1,55372 | 17   | 0,902682 | 1,553724 | 17   | 0,90268 | 1,55372 |
| 5      |      |         |         | 14   | 0,93364 | 1,3377  | 14   | 0,93364 | 1,33770 | 14   | 0,933647 | 1,337709 | 14   | 0,93364 | 1,33770 |
| 4      | 11   | 0,9588  | 1,0887  | 11   | 0,95886 | 1,08878 | 11   | 0,95886 | 1,08878 | 11   | 0,958861 | 1,088788 | 11   | 0,95886 | 1,08878 |
| 3      | 8    | 0,9781  | 0,81308 | 8    | 0,97817 | 0,81308 | 8    | 0,97817 | 0,81308 | 8    | 0,97817  | 0,813085 | 8    | 0,97817 | 0,81308 |
| 2      | 5    | 0,9914  | 0,51738 | 5    | 0,99145 | 0,51738 | 5    | 0,99145 | 0,51738 | 5    | 0,991454 | 0,51738  | 5    | 0,99145 | 0,51738 |
| 1      | 2    | 0,9986  | 0,20895 | 2    | 0,9986  | 0,20895 | 2    | 0,99863 | 0,20895 | 2    | 0,99863  | 0,20895  | 2    | 0,9986  | 0,20895 |

Продолжение таблицы 26

|    | 14   |         |         | 15     |         |         | 16     |         |         | 17     |         |         | 18     |         |         | 19   |         |         |
|----|------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|------|---------|---------|
|    | углы | коэф. 1 | коэф. 2 | углы   | коэф. 1 | коэф. 2 | углы   | коэф. 1 | коэф. 2 | углы   | коэф. 1 | коэф. 2 | углы   | коэф. 1 | коэф. 2 | углы | коэф. 1 | коэф. 2 |
|    |      |         |         |        |         |         |        |         |         |        |         |         |        |         |         |      |         |         |
|    |      |         |         |        |         |         | 44     | 0,4072  | 1,4878  | 44     | 0,4072  | 1,4878  | 44     | 0,4072  | 1,4878  |      |         |         |
|    |      |         | 41      | 0,4776 | 1,6785  | 41      | 0,4776 | 1,6785  | 41      | 0,4776 | 1,6785  | 41      | 0,4776 | 1,6785  |         |      |         |         |
|    | 38   | 0,5450  | 1,8279  | 38     | 0,5450  | 1,8279  | 38     | 0,5450  | 1,8279  | 38     | 0,5450  | 1,8279  | 38     | 0,5450  | 1,8279  | 38   | 0,5450  | 1,8279  |
|    | 35   | 0,6091  | 1,9323  | 35     | 0,6091  | 1,9323  | 35     | 0,6091  | 1,9323  | 35     | 0,6091  | 1,9323  | 35     | 0,6091  | 1,9323  | 35   | 0,6091  | 1,9323  |
|    | 32   | 0,6694  | 1,9892  | 32     | 0,6694  | 1,9892  | 32     | 0,6694  | 1,9892  | 32     | 0,6694  | 1,9892  | 32     | 0,6694  | 1,9892  | 32   | 0,6694  | 1,9892  |
|    | 29   | 0,7256  | 1,9971  | 29     | 0,7256  | 1,9971  | 29     | 0,725   | 1,997   | 29     | 0,7256  | 1,9971  | 29     | 0,7256  | 1,9971  | 29   | 0,7256  | 1,9971  |
|    | 26   | 0,7773  | 1,9560  | 26     | 0,7773  | 1,9560  | 26     | 0,777   | 1,956   | 26     | 0,7773  | 1,9560  | 26     | 0,7773  | 1,9560  | 26   | 0,7773  | 1,9560  |
|    | 23   | 0,8243  | 1,8667  | 23     | 0,8243  | 1,8667  | 23     | 0,824   | 1,866   | 23     | 0,8243  | 1,8667  | 23     | 0,8243  | 1,8667  | 23   | 0,8243  | 1,8667  |
| 59 | 20   | 0,8661  | 1,7315  | 20     | 0,8661  | 1,7315  | 20     | 0,866   | 1,731   | 20     | 0,8661  | 1,7315  | 20     | 0,8661  | 1,7315  | 20   | 0,8661  | 1,7315  |
|    | 17   | 0,9026  | 1,5537  | 17     | 0,9026  | 1,5537  | 17     | 0,902   | 1,553   | 17     | 0,9026  | 1,5537  | 17     | 0,9026  | 1,5537  | 17   | 0,9026  | 1,5537  |
|    | 14   | 0,9336  | 1,3377  | 14     | 0,9336  | 1,3377  | 14     | 0,933   | 1,337   | 14     | 0,9336  | 1,3377  | 14     | 0,9336  | 1,3377  | 14   | 0,9336  | 1,3377  |
|    | 11   | 0,9588  | 1,0887  | 11     | 0,9588  | 1,0887  | 11     | 0,958   | 1,088   | 11     | 0,9588  | 1,0887  | 11     | 0,9588  | 1,0887  | 11   | 0,9588  | 1,0887  |
|    | 8    | 0,9781  | 0,8130  | 8      | 0,9781  | 0,813   | 8      | 0,978   | 0,813   | 8      | 0,9781  | 0,8130  | 8      | 0,9781  | 0,8130  | 8    | 0,9781  | 0,8130  |
|    | 5    | 0,9914  | 0,5173  | 5      | 0,991   | 0,517   | 5      | 0,991   | 0,517   | 5      | 0,9914  | 0,5173  | 5      | 0,9914  | 0,5173  | 5    | 0,9914  | 0,5173  |
|    | 2    | 0,99863 | 0,20895 | 2      | 0,9986  | 0,2089  | 2      | 0,9986  | 0,2089  | 2      | 0,99863 | 0,20895 | 2      | 0,99863 | 0,20895 | 2    | 0,99863 | 0,20895 |

Примечание. Коэффициенты для соответствующих сечений повторяются, поэтому приведена только часть общей таблицы.

Угол  $\alpha$  определялся графическим способом в программном комплексе AutoCad и интерполяцией, значения углов показаны на схемах арок (рис. 35-38).

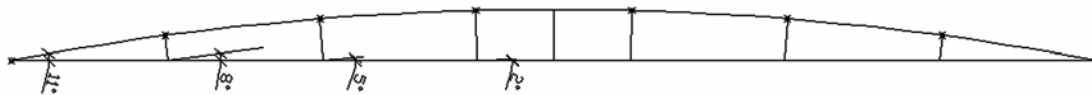


Рис. 35. Определение углов  $\alpha$

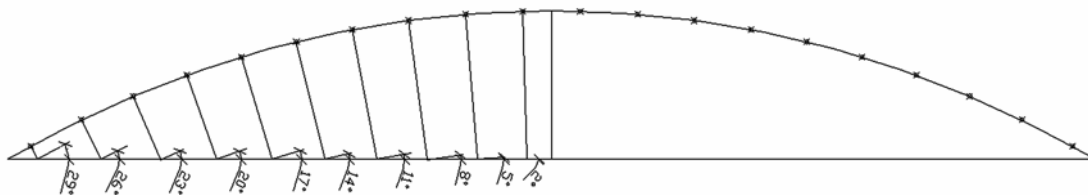


Рис. 36. Определение углов  $\alpha$

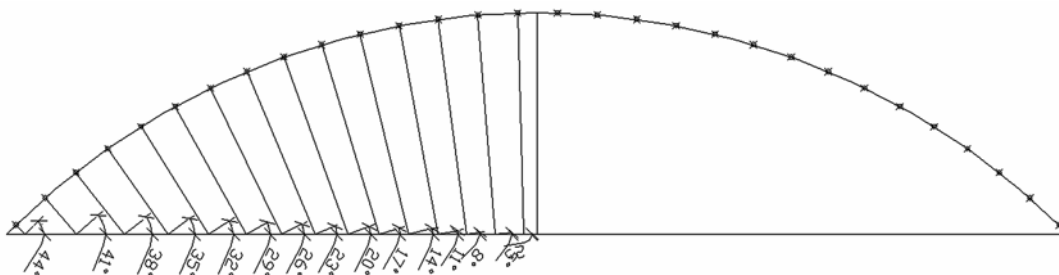


Рис. 37. Определение углов  $\alpha$

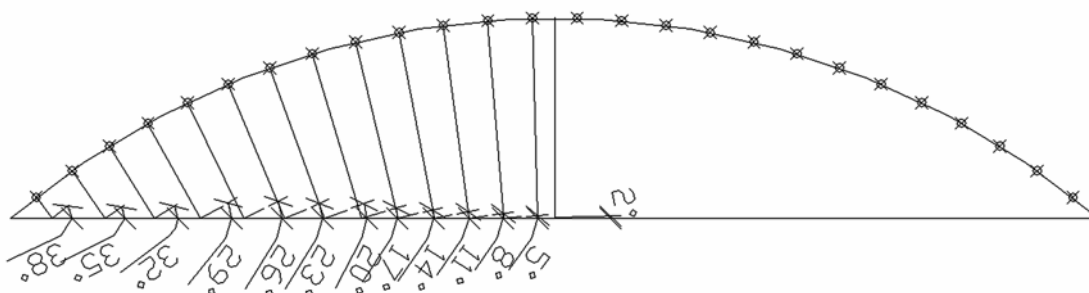


Рис. 38. Определение углов  $\alpha$

В таблице 27 приведена рассчитанная снеговая нагрузка для двух случаев загрузки, при различных коэффициентах  $\mu_1 = \cos 1,5\alpha$  и  $\mu_2 = 2 \sin 3\alpha$ .

Таблица 27. Снеговая нагрузка

| арки № | 14       |          |      | 15       |          |      | 16       |          |      | 17       |          |      | 18       |          |      | 19       |          |  |
|--------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|--|
| УГЛЫ   | случай 1 | случай 2 | углы | случай 1 | случай 2 | углы | случай 1 | случай 2 | углы | случай 1 | случай 2 | углы | случай 1 | случай 2 | углы | случай 1 | случай 2 |  |
|        |          |          |      |          |          | 44   | 0,5824   | 2,1276   | 44   | 0,5824   | 2,1276   | 44   | 0,5824   | 2,1276   |      |          |          |  |
|        |          |          | 41   | 0,6830   | 2,4003   | 41   | 0,6830   | 2,4003   | 41   | 0,6830   | 2,4003   | 41   | 0,6830   | 2,4003   |      |          |          |  |
| 38     | 0,7794   | 2,6139   | 38   | 0,7794   | 2,6139   | 38   | 0,7794   | 2,6139   | 38   | 0,7794   | 2,6139   | 38   | 0,7794   | 2,6139   | 38   | 0,7794   | 2,6139   |  |
| 35     | 0,8711   | 2,7632   | 35   | 0,8711   | 2,7632   | 35   | 0,8711   | 2,7632   | 35   | 0,8711   | 2,7632   | 35   | 0,8711   | 2,7632   | 35   | 0,8711   | 2,7632   |  |
| 32     | 0,9573   | 2,8446   | 32   | 0,9573   | 2,8446   | 32   | 0,9573   | 2,8446   | 32   | 0,9573   | 2,8446   | 32   | 0,9573   | 2,8446   | 32   | 0,9573   | 2,8446   |  |
| 29     | 1,0377   | 2,8560   | 29   | 1,0377   | 2,8560   | 29   | 1,0377   | 2,8560   | 29   | 1,0377   | 2,8560   | 29   | 1,0377   | 2,8560   | 29   | 1,0377   | 2,8560   |  |
| 26     | 1,1116   | 2,7971   | 26   | 1,1116   | 2,7971   | 26   | 1,1116   | 2,7971   | 26   | 1,1116   | 2,7971   | 26   | 1,1116   | 2,7971   | 26   | 1,1116   | 2,7971   |  |
| 23     | 1,1787   | 2,6694   | 23   | 1,1787   | 2,6694   | 23   | 1,1787   | 2,6694   | 23   | 1,1787   | 2,6694   | 23   | 1,1787   | 2,6694   | 23   | 1,1787   | 2,6694   |  |
| 20     | 1,2386   | 2,4761   | 20   | 1,2386   | 2,4761   | 20   | 1,2386   | 2,4761   | 20   | 1,2386   | 2,4761   | 20   | 1,2386   | 2,4761   | 20   | 1,2386   | 2,4761   |  |
| 17     | 1,2908   | 2,2218   | 17   | 1,2908   | 2,2218   | 17   | 1,2908   | 2,2218   | 17   | 1,2908   | 2,2218   | 17   | 1,2908   | 2,2218   | 17   | 1,2908   | 2,2218   |  |
| 14     | 1,3351   | 1,9129   | 14   | 1,3351   | 1,9129   | 14   | 1,3351   | 1,9129   | 14   | 1,3351   | 1,9129   | 14   | 1,3351   | 1,9129   | 14   | 1,3351   | 1,9129   |  |
| 11     | 1,3712   | 1,5570   | 11   | 1,3712   | 1,5570   | 11   | 1,3712   | 1,5570   | 11   | 1,3712   | 1,5570   | 11   | 1,3712   | 1,5570   | 11   | 1,3712   | 1,5570   |  |
| 8      | 1,3988   | 1,1627   | 8    | 1,3988   | 1,1627   | 8    | 1,3988   | 1,1627   | 8    | 1,3988   | 1,1627   | 8    | 1,3988   | 1,1627   | 8    | 1,3988   | 1,1627   |  |
| 5      | 1,4178   | 0,7399   | 5    | 1,4178   | 0,7399   | 5    | 1,4178   | 0,7399   | 5    | 1,4178   | 0,7399   | 5    | 1,4178   | 0,7399   | 5    | 1,4178   | 0,7399   |  |
| 2      | 1,4280   | 0,2988   | 2    | 1,4280   | 0,2988   | 2    | 1,4280   | 0,2988   | 2    | 1,4280   | 0,2988   | 2    | 1,4280   | 0,2988   | 2    | 1,4280   | 0,2988   |  |

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки  $w_m$  в зависимости от эквивалентной высоты  $Z_e$  над поверхностью земли определяют по формуле:

$$w_m = w_0 k(z_e) c,$$

где  $w_0$  — нормативное значение ветрового давления [2];

$k(Z_e)$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты  $Z_e$ ;

$c$  — аэродинамический коэффициент.

Все необходимые данные вычислялись в программе Excel и приведены в таблице 28. Далее конструкция загружалась по пластинам нагрузками  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  в соответствии со схемой воздействия ветра на прямоугольные в плане здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями.

Таблица 28. Ветровая нагрузка

|         |          |        | $K(Z_e)$ | 0,5    |        |          |
|---------|----------|--------|----------|--------|--------|----------|
|         |          |        | $w_0 =$  | 0,23   |        |          |
| $W_1$   | $W_2$    | $W_3$  | $Ce_1$   | $Ce_2$ | $Ce_3$ | $f/L$    |
| 0,0115  | -0,0897  | -0,046 | 0,1      | -0,78  | -0,4   | 0,046723 |
| 0,01495 | -0,09085 | -0,046 | 0,13     | -0,79  | -0,4   | 0,065667 |
| 0,0184  | -0,092   | -0,046 | 0,16     | -0,8   | -0,4   | 0,079864 |
| 0,01955 | -0,09315 | -0,046 | 0,17     | -0,81  | -0,4   | 0,091708 |
| 0,01955 | -0,0943  | -0,046 | 0,17     | -0,82  | -0,4   | 0,101998 |
| 0,0207  | -0,0943  | -0,046 | 0,18     | -0,82  | -0,4   | 0,111293 |
| 0,02185 | -0,09545 | -0,046 | 0,19     | -0,83  | -0,4   | 0,119855 |
| 0,023   | -0,09545 | -0,046 | 0,2      | -0,83  | -0,4   | 0,127917 |
| 0,02415 | -0,0966  | -0,046 | 0,21     | -0,84  | -0,4   | 0,135712 |
| 0,0253  | -0,09775 | -0,046 | 0,22     | -0,85  | -0,4   | 0,143433 |
| 0,0276  | -0,0989  | -0,046 | 0,24     | -0,86  | -0,4   | 0,15129  |
| 0,02875 | -0,10005 | -0,046 | 0,25     | -0,87  | -0,4   | 0,15959  |
| 0,0299  | -0,1012  | -0,046 | 0,26     | -0,88  | -0,4   | 0,168635 |
| 0,03105 | -0,10235 | -0,046 | 0,27     | -0,89  | -0,4   | 0,179051 |
| 0,03335 | -0,1035  | -0,046 | 0,29     | -0,9   | -0,4   | 0,191717 |
| 0,0345  | -0,1058  | -0,046 | 0,3      | -0,92  | -0,4   | 0,208333 |
| 0,0368  | -0,10695 | -0,046 | 0,32     | -0,93  | -0,4   | 0,220874 |
| 0,03565 | -0,1058  | -0,046 | 0,31     | -0,92  | -0,4   | 0,216611 |
| 0,0322  | -0,1012  | -0,046 | 0,28     | -0,88  | -0,4   | 0,183834 |

## 2.6. Задание нагрузок на конструкцию

### Порядок расчёта

1. Загружаем конструкцию равномерно распределенной нагрузкой на каждую пластину, величина нагрузок варьируется в зависимости от ее вида и расположения пластин (рис. 39).

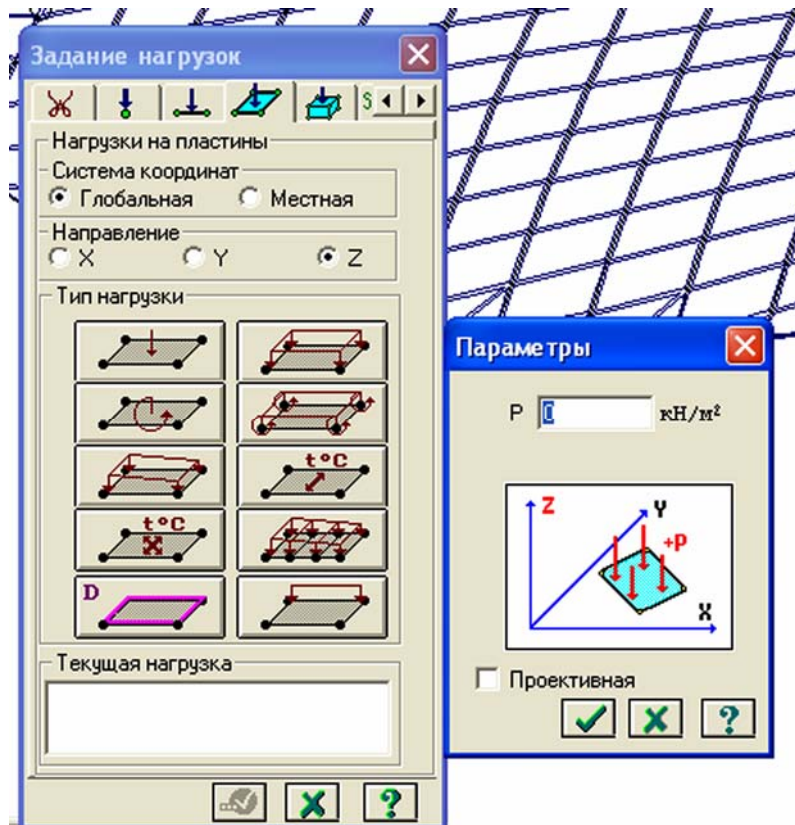


Рис.39. Задание нагрузок

Виды загрузений:

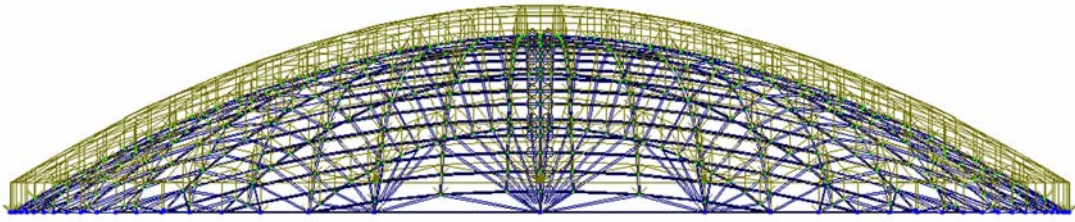
*Первое загрузение.* Добавлен собственный вес (рис. 40).

*Второе загрузение.* Нагрузка от плит покрытия. Постоянная нагрузка. Расчет нагрузок ниже (рис. 41).

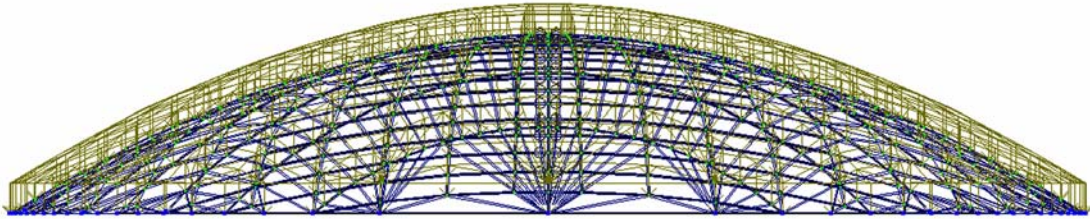
*Третье загрузение.* Снеговая нагрузка. Первый случай, когда снег расположен в центральной части конструкции (рис. 42).

*Четвертое загрузение.* Снеговая нагрузка. Второй случай, когда снег под воздействием ветра распространяется неравномерно по кровле конструкции (рис. 43).

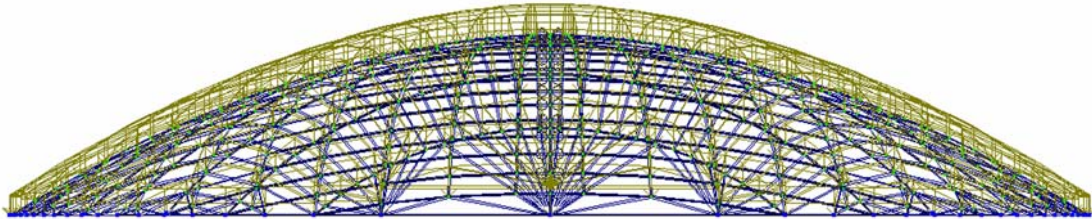
*Пятое загрузение.* Ветровая нагрузка. Учитывается боковой ветер. Аэродинамические коэффициенты были рассчитаны для каждой арки по графику в зависимости от соотношения  $F/l$  (рис. 44).



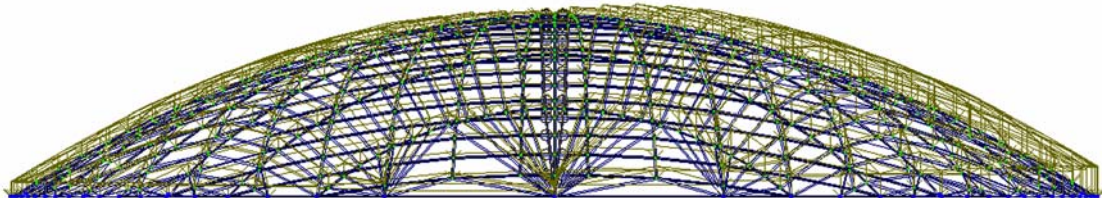
*Рис. 40. Собственный вес*



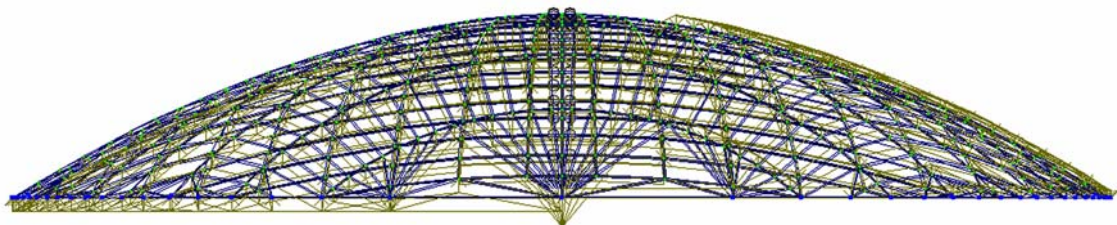
*Рис. 41. Нагрузка от плит покрытия*



*Рис. 42. Равномерно распределенный снег по покрытию*



*Рис. 43. Неравномерно распределенный снег по покрытию под действием силы ветра*



*Рис. 44. Боковой ветер справа  
(справа — активное давление ветра, слева — пассивный отпор)*

Основная схема представлена на рисунке 45.



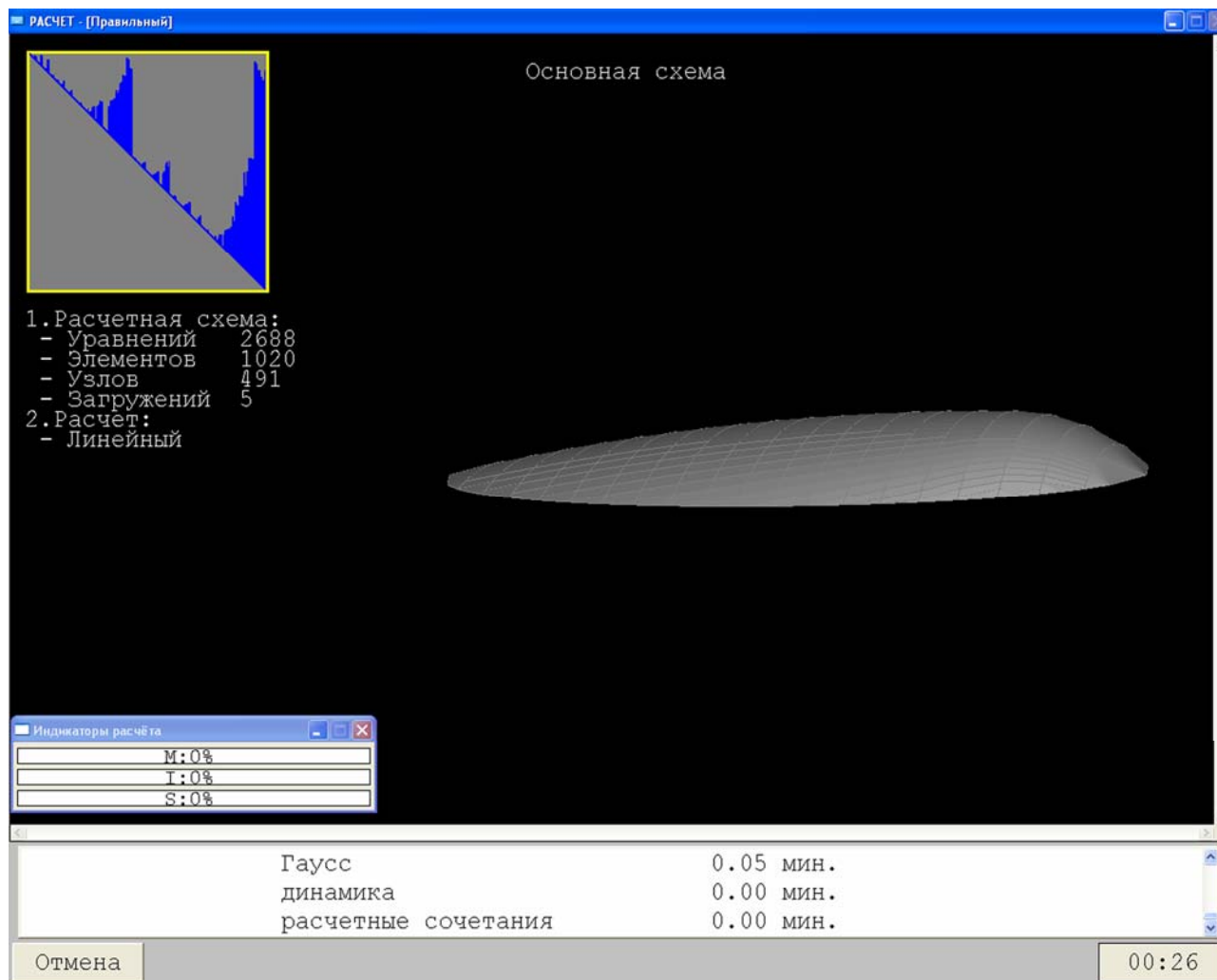
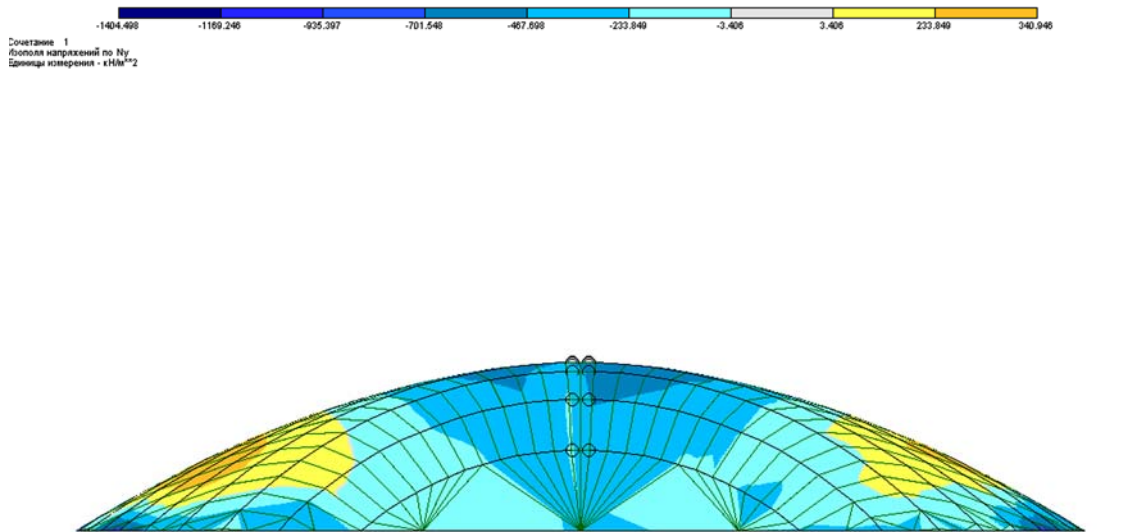


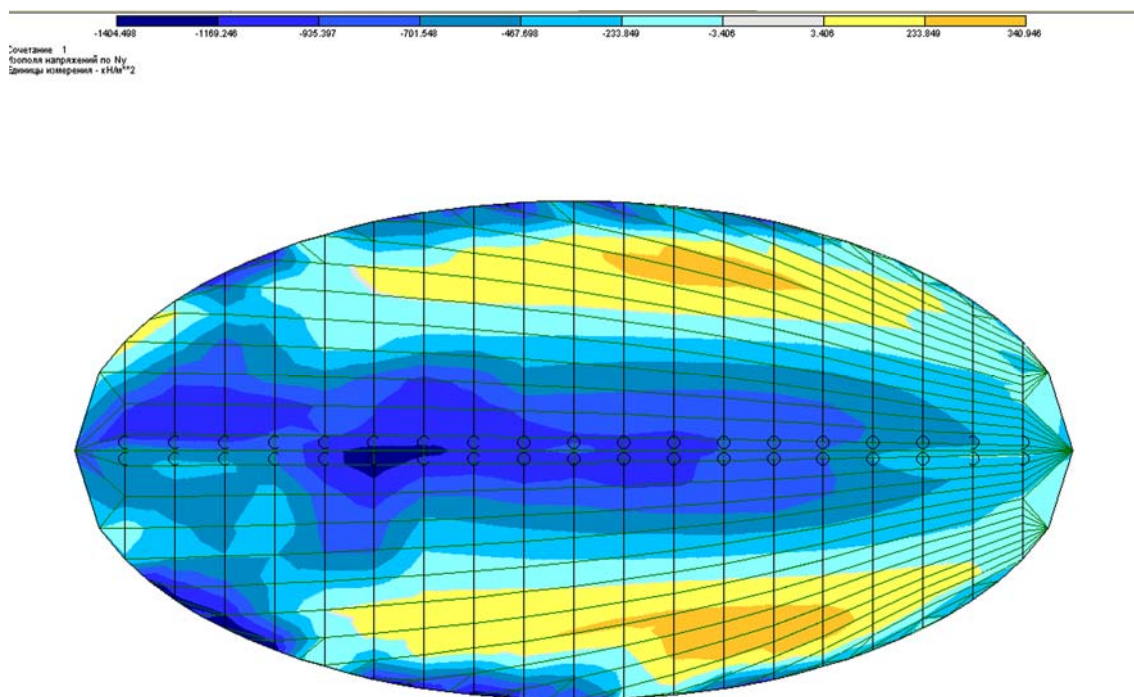
Рис. 45. Основная схема

2. Формируем сочетания нагрузок:

1) РСН 1. Собственный вес + нагрузка от плит покрытия + снеговая нагрузка по дуге (1 случай) + боковой ветер (рис. 46 а, б);



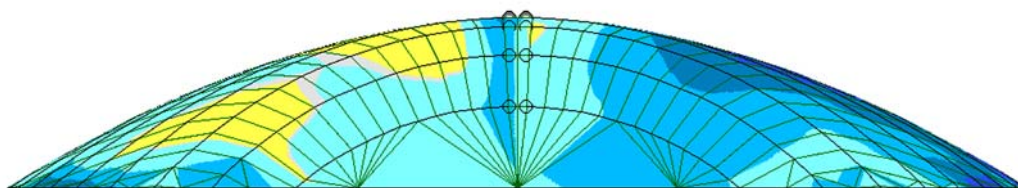
а)



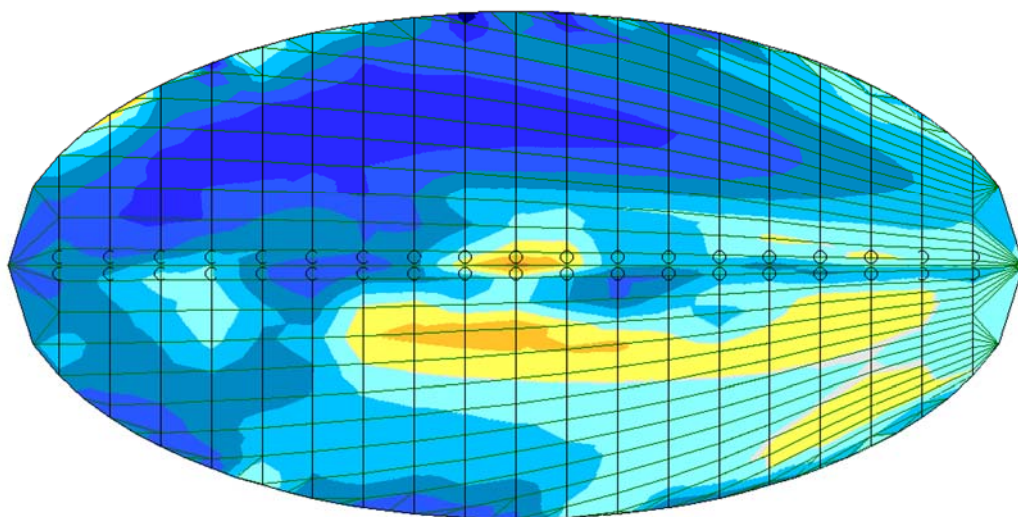
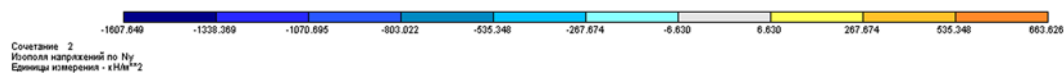
б)

Рис. 46. Изополюс напряжений:  
а — фронтальная проекция; б — горизонтальная проекция

2) РСН 2. Собственный вес + нагрузка от плит покрытия + снеговая нагрузка неравномерная (2 случая) + боковой ветер (рис. 47 а, б);



а)



б)

Рис. 47. Изополю напряжений:  
а — фронтальная проекция; б — горизонтальная проекция

3) РСНЗ Собственный вес + нагрузка от плит покрытия + снеговая нагрузка по дуге (1 случай) (рис. 48 а, б);

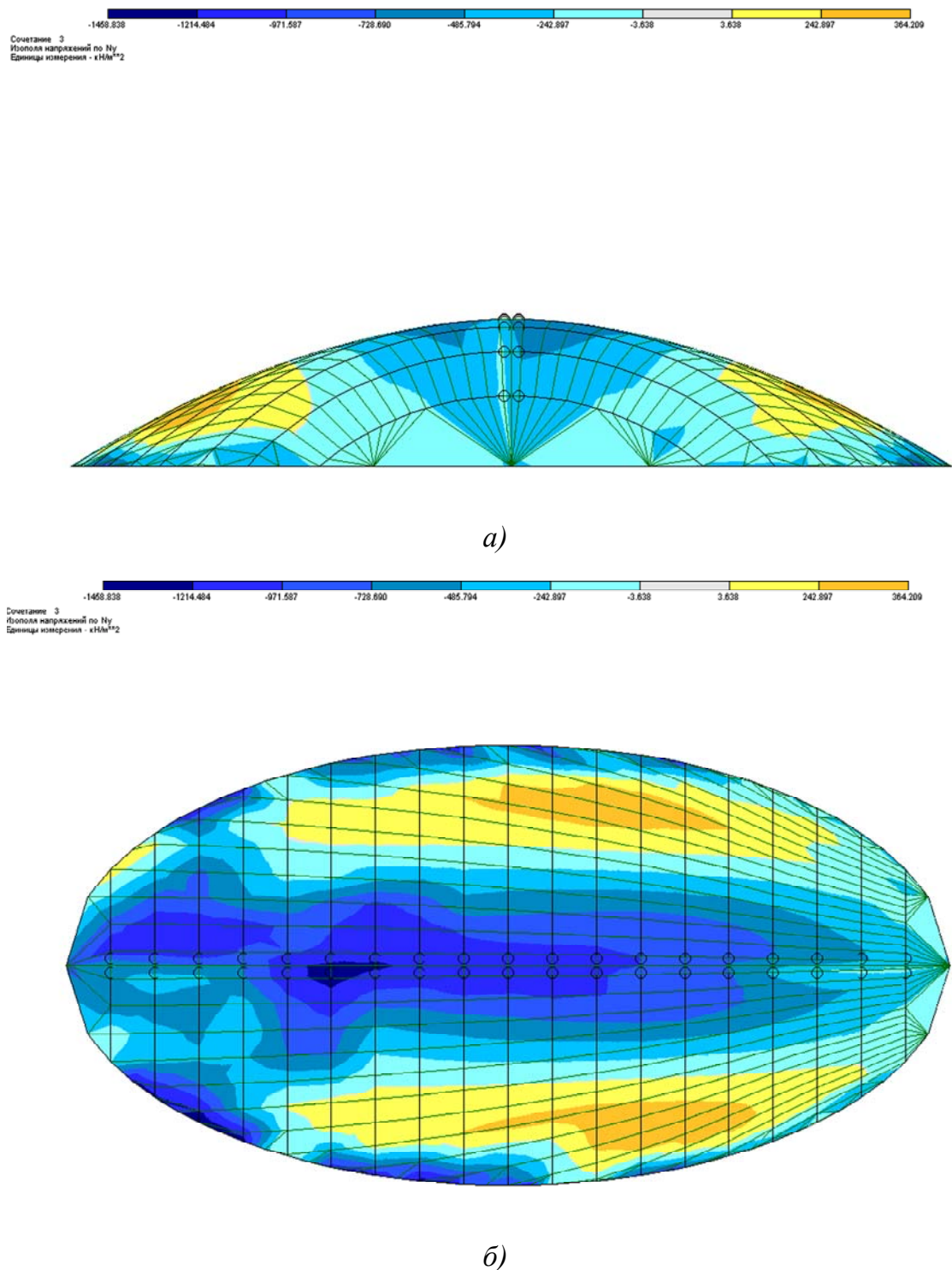
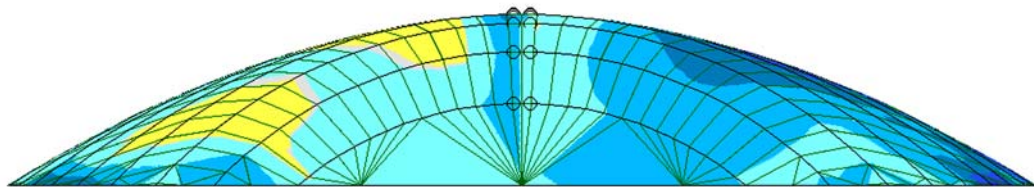
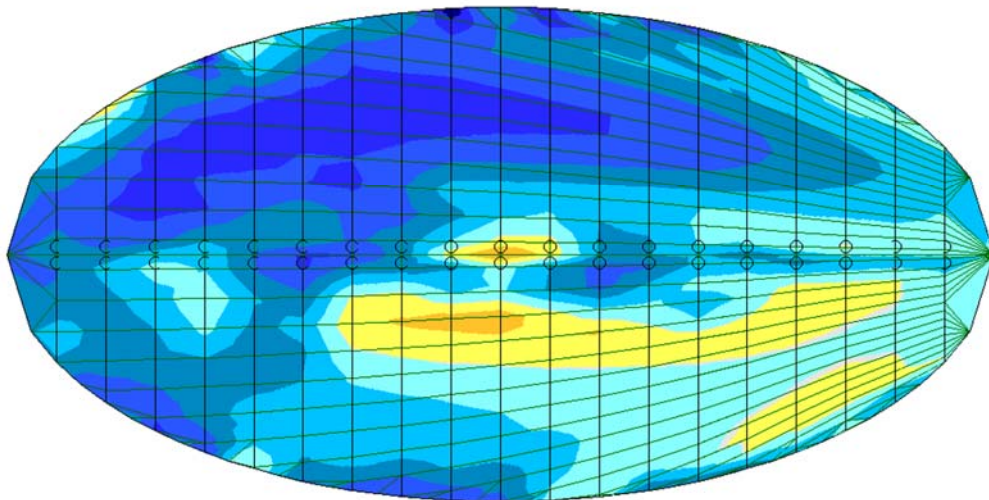


Рис. 48. Изополя напряжений:  
а — фронтальная проекция; б — горизонтальная проекция

4) РСН4 Собственный вес + нагрузка от плит покрытия + снеговая нагрузка неравномерная (2 случай) (рис. 49 а, б);



a)



б)

Рис. 49. Изополя напряжений:  
а — фронтальная проекция; б — горизонтальная проекция

## 2.7. Определение расчётных усилий

Рассматриваем наиболее загруженное сечение. Для нашего примера расчётное сочетание нагрузок оказалось наиболее неблагоприятным.

1. Определяем максимальные деформации расчётного сочетания нагрузок (рис. 50, 51).



значения по Z (z)  
единица - мм

70

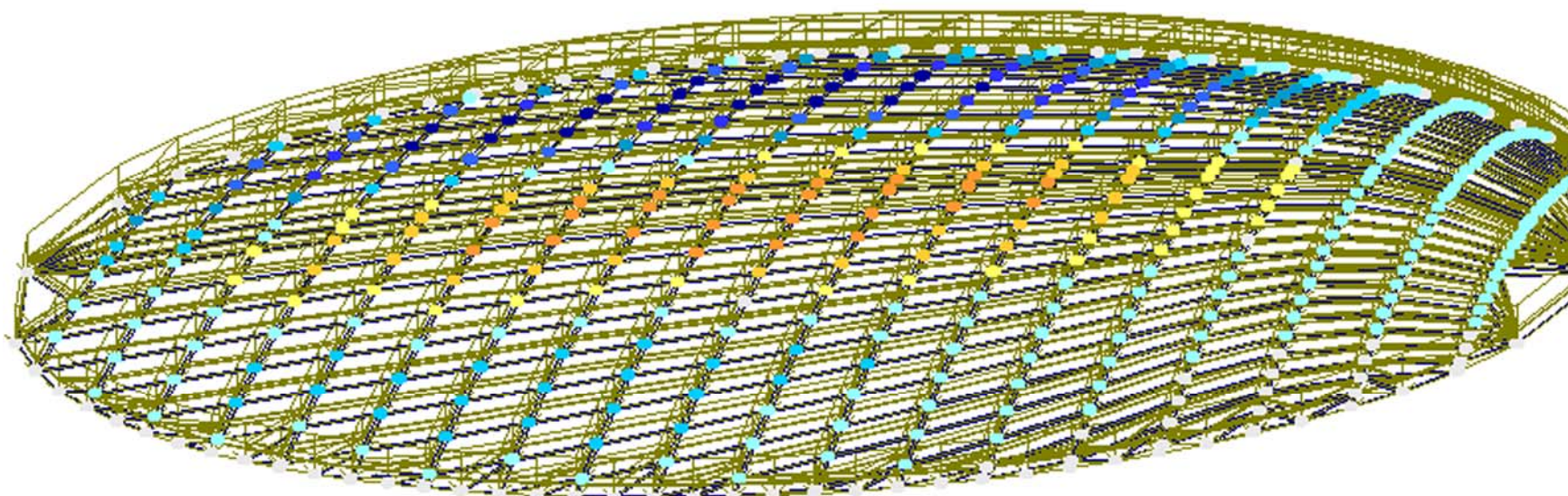


Рис. 50. Мозаика перемещений



71

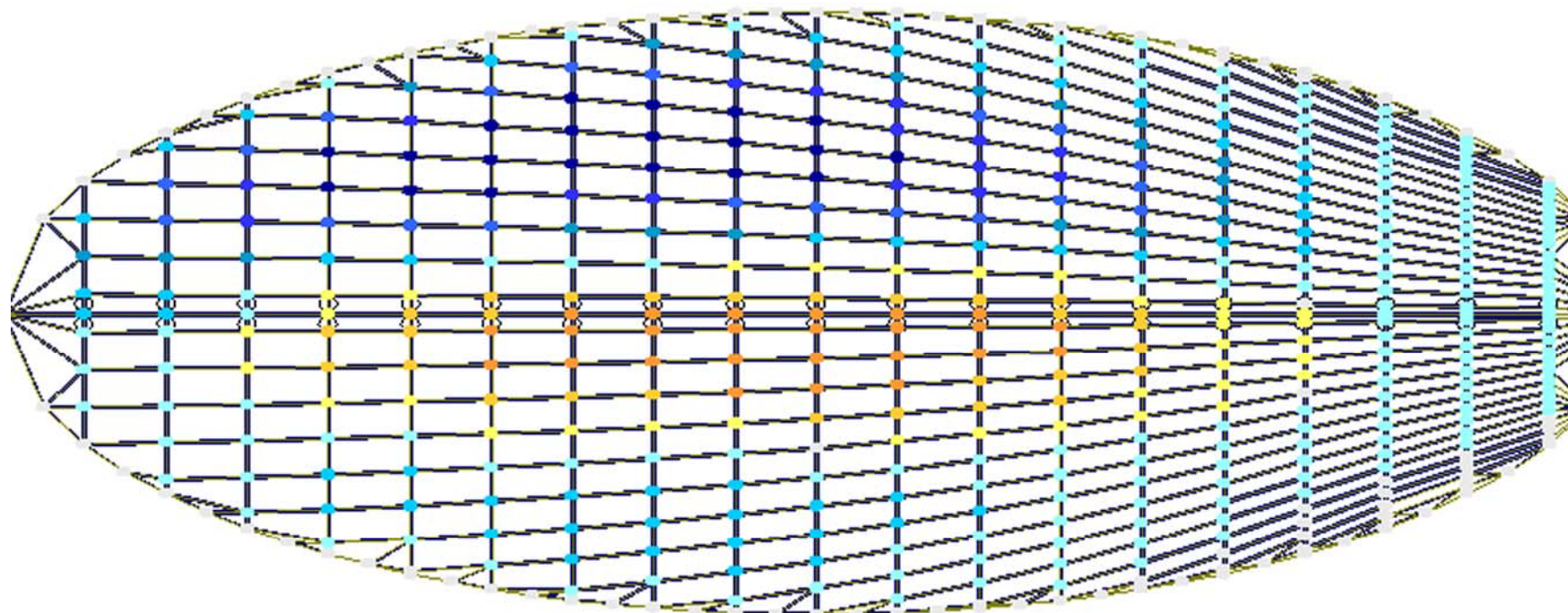


Рис. 51. Мозаика перемещений.

2. Определяем максимальные усилия от каждого расчётного сочетания нагрузок (табл. 29).

Таблица 29. Таблица усилий в пластинах

| № элем. | Усилия(напряжения)        |                           |                              |            |            |               |              |              |
|---------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------|------------|---------------|--------------|--------------|
|         | $N_x$ , кН/м <sup>2</sup> | $N_y$ , кН/м <sup>2</sup> | $T_{xy}$ , кН/м <sup>2</sup> | $M_x$ , кН | $M_y$ , кН | $M_{xy}$ , кН | $Q_x$ , кН/м | $Q_y$ , кН/м |
| 554     | -431,388                  | -376,020                  | 186,180                      | 2,748      | 0,180      | 0,328         | 0,327        | 0,110        |
| 555     | -430,619                  | -376,815                  | -185,868                     | -3,012     | -0,041     | 0,605         | 0,232        | -0,018       |
| 559     | -442,117                  | -368,604                  | 177,469                      | 3,029      | 0,495      | 0,307         | 0,264        | 0,078        |
| 740     | -446,360                  | -350,863                  | 166,480                      | 2,309      | 0,277      | 0,163         | 0,280        | 0,164        |
| 753     | -445,019                  | -321,488                  | -124,038                     | -2,030     | -0,127     | -0,003        | -0,235       | 0,006        |
| 754     | -469,995                  | -389,979                  | -171,306                     | -2,608     | -0,472     | 0,323         | 0,149        | 0,238        |
| 755     | -472,472                  | -379,580                  | -129,860                     | -2,361     | -0,259     | 0,019         | 0,167        | 0,079        |
| 761     | -454,571                  | -359,319                  | -88,855                      | -2,296     | -0,186     | -0,118        | 0,081        | -0,019       |
| 763     | -500,193                  | -385,800                  | -134,803                     | -2,208     | -0,403     | 0,066         | 0,369        | 0,196        |
| 767     | -481,479                  | -377,282                  | -95,271                      | -2,123     | -0,240     | -0,096        | 0,360        | 0,048        |
| 777     | -437,791                  | -340,502                  | -53,123                      | -2,310     | -0,203     | -0,192        | 0,048        | -0,049       |
| 778     | -418,728                  | -325,713                  | -22,510                      | -2,359     | -0,259     | -0,252        | 0,009        | -0,072       |
| 784     | -462,081                  | -362,174                  | -57,873                      | -2,126     | -0,237     | -0,200        | 0,382        | 0,001        |
| 785     | -439,060                  | -347,949                  | -24,628                      | -2,213     | -0,292     | -0,270        | 0,362        | -0,043       |

Наиболее загруженными оказались 14 пластин при втором сочетании нагрузок (см. табл. 29). Наибольшие изгибающие моменты возникают в пластине № 555.

3. Определяем стержни, связанные с наиболее загруженными пластинами. Наибольшие изгибающие моменты возникли в стержне №139, который непосредственно воспринимает нагрузку от наиболее загруженной пластины (табл. 30).

Таблица 30. Таблица усилий в стержнях

| № элем. | № сечен. | Усилия   |              |              |            |              |            |
|---------|----------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
|         |          | $N$ , кН | $M_k$ , кН·м | $M_y$ , кН·м | $Q_z$ , кН | $M_z$ , кН·м | $Q_y$ , кН |
| 139     | 1        | -25,980  | -0,191       | 1,669        | 0,375      | 0,046        | -0,046     |
| 139     | 2        | -25,844  | -0,191       | 1,885        | -0,125     | 0,126        | -0,046     |
| 140     | 1        | -24,962  | -0,107       | 1,766        | 0,058      | 0,074        | -0,014     |
| 140     | 2        | -24,853  | -0,107       | 1,428        | -0,449     | 0,099        | -0,014     |
| 153     | 1        | -28,955  | -0,096       | 1,135        | 0,592      | 0,047        | -0,022     |
| 153     | 2        | -28,797  | -0,096       | 1,727        | 0,113      | 0,084        | -0,022     |
| 154     | 1        | -27,313  | -0,061       | 1,349        | 0,471      | 0,052        | -0,024     |
| 154     | 2        | -27,180  | -0,061       | 1,733        | -0,015     | 0,093        | -0,024     |
| 155     | 1        | -25,782  | -0,028       | 1,404        | 0,161      | 0,066        | -0,003     |
| 155     | 2        | -25,676  | -0,028       | 1,260        | -0,332     | 0,071        | -0,003     |
| 169     | 1        | -27,954  | 0,003        | 1,152        | 0,498      | 0,046        | -0,011     |
| 169     | 2        | -27,800  | 0,003        | 1,586        | 0,034      | 0,063        | -0,011     |
| 170     | 1        | -26,295  | 0,018        | 1,395        | 0,333      | 0,058        | -0,006     |



## 2.8. Расчёт оболочки

После статического расчёта конструкции определяем максимально деформированный элемент и проводим его расчёт на прочность как сжато-изгибаемого элемента по нормальным напряжениям и на прочность по скалыванию по касательным напряжениям.

### 1. Расчёт на прочность сжато-изгибаемого элемента

$$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{M_{\partial}}{W_{расч}} \leq R_c,$$

где  $N$  — расчётная продольная сила;

$M_{\partial}$  — изгибающий момент от действия поперечных и продольных нагрузок;

$F_{расч}$  — площадь расчётного сечения нетто;

$W_{расч}$  — расчётный момент сопротивления поперечного сечения;

$R_c$  — расчётное сопротивление сжатию.

Изгибающий момент:

$$M_{\partial} = \frac{M_{\kappa}}{\xi_{\kappa}},$$

где  $M_{\kappa}$  — расчётный изгибающий момент;

$\xi_{\kappa}$  — коэффициент, учитывающий дополнительный момент от продольной силы:

$$\xi_{\kappa} = 1 - \frac{N}{\varphi R_c F_{бр}},$$

где  $N$  — расчётная продольная сила;

$F_{бр}$  — площадь брутто поперечного сечения элемента;

$R_c$  — расчётное сопротивление сжатию;

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба.

Подставив данные, получим

$$M_{\kappa} = 1,885 \text{ кН}\cdot\text{м}, N = 25,844 \text{ кН}, F_{бр} = 0,2 \cdot 0,3 = 0,06 \text{ м}^2.$$

Коэффициент продольного изгиба

$$\varphi = 1 - \alpha \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2,$$

где  $\alpha$  — коэффициент, для древесины — 0,8;

$\lambda$  — гибкость элемента:

$$\lambda = \frac{l_0}{r},$$

где  $l_0$  — расчётная длина элемента;  
 $r$  — радиус инерции сечения с максимальными размерами  
 брутто соответственно относительно осей X и Y.

Расчётная длина элемента

$$l_0 = l \mu_0,$$

где  $l$  — геометрическая длина элемента;  
 $\mu_0$  — коэффициент для определения расчётной длины.

Подставив данные, получим

$l = 1,72$  м (определено из расчетной схемы);

$\mu_0 = 0,65$  (т.к. оба конца стержня заземлены);

$$\lambda = \frac{l_0}{r} = \frac{1,72 \cdot 0,65}{0,289 \cdot 0,2} = 19,34 \leq 70;$$

$$\varphi = 1 - \alpha \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2 = 1 - 0,8 \left( \frac{19,34}{100} \right)^2 = 0,97;$$

$$\xi_k = 1 - \frac{28,844}{0,97 \cdot 12355 \cdot 0,06} = 0,96; \quad M_0 = \frac{1,885}{0,96} = 1,963 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$W_{расч} = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,3 \cdot 0,2^2}{6} = 0,002 \text{ м}^3.$$

$$R_c = 13 m_g m_l m_d m_n m_a m_{cl} m_{ch} = 13 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1 = 12,355 \text{ МПа}.$$

$$\frac{25,844}{0,06} + \frac{1,963}{0,002} = 1412,233 \text{ КПа} \leq R_c = 12,355 \text{ КПа}.$$

Прочность обеспечена.

2. Расчет изгибаемого элемента на прочность по скалыванию

$$\frac{QS_{бр}^I}{I_{бр} b_{рас}} \leq R_{ск}, \quad (33)$$

где  $Q$  — расчетная поперечная сила (на опоре);

$S_{бр}^I$  — статический момент брутто сдвигаемой части поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси;

$I_{бр}$  — момент инерции брутто поперечного сечения элемента относительно нейтральной оси;

$b_{рас}$  — расчетная ширина сечения элемента;

$R_{ск}$  — расчетное сопротивление скалыванию при изгибе:

$$R_{ск} = 1,5 m_6 m_t m_o m_n m_a m_{сл} m_{зн} = 1,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1 = 1,4256 \text{ МПа.}$$

$$Q = 0,125 \text{ КПа.}$$

$$S_{\text{бр}}^I = 0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 0,0015 \text{ м}^3.$$

$$I_{\text{бр}} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,2 \cdot 0,3^3}{12} = 0,00045 \text{ м}^3; b_{\text{рас}} = 0,2 \text{ м.}$$

$$\frac{QS_{\text{бр}}^I}{I_{\text{бр}} b_{\text{рас}}} = \frac{0,125 \cdot 0,0015}{0,00045 \cdot 0,2} = 2,083 \text{ КПа} \leq R_{ск} = 1425,6 \text{ КПа.}$$

Условие прочности на скалывание выполняется.

Определяем допустимый прогиб в арке № 8:

$$f_u = l / 250 = 29,394 / 250 = 0,117 \text{ м} = 117 \text{ мм.}$$

Максимальный прогиб в самой нагруженной арке 5,488 мм.

### 3. Расчет на устойчивость плоской формы деформирования сжато-изгибаемых элементов

$$\frac{N}{\varphi R_c F_{\text{бр}}} + \left( \frac{M_o}{\varphi_M R_u W_{\text{бр}}} \right)^n \leq 1,$$

где  $\varphi$  — коэффициент продольного изгиба, определяемый по формуле;

$F_{\text{бр}}$  — площадь брутто с максимальными размерами сечения элемента на участке  $l_p$ ;

$W_{\text{бр}}$  — см. СТО 36554501-002-2006 [4, п. 4.14];

$n$  — для элементов без закрепления растянутой зоны из плоскости деформирования  $n = 2$  и для элементов, имеющих такие закрепления  $n = 1$ :

$$\varphi = \frac{A}{\lambda^2},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, для древесины  $\alpha = 0,8$ , для фанеры  $\alpha = 1$ ;

$A$  — коэффициент, для древесины  $A = 3\,000$ , для фанеры и древесины из однонаправленного шпона  $A = 2\,500$ ;

$\varphi_M$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\varphi_M = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_\varphi,$$

где  $b$  — ширина поперечного сечения;

$l_p$  — расстояние между опорными сечениями элемента, а при закреплении сжатой кромки элемента в промежуточных точках от смещения из плоскости изгиба — расстояние между этими точками;

$h$  — максимальная высота поперечного сечения на участке  $l_p$ ;  
 $k_\phi$  — коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке  $l_p$ , определяемый по [4, табл. Г.2 приложение Г].

Подставив данные, получим

$$\frac{25,844}{0,97 \cdot 12355 \cdot 0,06} + \left( \frac{1,963}{12,26 \cdot 12355 \cdot 0,002} \right)^n \leq 1$$

$$0,042 \leq 1$$

$$\varphi_m = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_\phi = 140 \frac{0,2^2}{1,72 \cdot 0,3} \cdot 1,13 = 12,26.$$

### *Контрольные вопросы*

1. Какой признак имеет схема оболочки?
2. Что означает коэффициент  $\mu$  в расчёте снеговой нагрузки?
3. Как задают снеговую нагрузку на конструкцию?

### **3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ СЕТЧАТОГО КУПОЛА**

Сетчатые купола- оболочки представляют собой многогранники, вписанные в сферическую или другую поверхность вращения и состоящие из одного слоя конструктивных элементов, образованных параллелями и меридианами. Участки поверхности выбираются таким образом, чтобы получить минимальное количество разнотипных элементов в соединении.

Простейшие сетчатые купола образуются ребрами и кольцами, между которыми располагаются раскосы, в связи с чем усилия распределяются по всей поверхности купола на все элементы. Это приводит к появлению к появлению многочисленных слабо работающих элементов решетки, усложняющих узлы сопряжений граней купола из-за большого числа перегибов, возникающих между плоскостями связей.

Простейшие системы сетчатых куполов состоят из радиальных ребер, колец и диагоналей, устанавливаемых в каждом трапециевидном элементе, образованном ребрами и кольцами. Снизу купол завершается нижним растянутым опорным кольцом, воспринимающим распор купола. Сверху купол обычно срезается горизонтальной плоскостью и имеет верхнее кольцо, к которому присоединяются ребра.

#### **3.1. Конструктивное решение**

Купол Феппля (звездчатая схема) высоты 8 м, радиус нижнего кольца — 20 м, верхнего — 2 м, покрытие — поликарбонат толщиной 16 мм.

Материал — лиственница.

#### **3.2. Построение модели конструкции в программном комплексе «Лира»**

1. Выбираем пятый признак схемы (6 степеней свободы в узле) (рис. 52).

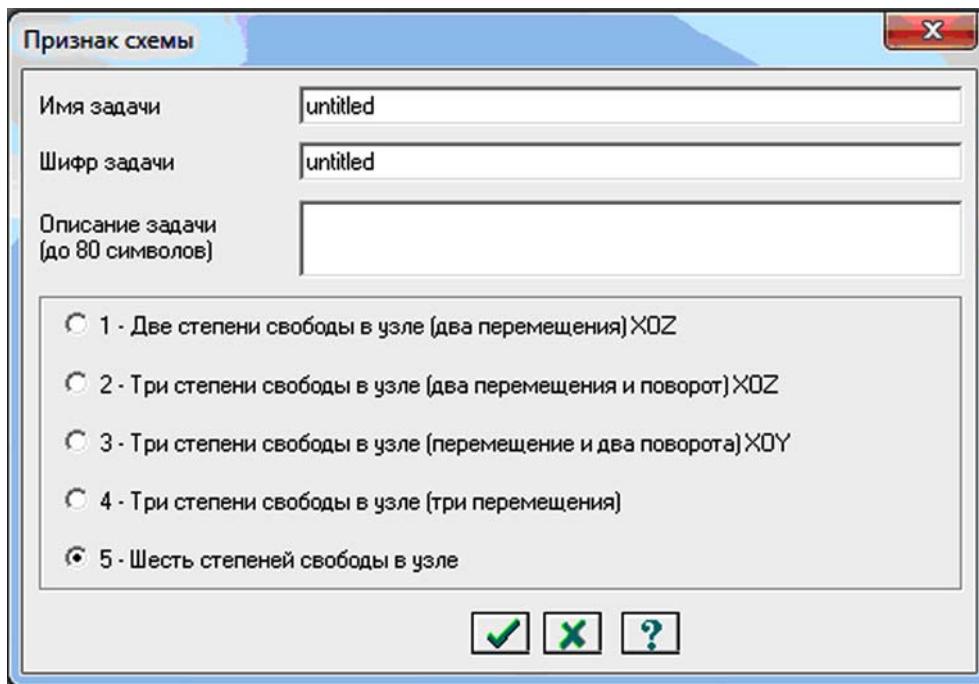


Рис. 52. Диалоговое окно «Признак схемы»

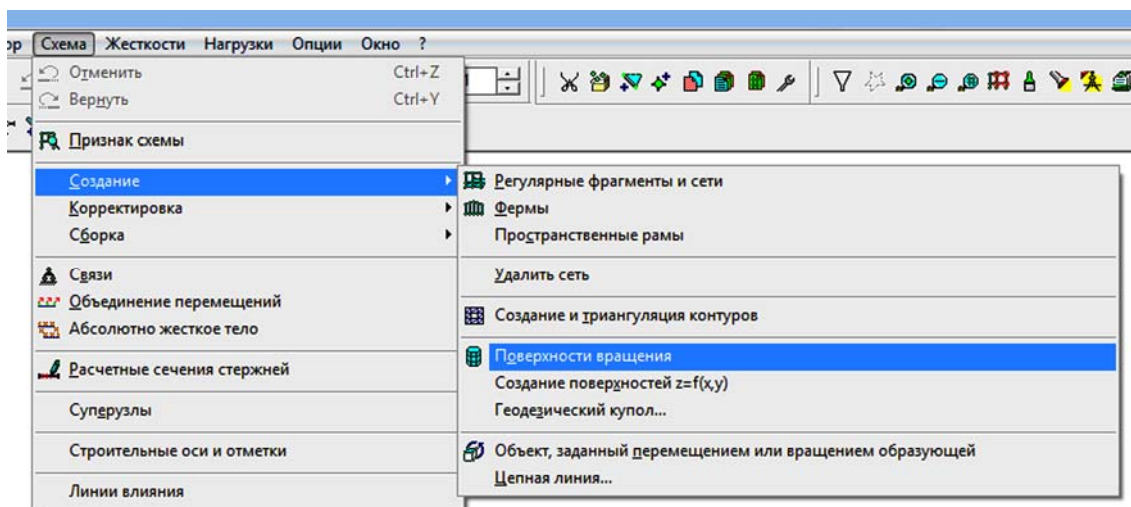


Рис. 53. Создание поверхности вращения

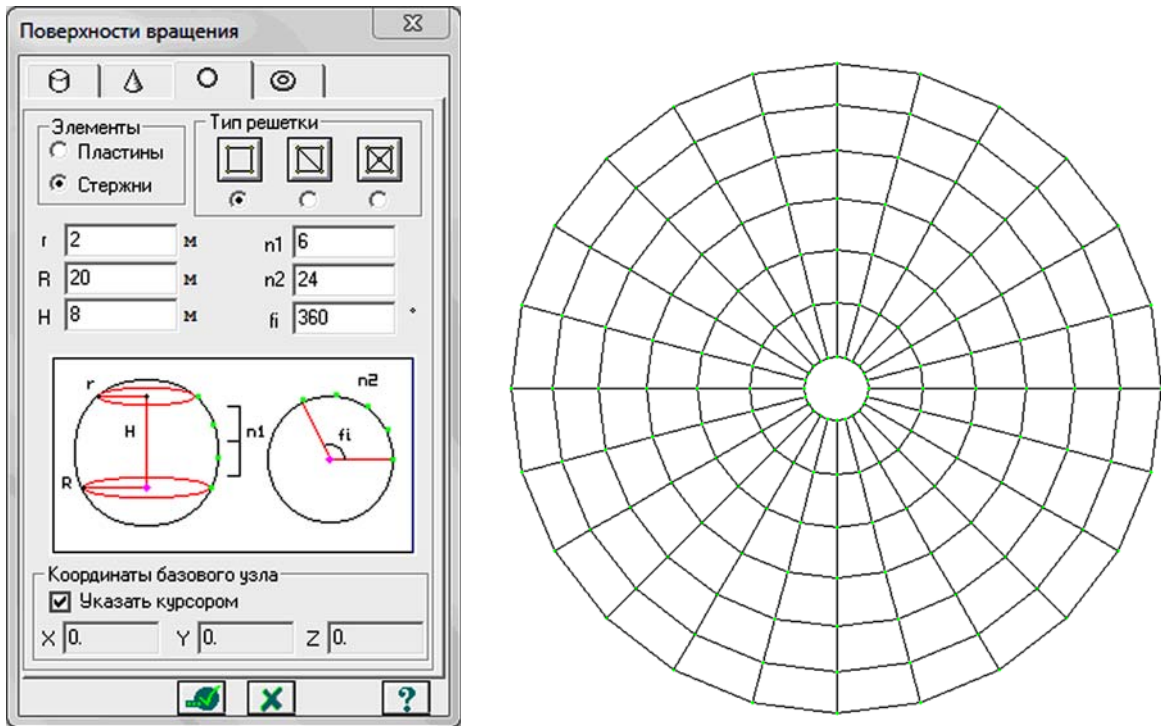


Рис. 54. Меню и результат создания поверхности вращения

2. Добавляем необходимые стержни: *Схема – Корректировка – Добавить Элементы* (рис. 55).

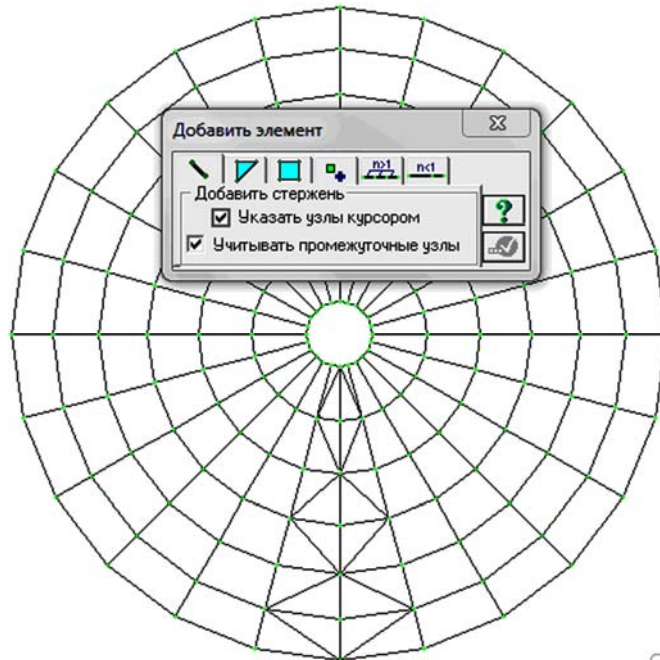


Рис. 55. Добавление элемента

3. Копируем добавленные стержни: *Схема – Корректировка – Копировать выбранные объекты* — выбираем четвертую вкладку (копирование с поворотом), заводим данные для поворота ( $F_i = 30^\circ$ ;  $N = 12$ ) поворот вокруг оси Z (рис. 56).

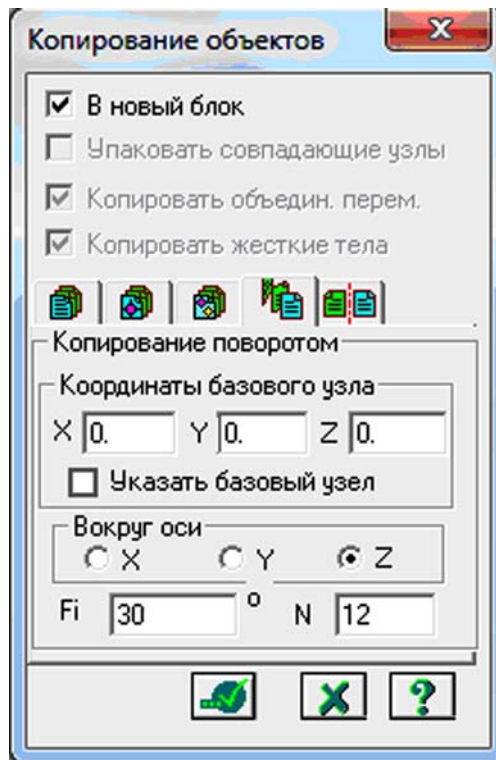


Рис. 56. Диалоговое окно «Копирование объекта»

4. Получаем (рис. 57).

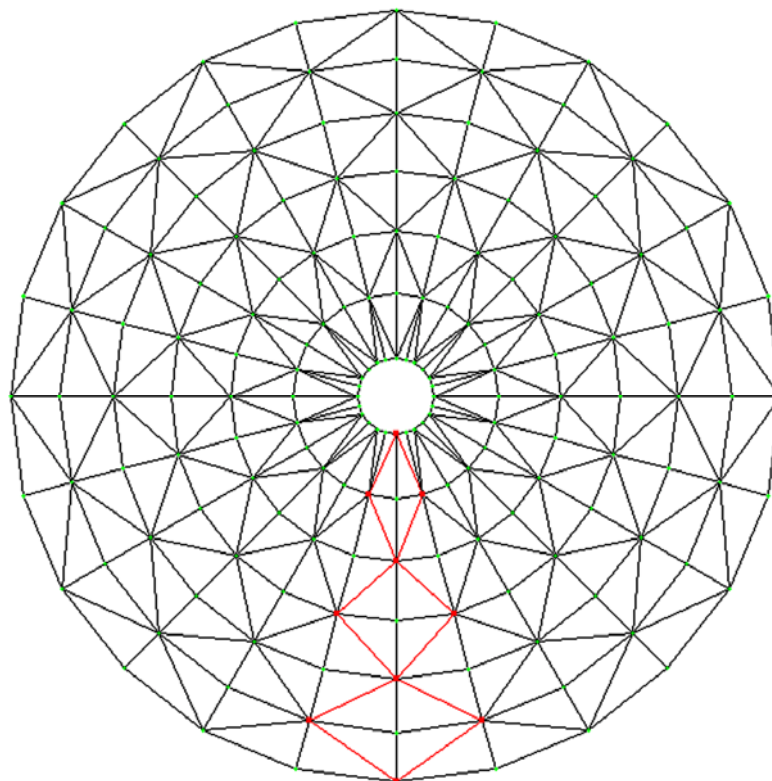


Рис. 57. Незавершенная схема рабочей модели купола



5. Удаляем лишние элементы и получаем (рис. 58).

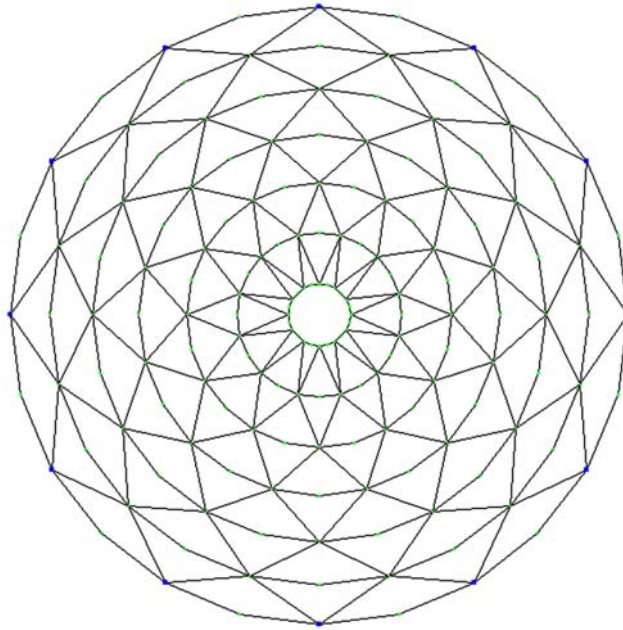


Рис. 58. Конечная схема рабочей модели

6. Задаем локальные оси: *Схема – Корректировка – Локальные оси узлов*, выделяем узлы и нажимаем применить (рис. 59).

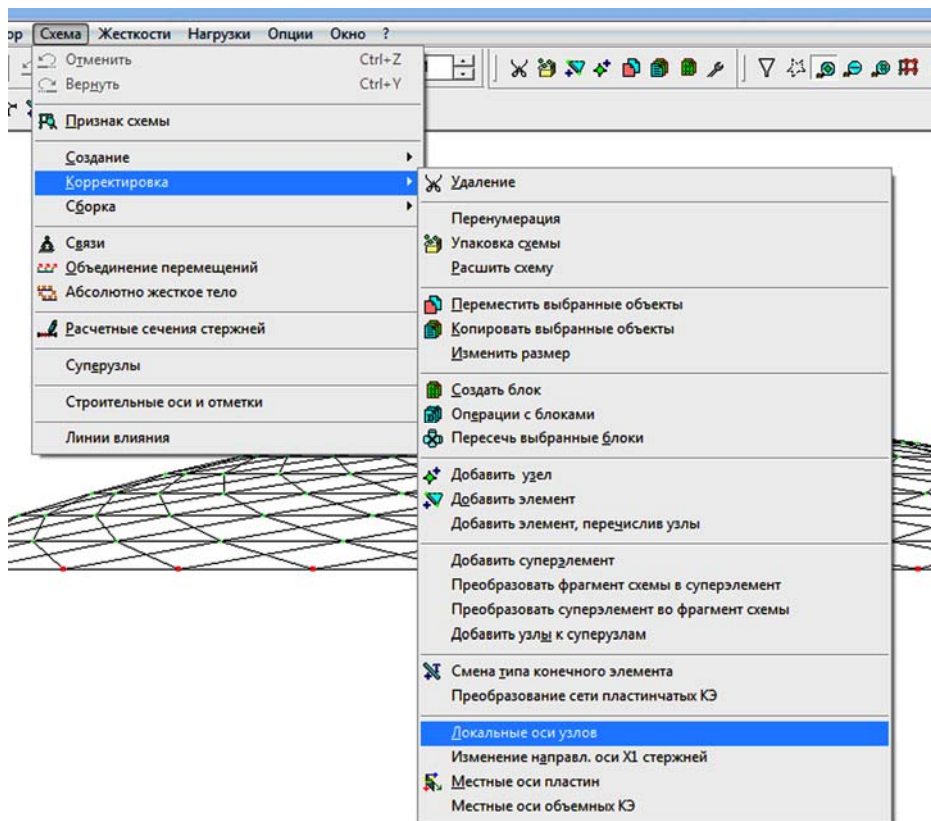


Рис. 59. Меню создания локальных осей

Необходимо переместить купол на величину координаты  $Z$ , для правильного расположения локальных осей ( $Z$  должен оказаться в  $0$ ). Выделяем весь купол и перемещаем вниз на величину координаты  $Z$ .

7. Задаем связи: *Схема – Связи (Z, Y)* (рис. 60).

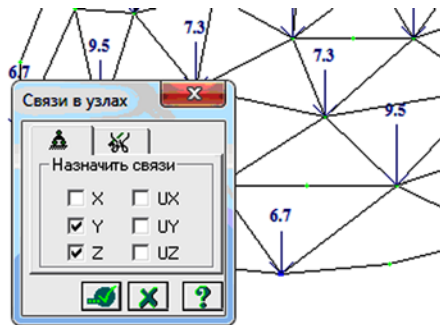


Рис. 60. Связи в узлах

8. Задаем жесткость элементов: *Жесткости – Жесткости элементов* (рис. 61).

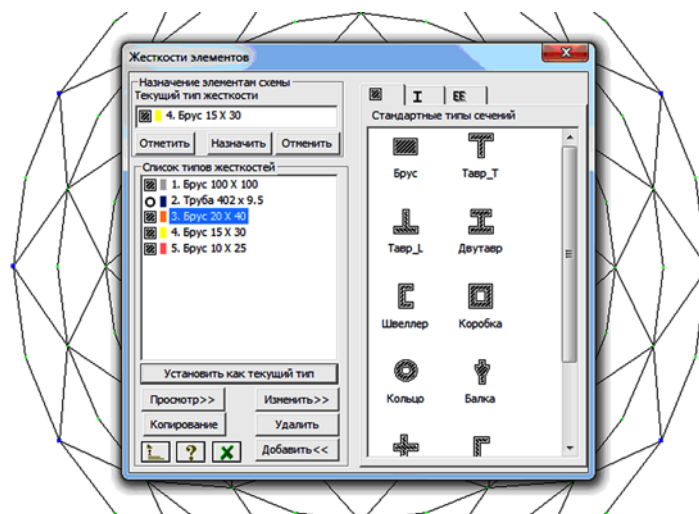
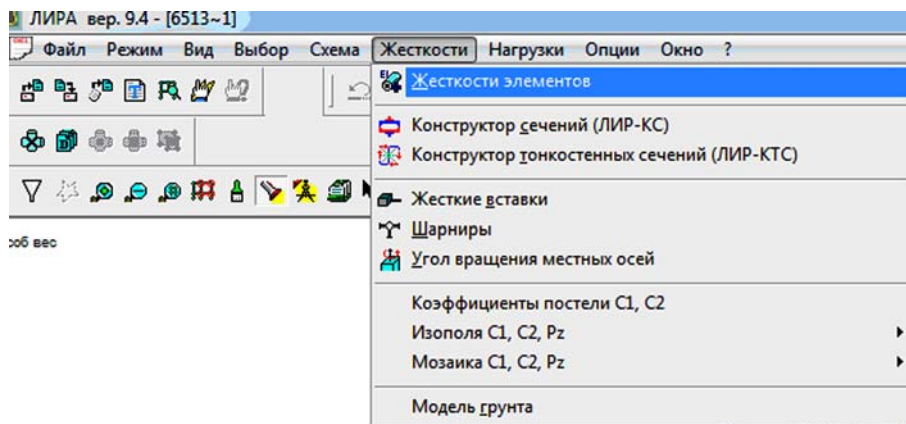


Рис. 61. Задание жесткости элементов

### 3.3. Сбор нагрузок на конструкцию

Пример определения нагрузки от собственного веса на один узел: рассмотрим узел 6 (рис. 62).

- а) нижний пояс:  $a \times b = 40 \times 20$  см,  $\gamma_1 = 6$  кН/м<sup>3</sup> для материала поясов и ребер (лиственница),  $L = 5,22$  м — длина элемента, входящего в рассматриваемый сектор:

$P_1 = ab\gamma_1 L = 0,4 \cdot 0,2 \cdot 6 \cdot 5,22 = 2,5056$  кН, аналогично нагрузке на другие элементы рассматриваемой площади;

- б) поликарбонат:  $\gamma_2 = 0,027$  кН/м<sup>2</sup>,  $S = 30,5064$  м<sup>2</sup> — площадь рассматриваемого сектора:

$$P_2 = \gamma_2 S = 0,027 \cdot 30,5064 = 0,82 \text{ кН.}$$

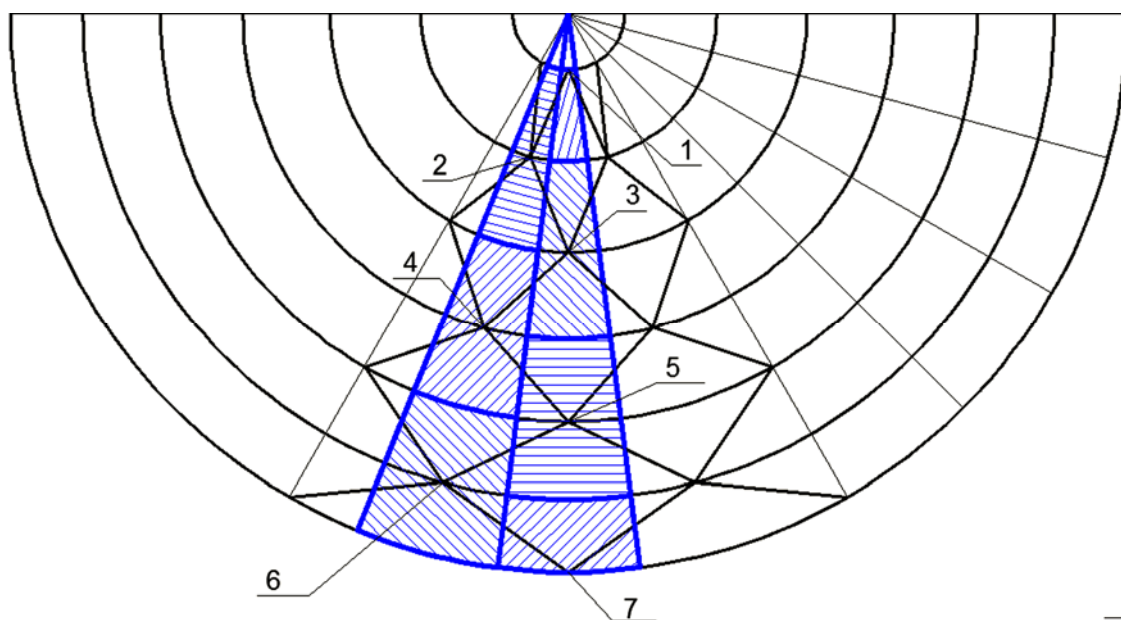


Рис. 62. Грузовая площадь для узла 6

Сбор нагрузок от собственного веса сводим в таблицу 31.

Таблица 31. Сбор нагрузок на узлы от собственного веса

| Номер узла | Вид нагрузки | $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup> | Нормативная нагрузка, кН | Сумма норм. нагрузок | Коэффициент надежности | Расчетная нагрузка, кН | Сумма расчёт. нагрузок |
|------------|--------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1          | 2            | 3                            | 4                        | 5                    | 6                      | 7                      | 8                      |
| 7          | нижний пояс  | 6                            | 2,5056                   | 6,0843               | 1,1                    | 2,75616                | 6,7369                 |
|            | верхний пояс | 6                            | 2,1888                   |                      | 1,1                    | 2,40768                |                        |
|            | ребра        | 6                            | 0,948                    |                      | 1,1                    | 1,0428                 |                        |
|            | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup>      | 0,441882                 |                      | 1,2                    | 0,5302584              |                        |
| 6          | нижний пояс  | 6                            | 2,5056                   | 8,5955               | 1,1                    | 2,75616                | 9,5374                 |
|            | верхний пояс | 6                            | 1,3824                   |                      | 1,1                    | 1,52064                |                        |
|            | средний пояс | 6                            | 2,1888                   |                      | 1,1                    | 2,40768                |                        |
|            | ребра        | 6                            | 1,695                    |                      | 1,1                    | 1,8645                 |                        |
|            | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup>      | 0,8236728                |                      | 1,2                    | 0,98840736             |                        |
| 5          | нижний пояс  | 6                            | 2,1888                   | 6,62                 | 1,1                    | 2,40768                | 7,3512                 |
|            | верхний пояс | 6                            | 0,8262                   |                      | 1,1                    | 0,90882                |                        |
|            | средний пояс | 6                            | 1,3824                   |                      | 1,1                    | 1,52064                |                        |
|            | ребра        | 6                            | 1,53                     |                      | 1,1                    | 1,683                  |                        |
|            | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup>      | 0,6925824                |                      | 1,2                    | 0,83109888             |                        |
| 4          | нижний пояс  | 6                            | 1,3824                   | 4,4675               | 1,1                    | 1,52064                | 4,9694                 |
|            | верхний пояс | 6                            | 0,336                    |                      | 1,1                    | 0,3696                 |                        |
|            | средний пояс | 6                            | 0,8262                   |                      | 1,1                    | 0,90882                |                        |
|            | ребра        | 6                            | 1,371                    |                      | 1,1                    | 1,5081                 |                        |
|            | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup>      | 0,5519016                |                      | 1,2                    | 0,66228192             |                        |
| 3          | нижний пояс  | 6                            | 0,8262                   | 3,0152               | 1,1                    | 0,90882                | 3,3571                 |
|            | верхний пояс | 6                            | 0,21                     |                      | 1,1                    | 0,231                  |                        |
|            | средний пояс | 6                            | 0,336                    |                      | 1,1                    | 0,3696                 |                        |
|            | ребра        | 6                            | 1,239                    |                      | 1,1                    | 1,3629                 |                        |
|            | поликарбонат | 0,027кН/м <sup>2</sup>       | 0,4040064                |                      | 1,2                    | 0,48480768             |                        |

Продолжение таблицы 11

| 1 | 2            | 3                       | 4         | 5      | 6   | 7          | 8      |
|---|--------------|-------------------------|-----------|--------|-----|------------|--------|
| 2 | нижний пояс  | 6                       | 0,336     | 2,0595 | 1,1 | 0,3696     | 2,2907 |
|   | верхний пояс | 7,6                     | 0,076     |        | 1,1 | 0,0836     |        |
|   | средний пояс | 6                       | 0,21      |        | 1,1 | 0,231      |        |
|   | ребра        | 6                       | 1,185     |        | 1,1 | 1,3035     |        |
|   | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup> | 0,252504  |        | 1,2 | 0,3030048  |        |
| 1 | нижний пояс  | 6                       | 0,21      | 0,7501 | 1,1 | 0,231      | 0,8425 |
|   | верхний пояс | 7,6                     | 0,076     |        | 1,1 | 0,0836     |        |
|   | ребра        | 6                       | 0,291     |        | 1,1 | 0,3201     |        |
|   | поликарбонат | 0,027 кН/м <sup>2</sup> | 0,1731456 |        | 1,2 | 0,20777472 |        |

Загрузка купола нагрузками от собственного веса представлено на рисунке 63.

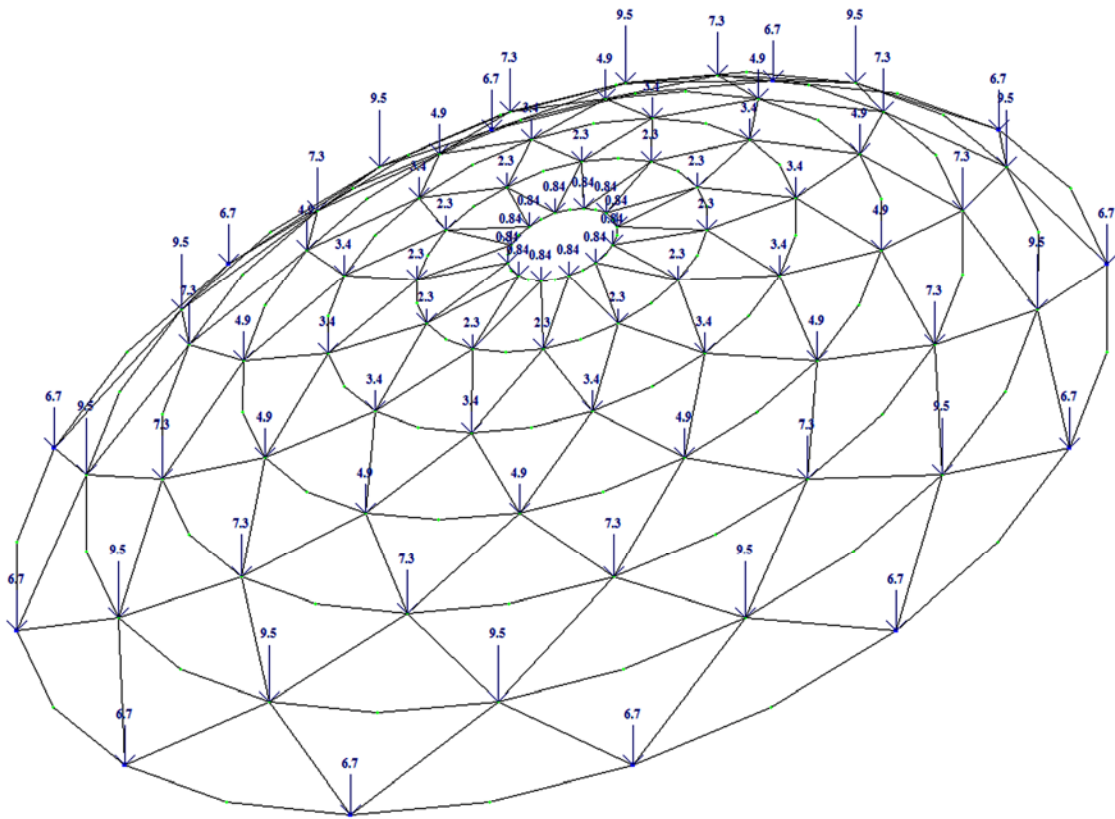


Рис. 63. Загрузка купола нагрузками от собственного веса

Определяем снеговую нагрузку по Своду Правил [2, формула (10.1)]:

$$S_0 = 0,7c_e c_t \mu S_g,$$

где  $c_e$  — коэффициент учитывающий снос снега с покрытия зданий под действием ветра или других факторов ( $c_e = 0,85$ ) т.к. размер в поперечнике менее 60 м;

$c_t$  — термический коэффициент ( $c_t = 0,8$ );

$\mu$  — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие ( $\mu$  определяется расчетом для двух случаев загрузки снегом (рис. 64);

$S_g$  — вес снегового покрытия на  $1 \text{ м}^2$ .

Для зданий с купольными круговыми и близко к ним по очертаниям покрытиями коэффициент  $\mu_1$  определяется по таблице 12. Промежуточные значения  $\mu_1$  определяются линейной интерполяцией.

Таблица 12. Коэффициент  $\mu_1$

| Уклон покрытия $\alpha$ , град. | $\mu_1$ |
|---------------------------------|---------|
| $\alpha \leq 30^\circ$          | 1       |
| $\alpha \geq 60^\circ$          | 0       |

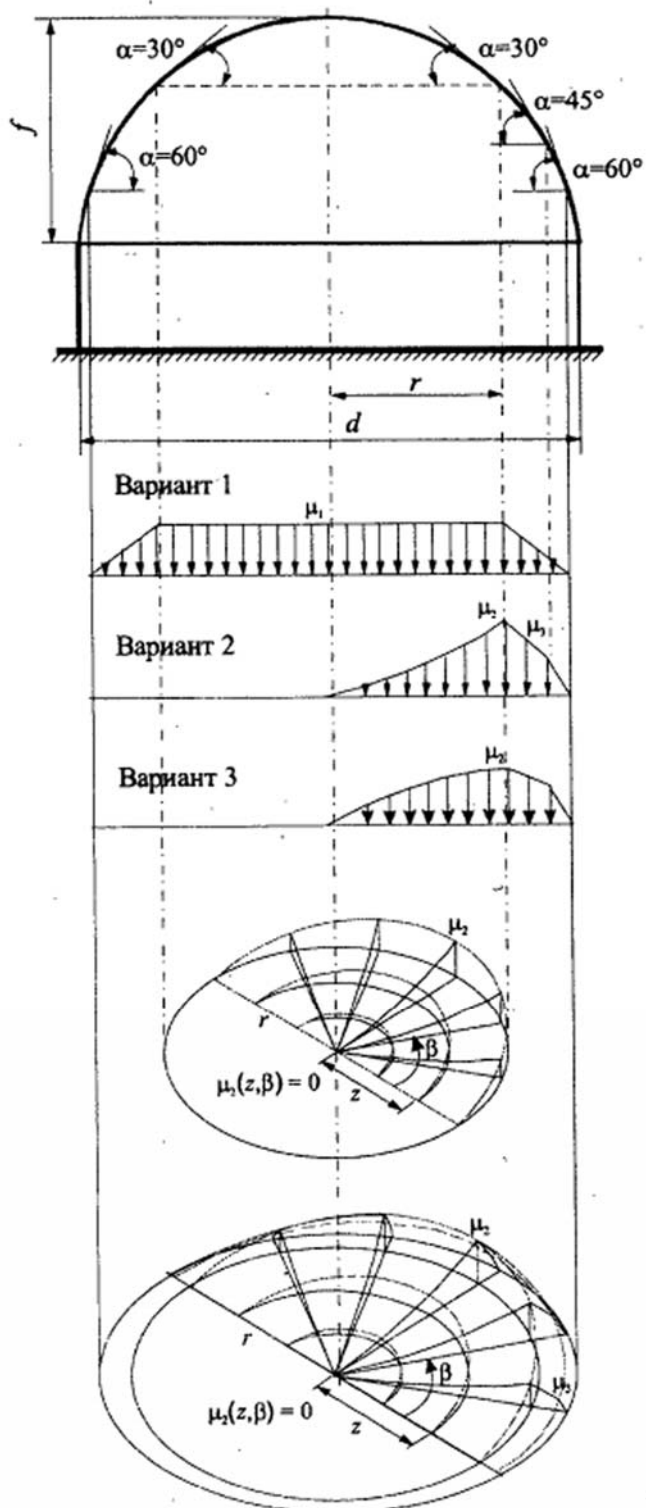


Рис. 64. Варианты загрузки снеговой нагрузкой по Своду Правил

Для пологих куполов с отношением  $f/d \leq 0,05$  следует учитывать только вариант 1.

Для куполов с отношением  $f/d > 0,05$  следует учитывать варианты 1, 2 и 3 при уклонах  $\alpha < 60^\circ$ .

Для варианта 2 следует принимать при  $z \leq r_1$ ; коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие  $\mu_2$  определять по формуле:

$$\mu_2 = C_r (z/r)^2 \sin \beta,$$

где  $C_r$  — коэффициент определяем по формуле

$$C_r = 2,55 - \exp(0,8 - 14 (f/d)),$$

где  $f$  — высота купола,  $d$  — диаметр купола;

$z$  — расстояние от центра до поясов купола;

$r$  — расстояние от центра до точки, где угол становится  $30^\circ$ ;

$\beta$  — угол до меридиана купола.

При  $z > r$ , коэффициент  $\mu_3$  при  $\alpha = 45^\circ$  определяем по формуле

$$\mu_3 = 1,5 \sin \beta,$$

где  $\beta$  — угол до меридиана купола (при  $\alpha > 60^\circ$   $\mu_3 = 0$ ).

Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Для варианта 3 коэффициент  $\mu_2$  определяем по формуле

$$\mu_2 = 3 \sqrt{\frac{(2f \sin 3\alpha)}{d}} \sin \beta,$$

где  $f$  — высота купола;

$d$  — диаметр купола;

$\alpha$  — угол к горизонтали от покрытия в узловых точка поясов;

$\beta$  — угол до меридиана купола.

Вариант 3 следует учитывать для куполов с  $f/d > 0,05$  при сильно шероховатой поверхности покрытия, наличии на нем возвышающихся надстроек, фонарей или снегозадерживающих преград, а так же для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки.

В нашем случае 3 вариант не рассматривается.

Угол  $\alpha$  определялся графическим способом в программном комплексе AutoCAD (рис. 65).



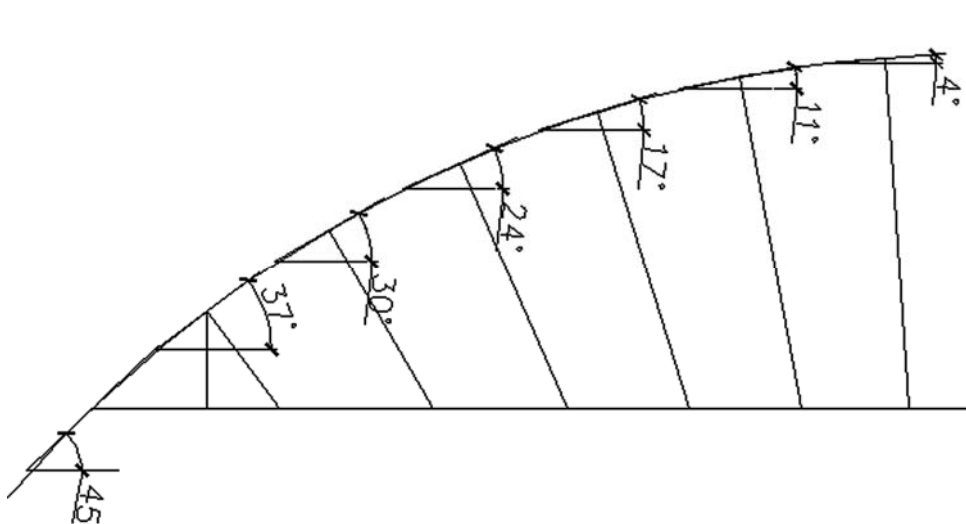


Рис. 65. Определение угла  $\alpha$

Все расчётные величины сводим в таблицу 32.

Определяем снеговую нагрузку по СНиП 2.01.07—85\*. Нагрузки и воздействия [6].

Полное расчётное значение снеговой нагрузки  $S$  на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле

$$S = S_g m,$$

где  $S_g$  — расчётное значение веса снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности земли [6];

$m$  — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие [6].

Таблица 32. Сводные данные расчёта снеговой нагрузки

| № меридиан | № узлов | $\alpha$ | $\beta$ | $z$   | $r$   | $C_r$ | $\mu_1$ | $\mu_2$ | $\mu_3$ | Площадь | $S_1$ | $S_2$ | $P_1$ | $P_2$ |
|------------|---------|----------|---------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1          | 1       | 4        | 0       | 1,99  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0       | 0       | 3,2064  | 0,857 | 0     | 2,747 | 0     |
|            | 3       | 17       | 0       | 8,54  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0       | 0       | 14,9632 | 0,857 | 0     | 12,82 | 0     |
|            | 5       | 30       | 0       | 14,62 | 14,63 | 2,415 | 1       | 0       | 0       | 25,6512 | 0,857 | 0     | 21,98 | 0     |
|            | 7       | 45       | 0       | 20    | 14,63 | 2,415 | 0,5     | 0       | 0       | 16,366  | 0,428 | 0     | 7,011 | 0     |
| 2          | 2       | 11       | 15      | 5,3   | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,082   |         | 9,352   | 0,857 | 0,07  | 8,013 | 0,658 |
|            | 4       | 24       | 15      | 11,66 | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,397   |         | 20,4408 | 0,857 | 0,34  | 17,51 | 6,957 |
|            | 6       | 37       | 15      | 17,4  | 14,63 | 2,415 | 0,767   |         | 0,39    | 30,4608 | 0,657 | 0,333 | 20,01 | 10,13 |
| 3          | 1       | 4        | 30      | 1,99  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,022   |         | 3,2064  | 0,857 | 0,019 | 2,747 | 0,061 |
|            | 3       | 17       | 30      | 8,54  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,412   |         | 14,9632 | 0,857 | 0,353 | 12,82 | 5,278 |
|            | 5       | 30       | 30      | 14,62 | 14,63 | 2,415 | 1       | 1,207   |         | 25,6512 | 0,857 | 1,034 | 21,98 | 26,52 |
|            | 7       | 45       | 30      | 20    | 14,63 | 2,415 | 0,5     |         | 0,75    | 16,366  | 0,428 | 0,643 | 7,011 | 10,52 |
| 4          | 2       | 11       | 45      | 5,3   | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,224   |         | 9,352   | 0,857 | 0,192 | 8,013 | 1,797 |
|            | 4       | 24       | 45      | 11,66 | 14,63 | 2,415 | 1       | 1,085   |         | 20,4408 | 0,857 | 0,93  | 17,51 | 19,01 |
|            | 6       | 37       | 45      | 17,4  | 14,63 | 2,415 | 0,767   |         | 1,06    | 30,4608 | 0,657 | 0,909 | 20,01 | 27,68 |
| 5          | 1       | 4        | 60      | 1,99  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,039   |         | 3,2064  | 0,857 | 0,033 | 2,747 | 0,106 |
|            | 3       | 17       | 60      | 8,54  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,713   |         | 14,9632 | 0,857 | 0,611 | 12,82 | 9,141 |
|            | 5       | 30       | 60      | 14,62 | 14,63 | 2,415 | 1       | 2,09    |         | 25,6512 | 0,857 | 1,79  | 21,98 | 45,93 |
|            | 7       | 45       | 60      | 20    | 14,63 | 2,415 | 0,5     |         | 1,3     | 16,366  | 0,428 | 1,113 | 7,011 | 18,22 |
| 6          | 2       | 11       | 75      | 5,3   | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,306   |         | 9,352   | 0,857 | 0,262 | 8,013 | 2,454 |
|            | 4       | 24       | 75      | 11,66 | 14,63 | 2,415 | 1       | 1,483   |         | 20,4408 | 0,857 | 1,27  | 17,51 | 25,96 |
|            | 6       | 37       | 75      | 17,4  | 14,63 | 2,415 | 0,767   |         | 1,45    | 30,4608 | 0,657 | 1,241 | 20,01 | 37,81 |
| 7          | 1       | 4        | 90      | 1,99  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,045   |         | 3,2064  | 0,857 | 0,038 | 2,747 | 0,123 |
|            | 3       | 17       | 90      | 8,54  | 14,63 | 2,415 | 1       | 0,823   |         | 14,9632 | 0,857 | 0,705 | 12,82 | 10,56 |
|            | 5       | 30       | 90      | 14,62 | 14,63 | 2,415 | 1       | 2,413   |         | 25,6512 | 0,857 | 2,067 | 21,98 | 53,03 |
|            | 7       | 45       | 90      | 20    | 14,63 | 2,415 | 0,5     |         | 1,5     | 16,366  | 0,428 | 1,285 | 7,011 | 21,03 |

Загружение осуществлять по рисунку 66.

Здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями

$m_1 = \cos 1,8a$ ;  $m_2 = 2,4 \sin 1,4a$ ,  
где  $a$  — уклон покрытия, град

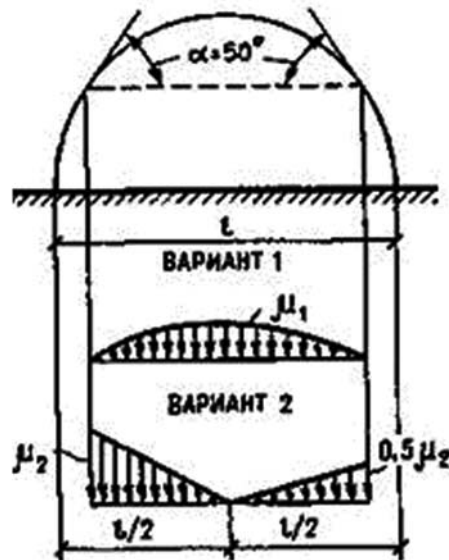


Рис. 66. Варианты загрузки снеговой нагрузкой [6]

В нашем случае наиболее нагруженным является второй вид загрузки от неравномерной нагрузки (рис. 67).

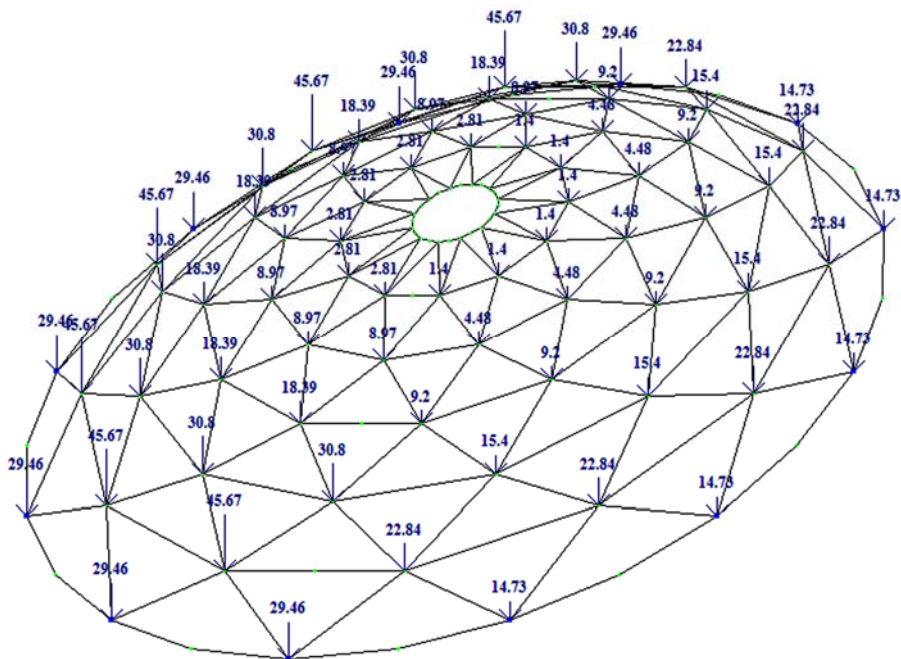


Рис.67. Загрузка снеговой нагрузкой

Определяем ветровую нагрузку по Своду Правил [2].  
Ветровую нагрузку находим по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) c_e,$$

- где  $w_0$  — нормативное значение ветрового давления, определяется по следующей таблице 33;  
 $k(z_e)$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты здания  $z_e$ , определяется по таблице 34;  
 $c_e$  — аэродинамический коэффициент.

Таблица 33. Нормативное значение ветрового давления

| Ветровые районы<br>(принимаются<br>по карте 3<br>приложения Ж) | Ia   | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $w_0$ , кПа  | 0,17 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,48 | 0,60 | 0,73 | 0,85 |

Таблица 34. Коэффициент ветрового давления по высоте

| Высота $z_e$ , м | Коэффициент $k$ для типов местности |      |      |
|------------------|-------------------------------------|------|------|
|                  | A                                   | B    | C    |
| $\leq 5$         | 0,75                                | 0,5  | 0,4  |
| 10               | 1,0                                 | 0,65 | 0,4  |
| 20               | 1,25                                | 0,85 | 0,55 |
| 40               | 1,5                                 | 1,1  | 0,8  |
| 60               | 1,7                                 | 1,3  | 1,0  |
| 80               | 1,85                                | 1,45 | 1,15 |
| 100              | 2,0                                 | 1,6  | 1,25 |
| 150              | 2,25                                | 1,9  | 1,55 |
| 200              | 2,45                                | 2,1  | 1,8  |
| 250              | 2,65                                | 2,3  | 2,0  |
| 300              | 2,75                                | 2,5  | 2,2  |
| 350              | 2,75                                | 2,75 | 2,35 |
| $\geq 480$       | 2,75                                | 2,75 | 2,75 |

Значения коэффициентов  $c_e$  в точках A и C, а так же в сечении ВВ приведены на рисунке 68.

Для промежуточных сечений коэффициенты  $c_e$  определяются линейной интерполяцией.

При определении эквивалентной высоты и коэффициента  $\nu$  в соответствии:  $h = h_1 + 0,7f$ .

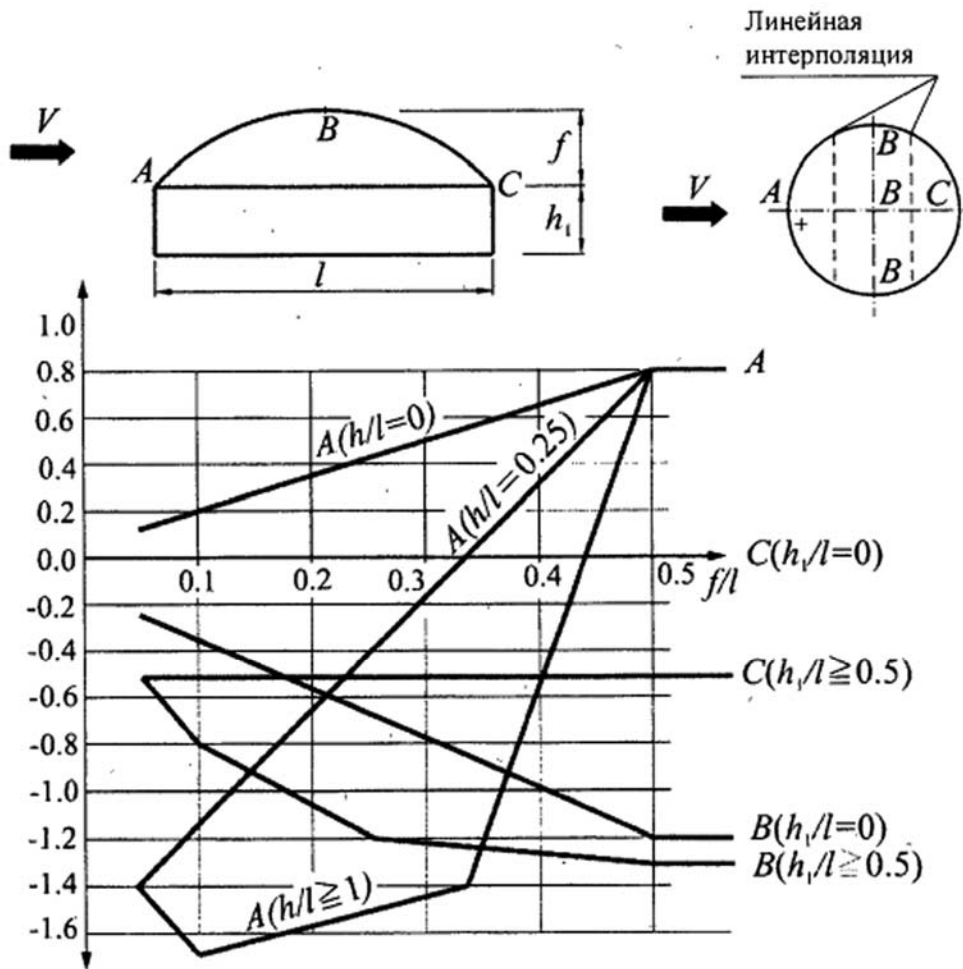


Рис. 68. Определение аэродинамического коэффициента

### 3.4. Задание нагрузок на конструкцию

Прикладываем ветровую нагрузку к куполу (рис. 69).

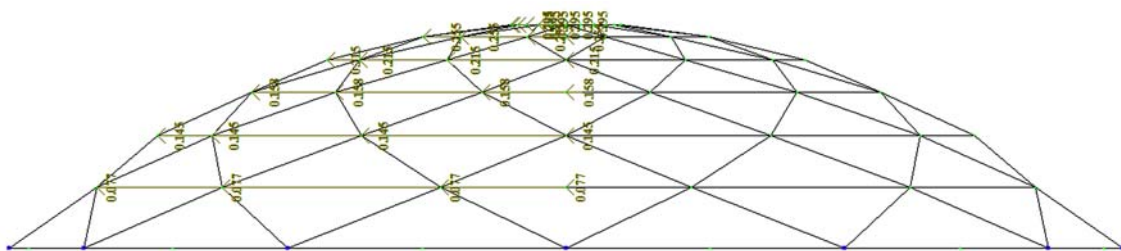
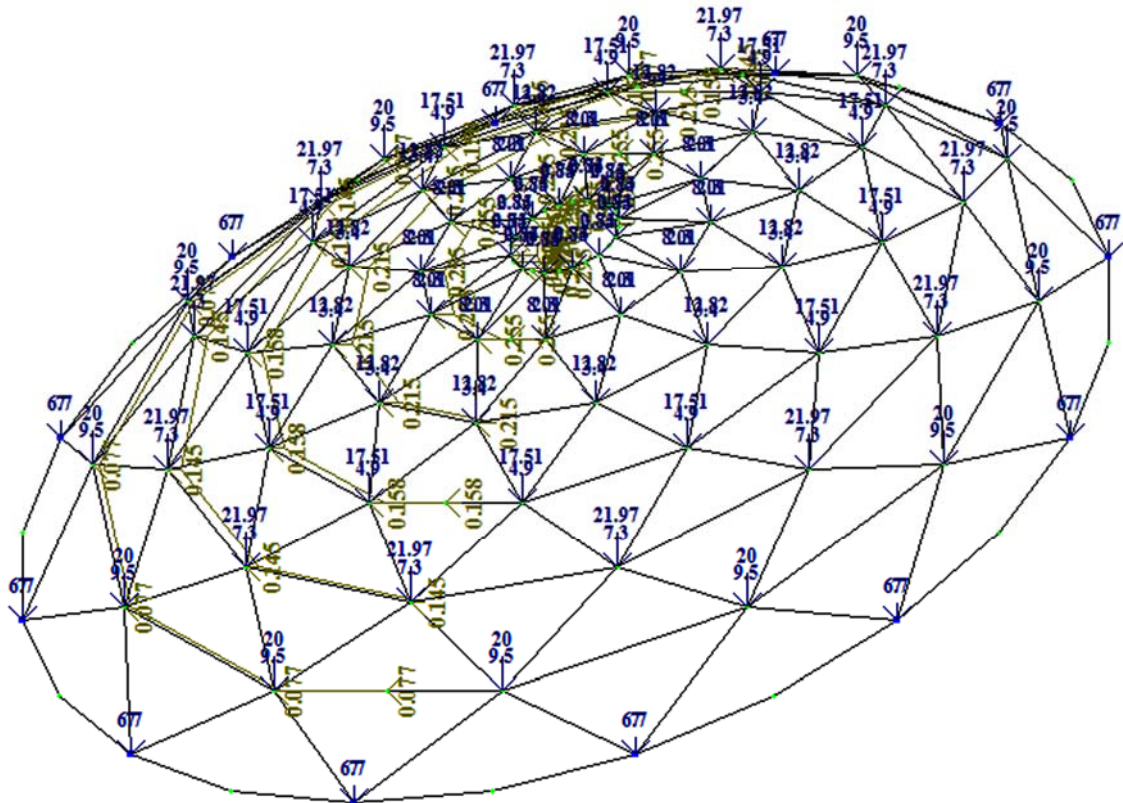


Рис. 69. Ветровая нагрузка

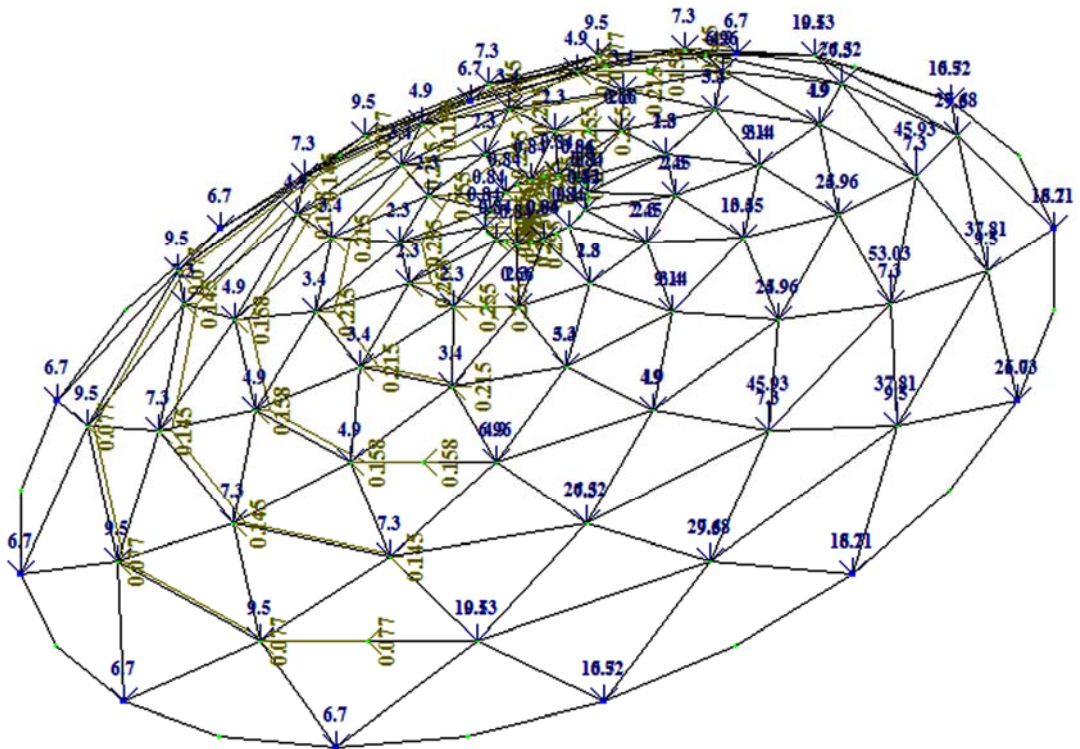
Формируем сочетания нагрузок по Своду Правил [2] и СНиП [6]. Производим их сопоставление.

1. Собственный вес + Снеговая (1 случай по СП) + ветер (рис. 70).



*Рис. 70. Способ загрузки по СНиП РСН 1*

2. Собственный вес + Снеговая (2 случай по СП)+ ветер (рис. 71).



*Рис. 71. Способ загрузки по СНиП РСН 2*

3. Собственные вес + снег [6] (рис. 72).

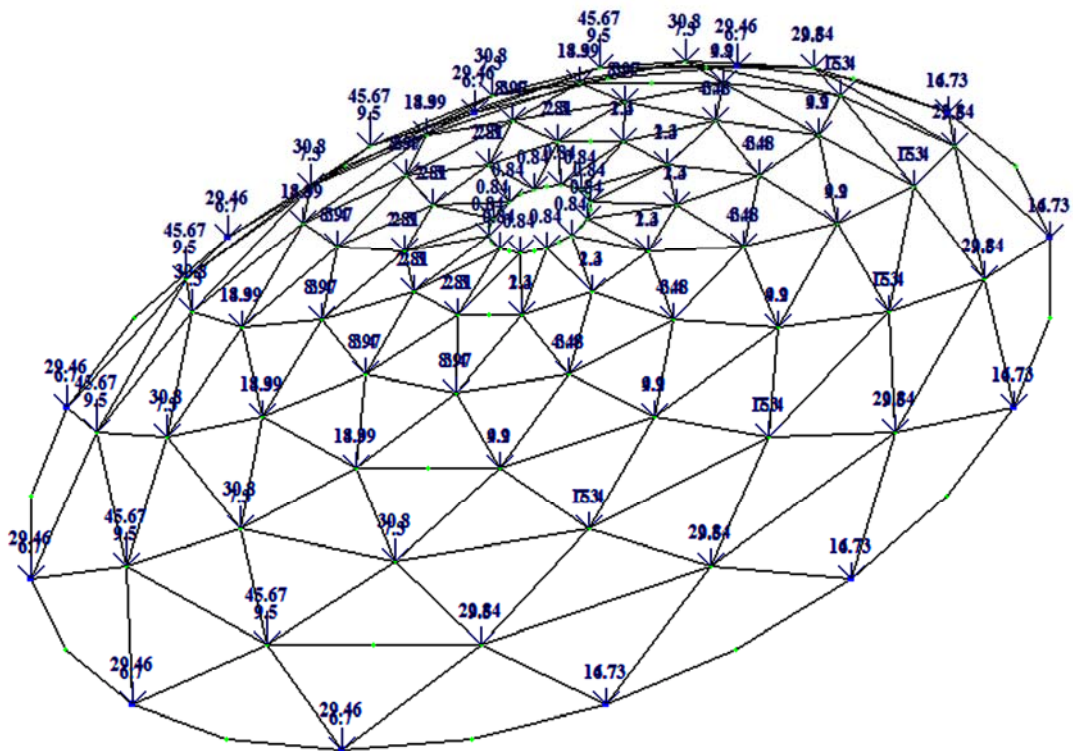


Рис. 72. Способ загрузки по СНиП РСН 3

### 3.5. Определение расчётных усилий

Определяем максимальные деформации от каждого РСН и рассматриваем наиболее загруженное сечение. РСН2 оказалось наиболее неблагоприятным (рис. 73).

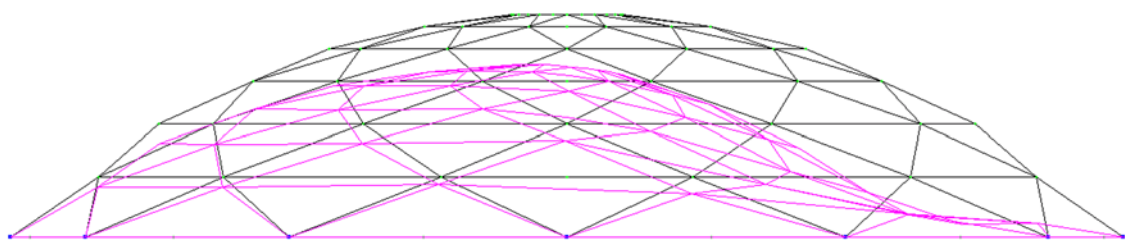


Рис. 73. Деформированная схема купола

Производим нумерацию узлов (рис. 74), сводим перемещения узлов в таблицу 35.

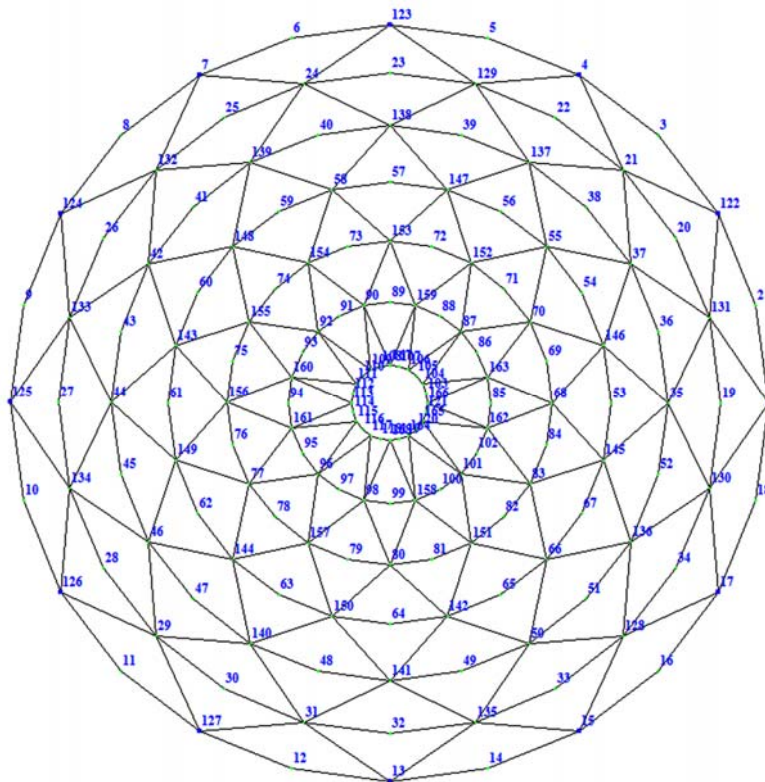


Рис .74. Нумерация узлов купола

Таблица 35. Перемещения узлов

| № узла | Перемещения |        |        |
|--------|-------------|--------|--------|
|        | X, мм       | Y, мм  | Z, мм  |
| 1      | 2           | 3      | 4      |
| 1      | 0,526       | 0,000  | 0,000  |
| 2      | 0,172       | 0,043  | -0,001 |
| 3      | 0,111       | 0,100  | -0,001 |
| 4      | 0,180       | 0,312  | 0,000  |
| 5      | 0,035       | 0,105  | 0,000  |
| 6      | -0,013      | 0,074  | 0,000  |
| 7      | -0,077      | 0,134  | 0,000  |
| 8      | -0,035      | 0,038  | -0,001 |
| 9      | -0,041      | 0,012  | 0,000  |
| 10     | -0,041      | -0,012 | 0,000  |
| 11     | -0,035      | -0,038 | -0,001 |
| 12     | -0,013      | -0,074 | 0,000  |
| 13     | 0,000       | -0,258 | 0,000  |
| 14     | 0,035       | -0,105 | 0,000  |
| 15     | 0,180       | -0,312 | 0,000  |
| 16     | 0,111       | -0,100 | -0,001 |
| 17     | 0,415       | -0,240 | 0,000  |
| 18     | 0,172       | -0,043 | -0,001 |
| 19     | -0,265      | 1,123  | -9,765 |



Продолжение таблицы 35

| 1  | 2      | 3      | 4       |
|----|--------|--------|---------|
| 20 | -0,786 | 2,086  | -1,836  |
| 21 | -0,281 | -0,451 | -2,750  |
| 22 | -0,786 | -2,086 | -1,836  |
| 23 | -3,369 | 0,000  | -26,511 |
| 24 | -2,832 | -0,655 | -23,859 |
| 25 | 0,131  | 0,205  | -5,385  |
| 26 | 0,173  | 0,000  | -5,181  |
| 27 | 0,131  | -0,205 | -5,385  |
| 28 | -1,408 | -0,165 | -15,822 |
| 29 | -1,979 | -1,003 | -23,679 |
| 30 | -0,068 | 1,424  | -7,367  |
| 31 | -1,979 | 1,003  | -23,679 |
| 32 | -1,735 | 0,000  | -26,145 |
| 33 | -1,234 | -0,540 | -24,012 |
| 34 | 0,975  | -0,076 | -9,875  |
| 35 | 0,404  | -0,742 | -11,245 |
| 36 | -1,234 | 0,540  | -24,012 |
| 37 | 0,250  | -0,094 | -18,063 |
| 38 | 0,883  | 0,328  | -12,044 |
| 39 | 1,147  | 0,101  | -11,722 |
| 40 | 1,147  | -0,101 | -11,722 |
| 41 | 0,883  | -0,328 | -12,044 |
| 42 | 0,250  | 0,094  | -18,063 |
| 43 | 0,639  | 0,029  | -15,939 |
| 44 | 0,548  | -0,011 | -15,667 |
| 45 | 0,941  | 0,286  | -15,251 |
| 46 | 0,820  | 0,121  | -14,781 |
| 47 | 1,067  | 0,703  | -14,275 |
| 48 | 0,955  | 0,694  | -13,516 |
| 49 | 1,190  | 0,141  | -13,310 |
| 50 | 1,097  | 0,267  | -13,178 |
| 51 | 1,440  | 0,008  | -13,120 |
| 52 | 1,417  | 0,019  | -13,108 |
| 53 | 1,573  | 0,000  | -13,093 |
| 54 | 1,417  | -0,019 | -13,108 |
| 55 | 1,440  | -0,008 | -13,120 |
| 56 | 1,097  | -0,267 | -13,178 |
| 57 | 1,190  | -0,141 | -13,310 |
| 58 | 0,955  | -0,694 | -13,516 |
| 59 | 1,067  | -0,703 | -14,275 |
| 60 | 0,941  | -0,286 | -15,251 |
| 61 | 0,639  | -0,029 | -15,939 |

Определяем внутренние усилия в элементах купола (рис. 75-83).

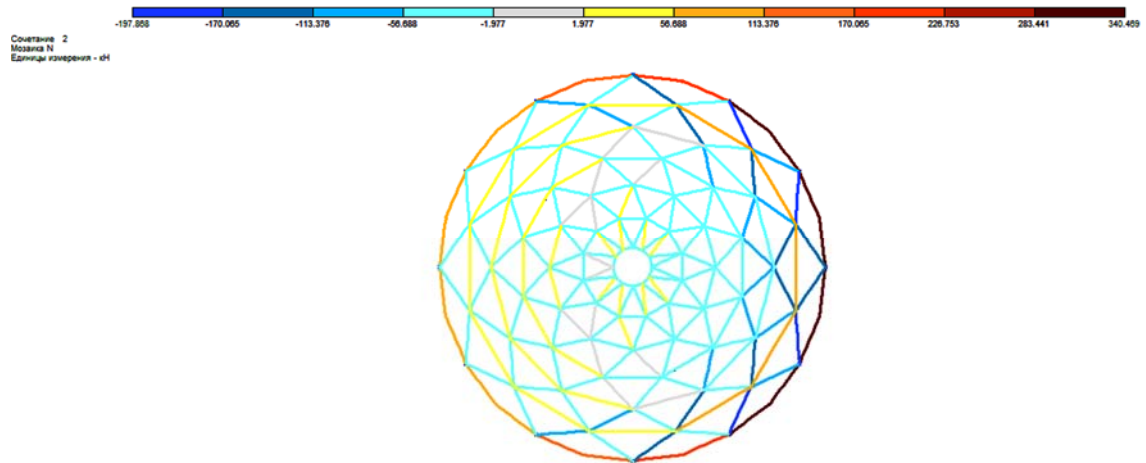


Рис. 75. Мозаика N

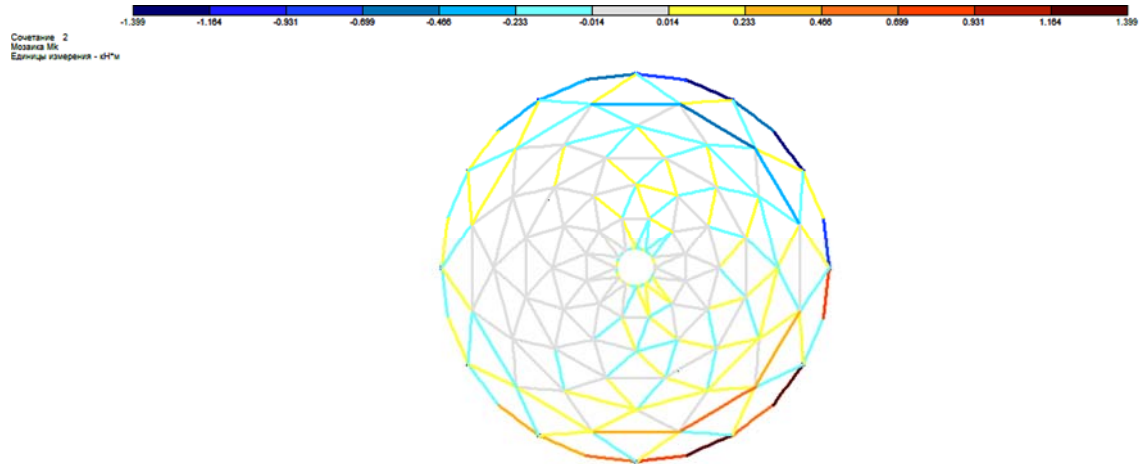


Рис. 76. Мозаика M<sub>k</sub>

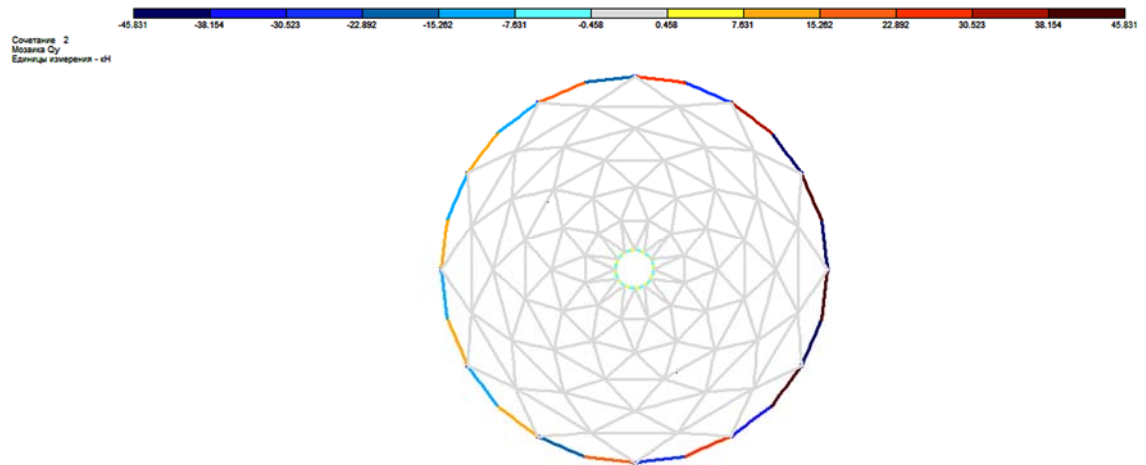


Рис. 77. Мозаика Q<sub>y</sub>

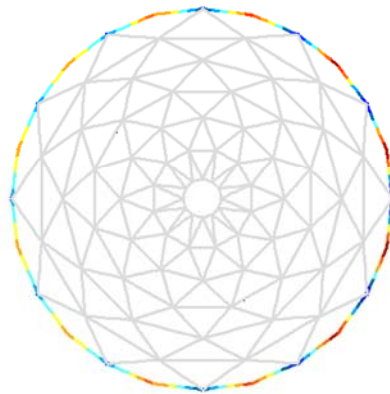
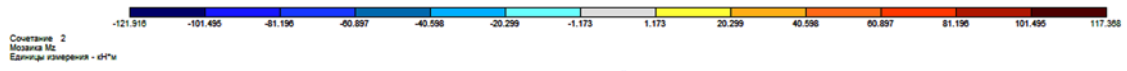


Рис. 78. Мозаика  $M_z$

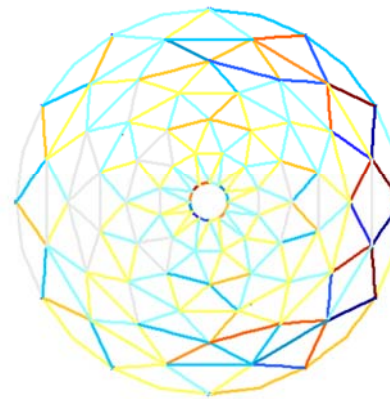
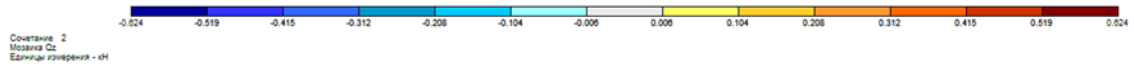


Рис. 79. Мозаика  $Q_z$

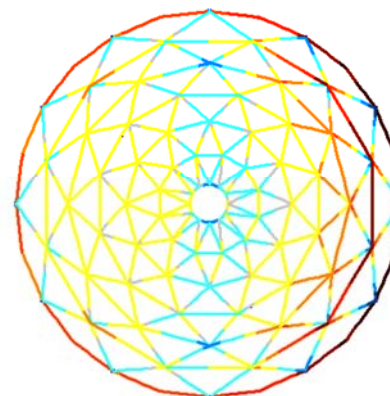
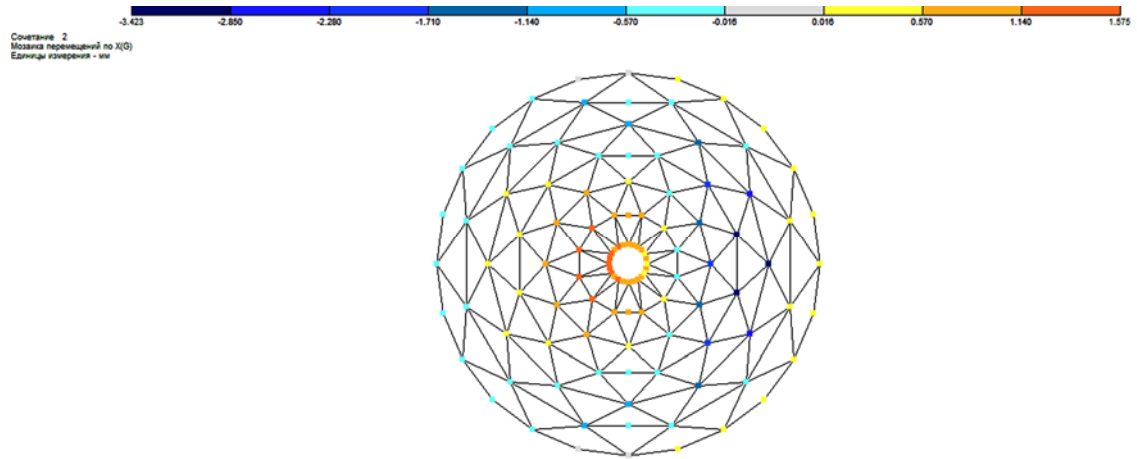
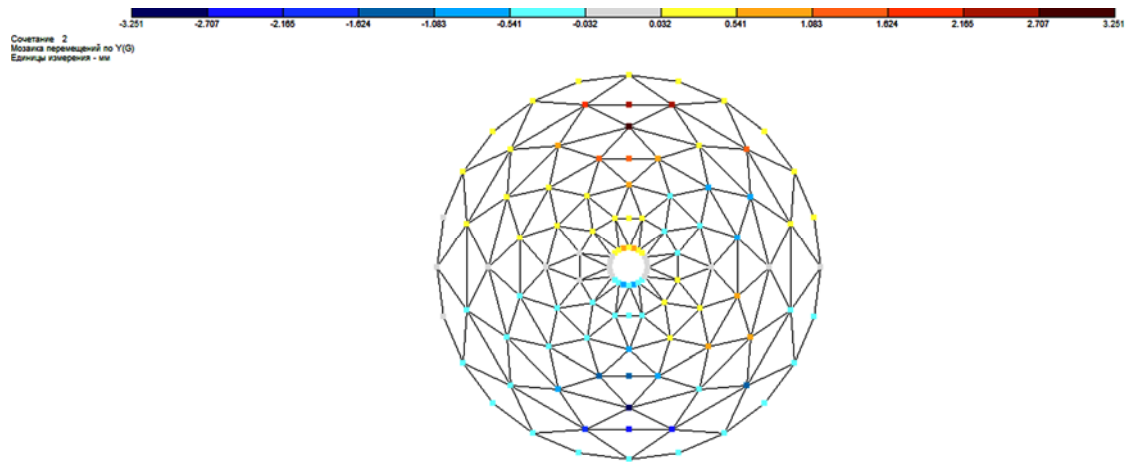


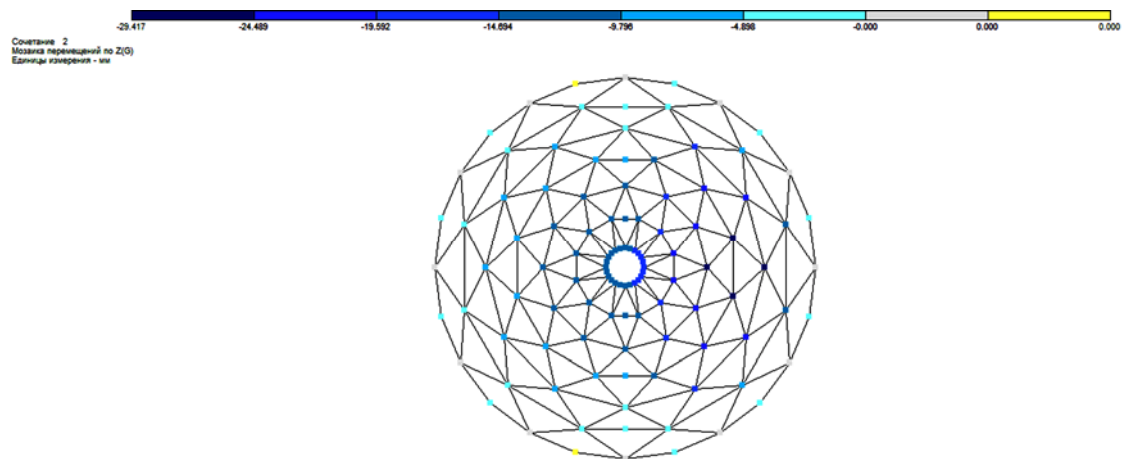
Рис. 80. Мозаика  $M_y$



*Рис. 81. Мозаика перемещений узлов по X*



*Рис. 82. Мозаика перемещений узлов по Y*



*Рис. 83. Мозаика перемещений узлов по Z*

Производим нумерацию стержней (рис. 84).

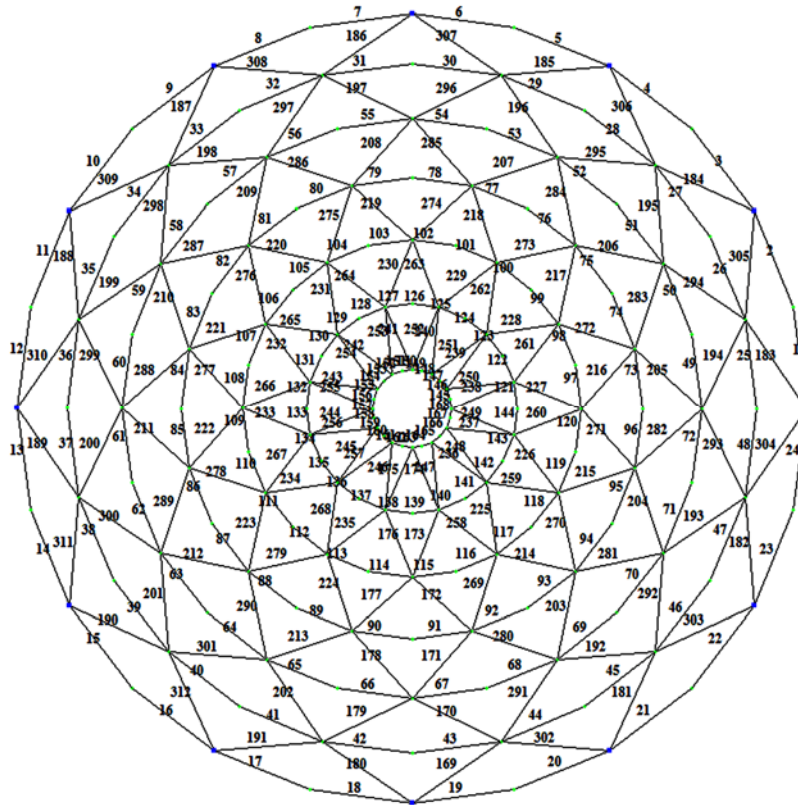


Рис. 84. Нумерация стержней

Усилия, полученные в стержнях, сводим в таблицу 36.

Таблица 36. Усилия в стержнях

| № элем. | № сечен. | Усилия   |              |              |            |              |            |
|---------|----------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
|         |          | $N$ , кН | $M_k$ , кН·м | $M_y$ , кН·м | $Q_z$ , кН | $M_z$ , кН·м | $Q_y$ , кН |
| 1       | 2        | 3        | 4            | 5            | 6          | 7            | 8          |
| 185     | 1        | -197,670 | -0,139       | 1,314        | -0,543     | -0,164       | -0,041     |
| 185     | 2        | -197,670 | -0,139       | -1,901       | -0,543     | 0,080        | -0,041     |
| 186     | 1        | -188,325 | -0,101       | 0,694        | -0,339     | -0,131       | -0,033     |
| 186     | 2        | -188,325 | -0,101       | -1,310       | -0,339     | 0,066        | -0,033     |
| 187     | 1        | -128,127 | -0,053       | -0,224       | -0,009     | -0,133       | -0,039     |
| 187     | 2        | -128,127 | -0,053       | -0,275       | -0,009     | 0,096        | -0,039     |
| 188     | 1        | -62,713  | -0,036       | 0,061        | -0,041     | -0,089       | -0,028     |
| 188     | 2        | -62,713  | -0,036       | -0,179       | -0,041     | 0,079        | -0,028     |
| 189     | 1        | -42,501  | -0,029       | 0,402        | -0,149     | -0,036       | -0,010     |
| 189     | 2        | -42,501  | -0,029       | -0,481       | -0,149     | 0,026        | -0,010     |
| 190     | 1        | -39,506  | -0,028       | 0,304        | -0,123     | -0,042       | -0,011     |
| 190     | 2        | -39,506  | -0,028       | -0,421       | -0,123     | 0,024        | -0,011     |
| 191     | 1        | -43,164  | -0,029       | 0,335        | -0,130     | -0,040       | -0,010     |
| 191     | 2        | -43,164  | -0,029       | -0,433       | -0,130     | 0,022        | -0,010     |

| 1   | 2 | 3       | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|-----|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 192 | 1 | -50,663 | -0,024 | 0,304  | -0,123 | -0,059 | -0,016 |
| 192 | 2 | -50,663 | -0,024 | -0,423 | -0,123 | 0,035  | -0,016 |
| 193 | 1 | 63,771  | -0,495 | 0,116  | 0,306  | -0,137 | -0,145 |
| 193 | 2 | 63,169  | -0,495 | 2,878  | 0,306  | -0,400 | 0,203  |
| 194 | 1 | 74,644  | -0,334 | 1,912  | 0,101  | -0,496 | -0,306 |
| 194 | 2 | 74,296  | -0,334 | 2,826  | 0,101  | -0,452 | 0,296  |
| 195 | 1 | 78,924  | 0,000  | 2,536  | 0,000  | -0,504 | -0,348 |
| 195 | 2 | 78,924  | 0,000  | 2,536  | 0,000  | -0,504 | 0,348  |
| 196 | 1 | 74,296  | 0,334  | 2,826  | -0,101 | -0,452 | -0,296 |
| 196 | 2 | 74,644  | 0,334  | 1,912  | -0,101 | -0,496 | 0,306  |
| 197 | 1 | 63,169  | 0,495  | 2,878  | -0,306 | -0,400 | -0,203 |
| 197 | 2 | 63,771  | 0,495  | 0,116  | -0,306 | -0,137 | 0,145  |
| 198 | 1 | 39,366  | 0,314  | 0,021  | -0,131 | 0,063  | -0,005 |
| 198 | 2 | 39,366  | 0,314  | -0,569 | -0,131 | 0,086  | -0,005 |
| 199 | 1 | 33,698  | 0,049  | 0,071  | 0,079  | 0,077  | 0,020  |
| 199 | 2 | 33,698  | 0,049  | 0,788  | 0,079  | -0,105 | 0,020  |
| 200 | 1 | 22,913  | -0,020 | 0,655  | -0,030 | -0,079 | -0,010 |
| 200 | 2 | 22,913  | -0,020 | 0,388  | -0,030 | 0,011  | -0,010 |

### 3.6. Расчёт купола

Расчет на прочность сжато-изгибаемого элемента:

$$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{M_{\delta}}{W_{расч}} \leq R_c;$$

$$M_{\delta} = \frac{M_{\kappa}}{\xi_{\kappa}};$$

$$\xi_{\kappa} = 1 - \frac{N}{\varphi R_c F_{\delta p}};$$

$$M_{\kappa} = 0,139 \text{ кН}\cdot\text{м}, N = 197,67 \text{ кН}.$$

$$F_{\delta p} = 0,1 \cdot 0,25 = 0,025 \text{ м}^2.$$

$$\varphi = 1 - \alpha \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2,$$

$$\lambda = \frac{l_0}{r};$$

$$l_0 = l \mu_0,$$

где  $l = 5,9$  м (определено из расчетной схемы);  $\mu_0 = 0,65$  (т.к. оба конца стержня заземлены);  $r$  — радиус инерции сечения с максимальными размерами брутто соответственно относительно осей X и Y.

Подставив данные, получим:

$$\lambda = \frac{l_0}{r} = \frac{5,9 \cdot 0,025}{0,19 \cdot 0,1} = 7,7 \leq 70; \quad \varphi = 1 - a \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2 = 1 - 0,8 \left( \frac{7,7}{100} \right)^2 = 0,99;$$

$$\xi_{\kappa} = 1 - \frac{197,67}{0,99 \cdot 12355 \cdot 0,025} = 0,64; \quad M_{\delta} = \frac{0,139}{0,64} = 0,217 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$W_{\text{расч}} = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,25 \cdot 0,1^2}{6} = 0,004 \text{ м}^3.$$

$$R_c = 13 m_g m_t m_o m_n m_a m_{ca} m_{ch} =$$

$$= 13 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1 = 12,355 \text{ МПа.}$$

$$\frac{197,67}{0,025} + \frac{0,139}{0,004} = 7910,275 \text{ КПа} \leq R_c = 12355 \text{ КПа.}$$

Прочность обеспечена.

Определяем допустимый прогиб:

$$f_u = l / 250 = 40 / 250 = 0,16 \text{ м} = 160 \text{ мм.}$$

Максимальный прогиб в самой нагруженной арке 29,4 мм.

Расчет на устойчивость плоской формы деформирования сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{n}{\varphi R_c F_{\text{бр}}} + \left( \frac{M_{\delta}}{\varphi_M R_u W_{\text{бр}}} \right)^n \leq 1,$$

где  $F_{\text{бр}}$  — площадь брутто с максимальными размерами сечения элемента на участке  $l_p$ ;

$W_{\text{бр}}$  — момент сопротивления поперечного сечения;

$n$  — коэффициент,  $n = 2$  — для элементов без закрепления растянутой зоны из плоскости деформирования и  $n = 1$  для элементов, имеющих такие закрепления;

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба, определяемый по формуле

$$\varphi = \frac{A}{\lambda^2},$$

где  $A$  — коэффициент  $A = 3\,000$  для древесины и  $A = 2\,500$  для фанеры и древесины из однонаправленного шпона;

$\varphi_M$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\varphi_M = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_{\varphi},$$

где  $l_p$  — расстояние между опорными сечениями элемента, а при закреплении сжатой кромки элемента в промежуточных точках от смещения из плоскости изгиба — расстояние между этими точками;

$b$  — ширина поперечного сечения;  
 $h$  — максимальная высота поперечного сечения на участке  $l_p$ ;  
 $k_\phi$  — коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке  $l_p$ , определяемый по [4, прил. Г, табл. Г.2].

Подставляя данные, получим

$$\frac{197,67}{0,99 \cdot 12355 \cdot 0,025} + \left( \frac{0,139}{1,1 \cdot 12355 \cdot 0,002} \right)^n \leq 1,$$

$$0,64 \leq 1,$$

$$\varphi_m = 140 \frac{0,1^2}{5,9 \cdot 0,25} \cdot 1,13 = 1,1.$$

В результате производим конструирование узлов купола (рис. 85-88).

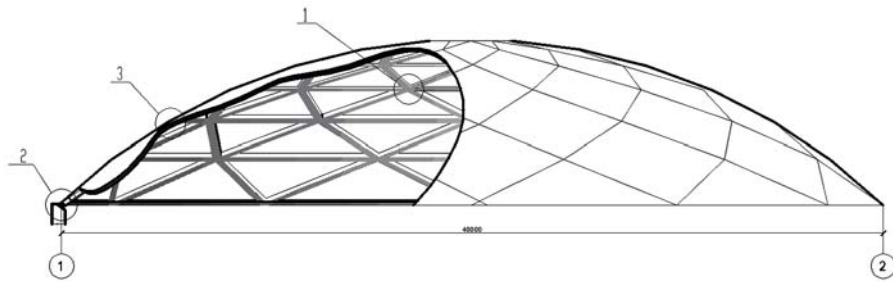


Рис. 85. Узлы купола

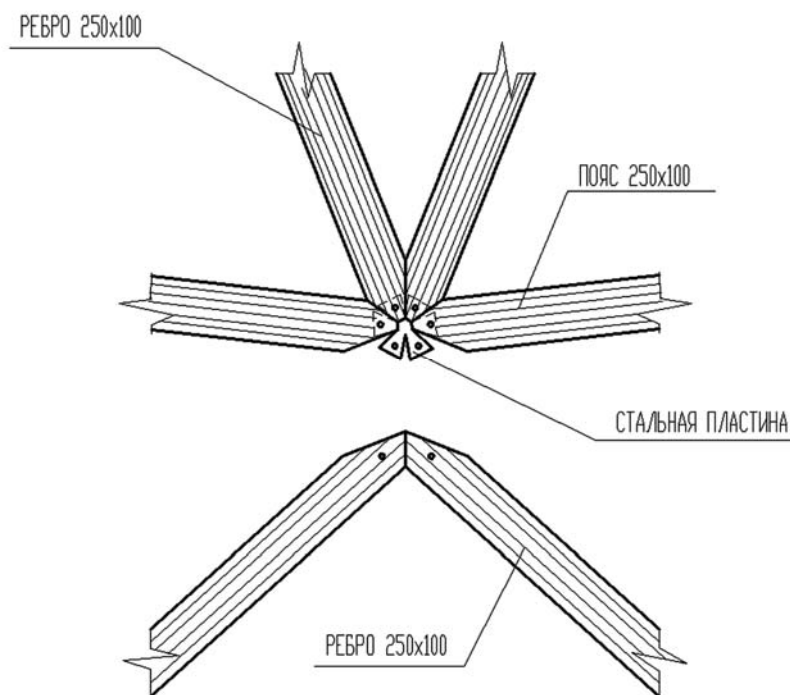
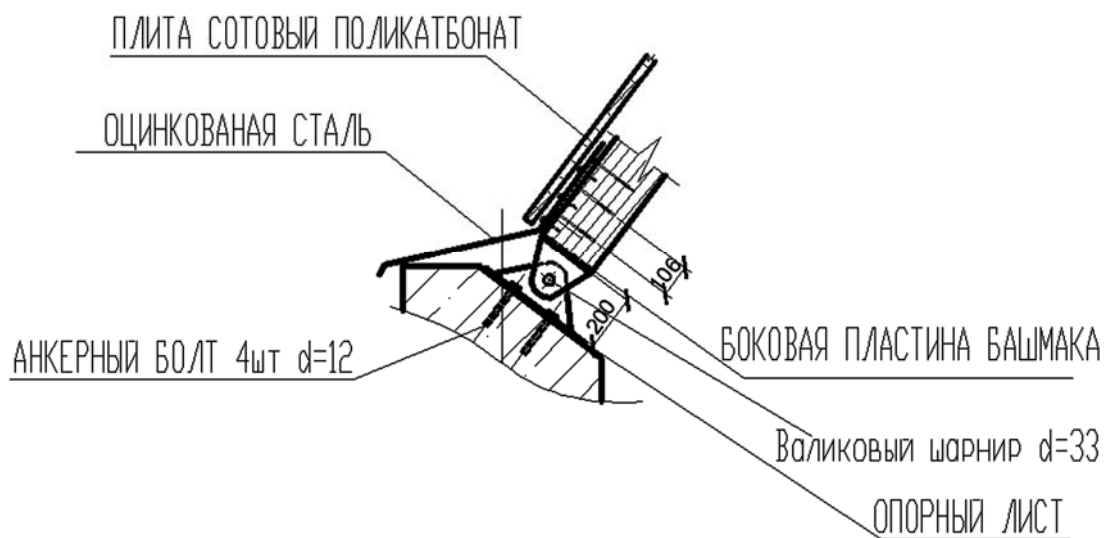
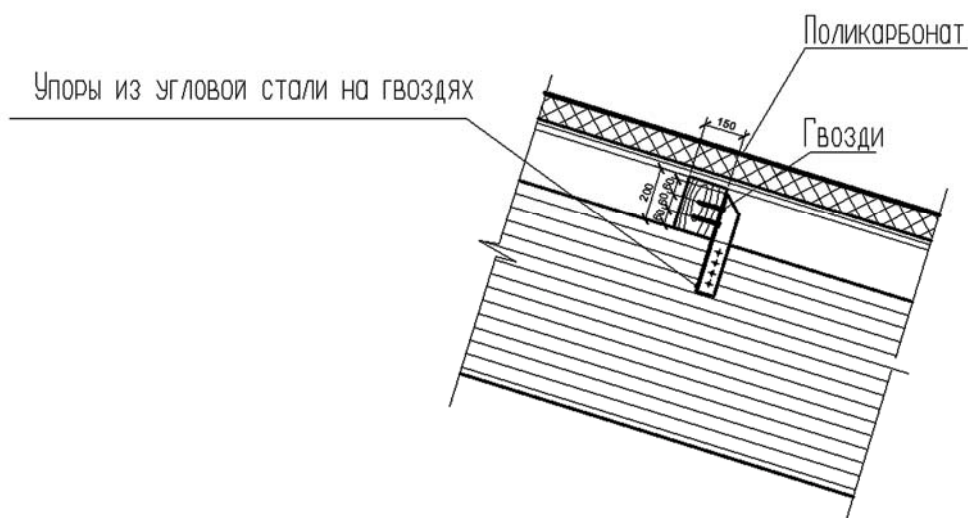


Рис. 86. Узел соединения (1) элементов купола





*Рис. 87. Узел сопряжения (2)  
монтажных элементов с фундаментом*



*Рис. 88. Узел крепления (3)  
несущих элементов кровли к куполу*

### *Контрольные вопросы*

1. По каким осям осуществляется закрепление узлов купола?
2. В чём отличие загрузки снеговой нагрузкой по разным нормативным документам?
3. По каким усилиям производится расчёт на прочность?

## 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ РЕБРИСТОГО КУПОЛА

Конструкция ребристых куполов состоит из меридиональных несущих ребер и поперечных стержней, образующих пояса купола. Если поперечные стержни, образующие пояс, включены в работу купола, то такой купол называется ребристо-кольцевой. Опираются такие купола как правило на бетонное основание. Сверху купола ребра упрутся в сжатое металлическое кольцо.

### 4.1. Конструктивное решение

Купол высотой 8 метров — сферический сегмент радиусом 20 м. Несущая конструкция образована из 16 меридиональных ребер и 7 поясов, образующих ребристо-кольцевую схему. Покрытие выполнено из светопрозрачных листов сотового поликарбоната. Купол шарнирно опирается на бетонное основание. Материал ребер — лиственница.

### 4.2. Порядок введения расчетной конструкции в программный комплекс «Лира»

1. Изначально указываем шестой признак схемы: 3 перемещения и 3 поворота (рис. 89).

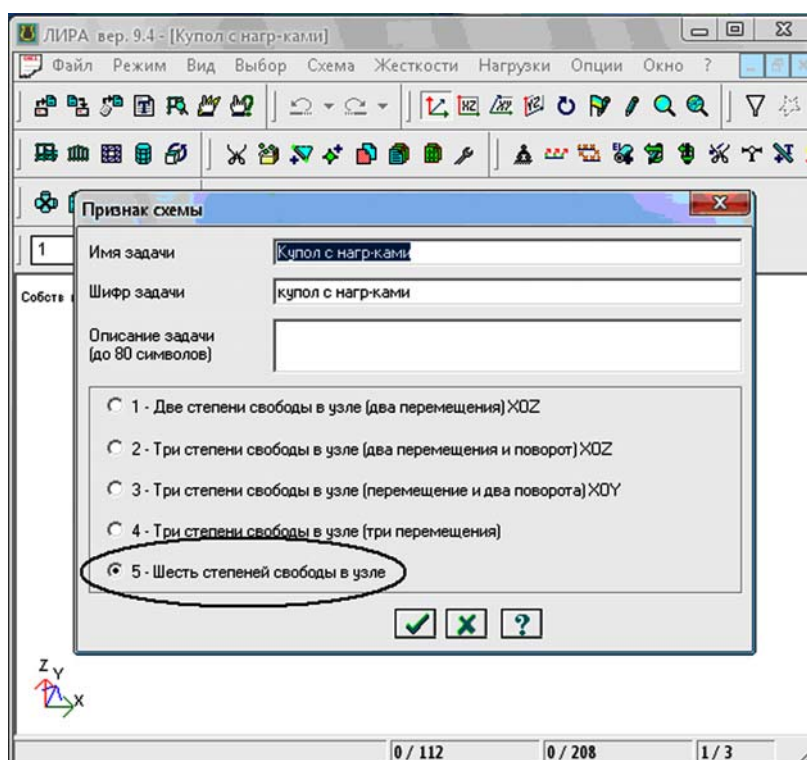


Рис. 89. Признак схемы

2. Задаем конструкцию купола: *Схема – Создание – Поверхности вращения*, указав нужные характеристики: 16 меридиональных ребер, 7 поясов, радиус 20 м, радиус фонаря 2 м, высота 8 м (рис. 90, 91).

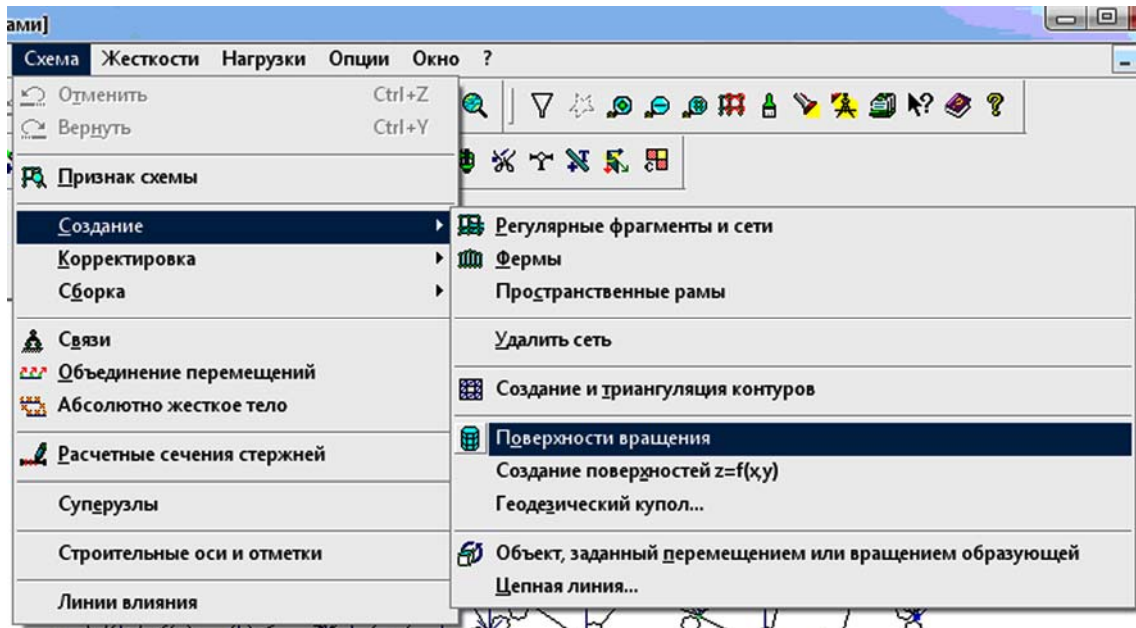


Рис. 90. Меню «Создание конструкции»

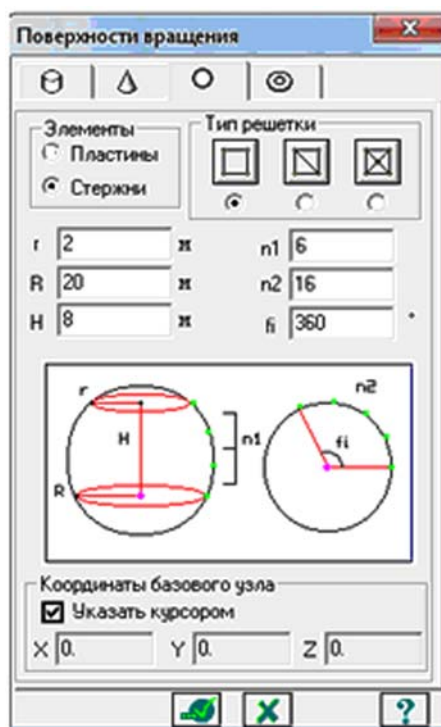


Рис. 91. Диалоговое окно для задания параметров

Получаем схему купола, которую в последствии будем изменять (рис. 92).

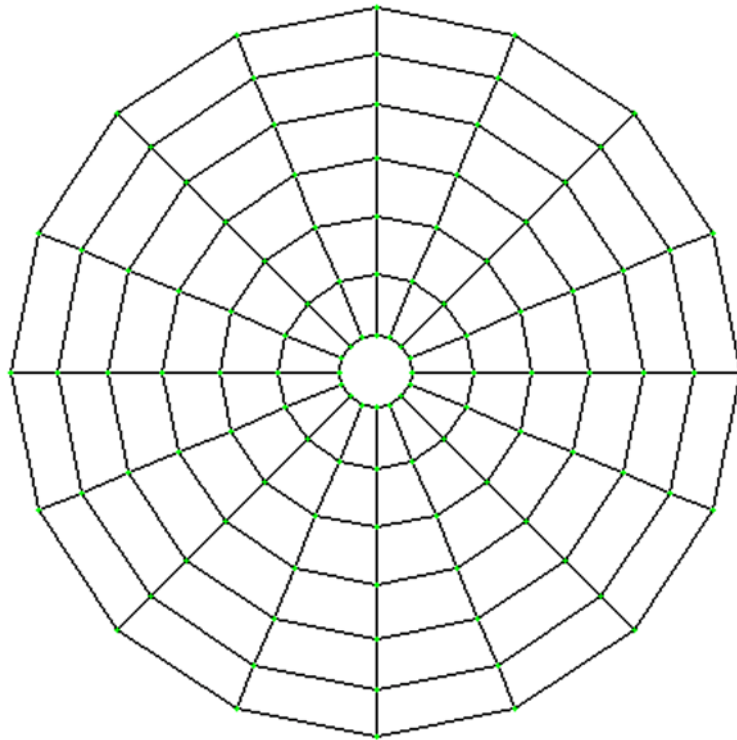


Рис. 92. Схема купола

3. Присваиваем опорам локальные оси: схема – корректировка – локальные оси узлов (рис. 93).

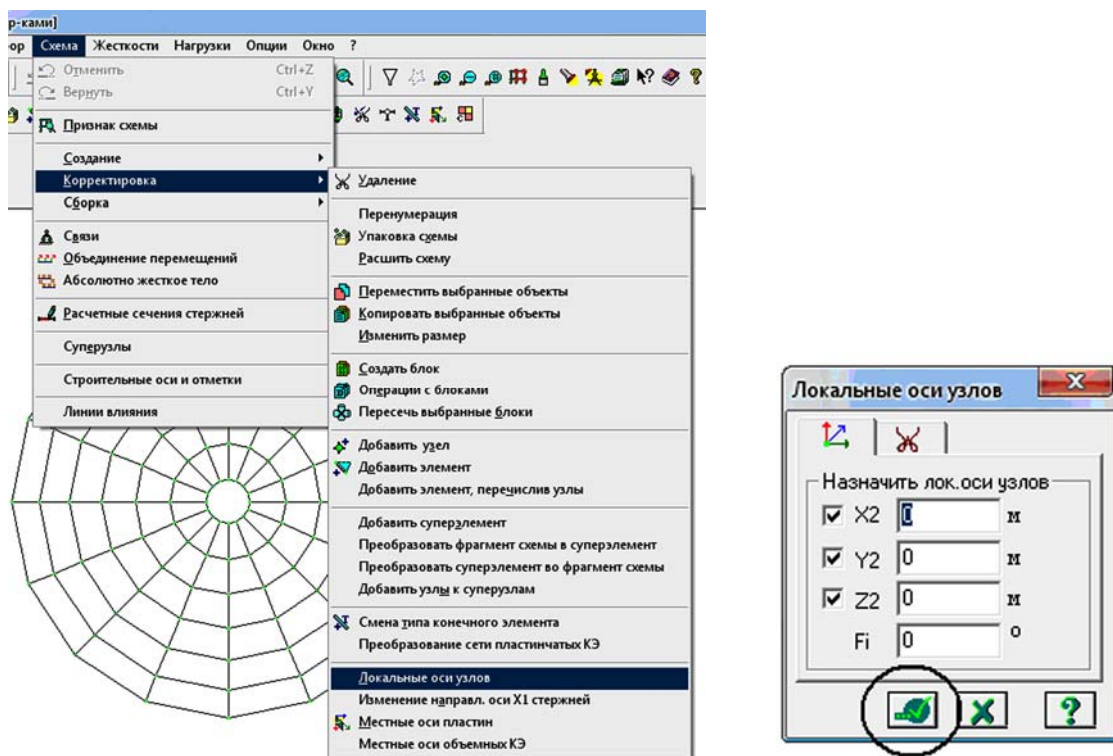


Рис. 93. Меню назначения локальных осей узлов

В случае если координата  $Z$  опорных точек отлична от нуля, надо опустить купол так, чтобы опорные точки имели координату  $Z$ , равную нулю. Для этого выделяем все точки купола и смещаем их вниз на текущее значение координаты  $Z$ .

4. Задаем опорам закрепления: схема – связи по  $Z$  и  $Y$  (рис. 94).

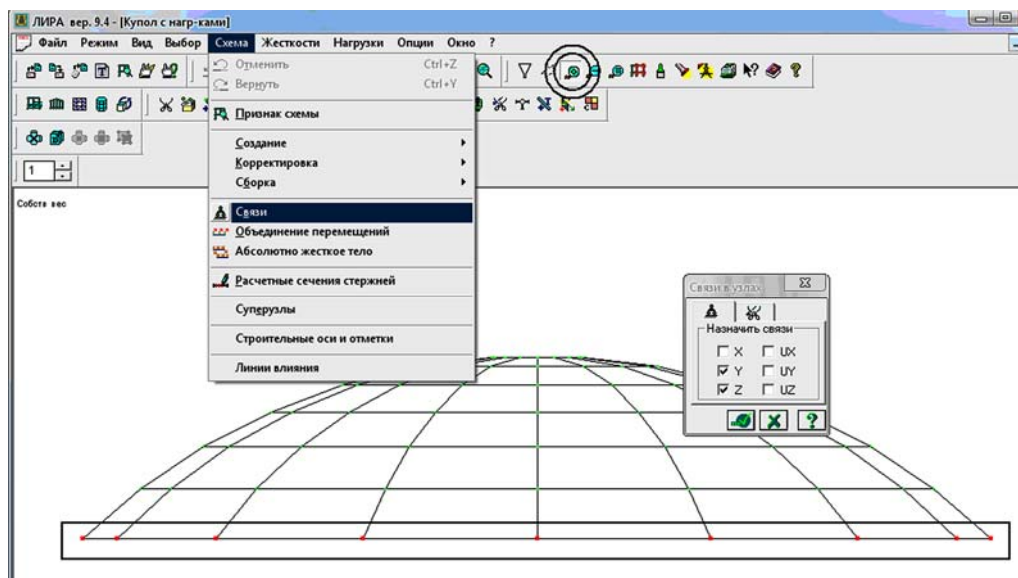


Рис. 94. Связи в узлах

5. Устанавливаем шарниры по оси  $UY$  на краях элементов пояса и на концах меридиональных ребер: жесткости – шарниры (рис. 95, 96, 97).

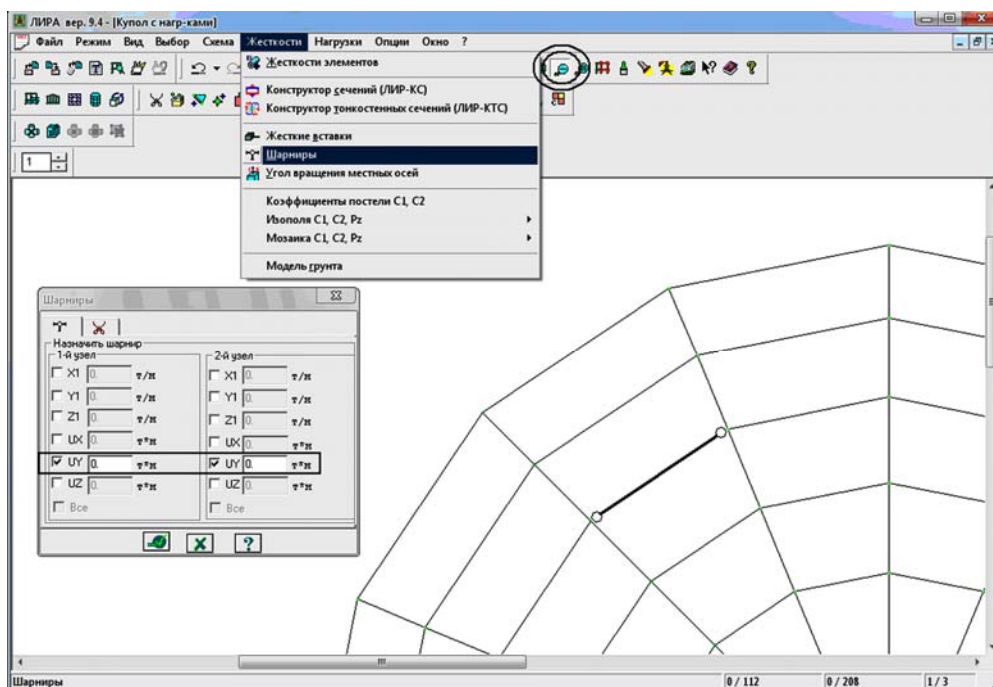


Рис. 95. Шарниры в элементах пояса

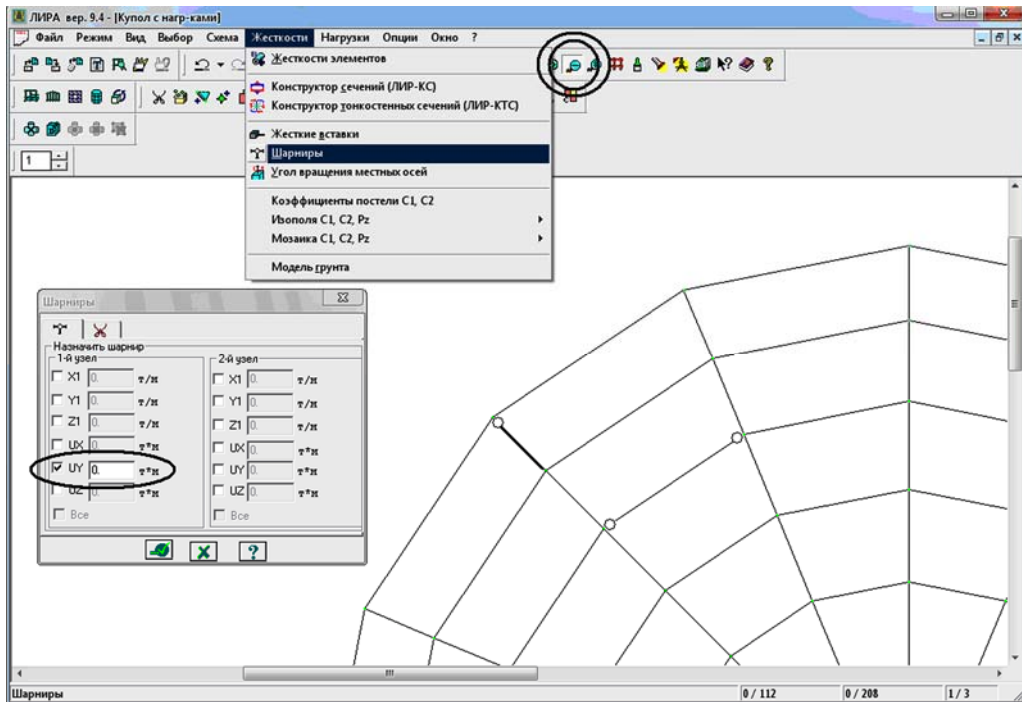


Рис. 96. Шарнир ребра на опоре

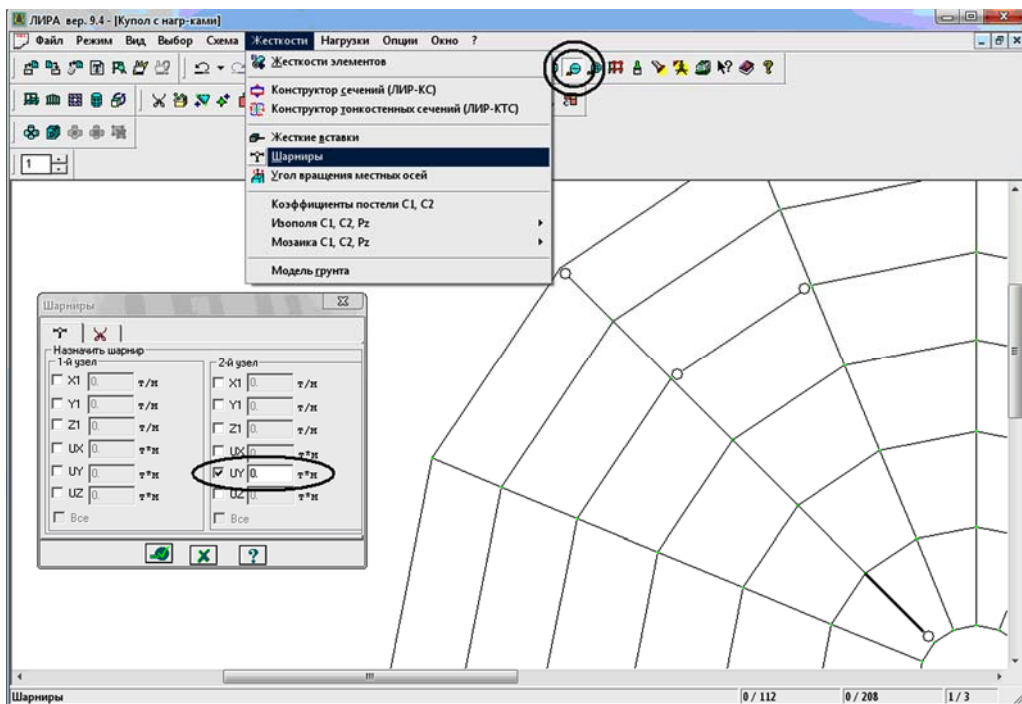


Рис. 97. Шарнир ребра у сжатого кольца

6. Вводим связи в конструкцию и устанавливаем в них шарниры (рис. 98).

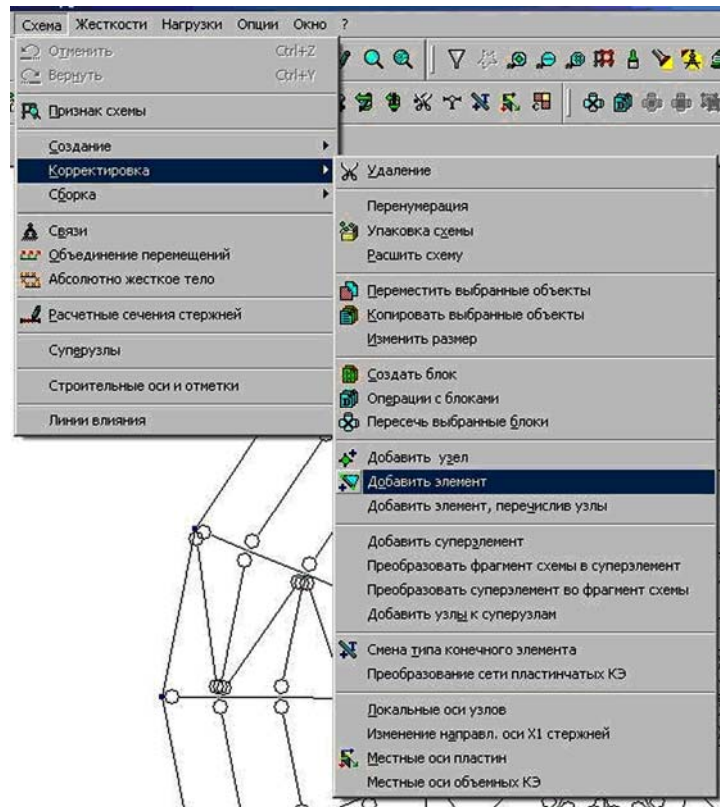


Рис. 98. Связи купола

Получаем схему со связями (рис. 99).

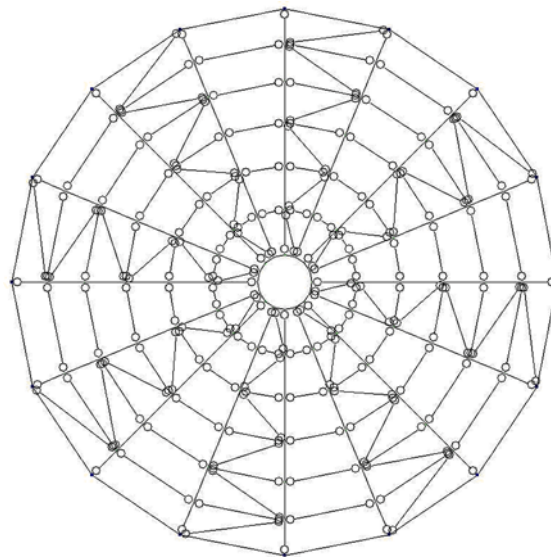


Рис. 99 Схема со связями

7. Задаем необходимые жесткости элементам купола: *Жесткости – Жесткости элементов – Добавить – Брус –  $E = 10^7$ ,  $V = 15$ ,  $H = 40$ ,  $R_0 = 15$  – Установить как текущий тип – Назначить*. И так для каждого сечения (рис. 100).

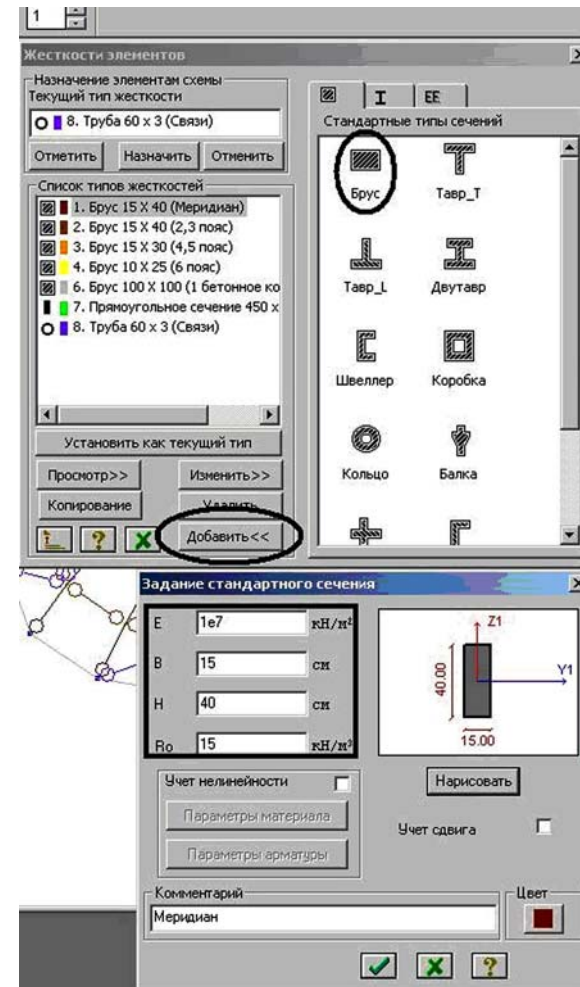
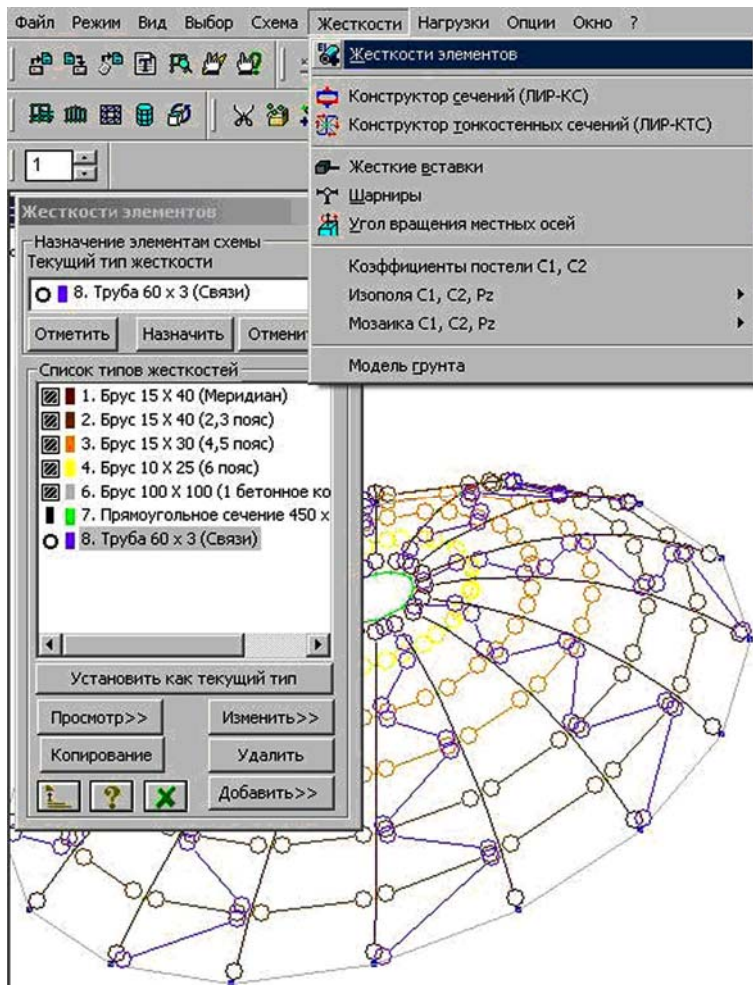


Рис. 100. Задание жесткостей элементам



Получаем схему с установленными жесткостями (рис. 101).

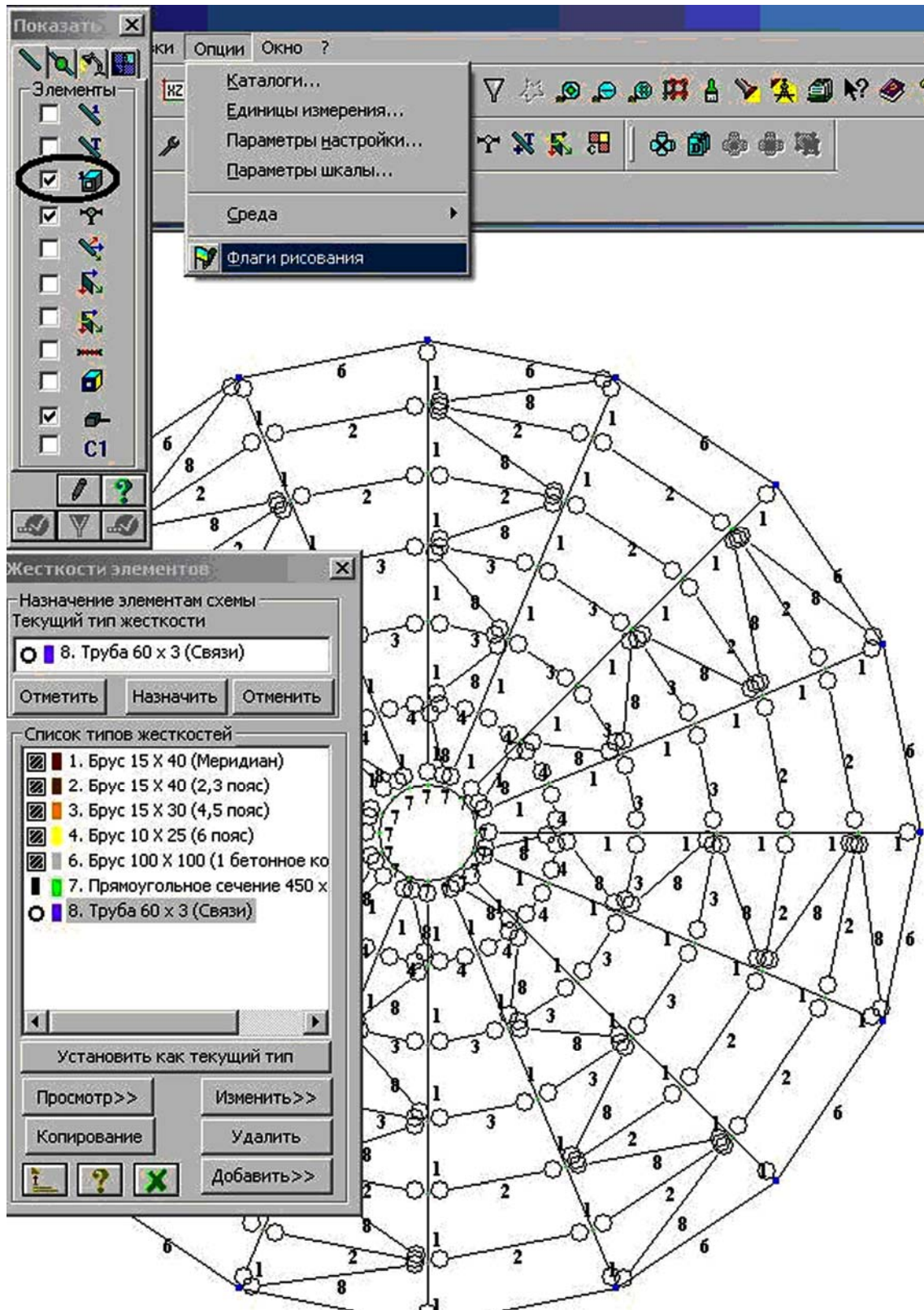


Рис. 101. Схема с установленными жесткостями

### 4.3. Сбор нагрузок на конструкцию

1. Собираем собственный вес конструкции на узлы вручную. Находим вес *погонного метра каждого сечения* и вес  $1\text{ м}^2$  покрытия из поликарбоната, а затем собираем из найденных значений вес на каждый узел. Для этого нужно умножить вес погонного метра сечения на длину ребра с данным сечением (рис. 102).

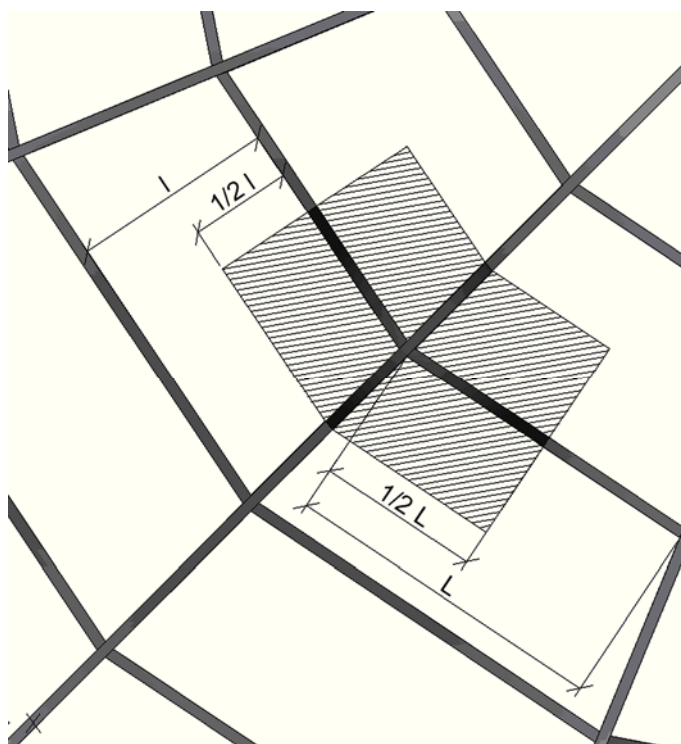


Рис. 102. Площадь сбора нагрузок на узел

Нагрузки от собственного веса сводим в таблицы 37, 38.

Таблица 37. Нагрузки от одного погонного метра конструкций

| Части конструкции | Сечение    | Нормативная нагрузка, кН/м, | Коэффициент | Расчетная нагрузка, кНм |
|-------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------------------|
| Меридиан          | 40×15 см   | 0,36                        | 1,1         | 0,396                   |
| Нижний пояс       | 40×20 см   | 0,48                        | 1,1         | 0,528                   |
| 2-, 3-й пояса     | 40×15 см   | 0,36                        | 1,1         | 0,396                   |
| 4-, 5-й пояса     | 30×15 см   | 0,27                        | 1,1         | 0,297                   |
| Верхний пояс      | 20×10 см   | 0,15                        | 1,1         | 0,165                   |
| Труба             | 402-9,5 мм | 0,233                       | 1,1         | 0,2563                  |
| Поликарбонат      | 16 мм      | 0,027                       | 1,2         | 0,0324                  |

Таблица 38. Нагрузки на узлы

| № пояса | Нагрузка кН |
|---------|-------------|
| 1       | 5,205       |
| 2       | 4,687       |
| 3       | 4,216       |
| 4       | 3,178       |
| 5       | 2,682       |
| 6       | 1,894       |
| 7       | 0,905       |

Задаем нагрузку от собственного веса: *Нагрузки – Нагрузки на узлы и элементы* (рис. 103).

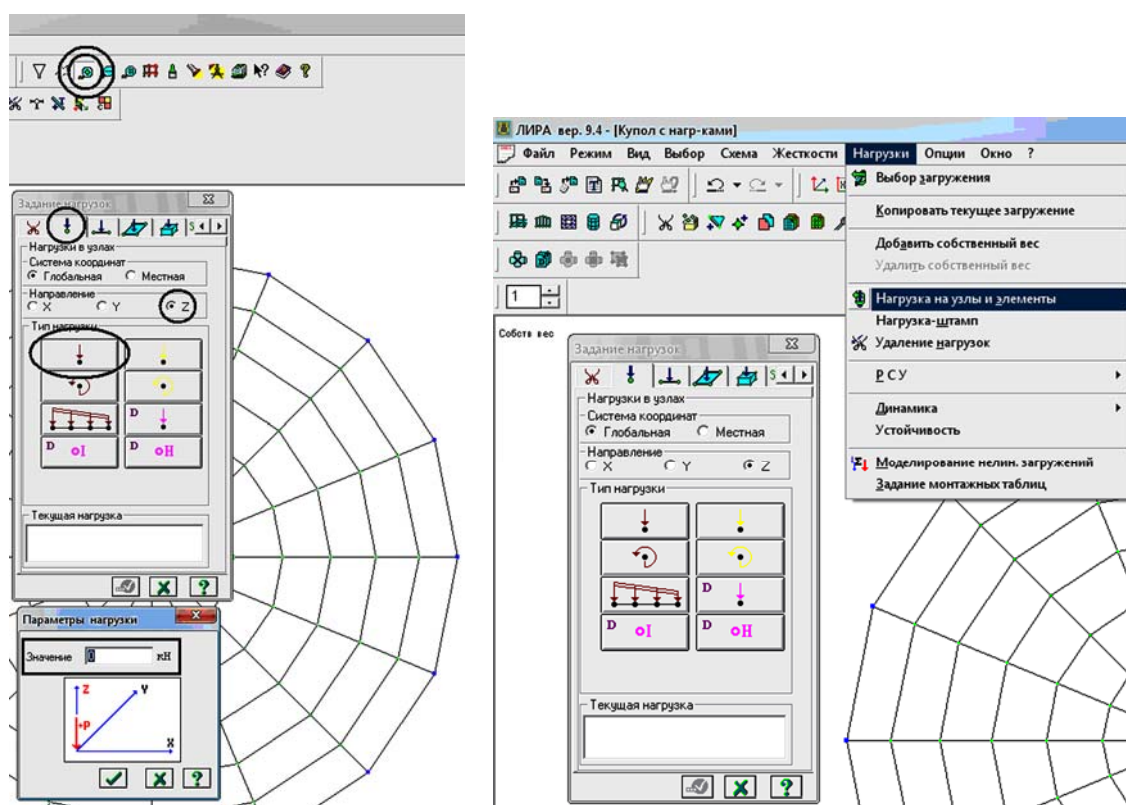


Рис. 103. Задание нагрузок от собственного веса

2. Каждому узлу задаем соответствующую нагрузку. Получаем (рис. 104).

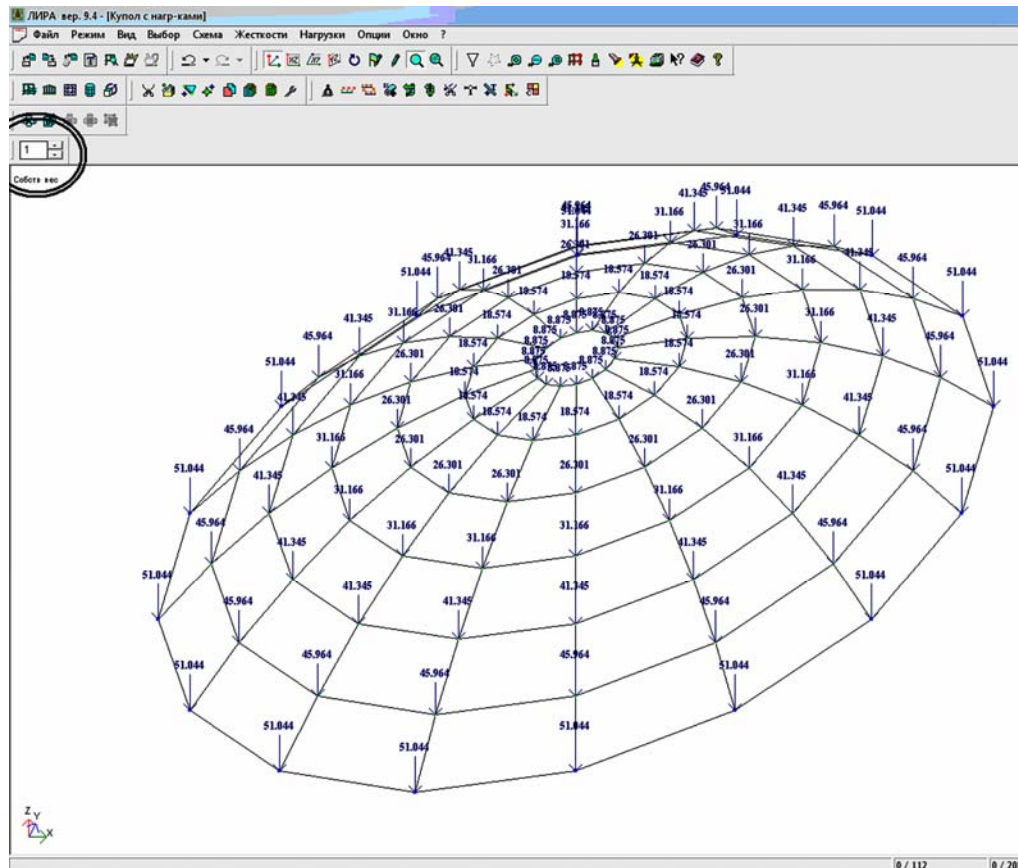


Рис. 104. Загрузка собственным весом

3. По Своду Правил [2] находим значения давления снега над каждым узлом в КПа и так же собираем их на узлы, используя те же площади, что использовали при подсчете нагрузки от покрытия. Задаем два вида снеговой нагрузки: 1 тип и 2 тип нагрузки, которые будем использовать в расчетных сочетаниях.

Определяем снеговую нагрузку по Своду Правил [2] по формуле

$$S_0 = 0,7c_e c_t \mu S_g,$$

где  $c_e$  — коэффициент учитывающий снос снега с покрытия зданий под действием ветра или других факторов ( $c_e = 0,8$ ) т.к. размер в поперечнике менее 60 м;

$c_t$  — термический коэффициент ( $c_t = 0,8$ );

$\mu$  — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие ( $\mu$  определяется расчетом для двух случаев загрузки снегом, см. рис. 64);

$S_g$  — вес снегового покрытия на  $1 \text{ м}^2$ ;

Для зданий с купольными круговыми и близкими к ним по очертаниям покрытиями коэффициент  $\mu_1$  определяется по [2, табл. 3]. Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Для пологих куполов с отношением  $f/d \leq 0,05$  следует учитывать только вариант 1.

Для куполов с отношением  $f/d > 0,05$  следует учитывать варианты 1, 2 и 3 при уклонах  $\alpha < 60^\circ$ .

Для варианта 2 следует принимать при  $z \leq r_1$ ; коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие  $\mu_2$  определять по формуле

$$\mu_2 = C_r (z/r)^2 \sin \beta,$$

где  $z$  — расстояние от центра до поясов купола;

$r$  — расстояние от центра до точки, где угол становится  $30^\circ$ ;

$\beta$  — угол до меридиана купола.

Коэффициент  $C_r$  определяется по формуле

$$C_r = 2,55 - \exp(0,8 - 14 (f/d)),$$

где  $f$  — высота купола;

$d$  — диаметр купола.

При  $z > r$ , коэффициент  $\mu_3$  при  $\alpha = 45^\circ$  определяем по формуле

$$\mu_3 = 1,5 \sin \beta,$$

где  $\beta$  — угол до меридиана купола (при  $\alpha > 60^\circ \mu_3 = 0$ ).

Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Для варианта 3 коэффициент  $\mu_2$  определяем по формуле

$$\mu_2 = 3 \sqrt{\frac{(2f \sin 3\alpha)}{d}} \sin \beta,$$

где  $f$  — высота купола;

$\alpha$  — угол к горизонтали от покрытия в узловых точка поясов;

$d$  — диаметр купола;

$\beta$  — угол до меридиана купола.

Вариант 3 следует учитывать для куполов с  $f/d > 0,05$  при сильно шероховатой поверхности покрытия, наличии на нем возвышающихся надстроек, фонарей или снегозадерживающих преград, а так же для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки.

В нашем случае 3 вариант не рассматривается.

Результаты расчетов сведены в таблицу 39.



Определяем снеговую нагрузку по СНиП [6].

Полное расчетное значение снеговой нагрузки  $S$  на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле

$$S = S_g m,$$

где  $S_g$  — расчетное значение веса снегового покрова на  $1 \text{ м}^2$  горизонтальной поверхности земли;

$m$  — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие (рис. 105).

Здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями

$m_1 = \cos 1,8a$ ;  $m_2 = 2,4 \sin 1,4a$ ,  
где  $a$  — уклон покрытия, град

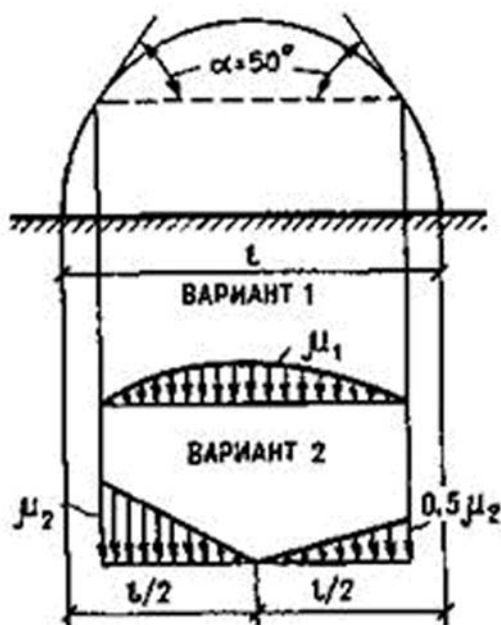


Рис. 105. Схема загрузки

В нашем случае наиболее нагруженным является второй вид загрузки.

Определяем ветровую нагрузку по Своду Правил [2].

Ветровую нагрузку находим по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) c_e,$$

где  $w_0$  — нормативное значение ветрового давления, определяется по следующей таблице 40;

$c_e$  — аэродинамический коэффициент, (рис. 106);

$k(z_e)$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты здания  $z_e$ , определяется по таблице 41.

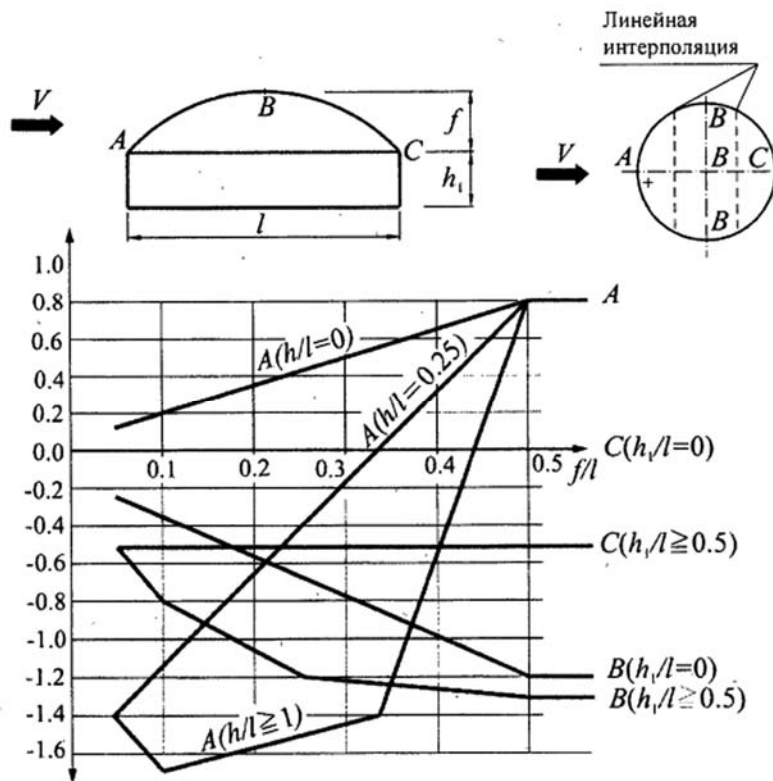


Рис. 106. Аэродинамический коэффициент

Таблица 40. Нормативное значение ветрового давления

| Ветровые районы<br>(принимаются по карте 3 приложения Ж) | Ia   | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $w_0$ , кПа  | 0,17 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,48 | 0,60 | 0,73 | 0,85 |

Таблица 41. Коэффициент ветрового давления по высоте

| Высота $z_e$ , м | Коэффициент $k$ для типов местности |      |      |
|------------------|-------------------------------------|------|------|
|                  | A                                   | B    | C    |
| $\leq 5$         | 0,75                                | 0,5  | 0,4  |
| 10               | 1,0                                 | 0,65 | 0,4  |
| 20               | 1,25                                | 0,85 | 0,55 |
| 40               | 1,5                                 | 1,1  | 0,8  |
| 60               | 1,7                                 | 1,3  | 1,0  |
| 80               | 1,85                                | 1,45 | 1,15 |
| 100              | 2,0                                 | 1,6  | 1,25 |
| 150              | 2,25                                | 1,9  | 1,55 |
| 200              | 2,45                                | 2,1  | 1,8  |
| 250              | 2,65                                | 2,3  | 2,0  |
| 300              | 2,75                                | 2,5  | 2,2  |
| 350              | 2,75                                | 2,75 | 2,35 |
| $\geq 480$       | 2,75                                | 2,75 | 2,75 |



Значения коэффициентов  $c_e$  в точках  $A$  и  $C$ , а так же в сечении  $ВВ$  приведены на рисунке 107. Для промежуточных сечений коэффициенты  $c_e$  определяются линейной интерполяцией.

При определении эквивалентной высоты и коэффициента  $\nu$  в соответствии:  $h = h_1 + 0,7f$ .

4. Задаем нагрузку от снега на узлы аналогично тому, как задается собственный вес (рис. 107, 108).

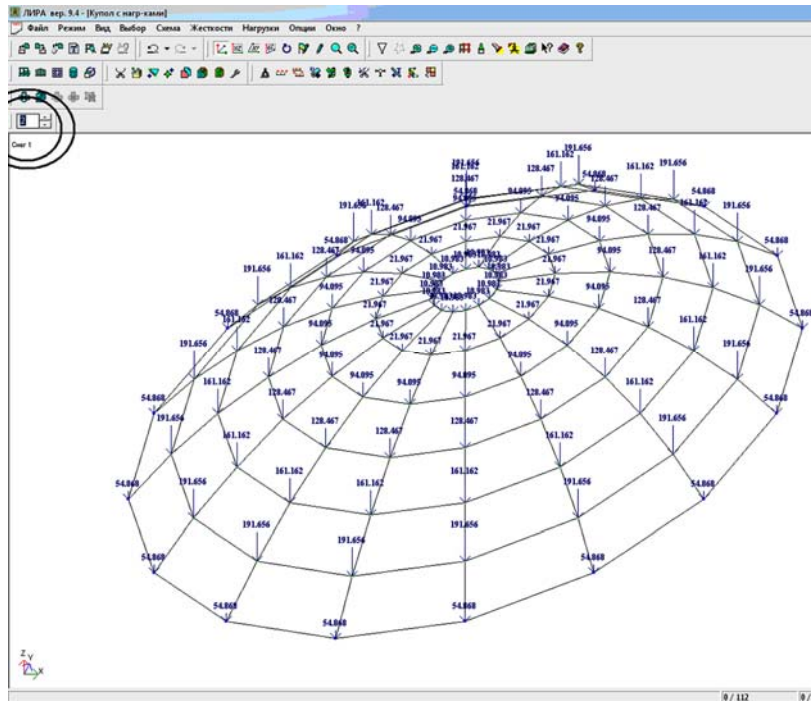


Рис. 107. Загрузка снег 1

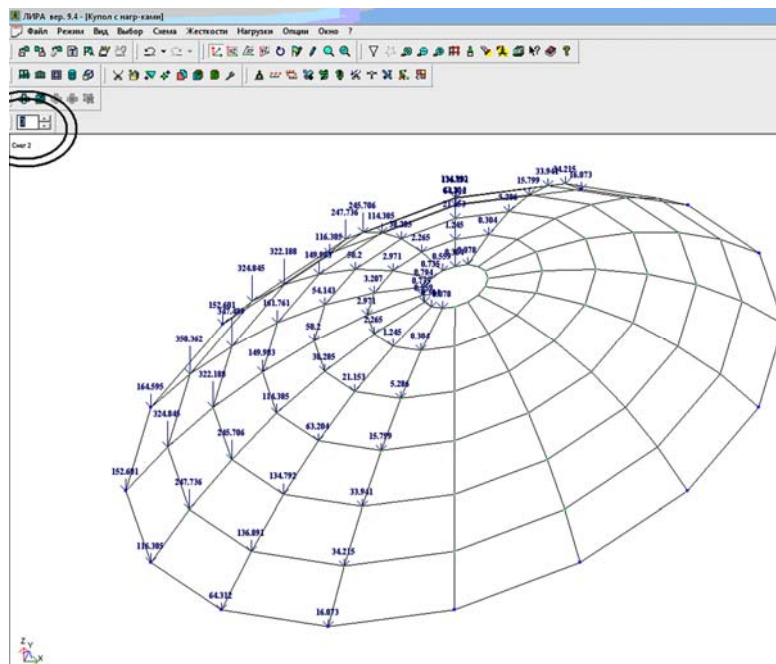


Рис. 108. Загрузка снег 2

5. Упаковываем схему и посылаем на расчет: *Режим – Выполнить расчет* (рис. 109).

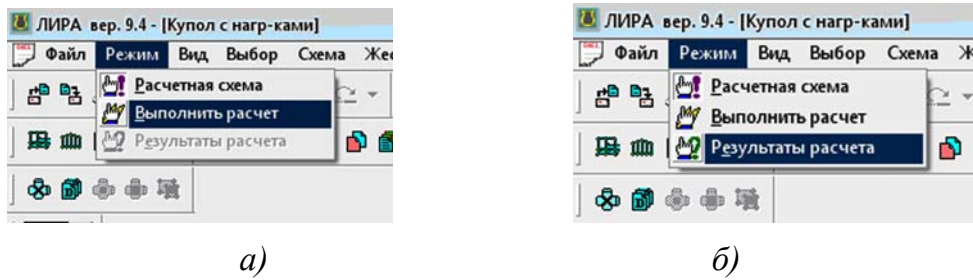


Рис. 109. Расчет (а) и получение результатов (б)

6. Составляем расчетные сочетания из собственного веса и разных снеговых нагрузок и выбираем для дальнейшего расчета то РСН, в котором условия более неблагоприятные: *Усилия – РСН –* указываем два РСН (собств.вес + ветер + 1 тип снеговой; собств. вес + ветер + 2 тип снеговой; собств. вес + снег по СНиП) – *Расчет*. Далее: *Выбор – Выбор РСН – 2 РСН* (рис. 110).

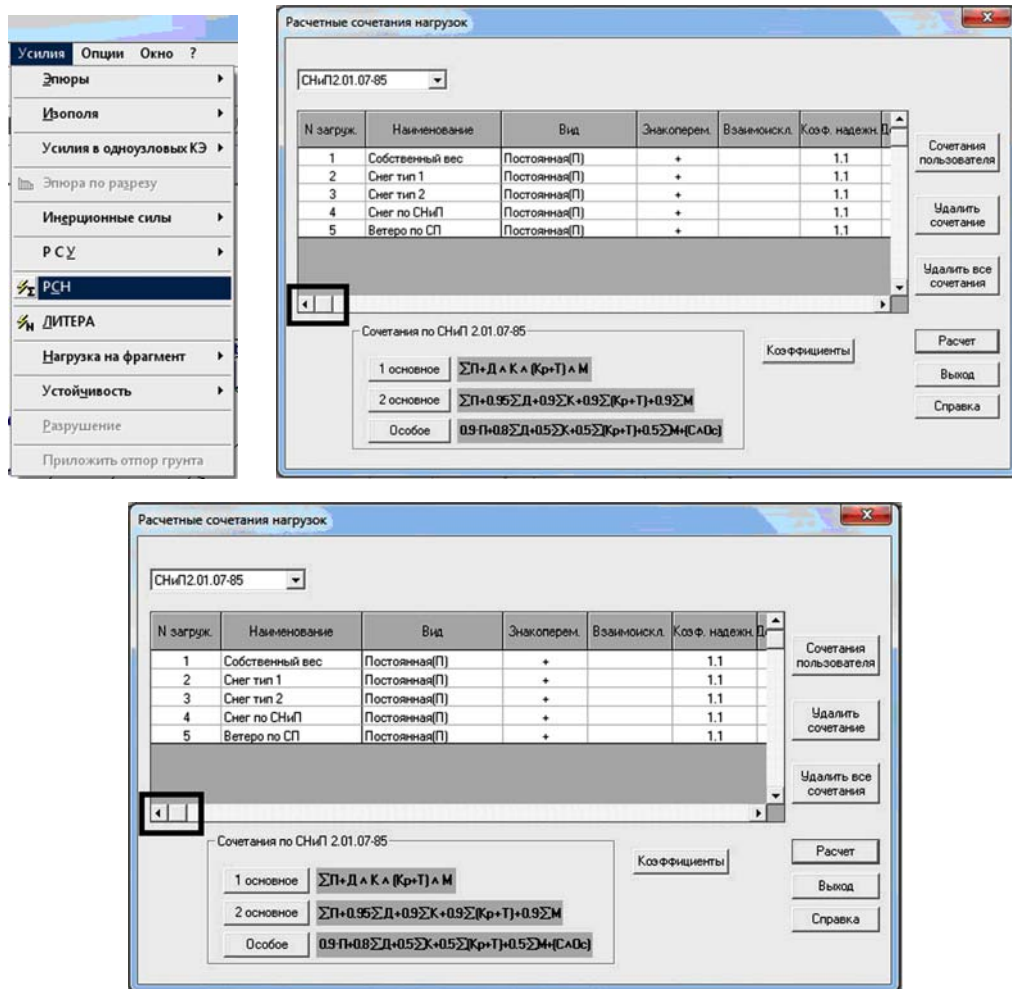


Рис. 110. Расчетные сочетания

7. Выполняем расчет и смотрим какое из расчетных сочетаний более неблагоприятное. В данном случае тип 2 более неблагоприятен (рис. 111).

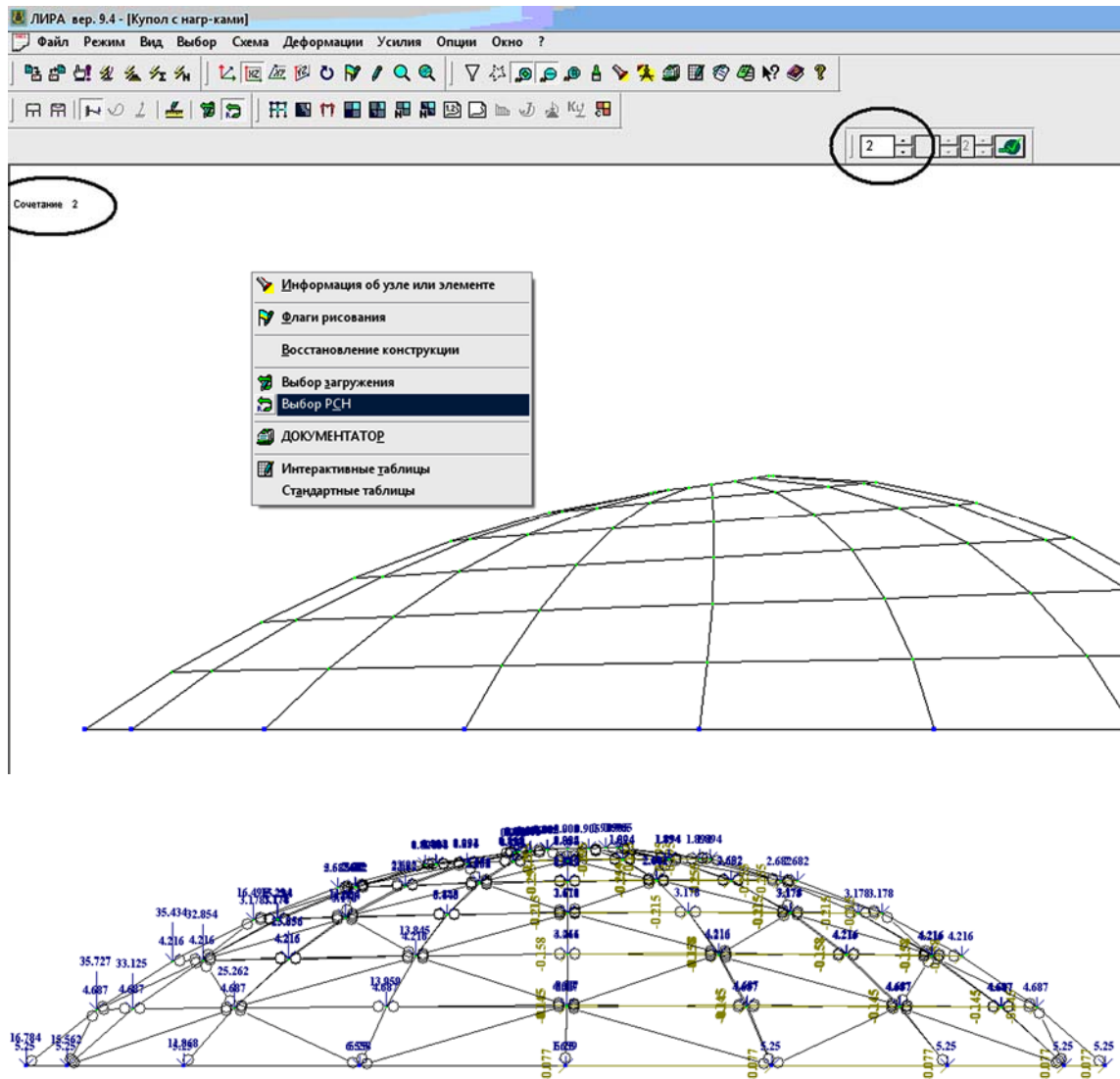


Рис. 111. Загрузка тип 2

8. Используем интерактивные таблицы усилий, моментов и перемещений, чтобы сохранить их в программе Excel: правой кнопкой мышки на поле: *Интерактивные таблицы – Перемещения – Таблицу на экран – Для всех РСН* — сохранить в формате Excel (рис. 112).

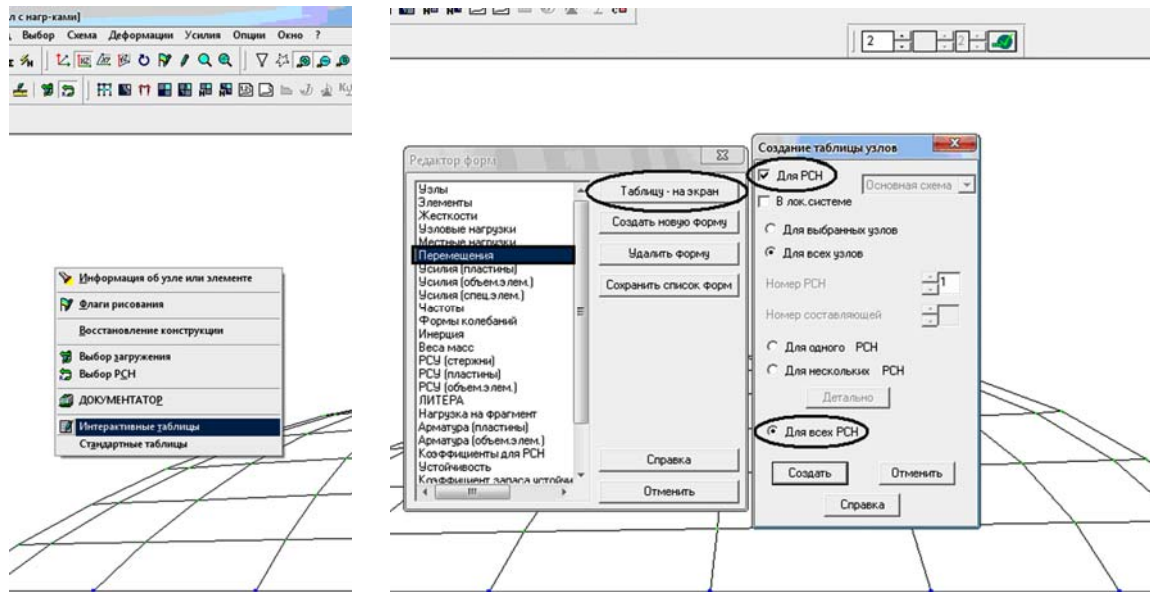


Рис. 112. Интерактивные таблицы

9. Показываем мозаики всех усилий, моментов и перемещений: Усилия – Эпюры – Мозаики (рис. 113).

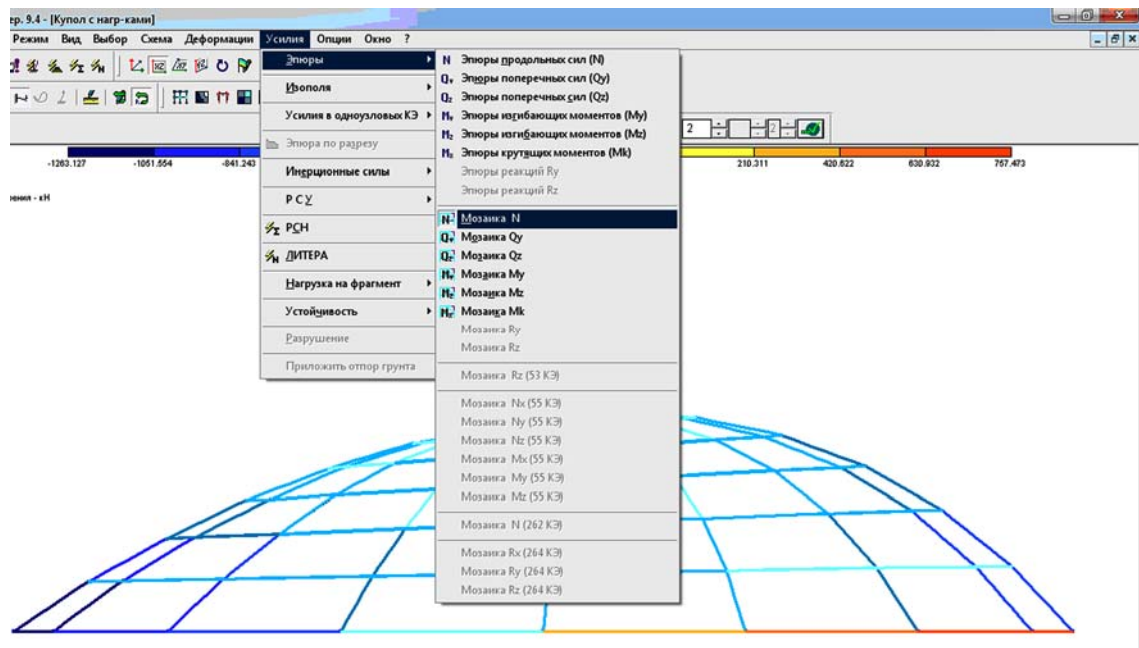


Рис. 113. Мозаики для всех усилий, моментов, перемещений

#### 4.4. Определение расчётных усилий

Определяем максимальные деформации от каждого РСН и рассматриваем наиболее загруженное сечение. РСН №2 оказалось наиболее неблагоприятным (рис. 114).

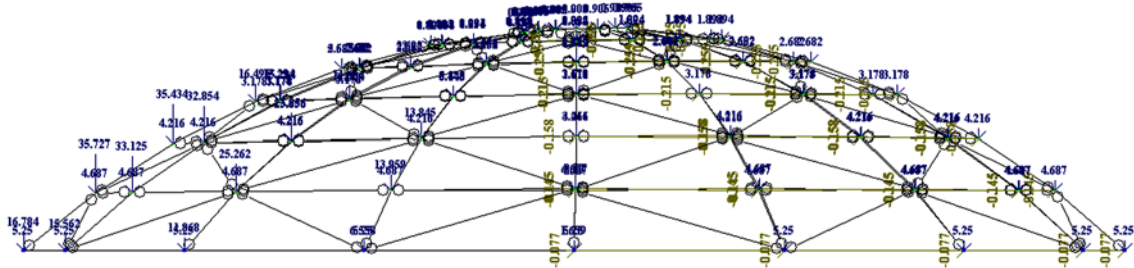


Рис. 114. РСН №2

Производим нумерацию узлов (рис. 115), сводим перемещения узлов в таблицу 42.

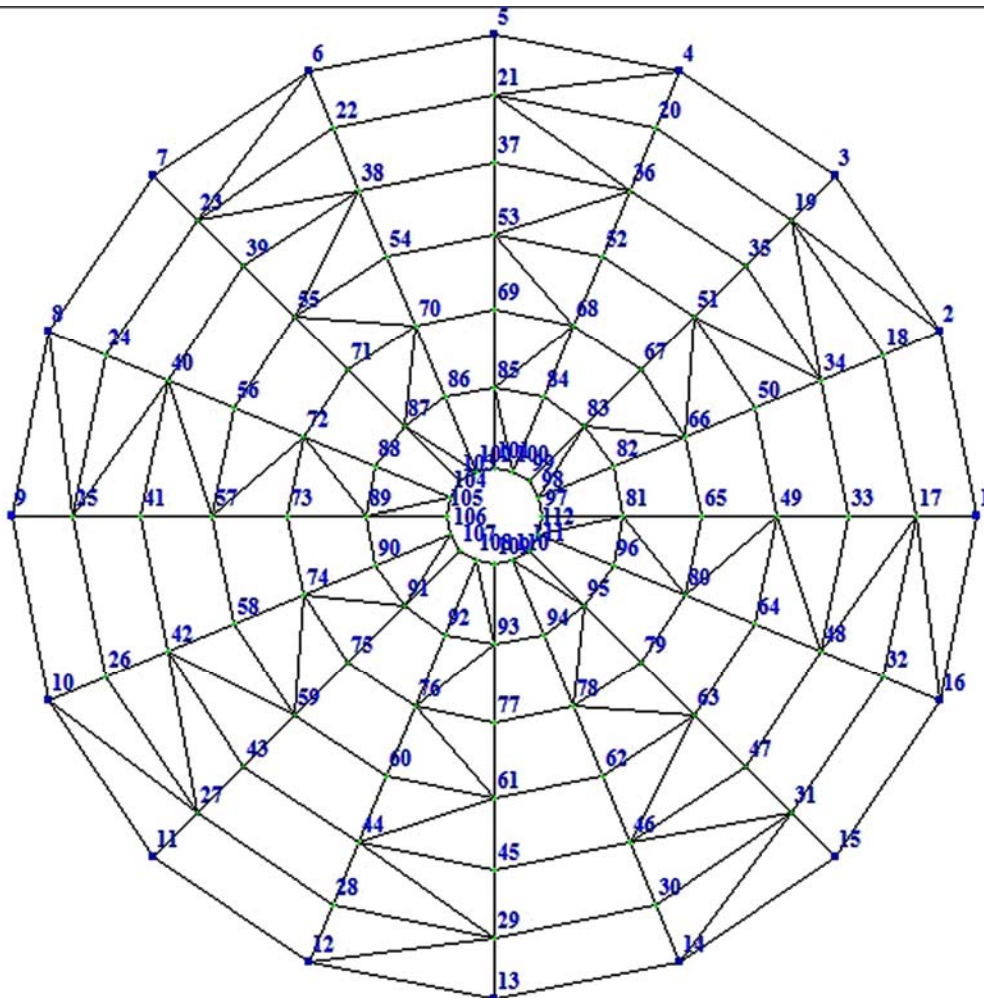


Рис. 115. Пронумерованные узлы

Таблица 42. Перемещения узлов

| № узла | Перемещения |         |         |
|--------|-------------|---------|---------|
|        | X, мм       | Y, мм   | Z, мм   |
| 40     | 23,946      | -0,348  | -31,938 |
| 41     | 25,225      | 0,448   | -34,998 |
| 42     | 22,913      | 1,045   | -29,226 |
| 43     | 18,780      | -0,974  | -19,840 |
| 44     | 13,893      | -7,167  | 2,014   |
| 45     | 12,272      | -14,679 | 16,141  |
| 46     | 9,755       | -2,691  | 8,928   |
| 47     | 12,521      | -6,770  | 16,134  |
| 48     | 1,699       | 0,492   | 1,935   |
| 49     | 5,791       | 0,239   | 8,707   |
| 50     | 9,562       | 1,016   | 12,114  |
| 51     | 8,897       | 0,612   | 11,815  |
| 52     | 16,731      | 12,260  | 19,887  |
| 53     | 16,456      | 10,725  | 16,486  |
| 54     | 17,823      | 5,329   | -8,146  |
| 55     | 19,308      | 3,624   | -14,946 |
| 56     | 27,859      | -1,306  | -40,414 |
| 57     | 28,535      | -0,780  | -42,147 |
| 58     | 25,282      | -0,656  | -33,010 |
| 59     | 23,765      | -0,767  | -27,801 |
| 60     | 16,866      | -10,224 | 4,840   |
| 61     | 15,951      | -12,375 | 11,139  |
| 62     | 14,361      | -5,037  | 16,379  |
| 63     | 14,808      | -5,951  | 17,620  |
| 64     | 5,508       | 0,282   | 8,637   |
| 65     | 7,744       | 0,099   | 13,543  |
| 66     | 10,863      | 0,680   | 14,534  |
| 67     | 11,650      | 1,118   | 17,607  |
| 68     | 17,468      | 9,697   | 14,040  |
| 69     | 17,816      | 10,540  | 15,744  |
| 70     | 19,200      | 4,477   | -11,921 |
| 71     | 19,442      | 4,617   | -13,887 |
| 72     | 27,573      | -0,478  | -39,370 |
| 73     | 27,613      | -0,176  | -40,250 |

Определяем внутренние усилия в элементах купола (рис. 116-121).

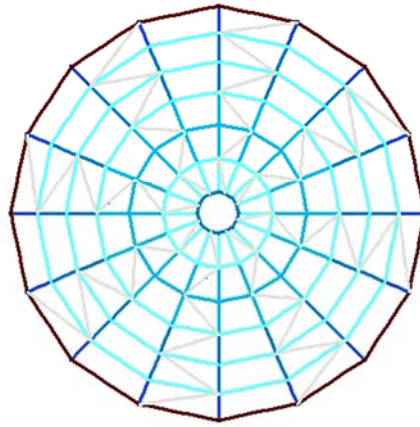
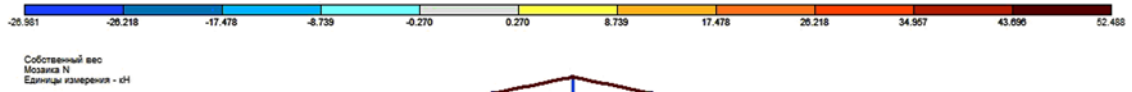


Рис. 116. Мозаика N

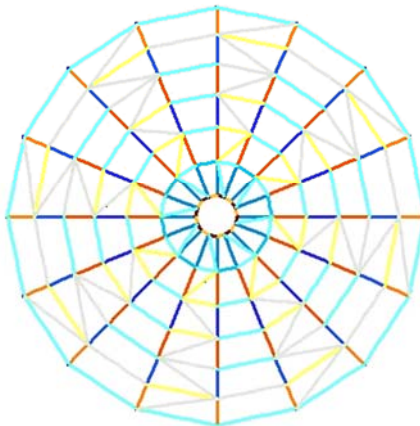
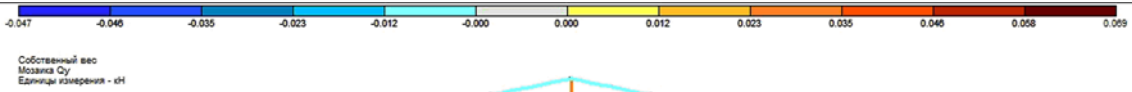


Рис. 117. Мозаика Qy

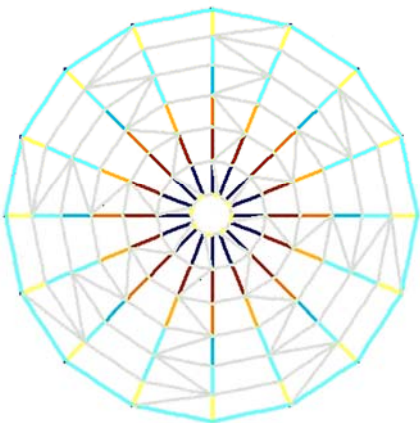
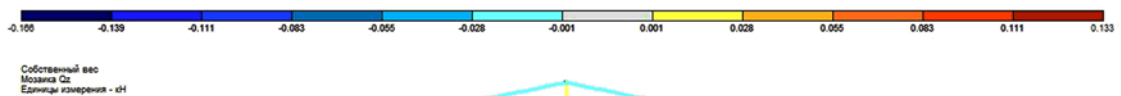


Рис. 118. Мозаика Qz

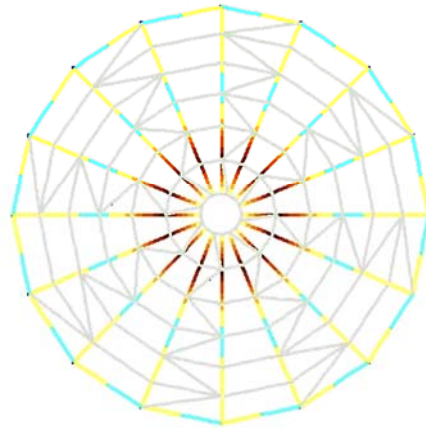
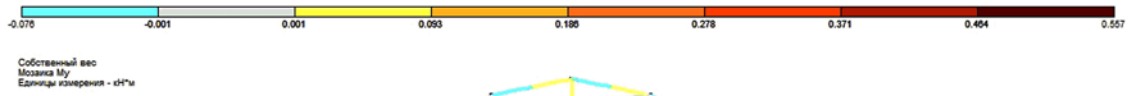


Рис. 119. Мозаика  $M_y$

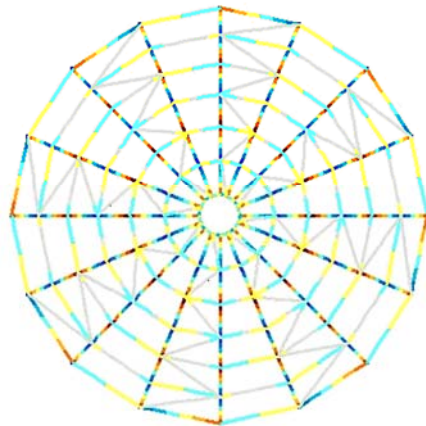
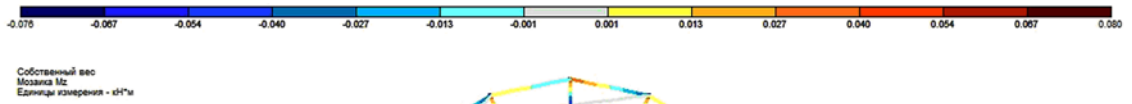


Рис. 120. Мозаика  $M_z$

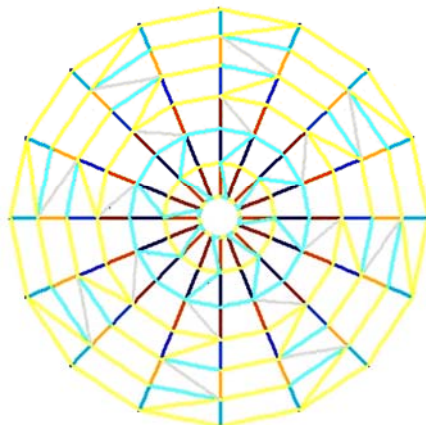


Рис. 121. Мозаика  $M_x$

Производим нумерацию стержней (рис. 122).



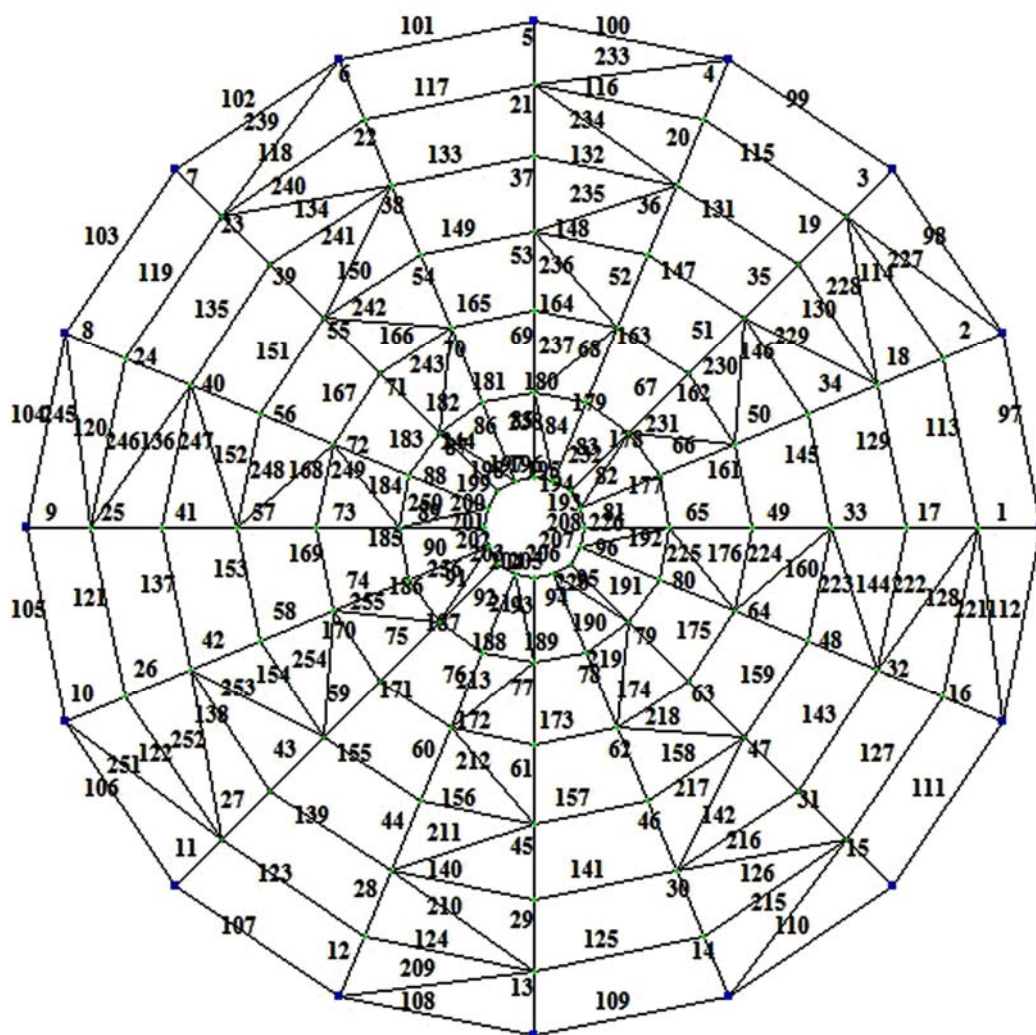


Рис. 122. Пронумерованные стержни

Усилия, полученные в стержнях, сводим в таблицу 43.

Таблица 43. Усилия в стержнях

| № элем. | № сечен. | Усилия   |              |              |            |              |            |
|---------|----------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
|         |          | $N$ , кН | $M_k$ , кН·м | $M_v$ , кН·м | $Q_z$ , кН | $M_z$ , кН·м | $Q_y$ , кН |
| 94      | 1        | -9,139   | 1,442        | -3,406       | 1,017      | 0,968        | 0,913      |
| 94      | 2        | -9,139   | 1,442        | 0,000        | 1,017      | -2,088       | 0,913      |
| 95      | 1        | 3,579    | 1,250        | 0,884        | -0,264     | 1,648        | 1,441      |
| 95      | 2        | 3,579    | 1,250        | 0,000        | -0,264     | -3,176       | 1,441      |
| 96      | 1        | -12,075  | 1,001        | -3,535       | 1,056      | 1,687        | 1,476      |
| 96      | 2        | -12,075  | 1,001        | 0,000        | 1,056      | -3,254       | 1,476      |
| 97      | 1        | 116,466  | -0,002       | -0,122       | 0,019      | 1,402        | 4,990      |
| 97      | 2        | 116,583  | -0,002       | 0,025        | 0,019      | -35,240      | 4,401      |
| 98      | 1        | 18,636   | 0,000        | -0,003       | 0,037      | -35,028      | -14,092    |
| 98      | 2        | 18,970   | 0,000        | 0,282        | 0,037      | 76,888       | -14,591    |
| 99      | 1        | 182,515  | -0,046       | -0,513       | 0,154      | 76,691       | 25,608     |
| 99      | 2        | 183,015  | -0,046       | 0,692        | 0,154      | -121,842     | 25,274     |
| 100     | 1        | 29,057   | -0,053       | -0,788       | 0,213      | -121,393     | -35,971    |
| 100     | 2        | 29,646   | -0,053       | 0,874        | 0,213      | 159,765      | -36,088    |
| 101     | 1        | 185,147  | -0,091       | -1,069       | 0,304      | 161,515      | 42,539     |
| 101     | 2        | 185,147  | -0,091       | 1,301        | 0,304      | -170,440     | 42,539     |
| 102     | 1        | 261,177  | -0,108       | -1,322       | 0,312      | -168,469     | -39,544    |
| 102     | 2        | 261,177  | -0,108       | 1,116        | 0,312      | 140,113      | -39,544    |
| 103     | 1        | 146,003  | -0,067       | -0,906       | 0,211      | 142,035      | 28,610     |
| 103     | 2        | 146,003  | -0,067       | 0,738        | 0,211      | -81,228      | 28,610     |
| 104     | 1        | 429,818  | -0,038       | -0,425       | 0,057      | -80,257      | -9,625     |
| 104     | 2        | 429,818  | -0,038       | 0,023        | 0,057      | -5,143       | -9,625     |
| 105     | 1        | 93,746   | 0,040        | 0,366        | -0,137     | -5,519       | -11,982    |
| 105     | 2        | 93,746   | 0,040        | -0,701       | -0,137     | 87,984       | -11,982    |
| 106     | 1        | 328,683  | 0,084        | 1,015        | -0,296     | 86,345       | 29,724     |
| 106     | 2        | 328,683  | 0,084        | -1,292       | -0,296     | -145,612     | 29,724     |
| 107     | 1        | 142,400  | 0,100        | 1,370        | -0,351     | -147,993     | -40,449    |
| 107     | 2        | 142,400  | 0,100        | -1,368       | -0,351     | 167,655      | -40,449    |
| 108     | 1        | 65,060   | 0,105        | 1,279        | -0,327     | 164,903      | 40,202     |
| 108     | 2        | 65,060   | 0,105        | -1,270       | -0,327     | -148,821     | 40,202     |
| 109     | 1        | 148,786  | 0,072        | 1,107        | -0,255     | -150,162     | -34,148    |
| 109     | 2        | 148,197  | 0,072        | -0,882       | -0,255     | 116,775      | -34,265    |
| 110     | 1        | -2,445   | 0,030        | 0,577        | -0,118     | 116,035      | 24,472     |
| 110     | 2        | -2,945   | 0,030        | -0,341       | -0,118     | -73,636      | 24,139     |
| 111     | 1        | 139,990  | 0,020        | 0,289        | -0,074     | -73,834      | -13,594    |
| 111     | 2        | 139,657  | 0,020        | -0,288       | -0,074     | 34,198       | -14,094    |
| 112     | 1        | 24,761   | 0,000        | 0,189        | -0,010     | 34,588       | 4,505      |
| 112     | 2        | 24,644   | 0,000        | 0,115        | -0,010     | 1,731        | 3,916      |
| 113     | 1        | 6,284    | -0,239       | 0,000        | 0,000      | 0,742        | 0,592      |

#### 4.5. Расчёт купола

Расчет на прочность сжато-изгибаемого элемента:

$$\frac{N}{F_{расч}} + \frac{M_{\delta}}{W_{расч}} \leq R_c;$$

$$M_{\delta} = \frac{M_{\kappa}}{\xi_{\kappa}};$$

$$\xi_{\kappa} = 1 - \frac{N}{\varphi R_c F_{\delta p}};$$

$$N = 4,845 \text{ кН}, M_{\kappa} = 1,981 \text{ кН}\cdot\text{м}, F_{\delta p} = 0,15 \cdot 0,4 = 0,06 \text{ м}^2,$$

$$\varphi = 1 - \alpha \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2,$$

$$\lambda = \frac{l_0}{r}, \quad l_0 = l \mu_0,$$

где  $l = 2,9$  м (определено из расчетной схемы);  $\mu_0 = 0,65$ ;  $r$  — радиус инерции сечения с максимальными размерами брутто соответственно относительно осей X и Y.

Подставляя значения, получим

$$\lambda = \frac{l_0}{r} = \frac{2,9 \cdot 0,65}{0,39 \cdot 0,17} = 28,43 \leq 70;$$

$$\varphi = 1 - \alpha \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2 = 1 - 0,8 \left( \frac{28,43}{100} \right)^2 = 0,935;$$

$$\xi_{\kappa} = 1 - \frac{4,845}{0,935 \cdot 12355 \cdot 0,06} = 0,99; \quad M_{\delta} = \frac{1,981}{0,99} = 2,001 \text{ кН}\cdot\text{м};$$

$$W_{расч} = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,4 \cdot 0,15^2}{6} = 0,0045 \text{ м}^3.$$

$$R_c = 13 m_6 m_t m_{\delta} m_n m_a m_{сл} m_{zn} =$$

$$= 13 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1 = 12,355 \text{ МПа.};$$

$$\frac{4,845}{0,06} + \frac{2,001}{0,0045} = 525,19 \text{ КПа} \leq R_c = 12355 \text{ КПа.}$$

Прочность обеспечена.

Определяют допустимый прогиб в арке № 8:

$$f_u = l/250 = 40/250 = 0,16 \text{ м} = 160 \text{ мм.}$$

Максимальный прогиб в самой нагруженной арке 42-147 мм.

Расчет на устойчивость плоской формы деформирования сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{n}{\varphi R_c F_{бр}} + \left( \frac{M_d}{\varphi_m R_u W_{бр}} \right)^n \leq 1,$$

где  $F_{бр}$  — площадь брутто с максимальными размерами сечения элемента на участке  $l_p$ ;

$W_{бр}$  — см. п. 4.14 СТО 36554501-002—2006;

$n$  —  $n = 2$  для элементов без закрепления растянутой зоны из плоскости деформирования и  $n = 1$  для элементов, имеющих такие закрепления;

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба, определяемый по формуле

$$\varphi = \frac{A}{\lambda^2},$$

где  $\alpha$  — коэффициент ( $\alpha = 0,8$  для древесины и  $\alpha = 1$  для фанеры);

$A$  — коэффициент ( $A = 3\,000$  для древесины и  $A = 2\,500$  для фанеры и древесины из однонаправленного шпона).

Коэффициент  $\varphi_m$  определяется по формуле

$$\varphi_m = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_\phi,$$

где  $l_p$  — расстояние между опорными сечениями элемента, а при закреплении сжатой кромки элемента в промежуточных точках от смещения из плоскости изгиба — расстояние между этими точками;

$b$  — ширина поперечного сечения;

$h$  — максимальная высота поперечного сечения на участке  $l_p$ ;

$k_\phi$  — коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке  $l_p$ , определяемый [4, прил. Г, табл. Г.2].

Подставляя значения, вычислим

$$\frac{4,845}{0,99 \cdot 12355 \cdot 0,06} + \left( \frac{2,001}{3,06 \cdot 12355 \cdot 0,002} \right)^n \leq 1,$$

$$0,007 \leq 1,$$

$$\varphi_m = 140 \frac{0,15^2}{2,9 \cdot 0,4} \cdot 1,13 = 3,06.$$

В результате производим конструирование узлов купола (рис. 123, 124).

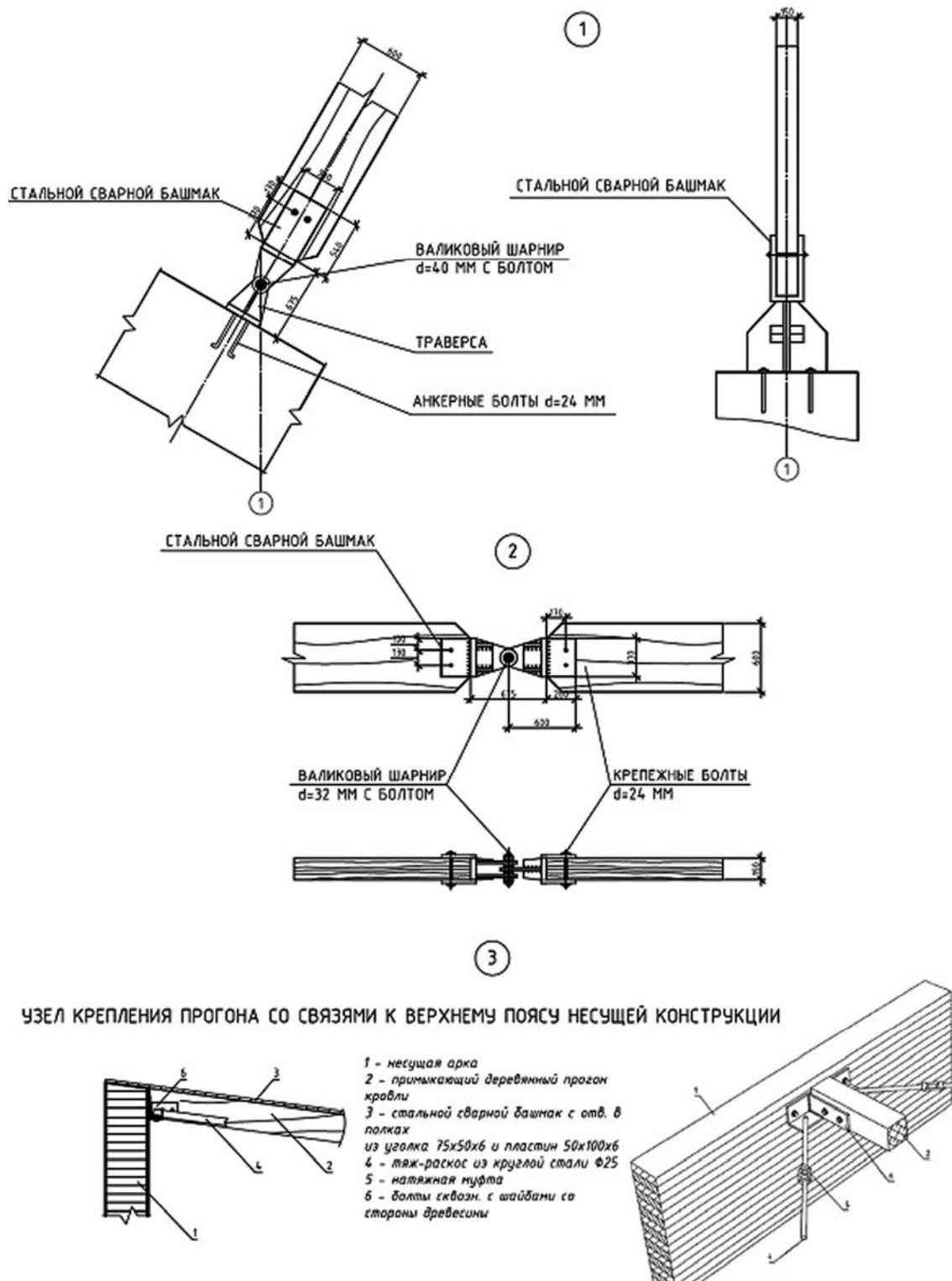


Рис. 123. Узлы сопряжения монтажных элементов с фундаментом и между собой (1 и 2). Узел крепления прогона со связями к верхнему поясу несущей конструкции (3)

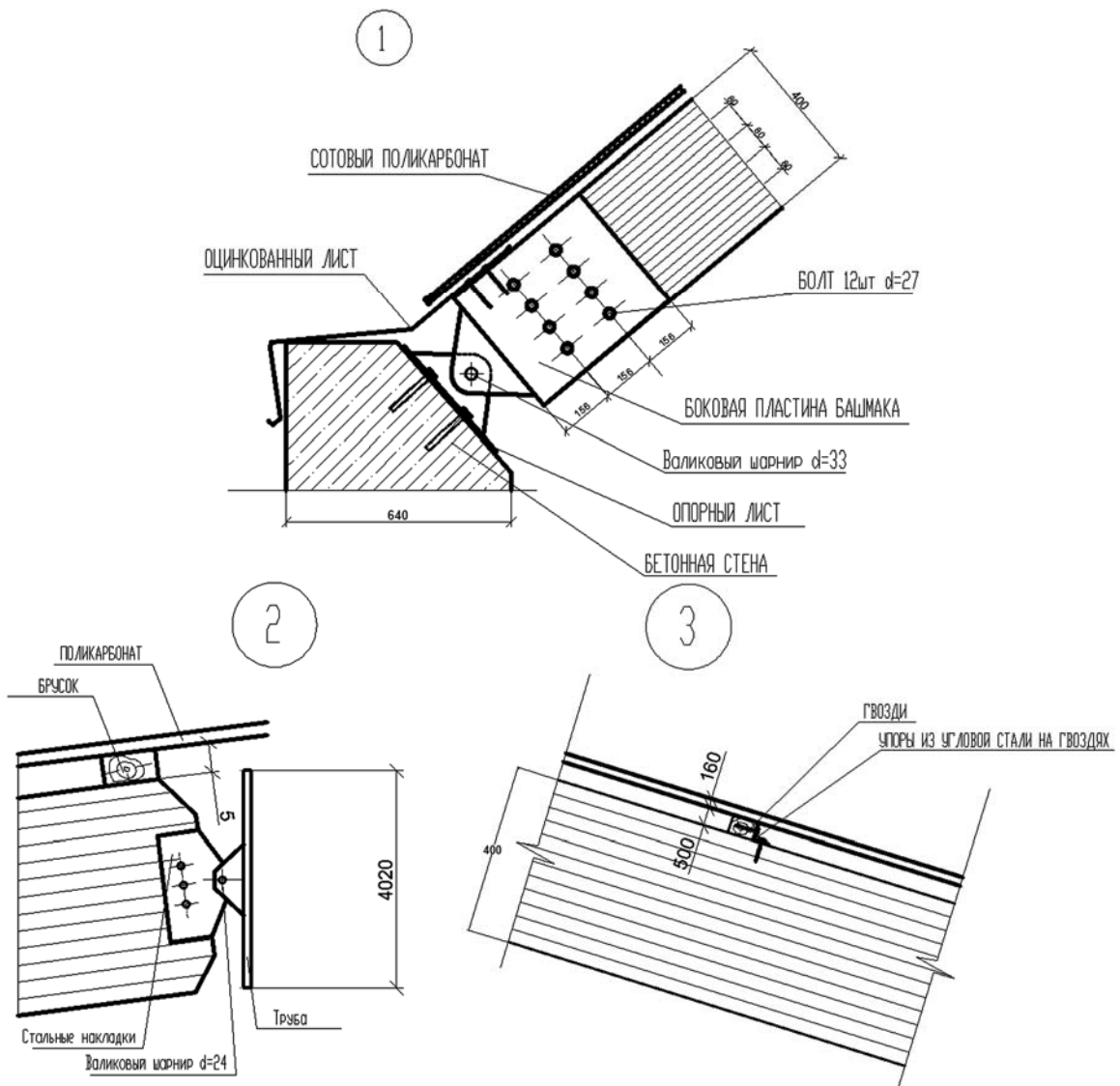
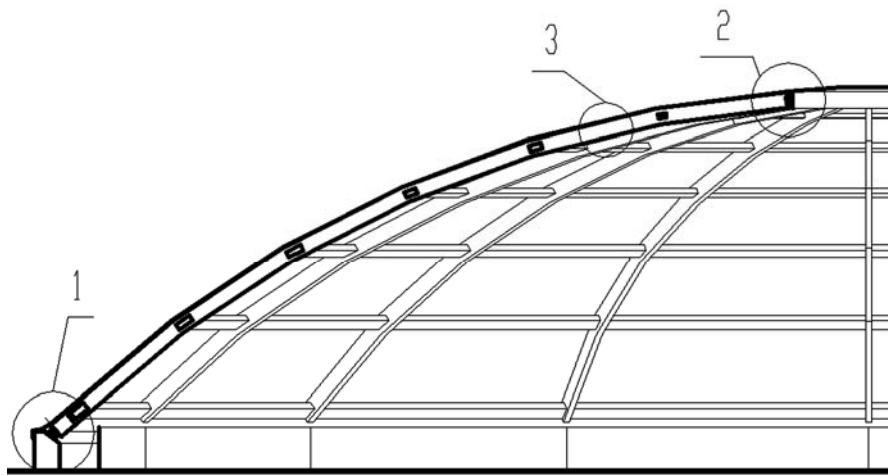


Рис. 124. Узел сопряжения монтажных элементов с фундаментом (1). Узел крепления меридионального ребра с верхним сжатым кольцом (2). Узел крепления листов сотового поликарбоната к конструкции (3)

### *Контрольные вопросы*

1. По каким осям осуществляется закрепление узлов купола?
2. Как осуществляется задание ветровой нагрузки на купол?
3. Какие расчёты относят ко второй группе предельных состояний?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Программный комплекс для расчёта и проектирования конструкций ЛИРА 9.4 : руководство пользователя. — Киев : НИИ АСС, 2010.
2. СП 20.13330.2011. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция. — М., 2011.
3. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Взамен СП 23-101-2000.
4. СТО 36554501-002-2006. Стандарт ОАО «НИЦ «Строительство». Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчёта. — М., 2006.
5. Металлические конструкции. СП 16.13330.2011. СНиП 2-23-81\* Стальные конструкции. Актуализированная редакция. — М., 2011.
6. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. — М., 2003.
7. СП 64.13330.2011. СНиП 2-25-80\*. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция. — М., 2011.



*Учебно-теоретическое издание*

**Борисова, И.С.** Проектирование и расчёт пространственных конструкций в деревянном исполнении с применением программного комплекса «Ли́ра» : учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 270102.65 «Промышленное и гражданское строительство», 270114.65 «Проектирование зданий» и направления подготовки 270100.62 «Строительство» очной и заочной форм обучения / И.С. Борисова, И.А. Потехин, А.А. Сапунова и др. — Караваево : Костромская ГСХА, 2013. — 136 с.

Гл. редактор Н.В. Киселева  
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева  
Корректор Т.В. Кулинич