

# Определение коэффициентов затенения зеркала большого космического радиотелескопа на основе технологии пакета Solid Works.

В.И. Буякас.

В рамках геометрической оптики предлагается новая технология расчета затенения главного зеркала большого телескопа, основанная на использовании возможностей пакета Solid Works. Развиваемый подход используется для расчета затенения плоской волны и расчета полного затенения 10 метрового зеркала космического телескопа проекта «Радиоастрон» [1].

## 1. Введение.

Конструкция большого телескопа включает в себя наряду с главным зеркалом ряд элементов размещаемых в окрестности фокуса. В однозеркальном телескопе сюда входят, прежде всего, приемник, приборный фокальный контейнер, поддерживающие их элементы конструкции. В многозеркальном инструменте это вторичное зеркало и поддерживающая его структура. Эти элементы ограничивают поток излучения, поступающего на приемник, и ухудшают качество инструмента. Коэффициенты затенения плоской и сферической волн определяют долю потока энергии, которая поглощается на пути от апертуры до главного зеркала и от главного зеркала до фокуса (в однозеркальной конструкции), общий коэффициент затенения определяет потерю потока энергии на пути от апертуры до приемника.

С геометрической точки зрения определение коэффициентов затенения - простая задача, но технически трудноосуществимая. Ранее предлагавшиеся подходы требовали либо аналитического представления объектов, затеняющих рефлектор [2], либо давали инженерную оценку коэффициентов затенения [3]. Использование возможностей пакета Solid Works приводит к точному конструктивному методу решения задачи затенения и не требует трудоемких аналитических представлений.

Пусть

- $K_1$  – коэффициент затенения плоской волны,
- $K_2$  – коэффициент затенения сферической волны,
- $K_\Sigma$  – общий коэффициент затенения,
- $S_r$  – общая площадь рефлектора,
- $S_{rs}$  – площадь затененной части рефлектора.

При оценке степени затенения главного зеркала распространены два ошибочных утверждения:

1. общий коэффициент затенения может быть представлен в виде суммы коэффициентов затенения плоской и сферической волны.

$$K_{\Sigma} = K_1 + K_2$$

2. отношение площади затененной части рефлектора к общей площади рефлектора является общим коэффициентом затенения

$$K_{\Sigma} = S_{rs} / S_r.$$

Ошибочность *первого* утверждения доказывается следующим рассуждением. Спроектируем на рефлектор с помощью плоской волны объекты, создающие затенение. Пусть  $A_1$  – область затененной части рефлектора от плоской волны. Затем методом центральной проекции из фокуса спроектируем на рефлектор объекты, стоящие на пути сферической волны. Пусть  $A_2$  – область затененной части рефлектора от сферической волны. Тогда, если области  $A_1$  и  $A_2$  пересекаются, то

$$K_{\Sigma} < K_1 + K_2.$$

В общем случае

$$K_{\Sigma} \leq K_1 + K_2.$$

Ошибочность *второго* утверждения доказывается следующим рассуждением. Рассмотрим в плоскости апертуры два круга малого радиуса, один из которых расположен в окрестности фокальной оси, другой – у границы зеркала. Пусть  $S_1$  и  $S_2$  их площади. Спроектируем круги на поверхность рефлектора и обозначим через  $S_{r1}$  и  $S_{r2}$  – площади проекций, а через  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – телесные углы, под которыми эти проекции видны из фокуса рефлектора. Пусть

$$S_1 = S_2.$$

Очевидно, что для параболического зеркала

$$S_{r1} < S_{r2}.$$

Поэтому

$$S_1 / S_2 = 1,$$

но

$$S_{r1} / S_{r2} < 1.$$

Следовательно, отношения площадей на поверхности рефлектора не соответствуют отношениям потоков энергии падающих на апертуру. Можно показать, однако, что при этом

$$\Omega_1 / \Omega_2 = 1$$

Отсюда вытекают два способа определения коэффициента затенения зеркала, используемые в работе.

Первый способ основан на проектировании затененной части рефлектора на плоскость апертуры и определении отношения затененной части апертуры к общей площади апертуры.

Второй способ основан на измерении телесного угла, под которым затененная часть рефлектора видна из фокуса и определении отношения этого телесного угла к телесному углу, под которым весь рефлектор виден из фокуса.

Расчет *коэффициента затенения плоской волны* с использованием пакета Solid Works осуществляется в следующей последовательности:

1. Строится виртуальная 3D модель рефлектора и элементов конструкции телескопа, создающих затенение плоской и сферической волнам.
2. На поверхность рефлектора вдоль фокальной оси проектируются всех элементов конструкции, расположенные на пути плоской волны.
3. Затененная часть параболического рефлектора высекается.
4. При расчете коэффициента затенения плоской волны по *первому* способу, затененная часть рефлектора проектируется вдоль фокальной оси на плоскость апертуры и вычисляется отношение площади затененной части апертуры к ее общей площади.
5. При расчете коэффициента затенения плоской волны по *второму* способу определяется телесный угол, под которым затененная часть рефлектора видна из фокуса, и вычисляется отношение этого телесного угла к телесному углу, под которым весь рефлектор виден из фокуса.

При вычислении *полного коэффициента затенения* после п. 3 выполняются следующие операции:

6. Проектируются из фокуса на поверхность главного зеркала методом центральной проекции все объекты, расположенные между фокусом и рефлектором.
7. Затенение сферической волны высекается из тонкостенной поверхности главного зеркала. После этой операции из модели рефлектора оказываются удаленными тени плоской и сферической волн.
8. При расчете полного коэффициента затенения по *первому* способу незатененная часть рефлектора проектируется вдоль фокальной оси на

плоскость апертуры и вычисляется отношение площади затененной части апертуры к общей площади апертуры.

9. При расчете полного коэффициента затенения по *второму* способу определяется телесный угол, под которым затененная часть рефлектора видна из фокуса и вычисляется отношение этого телесного угла к телесному углу, под которым весь рефлектор виден из фокуса.

Прямого способа вычисления телесных углов в пакете Solid Works не существует. Поэтому для их вычисления используется следующий прием.

Между фокусом и рефлектором строится тонкостенная сферическая поверхность произвольного радиуса с центром в фокусе рефлектора. Строится конус  $K$  с вершиной в фокусе, который опирается на наружную кромку рефлектора. Находится линия пересечения конуса и сферической поверхности. Отсекается часть сферической поверхности, расположенная вне конуса. Площадь  $S_s$ , оставшейся части сферической поверхности, пропорциональна телесному углу, под которым рефлектор виден из фокуса. Далее строятся конуса  $K_1$  и  $K_2$ , которые опираются на границы высечек, построенных в п3 и п7. На сферической поверхности им соответствуют площади  $S_{s1}$  и  $S_{s2}$ . Тогда для коэффициентов затенения плоской волны и полного коэффициента затенения имеем:

$$K_1 = S_{s1} / S_s.$$

$$K_{\Sigma} = S_{s\Sigma} / S_s$$

## **2. Построение 3D модели антенны радиотелескопа.**

На рисунке 1 представлен космический телескоп проекта «Радиоастрон» в раскрытом состоянии во время наземных испытаний. Инструмент выполнен по однозеркальной схеме. Здесь основными элементами, создающими затенение, являются: фокальный контейнер (1), радиатор фокального контейнера (2), штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью зеркала (3), поперечные тяги (4), соединяющие штанги. Тяги введены в конструкцию для улучшения динамических характеристик системы на этапе выведения радиотелескопа на орбиту.

Для вычисления геометрического затенения радиотелескопа в пакете Solid Works была создана трехмерная модель (3D модель) рефлектора и основных элементов конструкции радиотелескопа, попадающих в область затенения. Модель включает в себя: тонкостенный параболоид главного зеркала, фокальный контейнер, радиатор фокального контейнера, 6 опор (штанг), удерживающих фокальный контейнер над поверхностью зеркала и 6 поперечных тяг фермы рефлектора.



Рис. 1. Зеркало телескопа проекта «Радиоастрон» в раскрытом состоянии.  
 1 – фокальный контейнер, 2 – радиатор фокального контейнера, 3 – штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью зеркала, 4 – поперечные тяги, соединяющие штанги, 5 – лепестки, 6 – центральное зеркало.

Построение 3D модели происходит в себя следующей последовательности.  
 1. Строятся образующая и ось вращения параболоида.

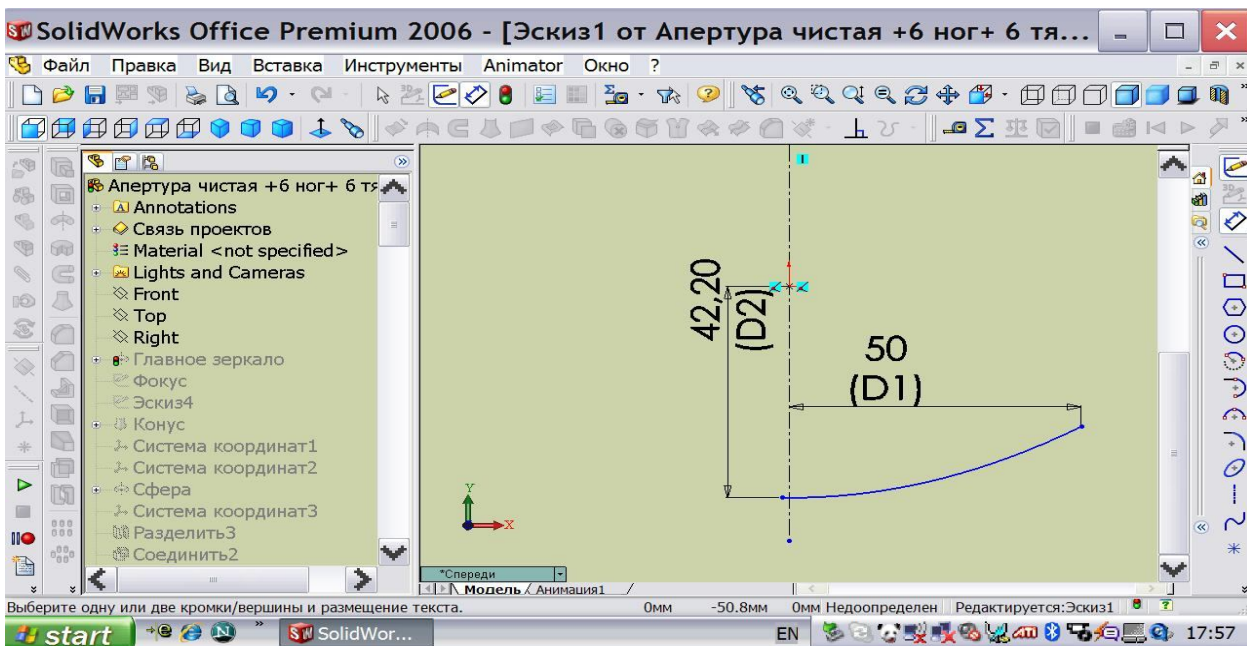


Рис. 2. Построение образующей параболического зеркала и оси вращения.

2. Виртуальная модель рефлектора создается как поверхность вращения образующей вокруг оси параболоида.

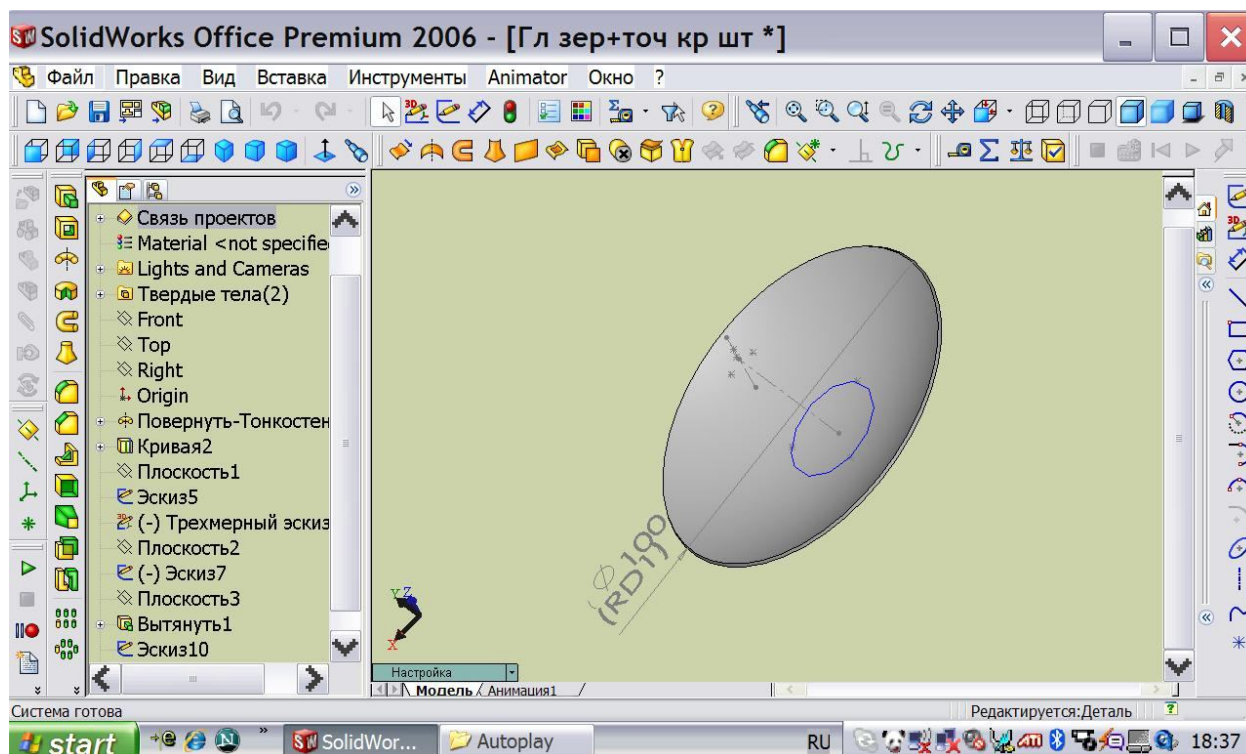


Рис. 3. Построение главного зеркала вращением образующей вокруг оси параболоида.

3. Далее последовательно строятся объекты, расположенные на пути плоской и сферической волн (фокальный контейнер, штанги и т.д.).

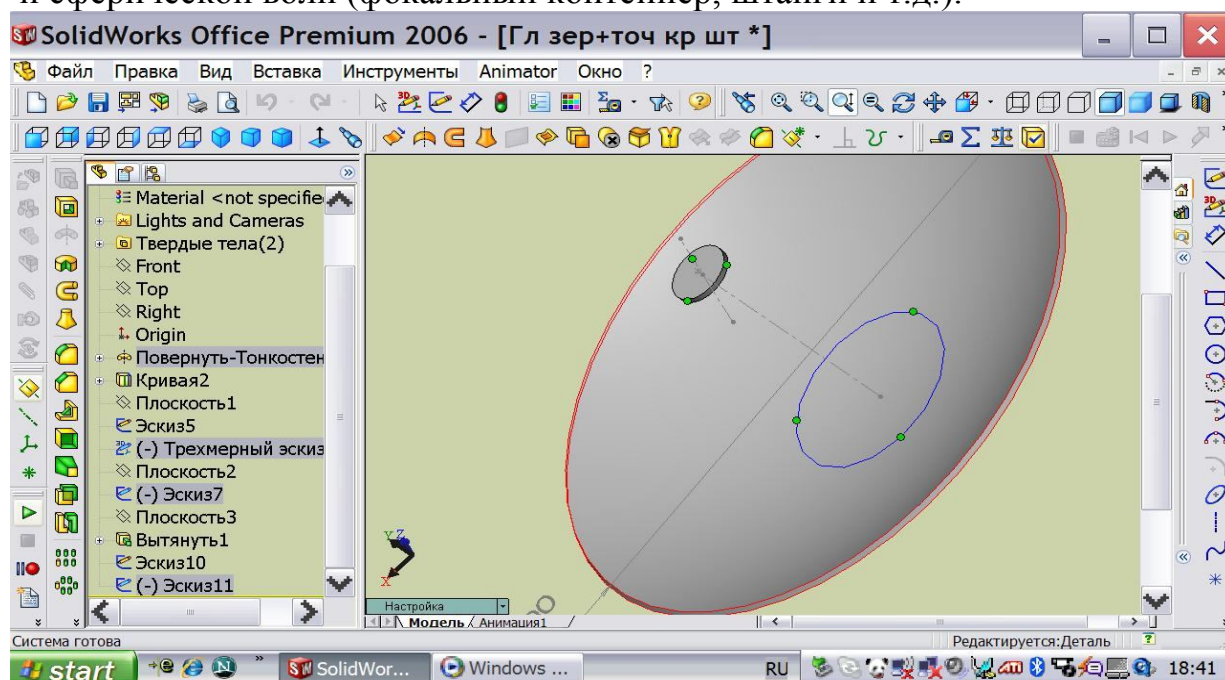


Рис. 4. Разметка точек крепления штанг, удерживающих фокальный контейнер.

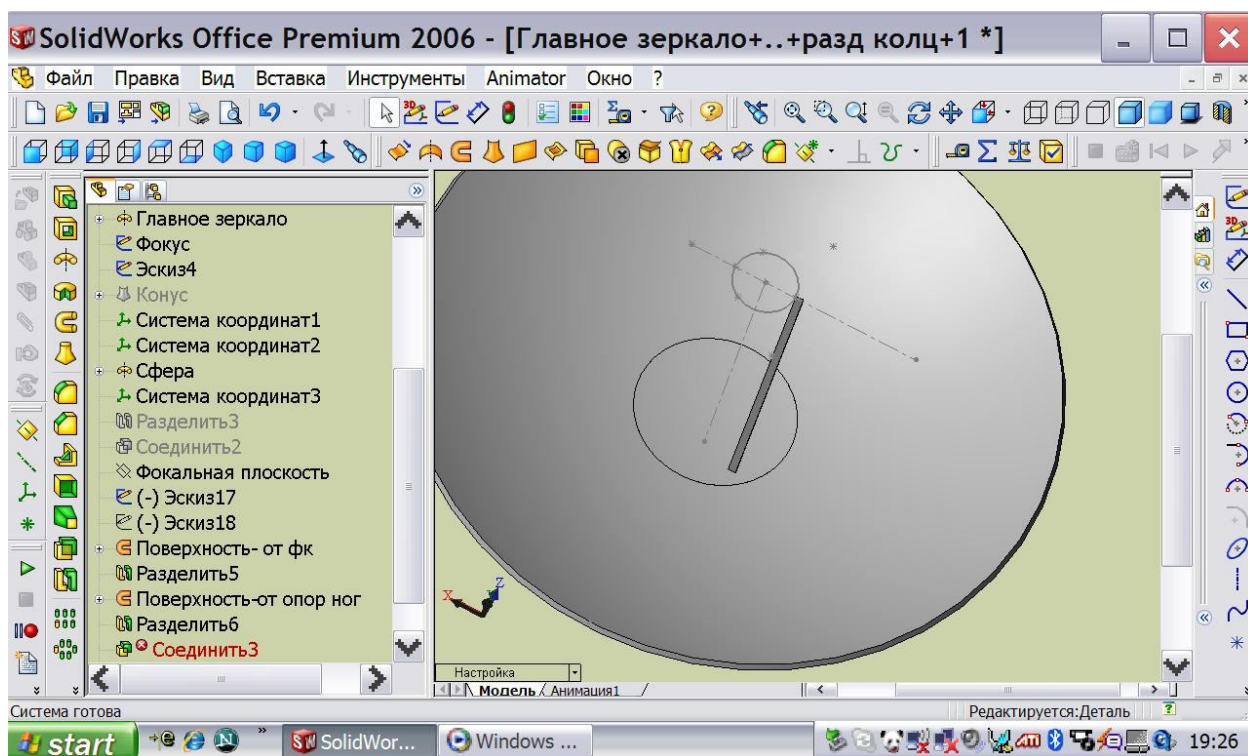


Рис. 5. Размещение первой штанги.

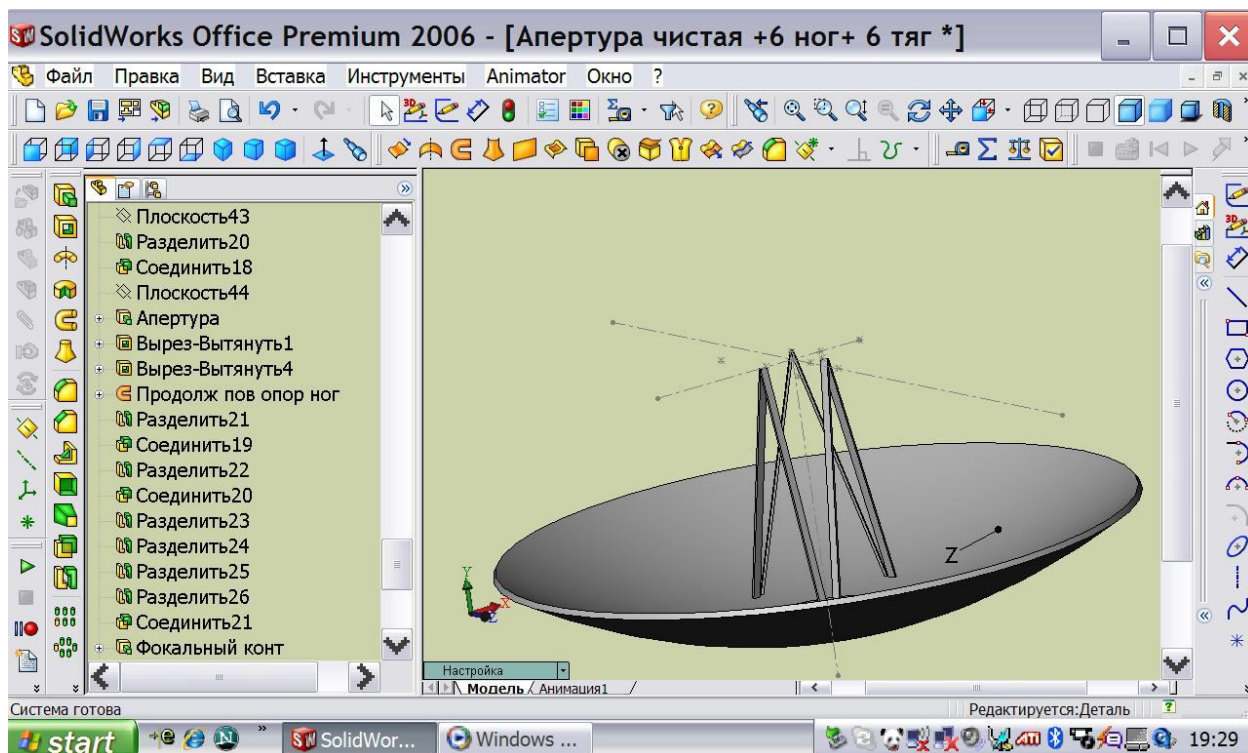


Рис. 6. Размещение остальных штанг.

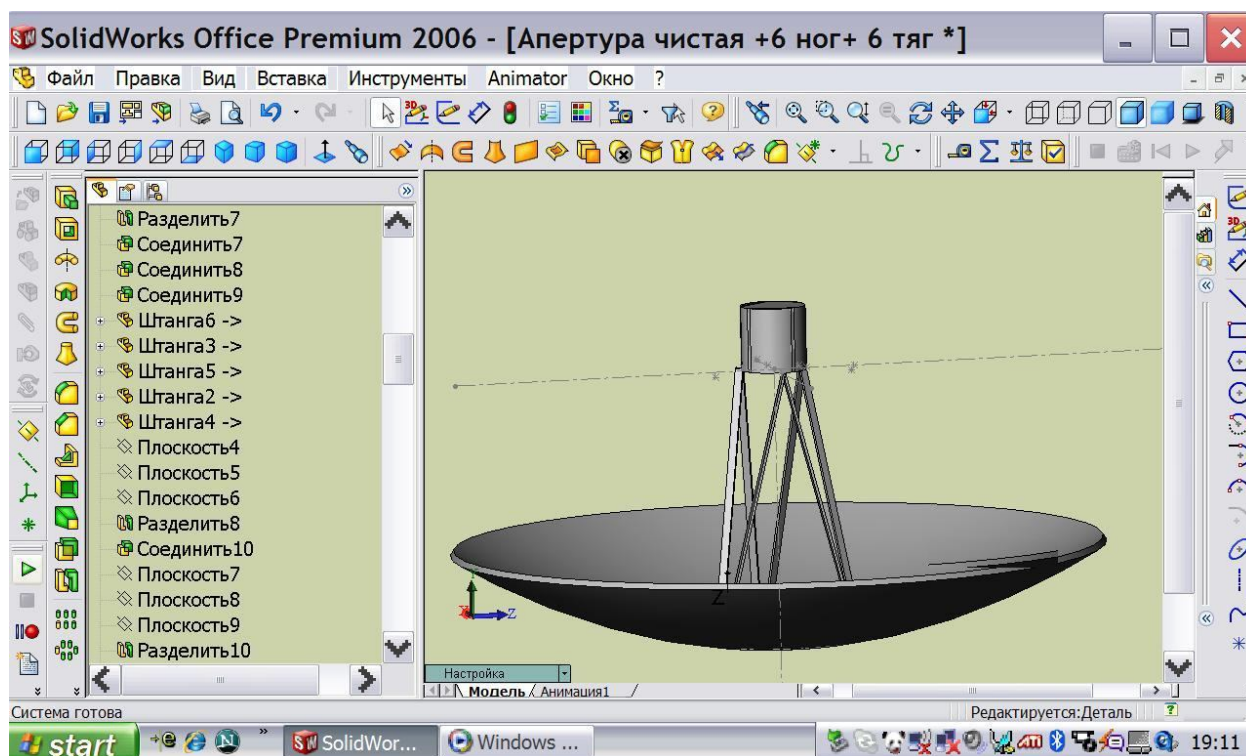


Рис. 7. Размещение фокального контейнера.

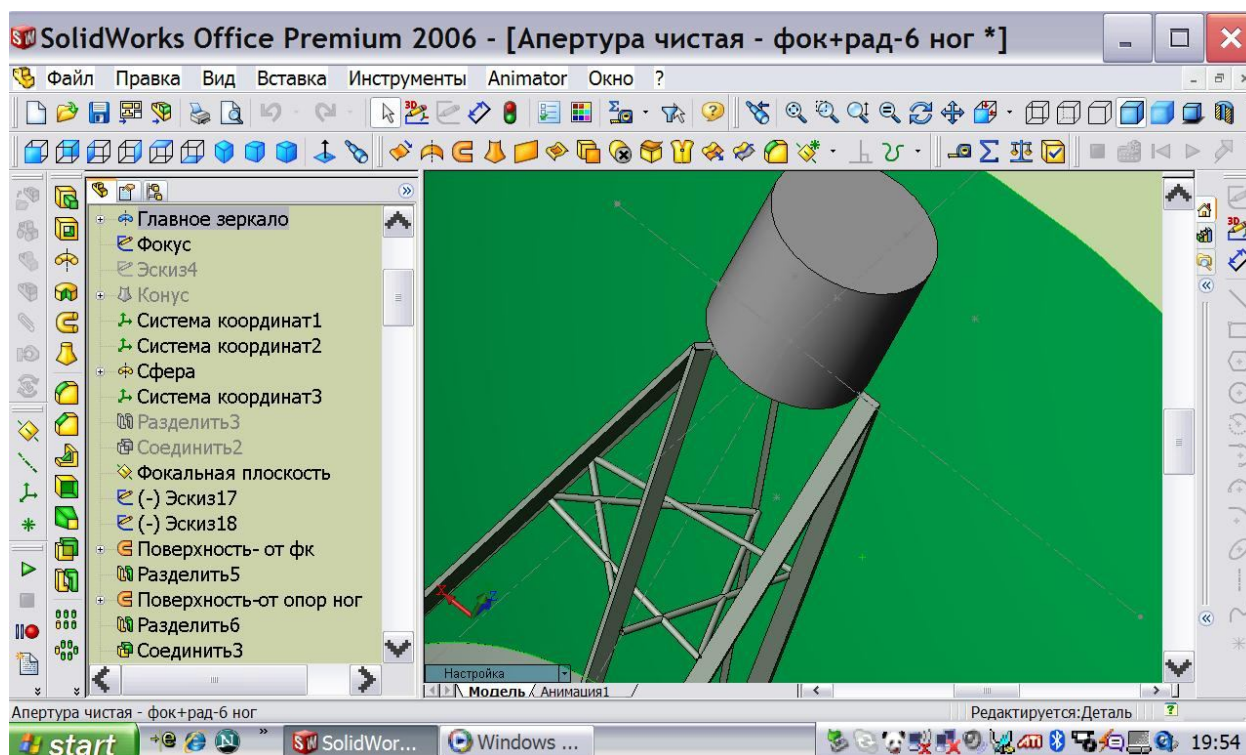


Рис. 8. Размещение поперечных тяг.



### 3. Затенение плоской волны.

Для определения затенения плоской волны фокальный контейнер, штанги и тяги проектируются вдоль фокальной оси на поверхность рефлектора. Тени последовательно высекаются из тонкостенного профиля рефлектора.

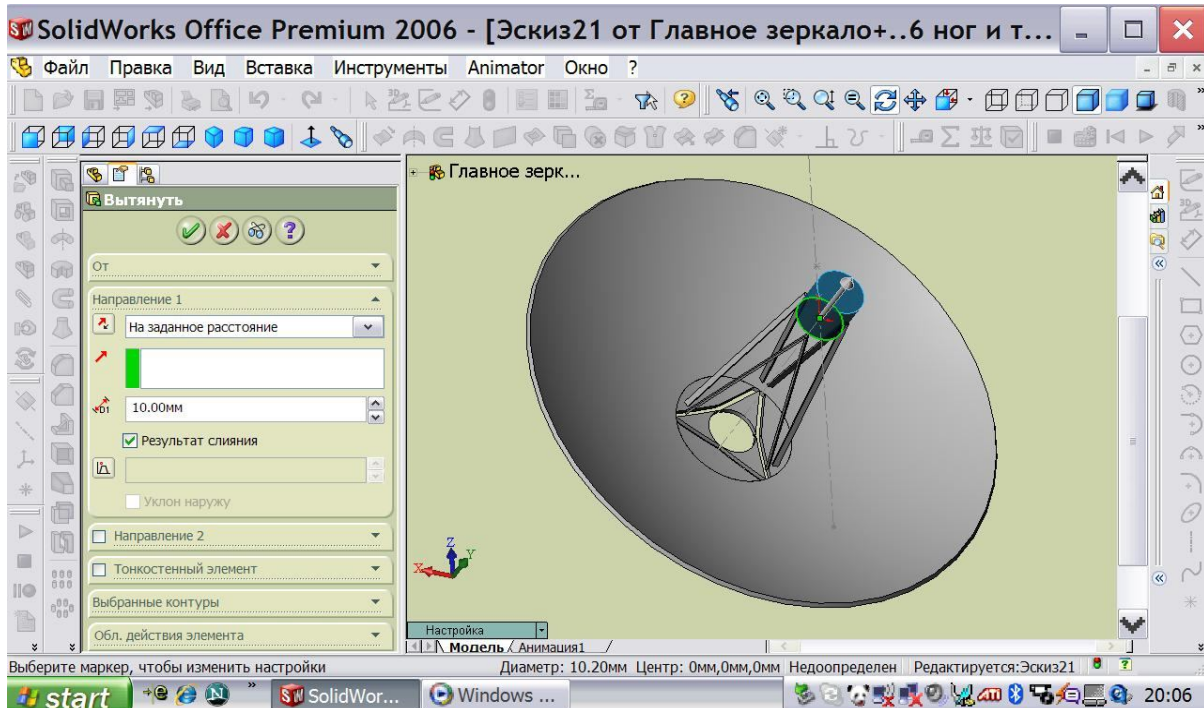


Рис. 9. Формирование тени плоской волны на зеркале от фокального контейнера и штанг и ее высечение.

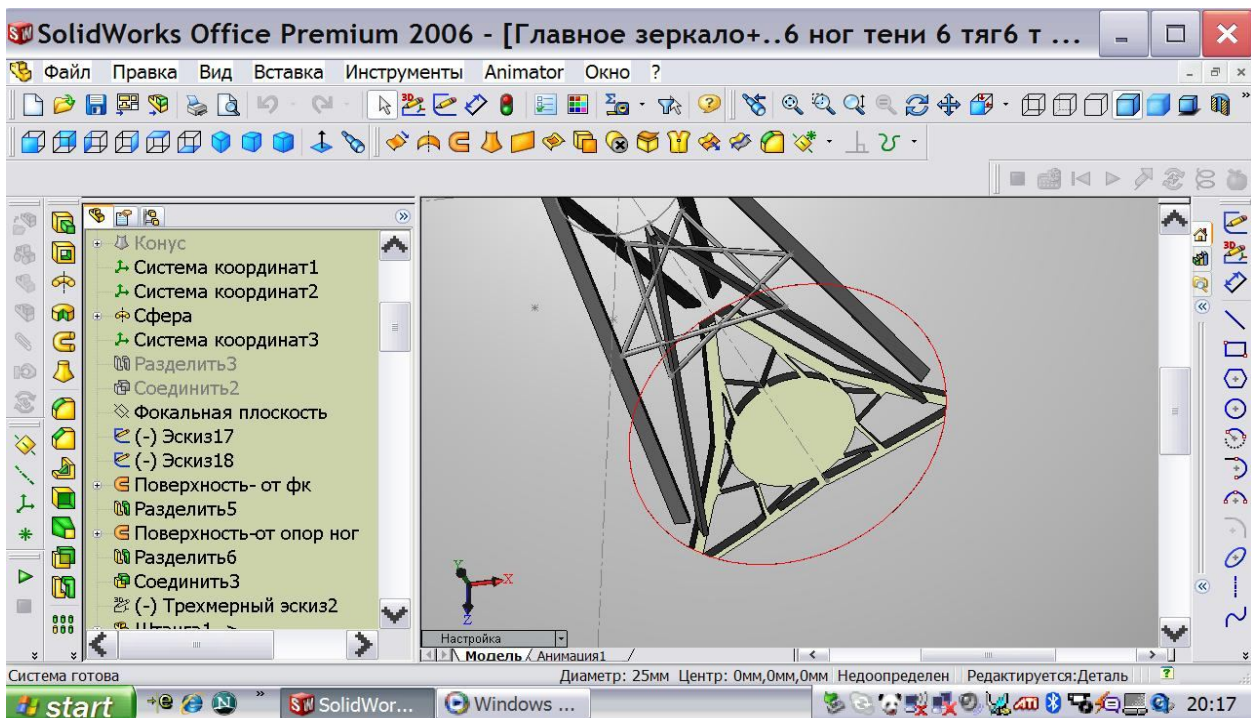


Рис. 10. Формирование тени плоской волны на поверхности рефлектора от поперечных тяг и ее высечение.

При вычислении коэффициентов затенения тень от радиатора проектируется непосредственно на плоскость апертуры.

#### **4. Затенение сферической волны.**

Далее центральной проекцией из фокуса на поверхность рефлектора проектируются объекты, расположенные на пути сферической волны: штанги и поперечные тяги. Затем, построенная тень высекается из поверхности рефлектора.

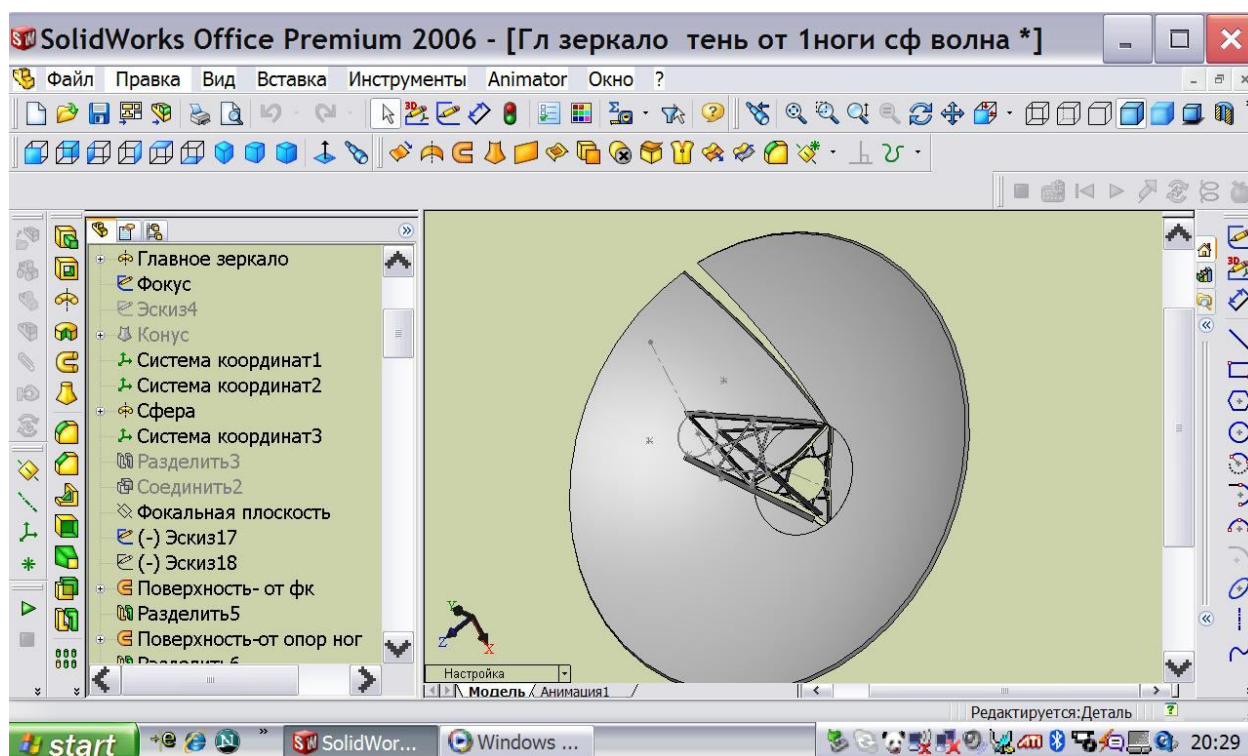


Рис. 11. Тень сферической волны на рефлекторе от одной штанги.

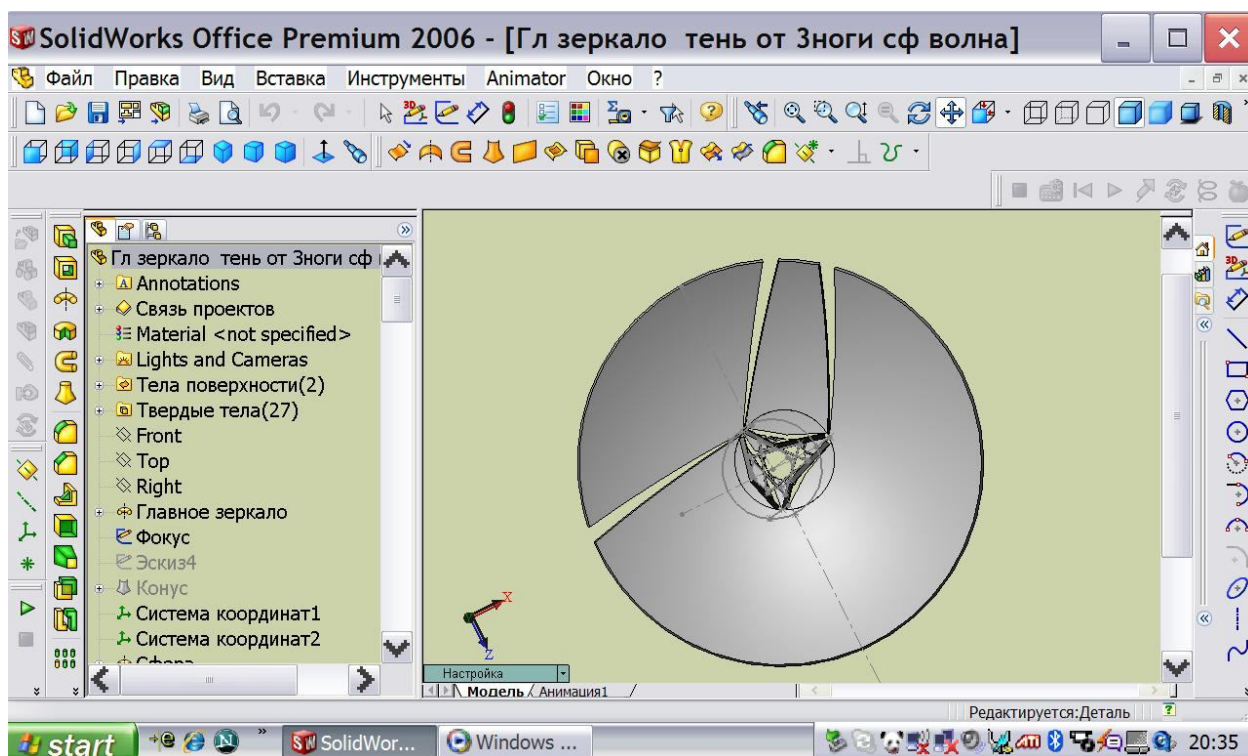


Рис. 12. Тень сферической волны от трех штанг.

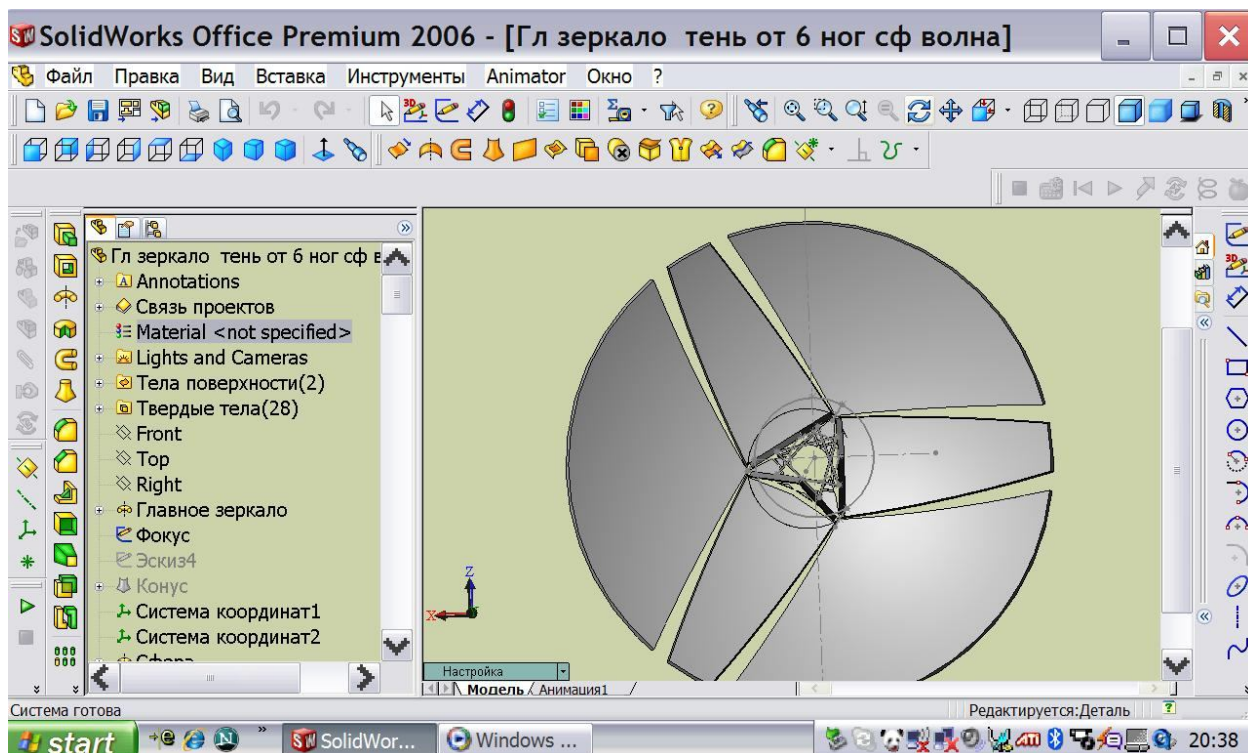


Рис. 13. Тень сферической волны от шести штанг.

Детальный анализ показывает, что радиатор, как и фокальный контейнер, не попадает в область затенения сферической волны.

## 5. Вычисление коэффициента затенения плоской волны.

Далее осуществляется расчет коэффициента затенения плоской волны. Для решения этой задачи над фокальным контейнером в плоскости, параллельной фокальной плоскости, формируется тонкостенный апертурный диск. Диаметр диска равен диаметру рефлектора. Все объекты затенения плоской волны проектируются на плоскость затенения апертурного диска. Затененная часть высекается из тонкостенного профиля.

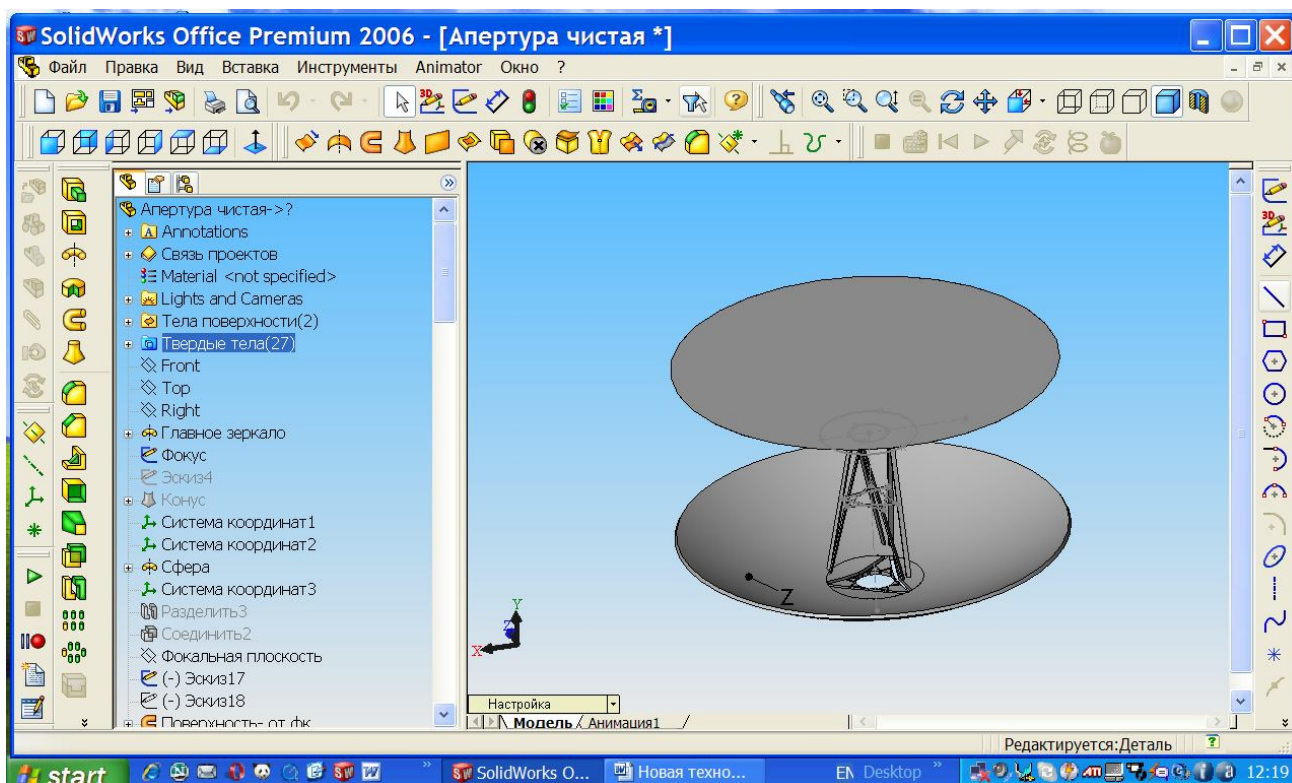


Рис. 14. Создание апертурного диска.

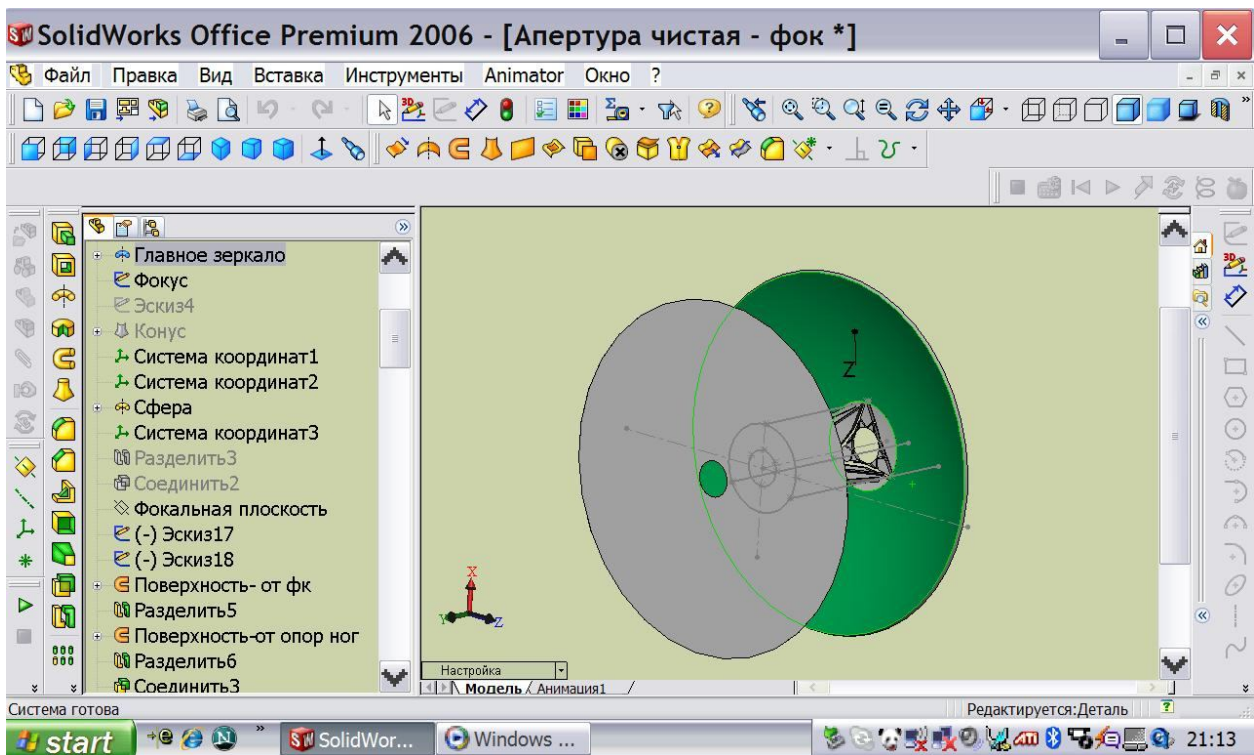


Рис.15. Высечение тени фокального контейнера из апертурного диска.

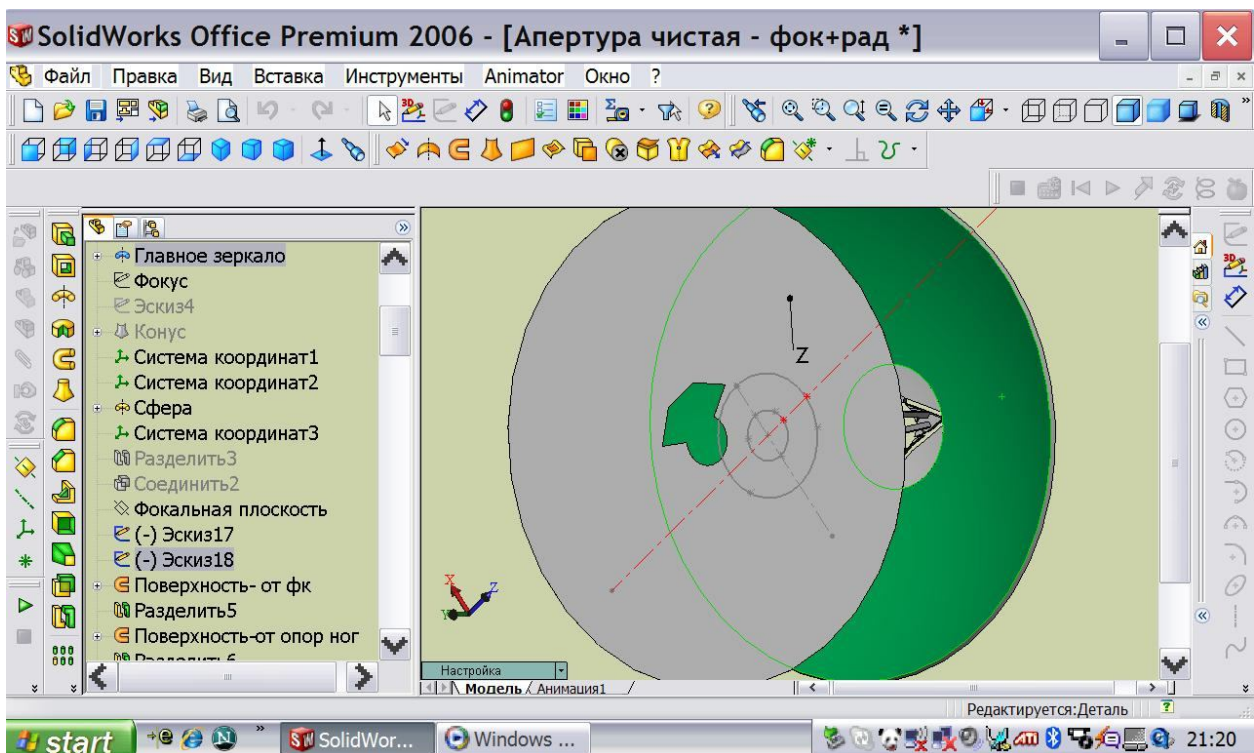


Рис.16. Высечение тени радиаторов из апертурного диска.

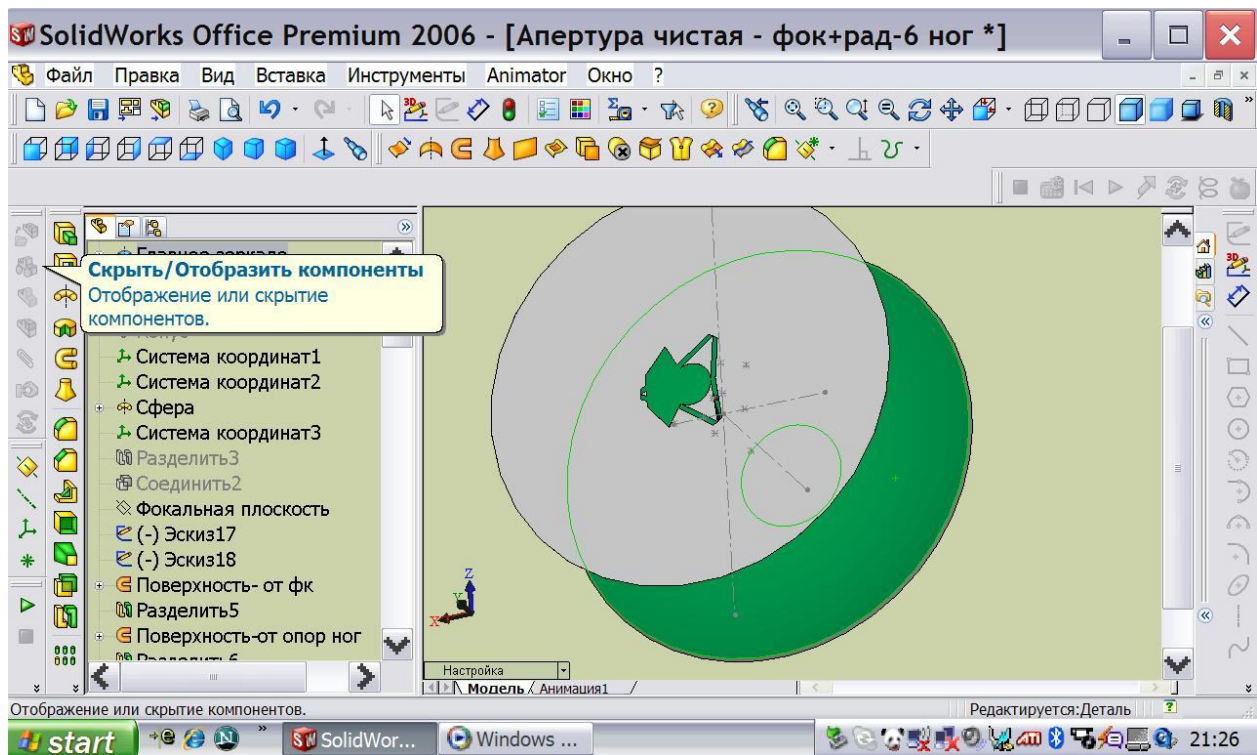


Рис.17. Высечение тени штанг из апертурного диска.

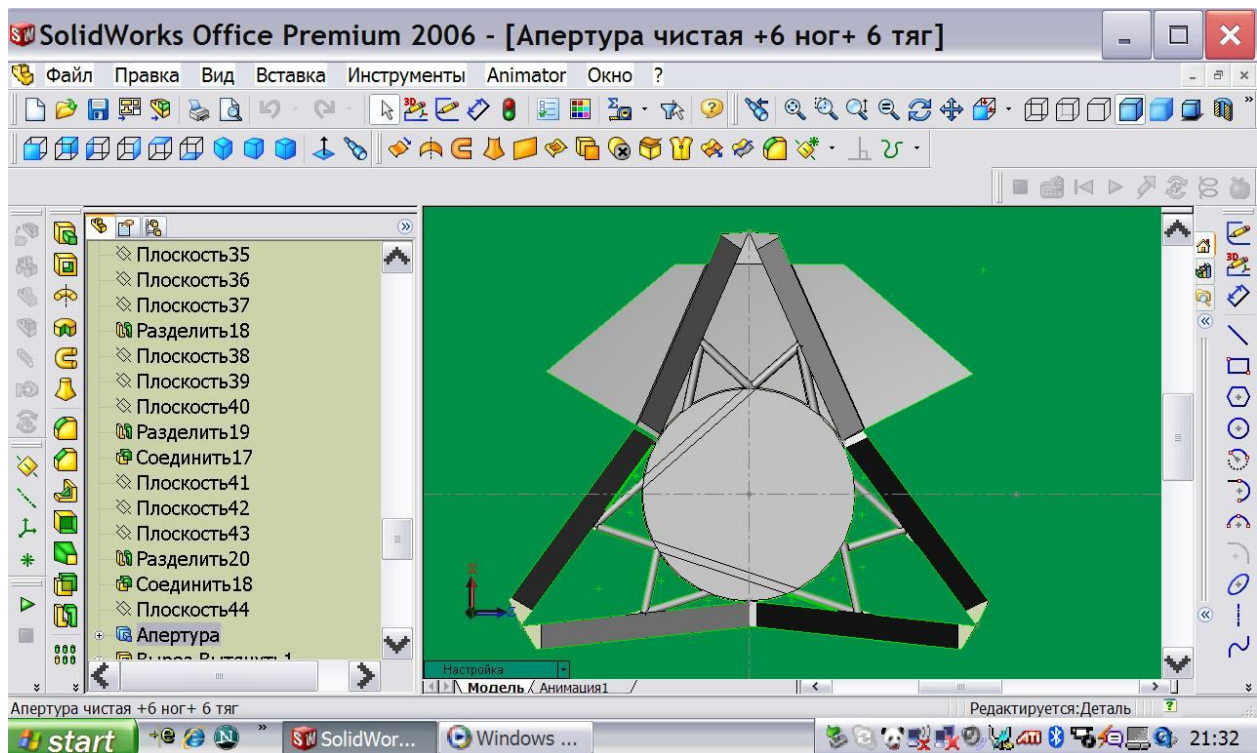


Рис. 18. Высечение из апертурного диска тени от поперечных тяг.

Далее определяются общая площадь апертурного диска (рис. 19) и площадь незатененной части апертурного диска (рис. 20).

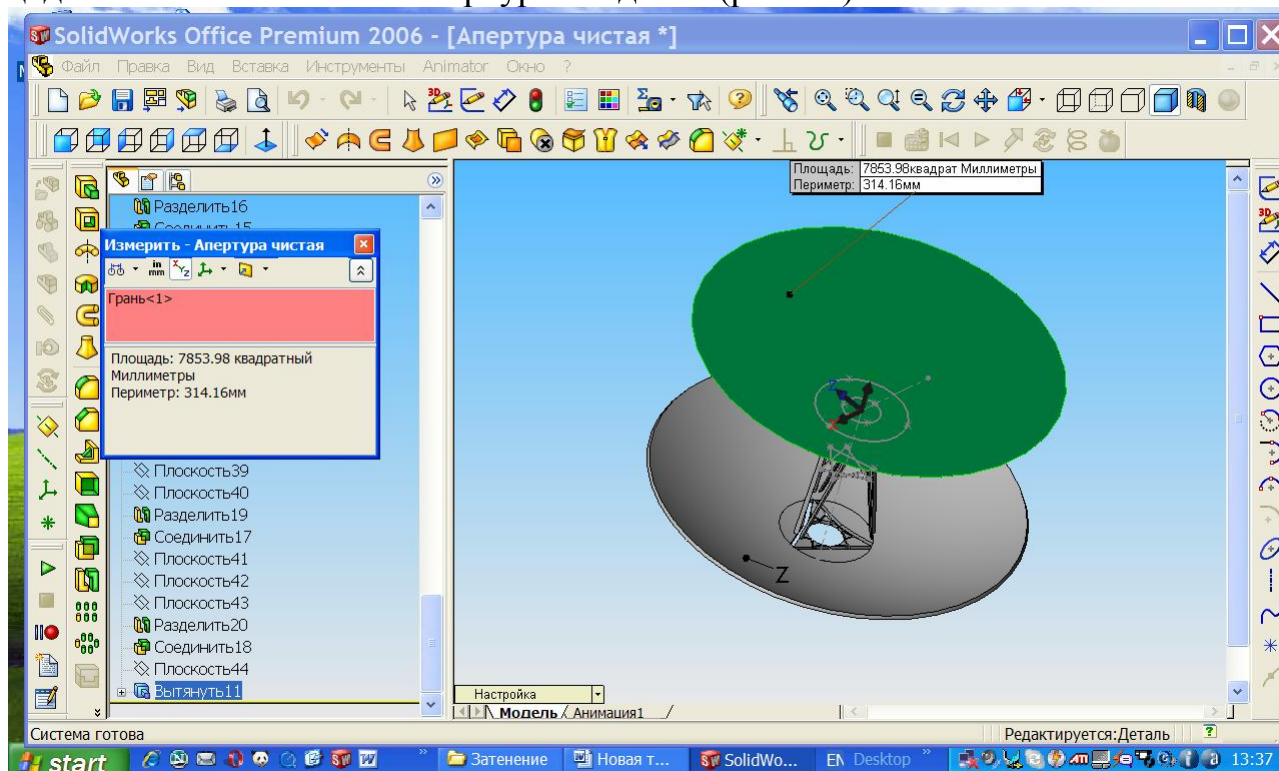


Рис. 19. Вычисление площади апертурного диска.

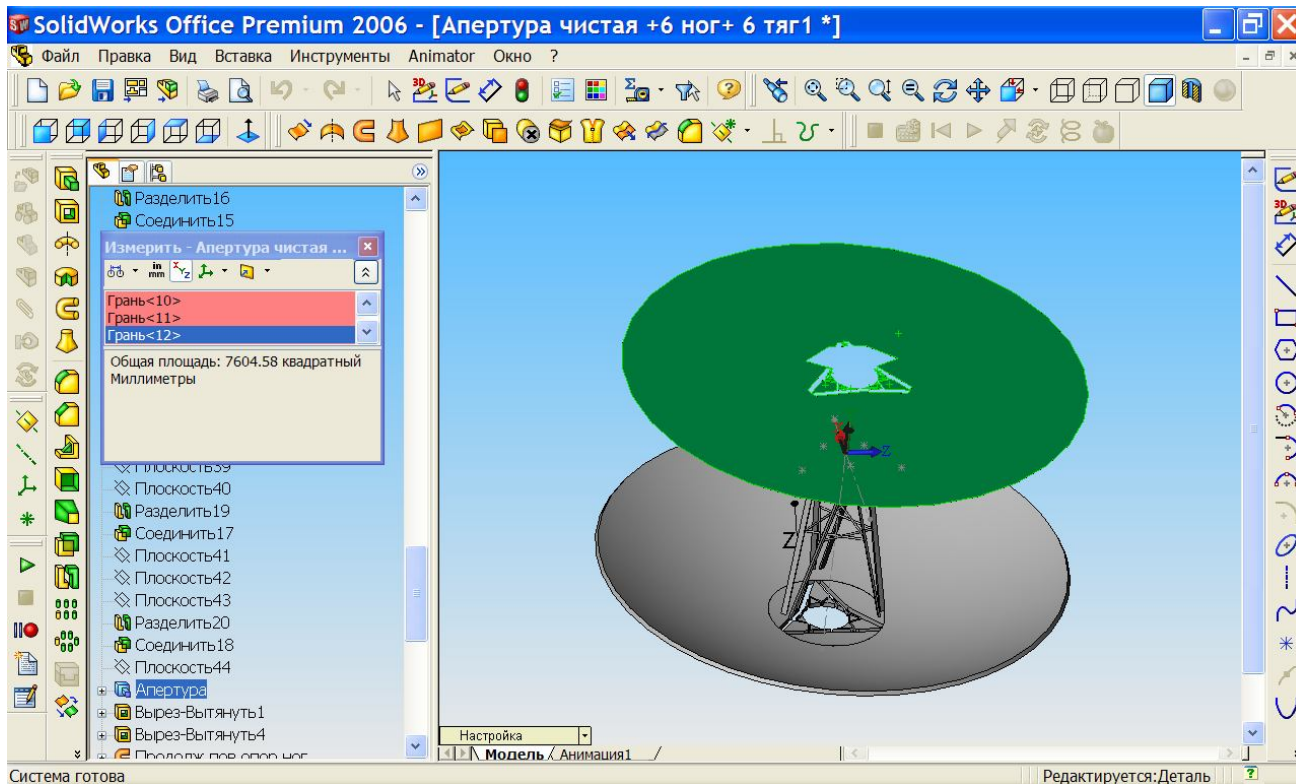


Рис. 20. Вычисление площади незатененной части апертурного диска.

После этого вычисляется коэффициент затенения рефлектора по плоской волне. Пусть  $S_a$  – полная площадь апертурного диска,  $S_{a1}$  – площадь незатененной части апертурного диска по плоской волне. Из рисунков 19 и 20 имеем:

$$S_{a1} = 7604,58 \text{ условных единиц,}$$

$$S_a = 7853,98 \text{ условных единиц.}$$

Отсюда находим коэффициент затенения зеркала проекта «Радиоастрон» по плоской волне:

$$K_{\pi} = (S_a - S_{a1}) / S_a = 0,0317.$$

Таким образом, в плоской волне поглощается 3,17% падающего излучения.

## **6. Вклад штанг в затенение сферической волны.**

Оценим вклад штанг, удерживающих контейнер, в затенение сферической волны. Для этого вначале построим часть сферы произвольного радиуса с центром в фокусе, расположенную между фокусом и рефлектором.

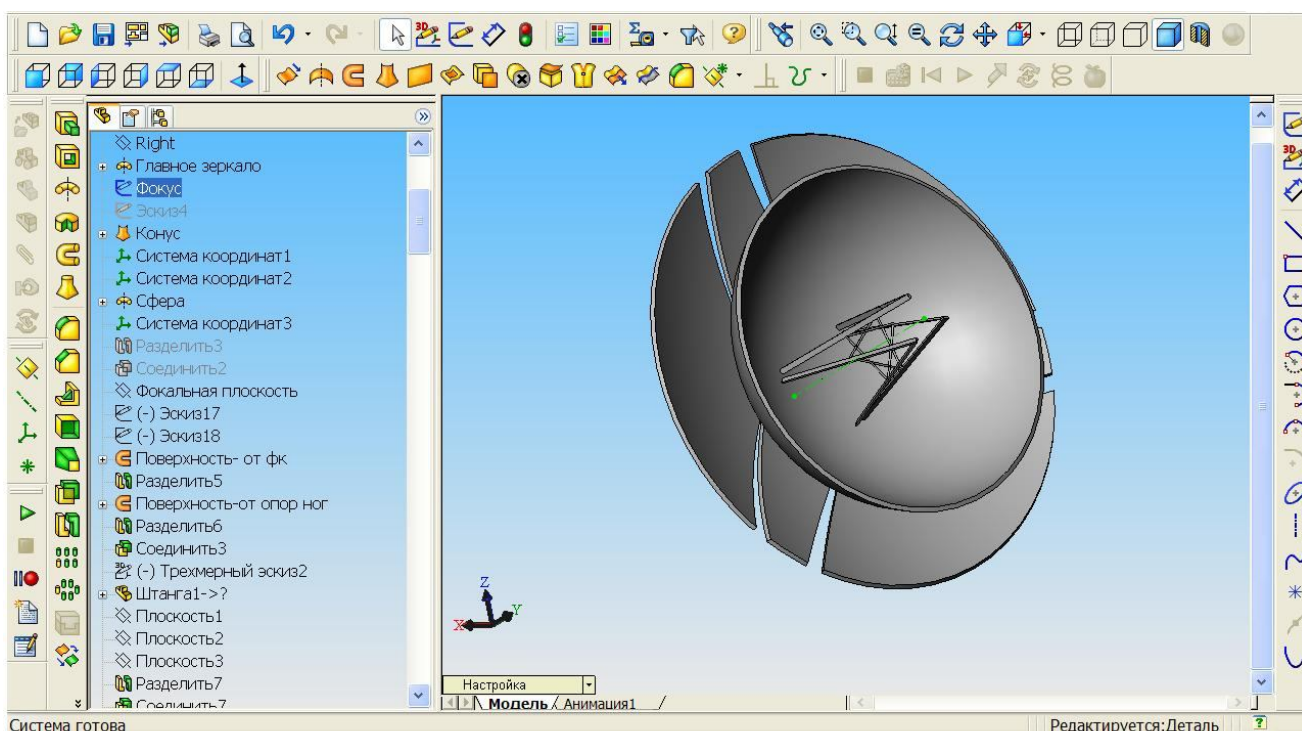


Рис. 21. Построение сферы.

Затем построим конус с вершиной в фокусе, опирающийся на внешнюю границу рефлектора.



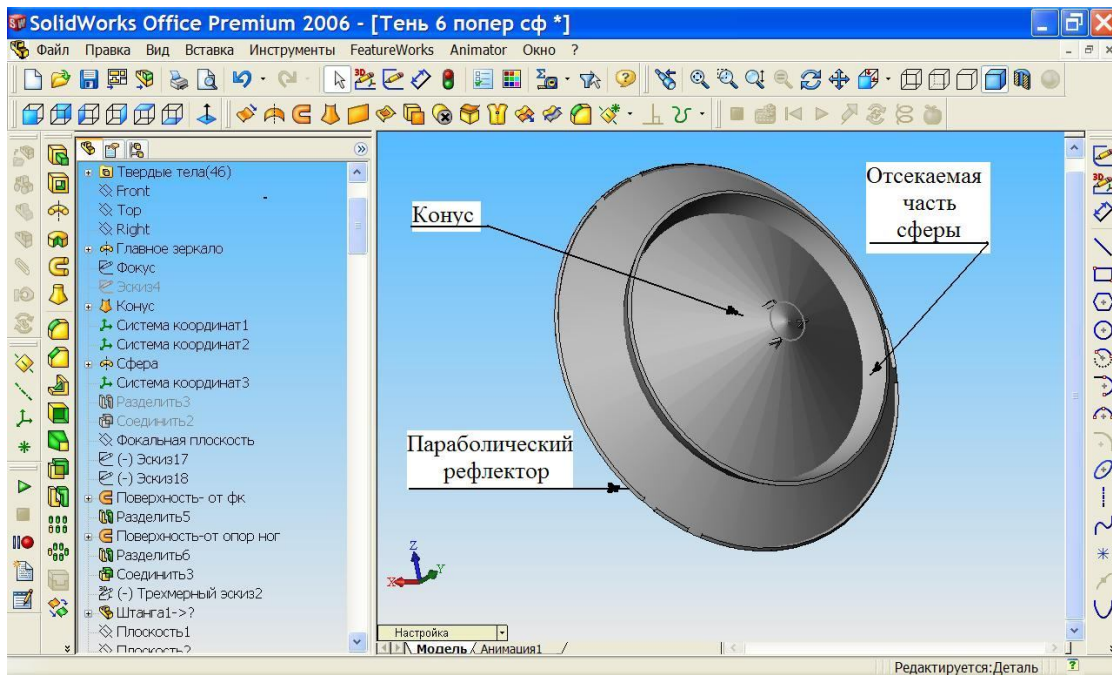


Рис. 22. Построение конуса.

Отсечем часть сферы, выступающую за границу конуса. Площадь оставшейся части сферы  $S_s$  пропорциональна телесному углу, под которым рефлектор виден из фокуса.

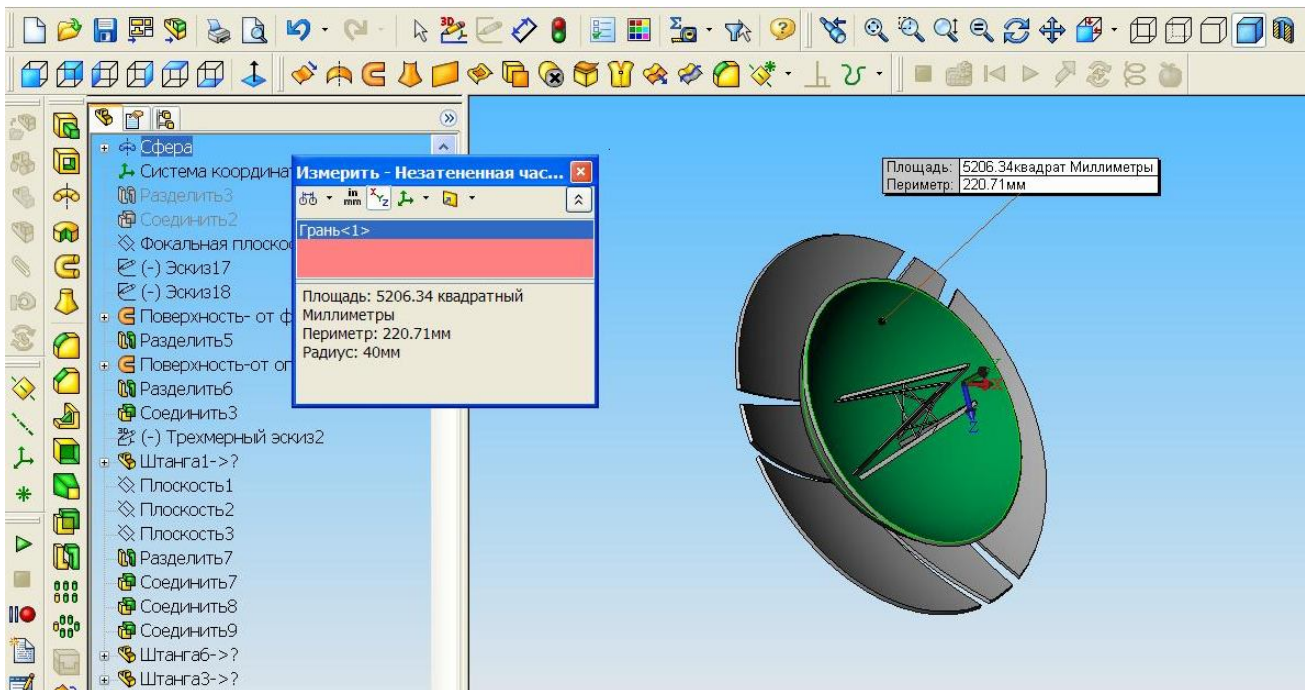


Рис. 23. Отсечение части сферы, выступающей за пределы конуса и измерение площади оставшейся части сферы.

Если спроектировать методом центральной проекции затененную часть рефлектора на поверхность оставшейся части сферы и удалить незатененную часть сферы, то площадь оставшейся части сферы  $S_{s\Sigma}$  пропорциональна телесному углу, под которым затененная часть рефлектора видна из фокуса.

Мы хотим оценить, какой вклад в затенение сферической волны вносят штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью рефлектора. Спроектируем на поверхность сферы методом центральной проекции тень штанг от сферической волны на рефлекторе. Удалим незатененную часть сферы и измерим площадь  $S_{штт}$  оставшейся части сферы. Эта площадь пропорциональна телесному углу, под которым тени штанг видны из фокуса.

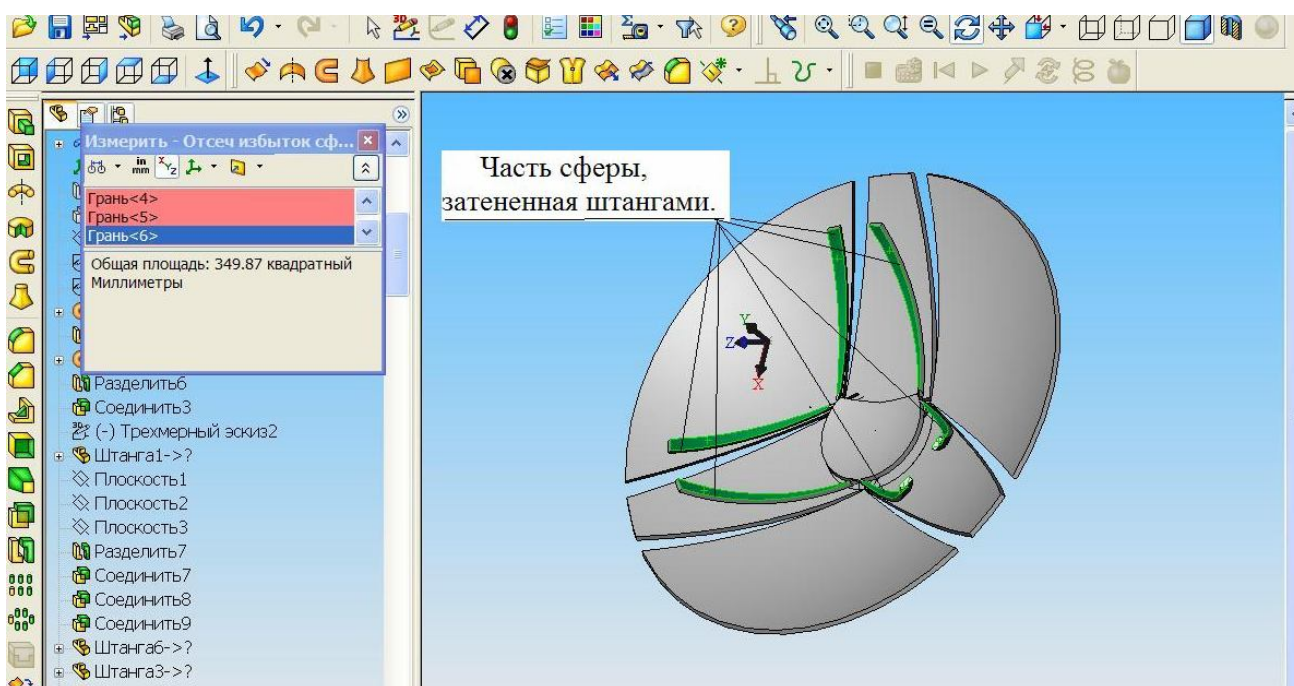


Рис. 24. Проекция на сферу тени от штанг и вычисление ее площади.

Из рисунков 23, 24 следует, что

$$S_{штт} = 349,87 \text{ условных единиц,}$$

$$S_s = 5206,34 \text{ условных единиц.}$$

Потери энергии в сферической волне, вносимые штангами, определяются коэффициентом затенения  $K_{штт}$ :

$$K_{штт} = 349,87/5206,34 = 0,0672.$$

Таким образом, штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью рефлектора, поглощая в сферической волне около 6,7% потока энергии, существенно влияют на качество инструмента.

## 7. Вычисление полного коэффициента затенения.

На рис. 25 отсеченной части рефлектора соответствует тень, образованная плоской и сферической волнами одновременно. Спроектируем эту тень на плоскость апертуры и удалим незатененную часть (Рис.26).

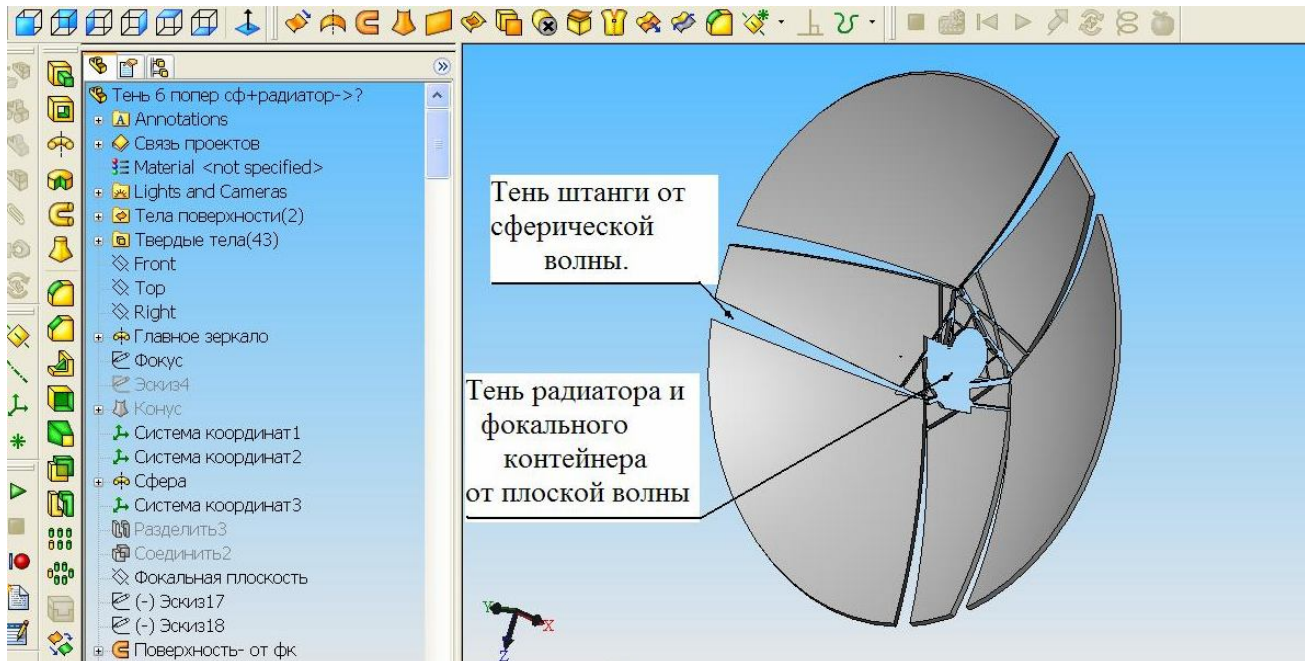


Рис. 25. Незатененная часть рефлектора (отсечены тени от плоской и сферической волн).

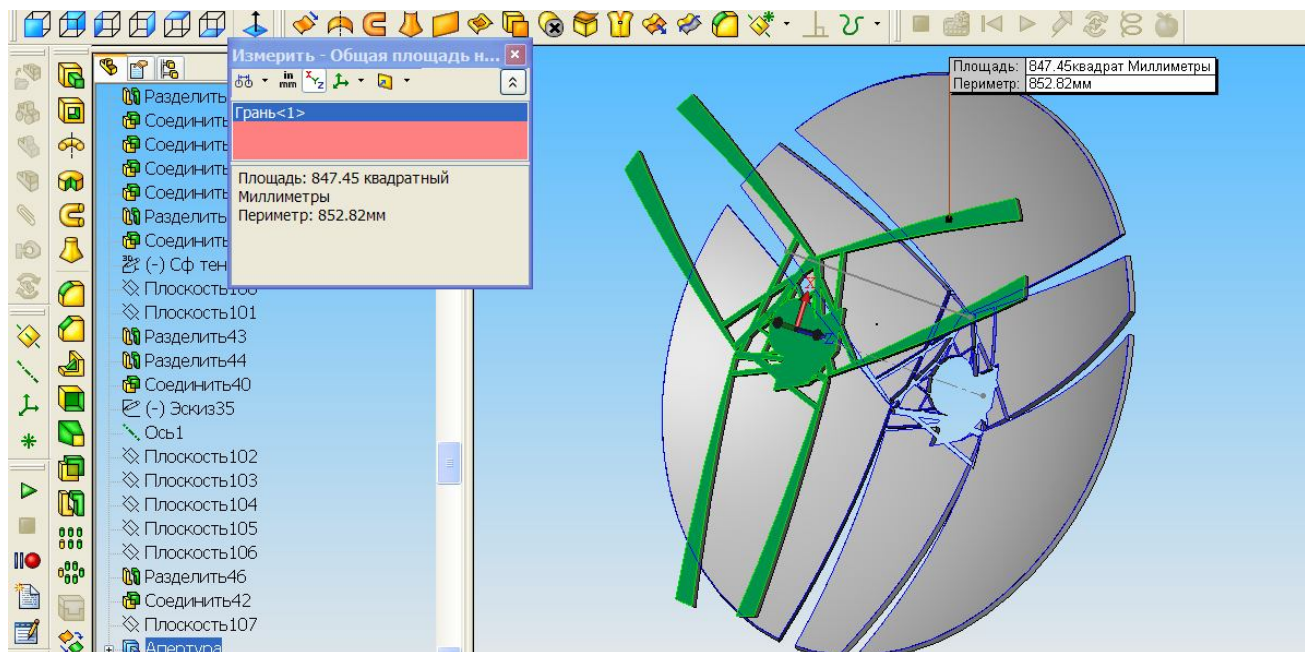


Рис. 26. Проекция общего затенения на плоскость апертуры и вычисление полного коэффициента затенения.

Из рисунка 25 для общей площади апертуры имеем:

$$S_a = 7853,98 \text{ условных единиц.}$$

Из рисунка 26 находим общую площадь затененной части апертуры

$$S_{a\Sigma} = 847,45 \text{ условных единиц.}$$

Вычисляем общий коэффициент затенения

$$K_{\Sigma} = 847,45/7853,98=0,1079.$$

Таким образом, общие потери приемного тракта за счет затенения составляют  $\approx 10,8\%$ .

При расчете коэффициентов затенения главного зеркала телескопа проекта «Радиоастрон» использовались следующие исходные данные.

Апертура главного зеркала – 10 метров,

Фокусное расстояние – 4,22 метров,

Диаметр фокального контейнера – 1,028 метров,

Размеры штанг, поддерживающих фокальный контейнер – 4200 × 120 × 40 мм,

Диаметр поперечных тяг – 40 мм.

Виртуальная модель рефлектора и объектов затенения строилась вручную, поэтому значения полученных коэффициентов затенения являются оценочными.

## **8. Заключение.**

Предложена новая технология расчета геометрического затенения главного зеркала большого радиотелескопа, основанная на использовании возможностей технологии пакета Solid Works. Проведен оценочный расчет коэффициентов затенения рефлектора радиотелескопа проекта «Радиоастрон».

Работа частично поддержана проектом РФФИ 07-08-00482.

## **Литература.**

1. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron>
2. С.Н.Саяпин, С.П.Соколов, Е.И.Битушан, В.И.Алтунин, А.Г.Трубников, Л.Б.Шевчук. Проектирование опорной системы трансформируемых антенн лепесткового типа на примере антенны космического радиотелескопа. «Радиоастрон» Препринт ИКИ АН СССР, 1989, Пр-1617.
3. С.Д.Федорчук. Определение оптического затенения рефлектора элементами конструкции КРТ по результатам макетирования. Научно-технический отчет АКЦ. АМ1.50.00.21, 2007.