

## Моделирование и статический расчет ребристо-кольцевого купола

Геометрия купола:

- диаметр нижнего кольца 12 м;
- диаметр верхнего кольца 2 м;
- высота купола 4 м.

12 радиальных ребер, два промежуточных кольцевых элемента;

Связевые элементы - расставлены через сектор.

В качестве светопрозрачного покрытия – сотовые панели из высококачественного поликарбонатного материала. Вес 3,5 кг/м<sup>2</sup>.

Зеркало 1 объект вид

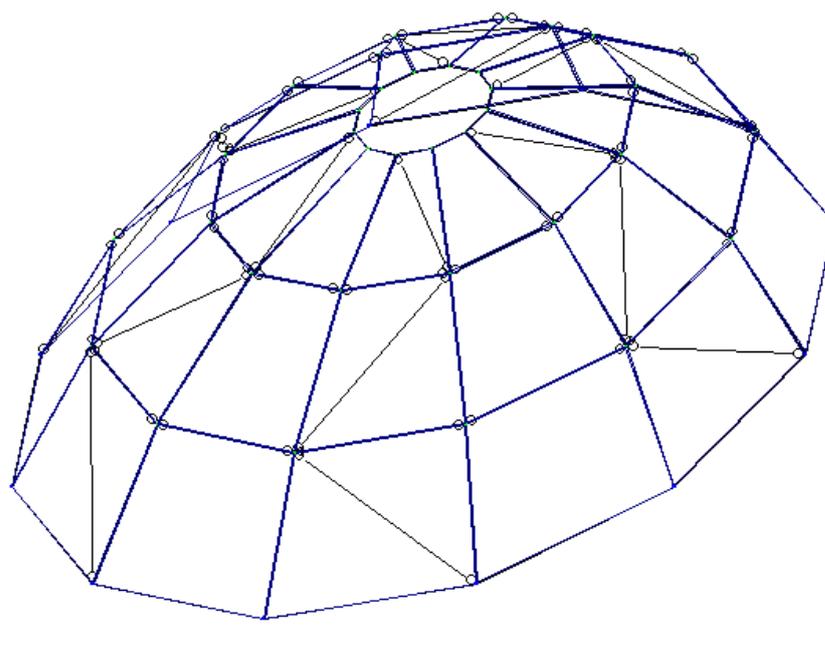


Рис.1. Модель купола.

Жесткости элементов:

- ребра – двутавр балочный 20Б1;
- нижнее кольцо – тавр 20БТ\*;
- верхнее кольцо – швеллер с уклоном внутренних граней полки 24;

- промежуточные кольцевые элементы – швеллер с параллельными гранями полок 10П;

- связевые элементы – горячекатанная сталь диаметром 20 мм.

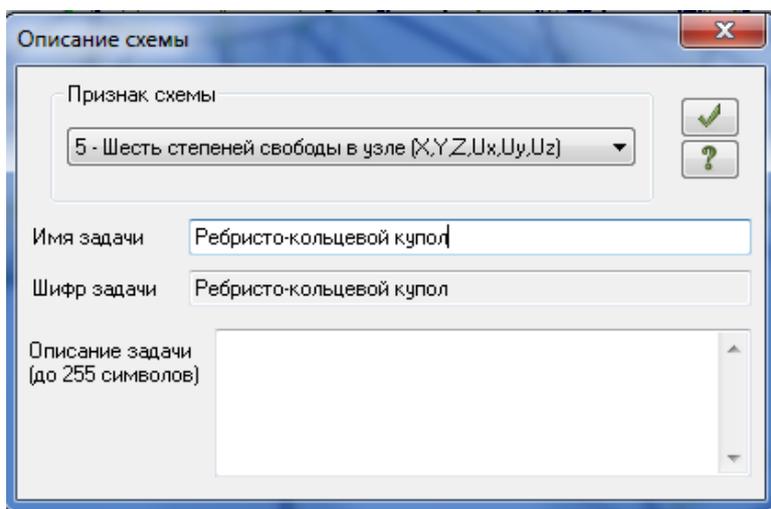
Загружения: 1 – от покрытия;

2 – собственный вес; 3 – снег 1 вариант (См. СП Нагрузки и воздействия); 4 – снег 2 вариант.

### **Последовательность моделирования:**

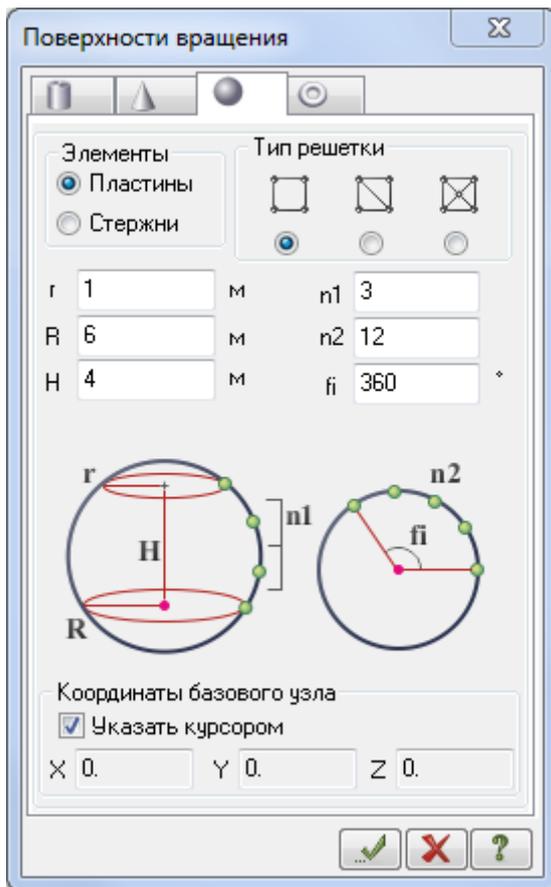
Файл – новый.

Оформляем закладку.



Создание –Поверхности вращения

Оформляем закладку

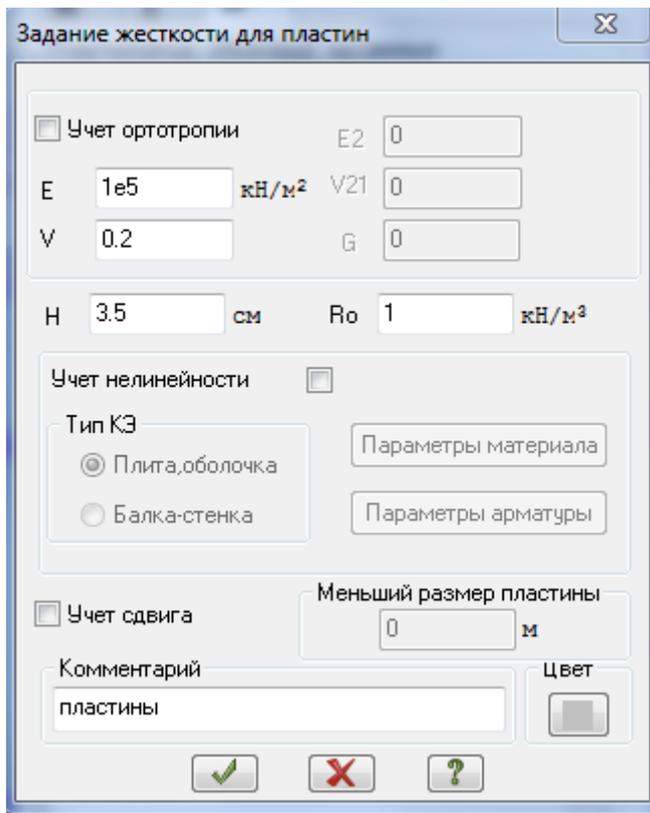


Модель сформирована из пластинчатых конечных элементов.

Назначаем им жесткость.

Жесткость-Добавить -EF-Пластины.

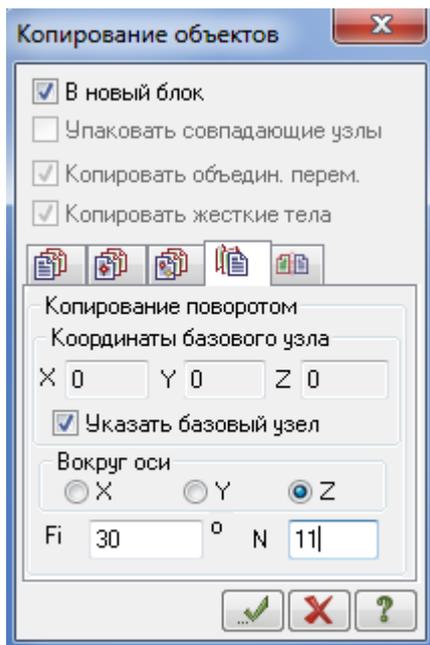
Оформляем закладку.



Моделируем ребра.

Добавить элемент-Стержень. Заводим одно ребро, присваиваем ему жесткость. Затем выделяем это ребро, выделяем узлы, принадлежащие отмеченному ребру и копируем поворотом вокруг оси Z.

Оформляем закладку.

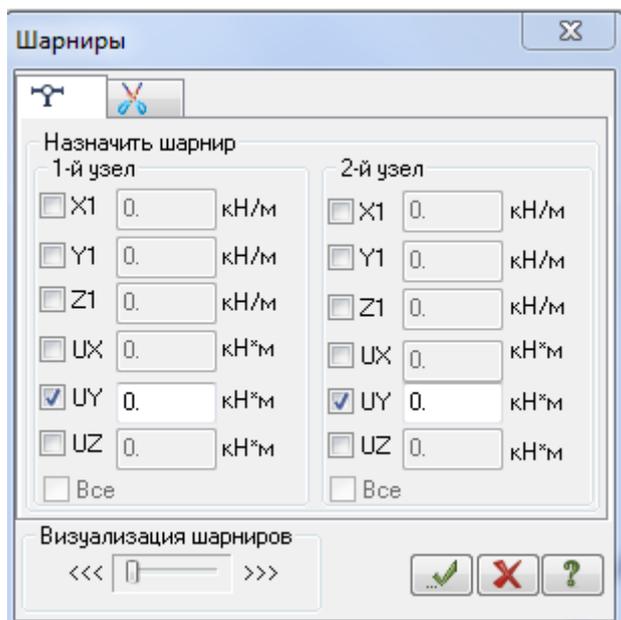


Таким же образом моделируем все элементы купола. Заводим стержень, присваиваем жесткость, копируем поворотом относительно оси Z.

При копировании связей поворотом угол  $F_1=60^0$ ,  $N=5$ .

Промежуточным кольцевым элементам и связям, на концах их стержней, вводим шарниры. Предварительно эти элементы надо выделить.

Оформляем закладку.



Не забываем после каждого изменения в модель активизировать команду Упаковка схемы.

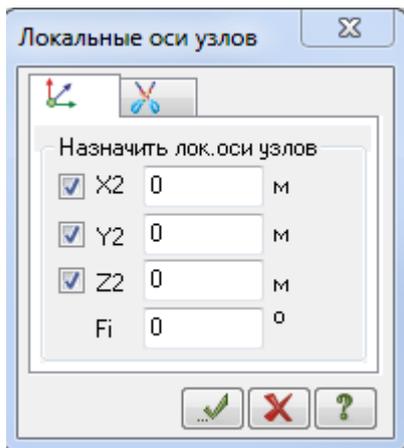
Назначение связей в опорные узлы по нижнему кольцу.

В связи с необходимостью наложения связей на опорные узлы по Z и по окружному направлению Y (в радиальном направлении оставляем свободу перемещений) необходимо сформировать это окружное направление с направление Y, так как окружное направление не совпадает с глобальной системой координат.

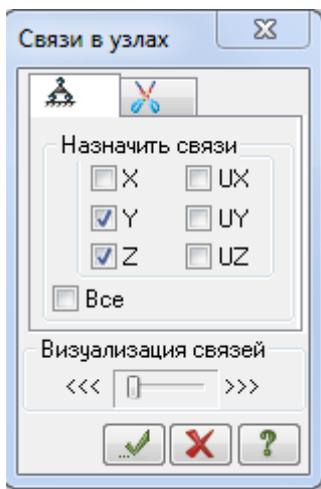
В связи с этим, необходимо сформировать **локальную систему координат опорных узлов**.

Для этого, выделяем все опорные узлы по нижнему кольцу. Редактирование-Локальные оси узлов. Или правая кнопка «мыши»- Локальные оси узлов.

Подтверждаем назначенные связи.

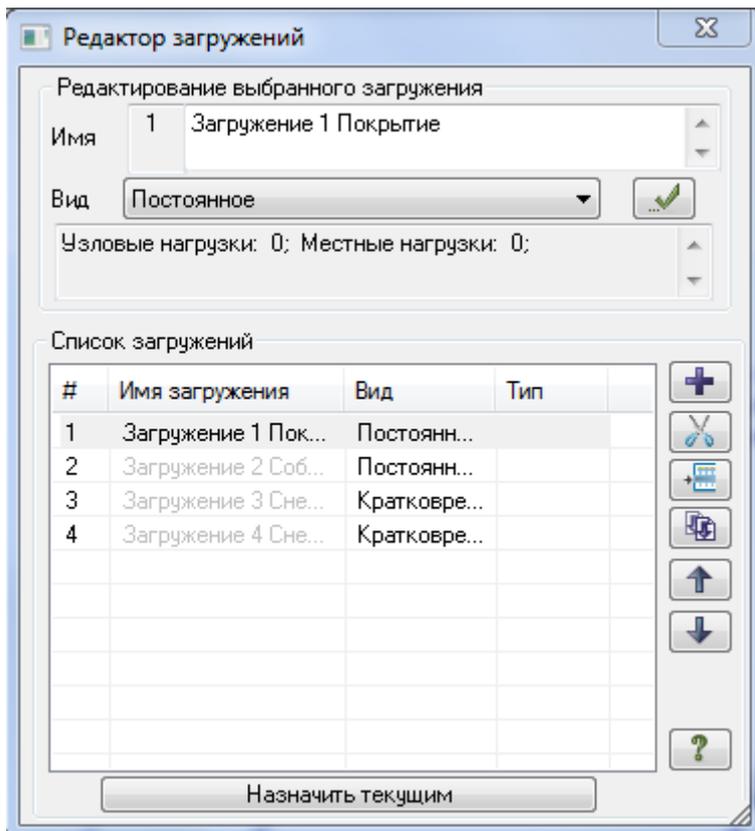


Далее выделяем опорные узлы по нижнему кольцу и назначаем связи

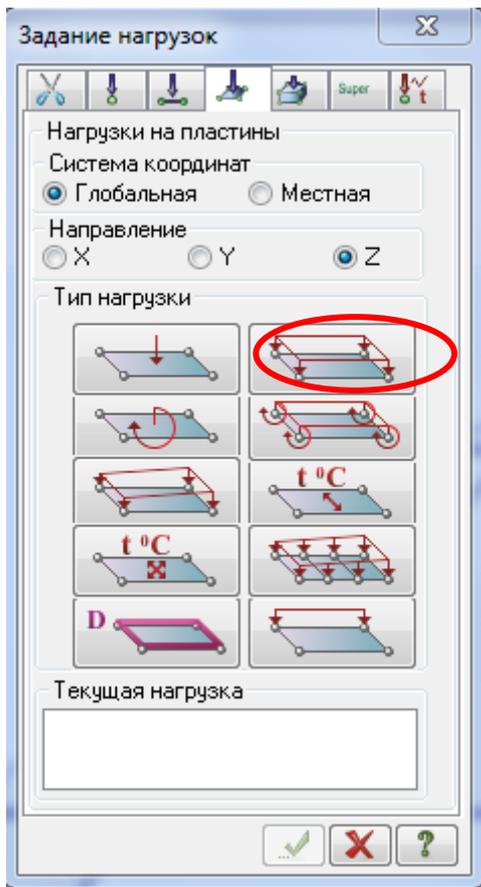


Формирование загрузжений.

Редактор загрузжений. Формируем список загрузжений.



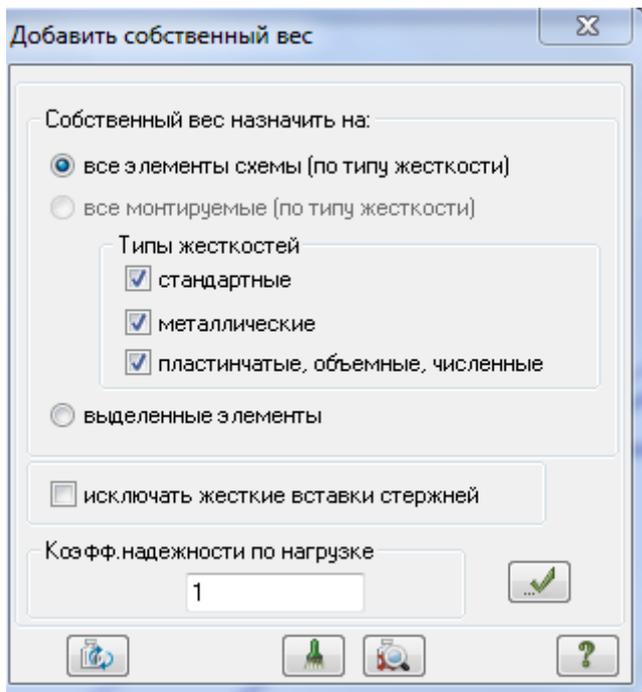
Подтверждаем первое нагружение (контролируем запись в верхнем левом углу рабочего окна). Выделяем всю поверхность купола (через команду Полифильтр выделяем пластины) и назначаем нормативную нагрузку  $0.035 \text{ кН/м}^2$



Второе загрузжение – подтверждаем.



Команда Нагрузки-Добавить собственный вес. Нагрузку присваиваем нормативную, поэтому в закладке коэффициент надежности по нагрузке равен 1.

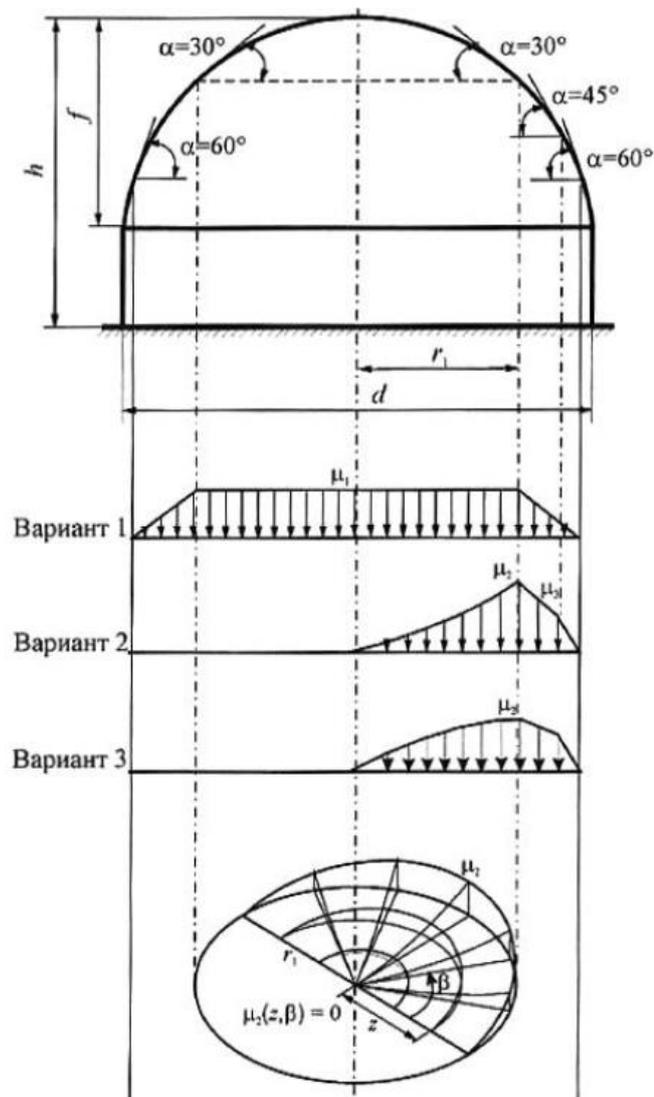


Третье загрузение

В соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия

Снеговая нагрузка должна быть представлена в трех вариантах, так как для куполов с отношением высоты купола к диаметру нижнего кольца  $f/d = 4/12 = 0,333 (>0,05)$  при уклонах  $<60^\circ$ .

Приложение Б. п.11



В этом же пункте есть уточнение

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 также для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки.

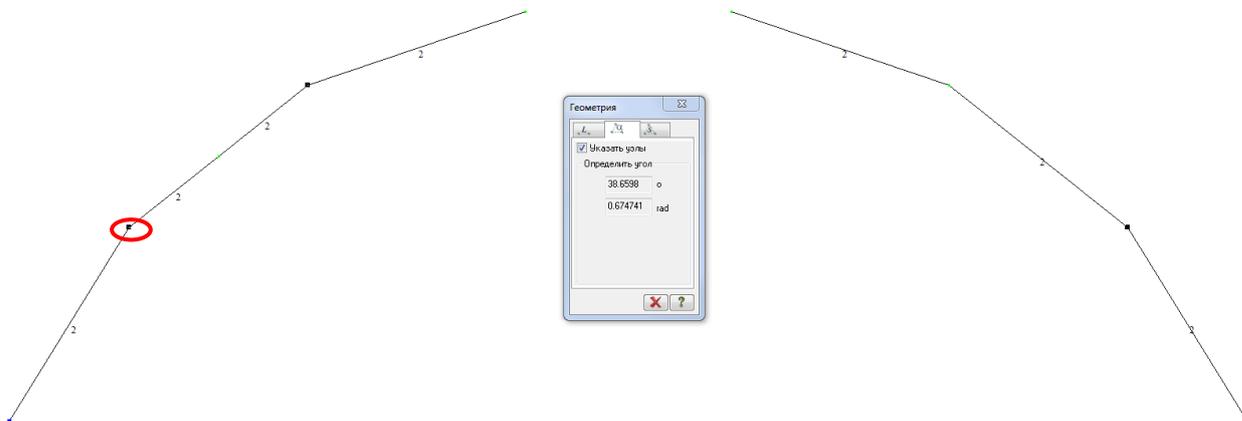
Следовательно, будем моделировать только два варианта по снегу – 1 и 2.

**Вариант снеговой нагрузки 1** – равномерно-распределенная от точки где касательная к поверхности  $\alpha \leq 30^\circ$

Таблица Б.2

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

Для нашего примера, угол наклона касательной, соответствующий 30 градусам к поверхности купола приблизительно соответствует расположению первого промежуточного кольцевого элемента



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

$$S_0 = c_e c_t \mu S_g, \quad (10.1)$$

10.8 Для купольных сферических и конических покрытий зданий на круглом плане, регламентируемых схемами Б.13, Б.14 приложения Б, при задании равномерно распределенной снеговой нагрузки значения коэффициента  $c_e$  следует устанавливать в зависимости от диаметра  $d$  основания купола:

$$c_e = 0,85 \text{ при } d \leq 60 \text{ м;}$$

Таблица 10.1

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

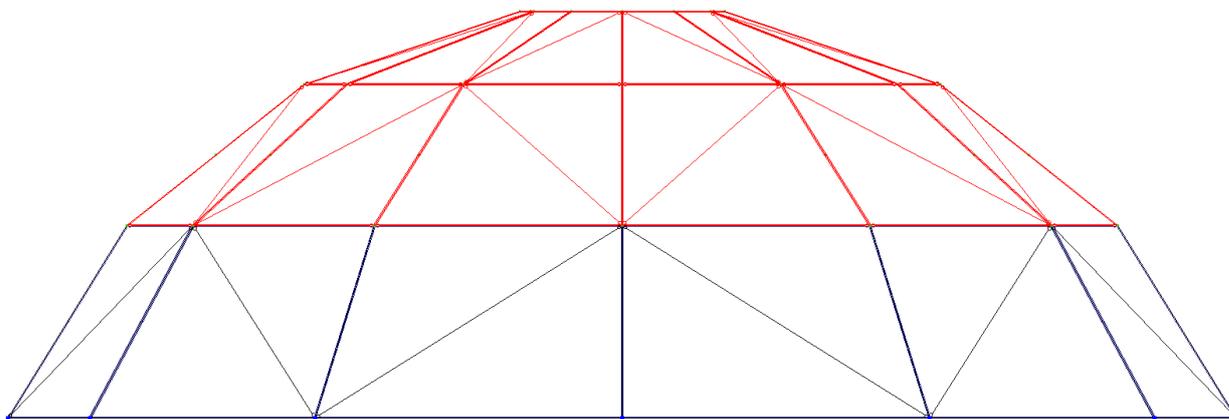
$$S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g = 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 = 1,7 \text{ кН/м}^2.$$

Коэффициент сноса снега  $c_e = 0,85$

Термический коэффициент  $c_t = 1$ .

Снеговую нагрузку представляем, как нормативную.

Выделяем элементы (пластины) на куполе от первого промежуточного кольцевого элемента и выше (где угол альфа меньше 30 градусов)



и задаем равномерную нагрузку  $1,7 \text{ кН/м}^2$ .

**Четвертое загрузжение – снеговая по варианту 2.**

$$\mu_2 = C_{r1}(z/r_1)^2 \sin \beta;$$

$$C_{r1} = 2,55 - \exp(0,8 - 14f/d) = 2,55 - \exp(-3,87) = 2,55 - 0,021 = 2,53$$

$$0 \leq \beta \leq 180^\circ \quad 0 \leq (z/r_1)^2 \leq 1$$

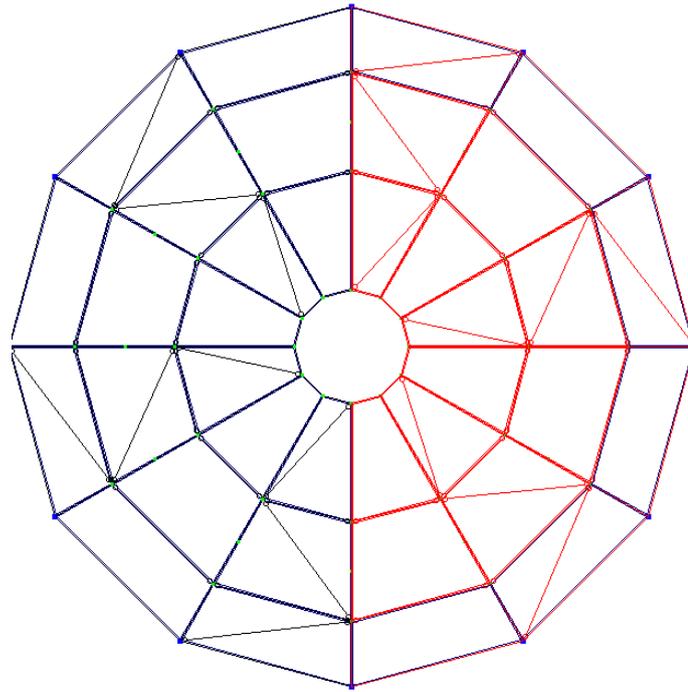
$$\exp(-3.87) = 0.021 \quad \text{- выражение подсчитано в MathCad}$$

Максимальное значение снеговая нагрузка имеет при  $z = r_1$  ( $\alpha = 30^\circ$ ) и при  $\beta = 90^\circ$ :

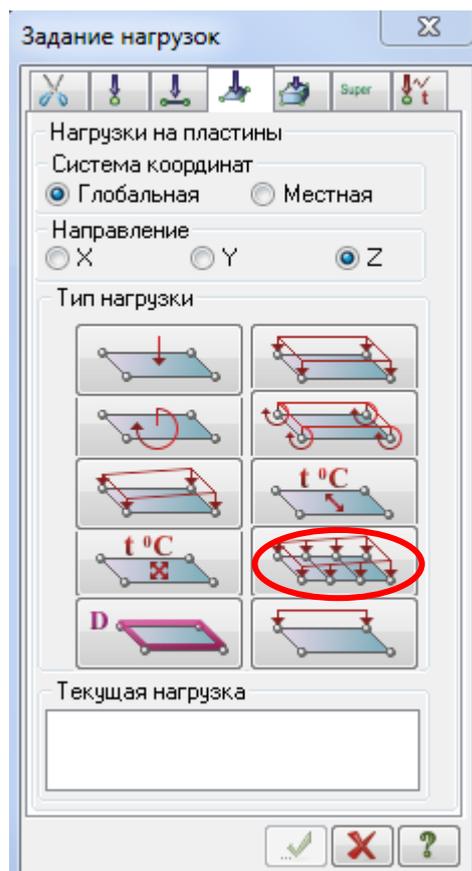
$$\mu_2 = 2,53 \cdot 1 \cdot 1 = 2,53$$

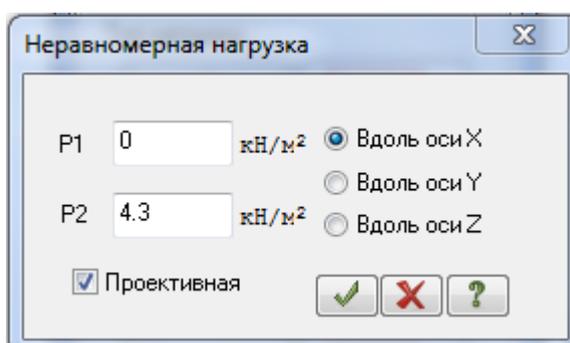
$$S_0 = 2,53 \cdot 1,7 = \mathbf{4,3 \text{ кН/м}^2}.$$

Нагрузку моделируем с заветренной стороны купола (справа), выделяя те элементы где  $\alpha$  изменяется от 0 до 30 градусов.



Задаем нагрузку на пластины





В закладке ставим галочку «Проективная», в этом случае программа при расчете автоматически преобразует проективную нагрузку (равномерную или неравномерную) в нагрузку на элемент по СП, т.е. умножает нагрузку на косинус угла наклона элемента к горизонту.

Активизируем команду Упаковка схемы. Расчет –Выполнить полный расчет.

Если замечание нет, то статический расчет выполнен.

Далее формируем расчетные сочетания нагрузок (РСН).



Подтверждаем команду

Формируем таблицу РСН.

1. РСН 1 расчетные нагрузки для оценки усилий в стержнях купола (расчет по первой группе предельных состояний)

$$1 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 2 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 3 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f;$$

где для нагрузки от покрытия  $\gamma_f = 1.2$ ;

от собственной нагрузки  $\gamma_f = 1.05$ ;

от снеговой  $\gamma_f = 1.4$ .

2. РСН 2 расчетные нагрузки для оценки усилий в стержнях купола (расчет по первой группе предельных состояний)

$$1 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 2 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 4 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f;$$

где величины  $\gamma_f$  те же.

3. РСН 3 нормативные нагрузки для оценки перемещений в узлах купола (расчет по второй группе предельных состояний)

$$1 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 2 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f + 3 \text{ загрузка} \cdot \gamma_f;$$

где для нагрузки от покрытия  $\gamma_f = 1$ ;

от собственной нагрузки  $\gamma_f = 1$ ;

от снеговой  $\gamma_f = 1$ .

4. РСН 4 нормативные нагрузки для оценки перемещений в узлах купола (расчет по второй группе предельных состояний)

1 загрузка  $\cdot \gamma_f + 2$  загрузка  $\cdot \gamma_f + 4$  загрузка  $\cdot \gamma_f$ .

	N загрузк.	Наименование	Вид	Знакоперем.	Взаимоискл.	Коэф. надёжн.	Доля длительн.	1	2	3	4
1	1	Загрузка 1 покрытие	Постоянное(П)	+		1.1	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0
2	2	Загрузка 2 Собственн	Постоянное(П)	+		1.1	1.0	1.05	1.05	1.0	1.0
3	3	Загрузка 3 Снег везд	Кратковременное(К)	+		1.2	.35	1.4	.0	1.0	.0
4	4	Загрузка 4 снег спрай	Кратковременное(К)	+		1.2	.35	.0	1.4	.0	1.0

После формирования величин  $\gamma_f$  активизируем команду Сохранить

данные  в этой закладке. Выполнить расчет. Перейти в Анализ. Внизу рабочего окна станет доступна команда Перейти к анализу результатов по РСН .

Далее просматриваем результаты статического расчета. Выбираем наиболее невыгодное сочетание нагрузок (с наибольшими усилиями, с наибольшими перемещениями). Делаем выводы.