

УДК 520.2.02

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА ЗАТЕНЕНИЯ ЗЕРКАЛА БОЛЬШОГО КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА

В. И. Буякас¹

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”. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (код проекта 07–08–00482).

Ключевые слова: космический радиотелескоп, технология расчета затенения, пакет Solid Works.

1. Введение. За последние десятилетия были спроектированы, созданы и использовались в астрономических наблюдениях наземные и космические телескопы, перекрывающие практически весь спектр электромагнитного излучения. Основные усилия разработчиков сосредоточены на создании инструментов, обеспечивающих максимально высокую чувствительность и (или) угловое разрешение при астрономических наблюдениях.

Увеличение чувствительности достигается в первую очередь увеличением размера главного зеркала. Рекордными в этом отношении наземными инструментами являются 100-метровый радиотелескоп в Грин Бэнк (США, начал работать в 2000 г.) [2, 3] и 50-метровый телескоп миллиметрового диапазона на вулкане Сьерра Негра (Мексика, вступил в строй в 2006 г.) [4].

Космические телескопы инфракрасного диапазона [5, 6] открыли для наблюдений области спектра, недоступные из-за поглощений в атмосфере наземным инструментам; с их помощью исследователи обнаружили огромное количество новых астрономических объектов.

Совместная работа космических и наземных телескопов в интерферометрическом режиме позволяет создавать инструменты с очень высоким угловым разрешением. Первые результаты в этом направлении уже получены при работе с космическим телескопом проекта VSOP (Япония) [7]. Большие надежды возлагаются на готовящийся к запуску радиотелескоп проекта “Радиоастрон” [1, 8, 9] (Россия) и разрабатываемый космический телескоп миллиметрового диапазона проекта “Миллиметрон” (Россия) [10, 11].

Наряду с размером главного зеркала, чувствительность телескопа зависит от точности отражающей поверхности, потери в приемном тракте и других факторов. Существенное влияние на чувствительность инструмента оказывают элементы конструкции, которые приходится размещать в окрестности фокуса главного зеркала. В однозеркальных телескопах — это, прежде всего, облучатели и поддерживающие их структуры, в многозеркальных — вторичное зеркало. Оказываясь на пути падающего потока излучения, эти элементы создают затенение и уменьшают поток энергии, поступающий на приемник. Оптимальные конструкторские решения, обеспечивающие минимальное геометрическое затенение главного зеркала, значительно повышают чувствительность телескопов.

Если говорить о параболических зеркалах, то потери от затенения естественным образом разбиваются на две части: потери в плоской волне на пути от плоскости апертуры до поверхности рефлектора и потери в сферической волне на пути от поверхности рефлектора до фокуса главного зеркала. Коэффициенты затенения плоской и сферической волн определяют долю потока энергии, которая поглощается на пути от апертуры до главного зеркала и от главного зеркала до его фокуса; общий коэффициент затенения определяет потерю потока энергии на пути от апертуры до фокуса главного зеркала.

С геометрической точки зрения определение коэффициентов затенения — простая задача, но технически трудноосуществимая. Ранее предлагавшиеся подходы требовали либо аналитического представления объектов, затеняющих рефлектор [12], либо давали инженерную оценку коэффициентов затенения [13]. Рассматриваемая в настоящей статье технология расчета затенения, основанная на использовании возможностей пакета программ SolidWorks, приводит к точному конструктивному методу решения задачи затенения и не требует трудоемких аналитических представлений. Развиваемый подход используется для

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект, д. 53, 119991, ГСП-1, Москва; e-mail: byjakas@yandex.ru

расчета затенения плоской волны и полного затенения 10-метрового зеркала космического телескопа проекта “Радиоастрон”.

Пакет Solid Works создавался изначально для автоматического проектирования и разработки чертежей с целью подготовки к производству сложных технических изделий и был выполнен в виде интерактивной среды трехмерного моделирования [14]. Постоянно наращивая возможности пакета, разработчики сегодня превратили его в гибкий инструмент для решения широкого спектра инженерных и научно-технических задач механики, геометрии, аэро- и гидродинамики, светотехники, архитектуры и других областей деятельности [15].

Пусть K_1 — коэффициент затенения плоской волны, K_2 — коэффициент затенения сферической волны, K_Σ — общий коэффициент затенения, S_r — общая площадь рефлектора и 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 Ω_1 и Ω_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 нашей 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 все элементы 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 пункта 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

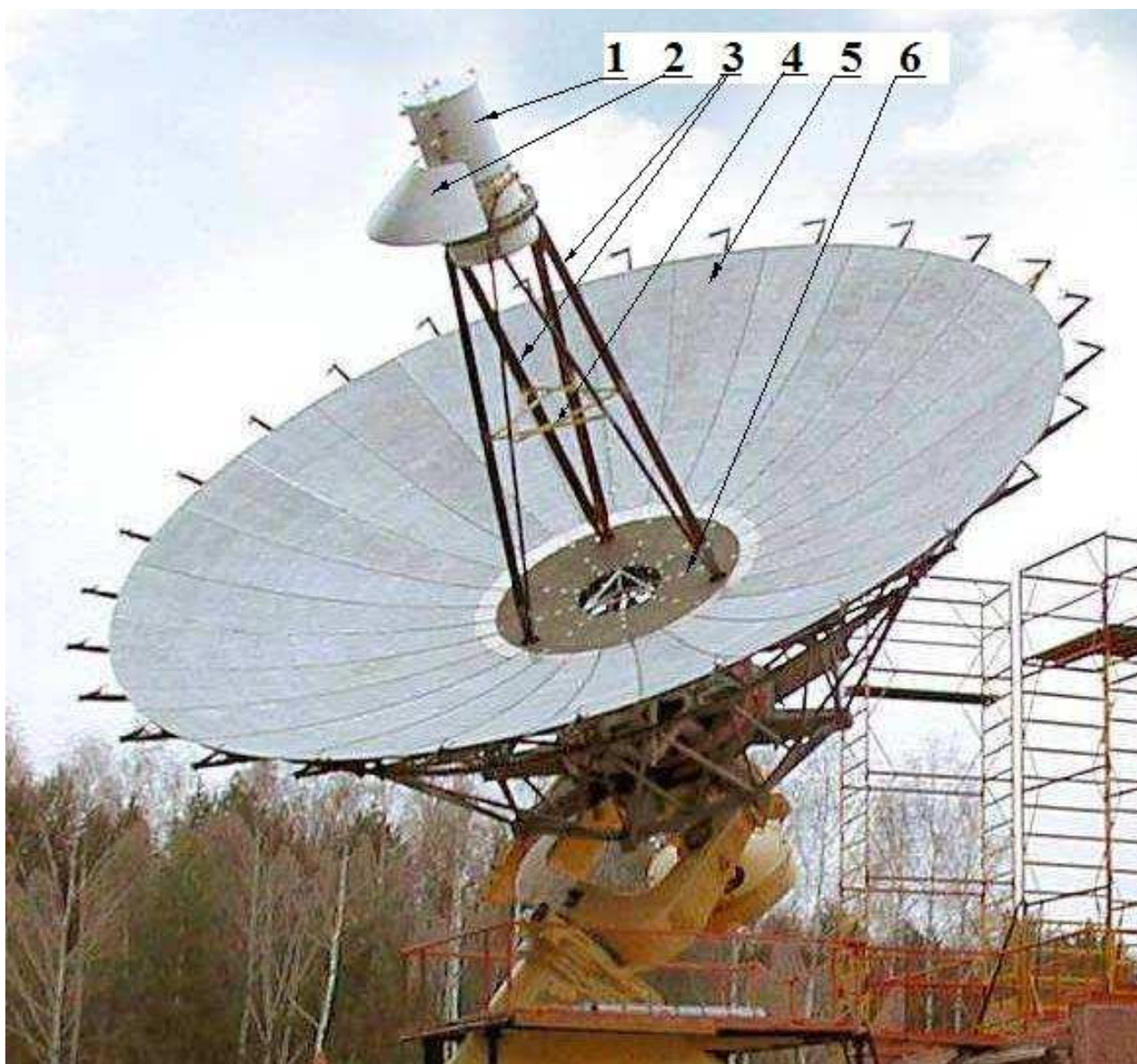


Рис. 1. Зеркало телескопа проекта “Радиоастрон” в раскрытом состоянии. 1 — фокальный контейнер, 2 — радиатор фокального контейнера, 3 — штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью зеркала, 4 — поперечные тяги, соединяющие штанги, 5 — лепестки, 6 — центральное зеркало

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 конусы K_1 и K_2 , которые опираются на границы высеков, построенных в пунктах 3 и 7. На сфе-

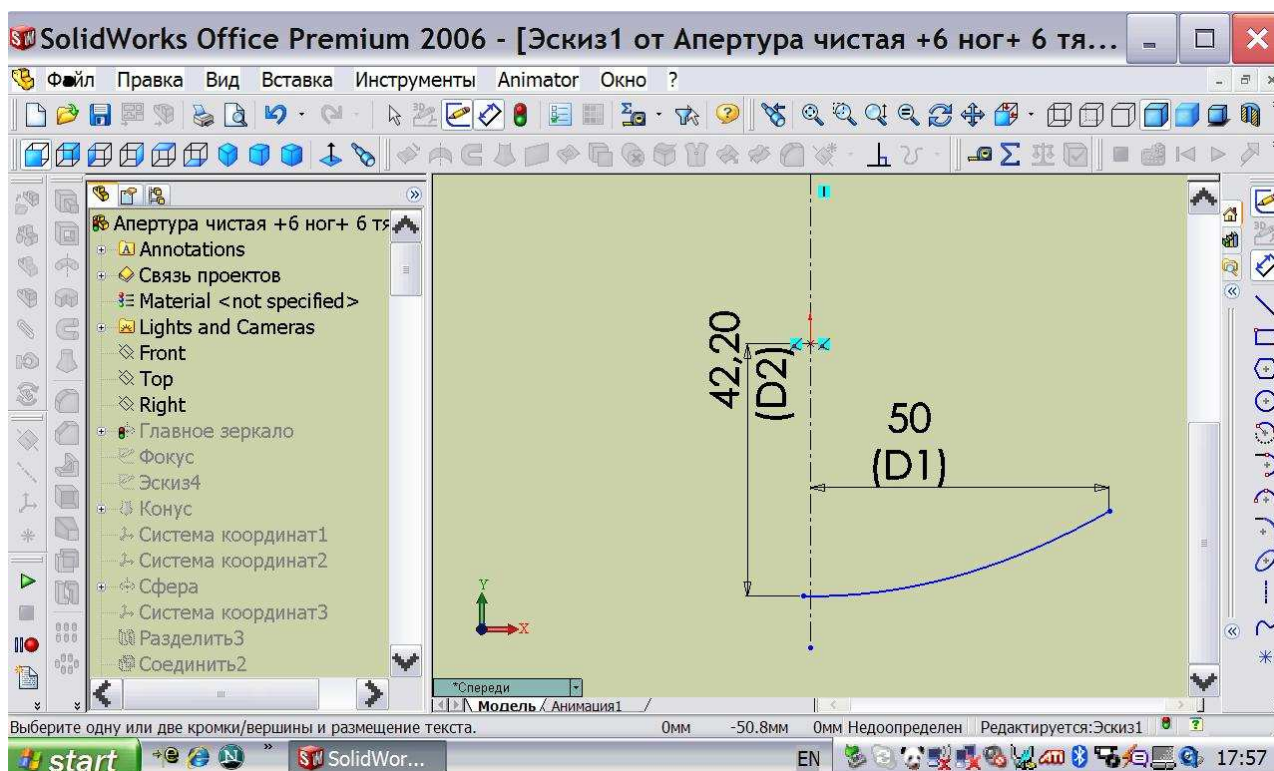


Рис. 2. Построение образующей параболического зеркала и оси вращения

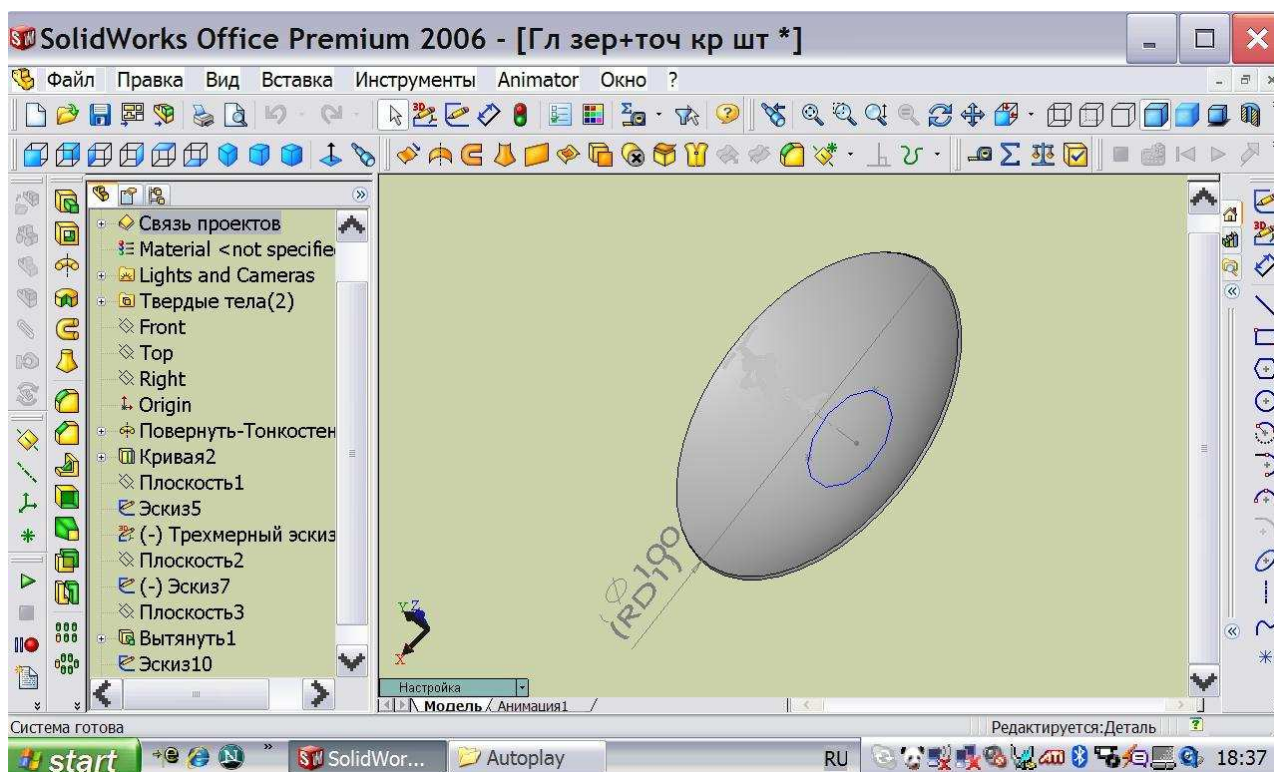


Рис. 3. Построение главного зеркала вращением образующей вокруг оси параболоида

рической поверхности им соответствуют площади S_{s1} и $S_{s\Sigma}$. Тогда для коэффициента затенения плоской волны и полного коэффициента затенения имеем $K_1 = S_{s1}/S_s$ и $K_\Sigma = S_{s\Sigma}/S_s$.

2. Построение 3D-модели антенны радиотелескопа. На рис. 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, шесть опор (штанг), удерживающих фокальный контейнер над поверхностью зеркала, и шесть поперечных тяг фермы рефлектора.

Построение 3D-модели происходит в следующей последовательности.

1. Строятся образующая и ось вращения параболоида (рис. 2).
2. Виртуальная модель рефлектора создается вращением образующей вокруг оси параболоида (рис. 3).
3. Далее последовательно строятся объекты, расположенные на пути плоской и сферической волн (фокальный контейнер, штанги и т.д., рис. 4-8).

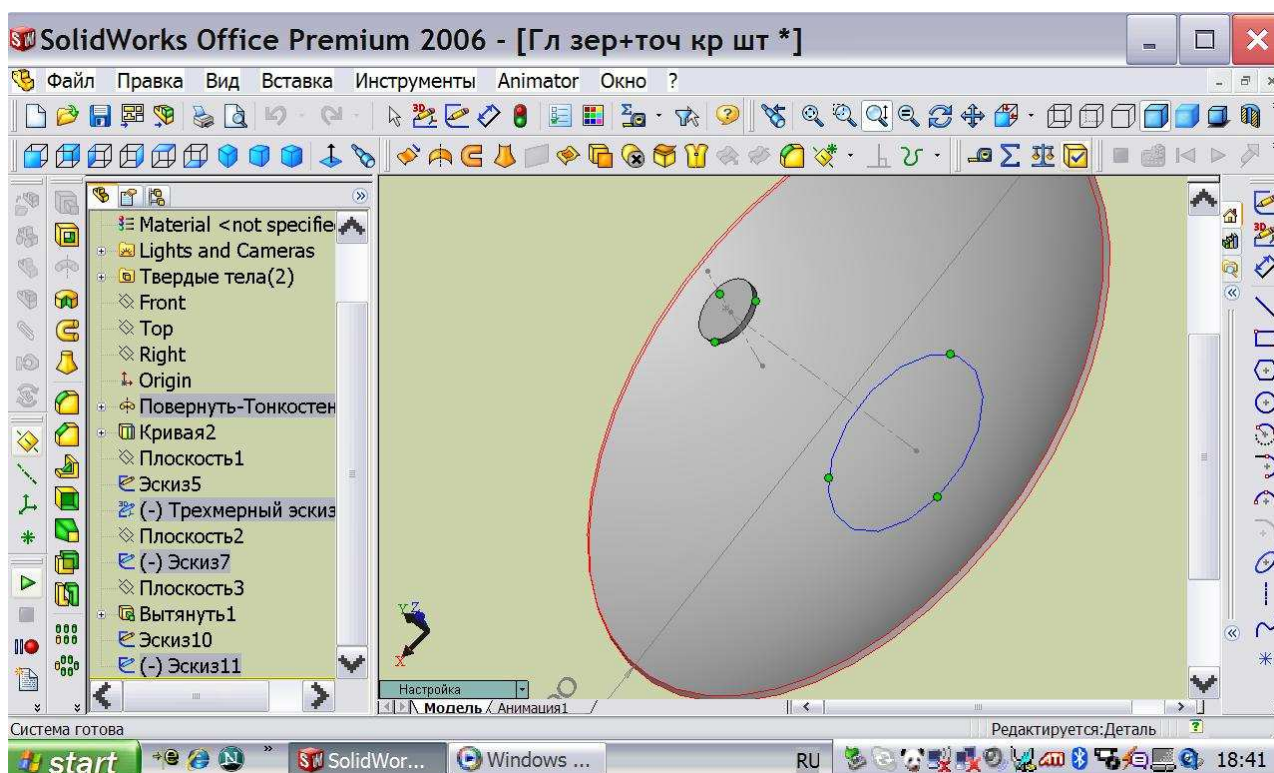


Рис. 4. Разметка точек крепления штанг, удерживающих фокальный контейнер

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, 10).

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

4. Затенение сферической волны. Для определения затенения сферической волны из фокуса центральной проекцией на поверхность рефлектора проектируются объекты, расположенные на пути сферической волны: штанги и поперечные тяги. Тени последовательно высекаются из тонкостенного профиля рефлектора (рис. 11-13).

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 (рис. 14). Диаметр диска равен диаметру рефлектора. Все объекты затенения плоской волны проектируются на плоскость затенения апертурного диска. Затененная часть высекается из тонкостенного профиля апертурного диска.

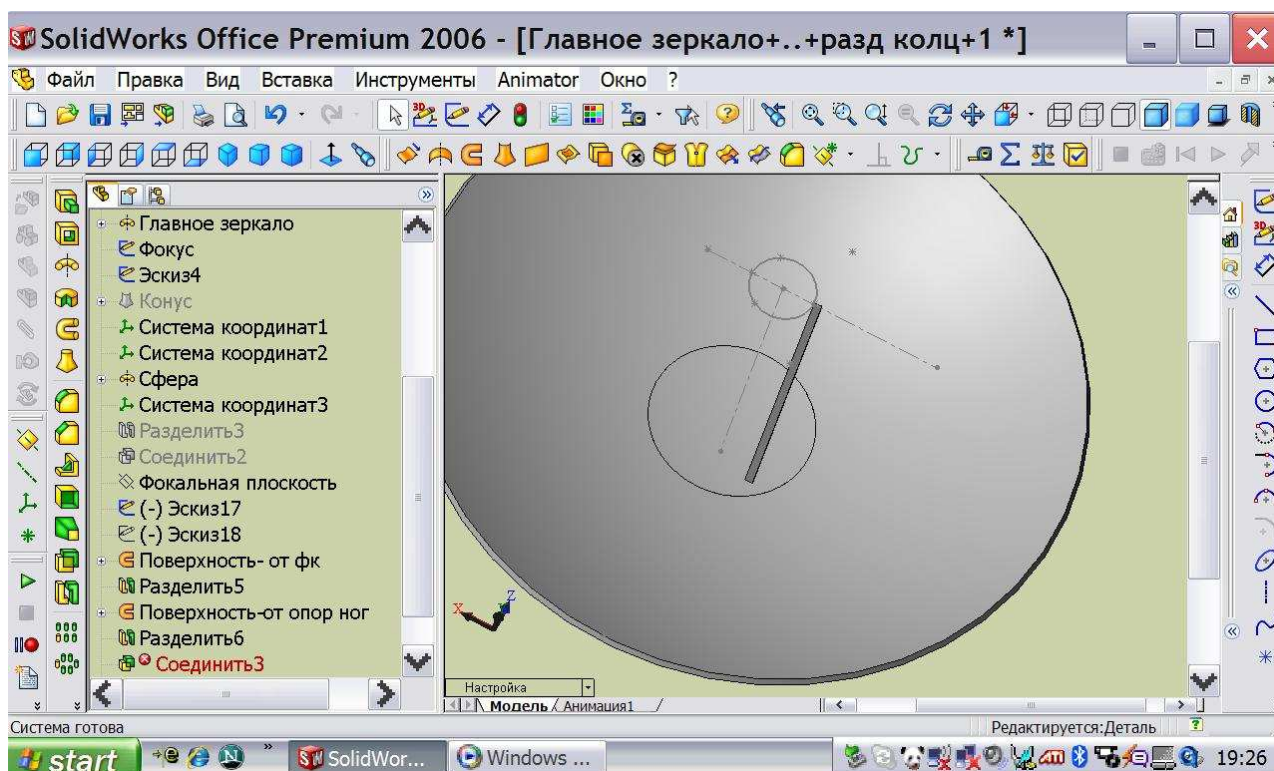


Рис. 5. Размещение первой штанги

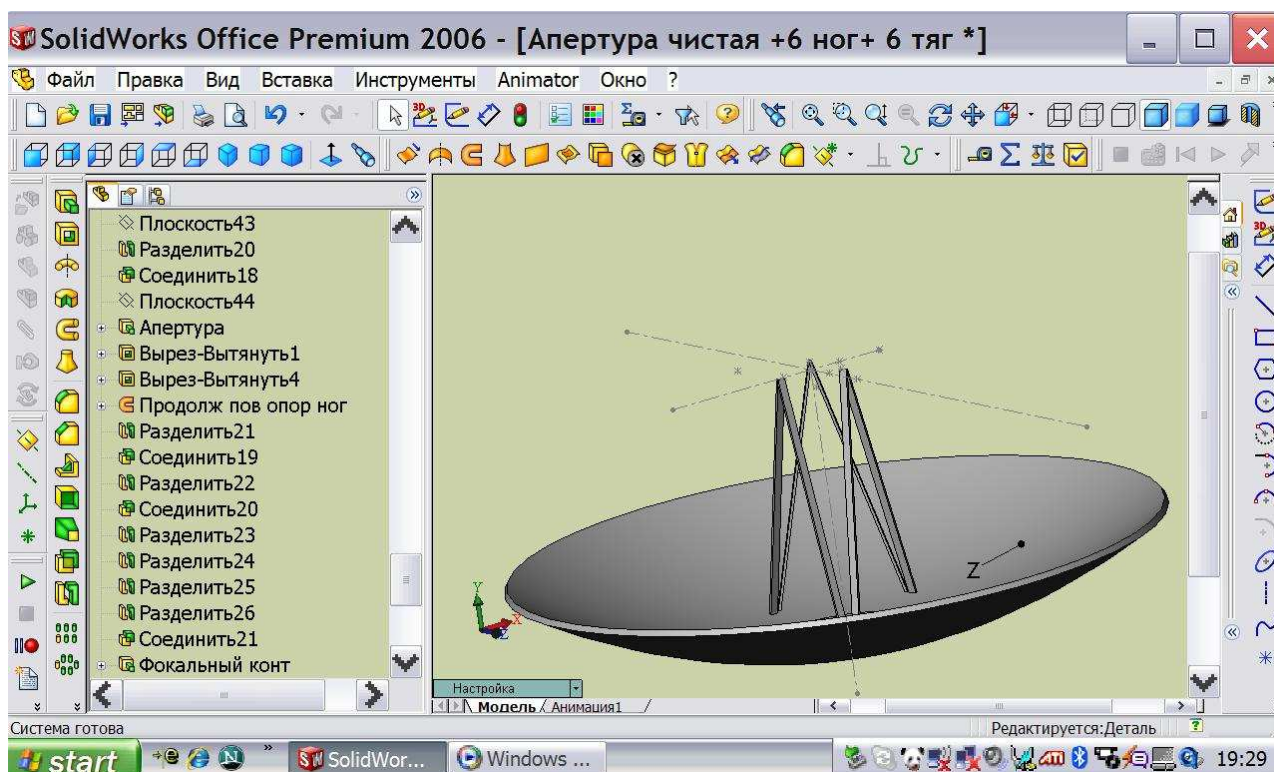


Рис. 6. Размещение остальных штанг

(рис. 15–18).

Далее определяются площадь апертурного диска (рис. 19) и площадь незатененной части апертурного диска (рис. 20). После этого вычисляется коэффициент затенения по плоской волне. Пусть S_a — полная площадь апертурного диска и S_{a1} — площадь незатененной части апертурного диска по плоской волне.

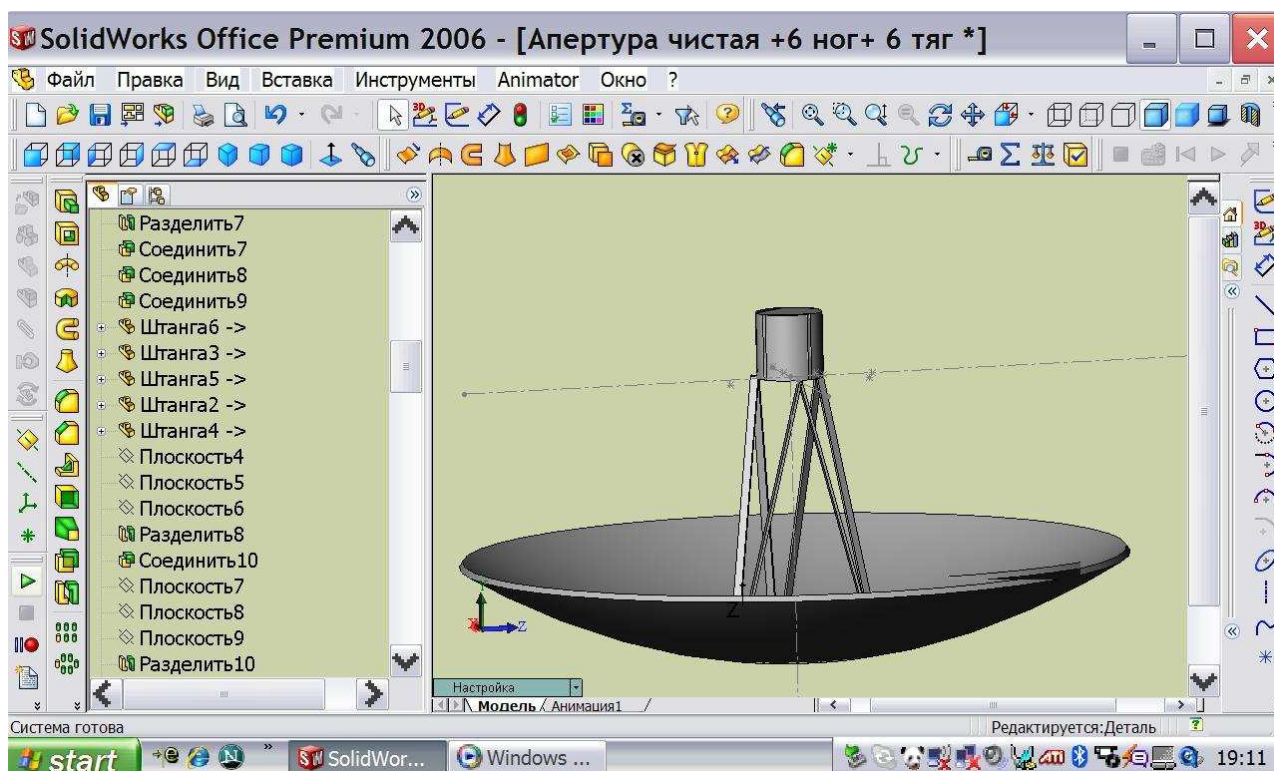


Рис. 7. Размещение фокального контейнера

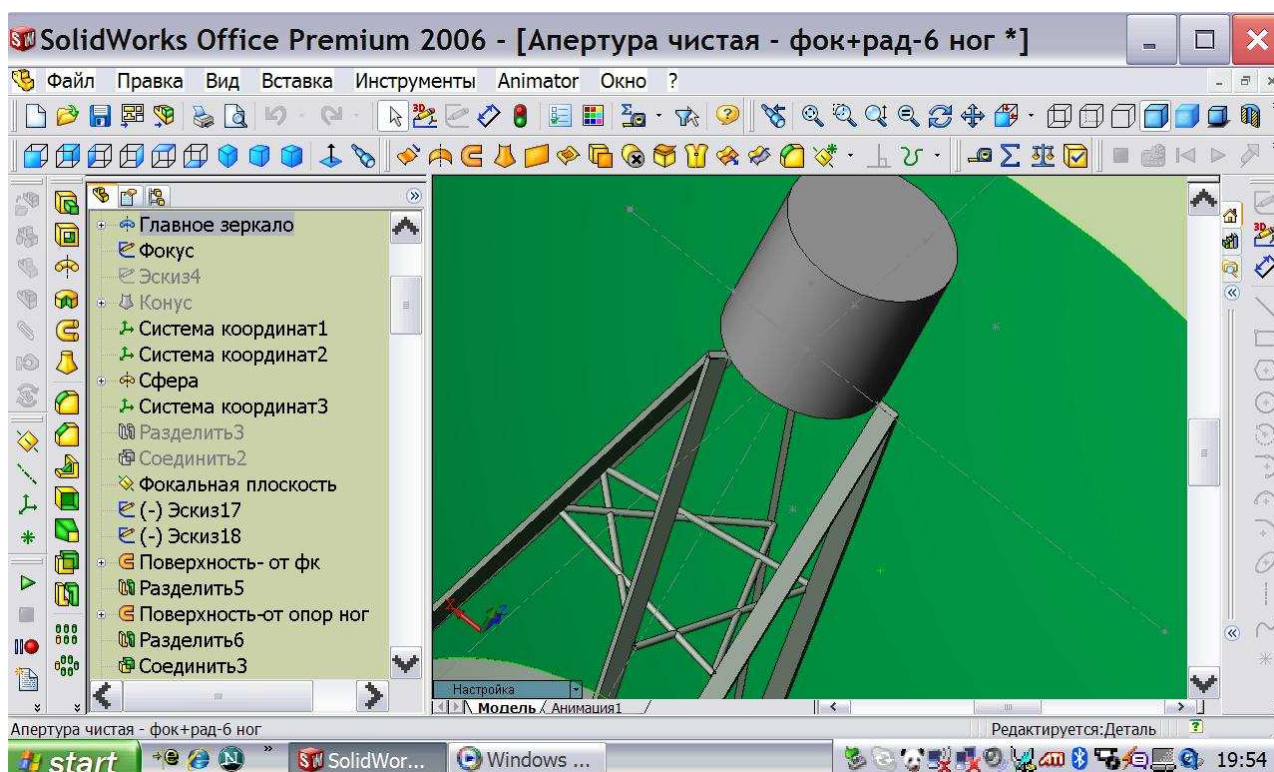


Рис. 8. Размещение поперечных тяг

Из рис. 19 и 20 имеем $S_{a1} = 7604,58$ условных единиц и $S_a = 7853,98$ условных единиц. Отсюда находим коэффициент затенения зеркала проекта “Радиоастрон” по плоской волне: $K_n = \frac{S_a - S_{a1}}{S_a} = 0,0317$. Таким образом, в плоской волне поглощается 3,17% падающего излучения.

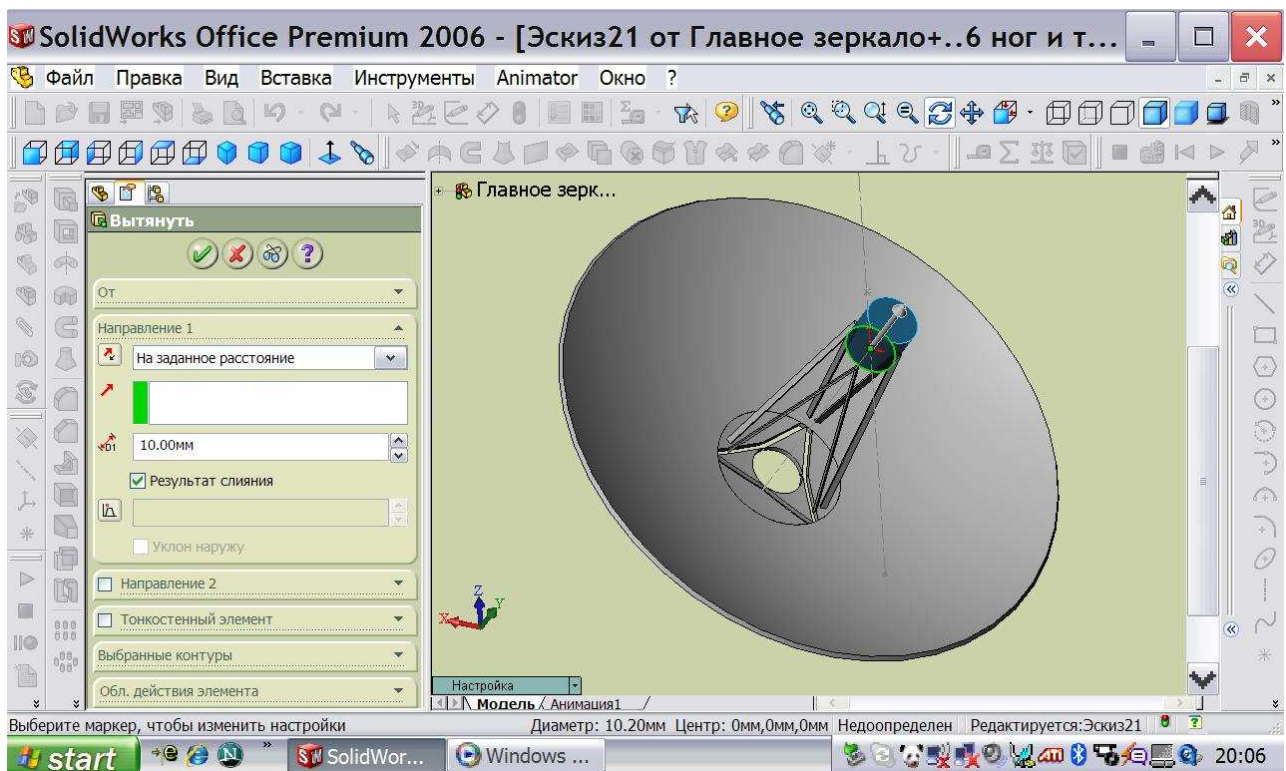


Рис. 9. Формирование тени плоской волны на зеркале от фокального контейнера и штанг и ее высечение

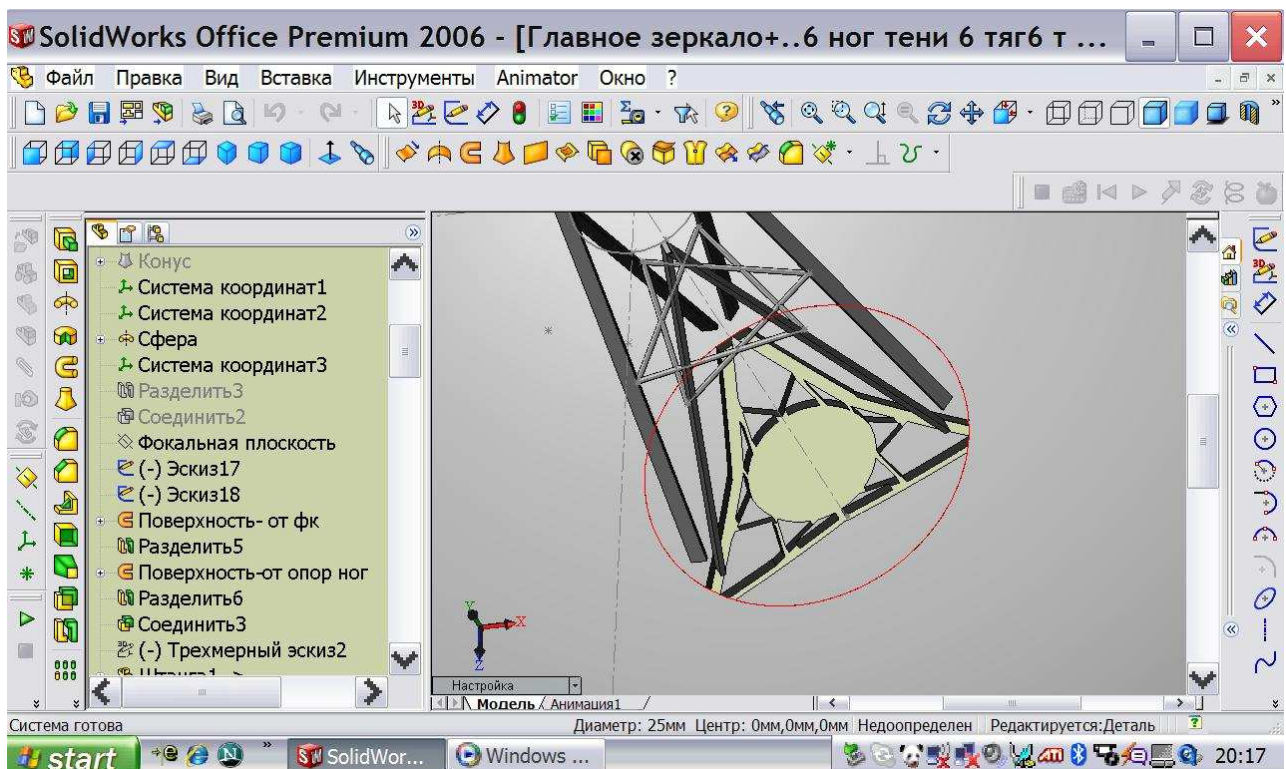


Рис. 10. Формирование тени плоской волны на поверхности рефлектора от поперечных тяг и ее высечение

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 (рис. 21), расположенную между фокусом и рефлектором.

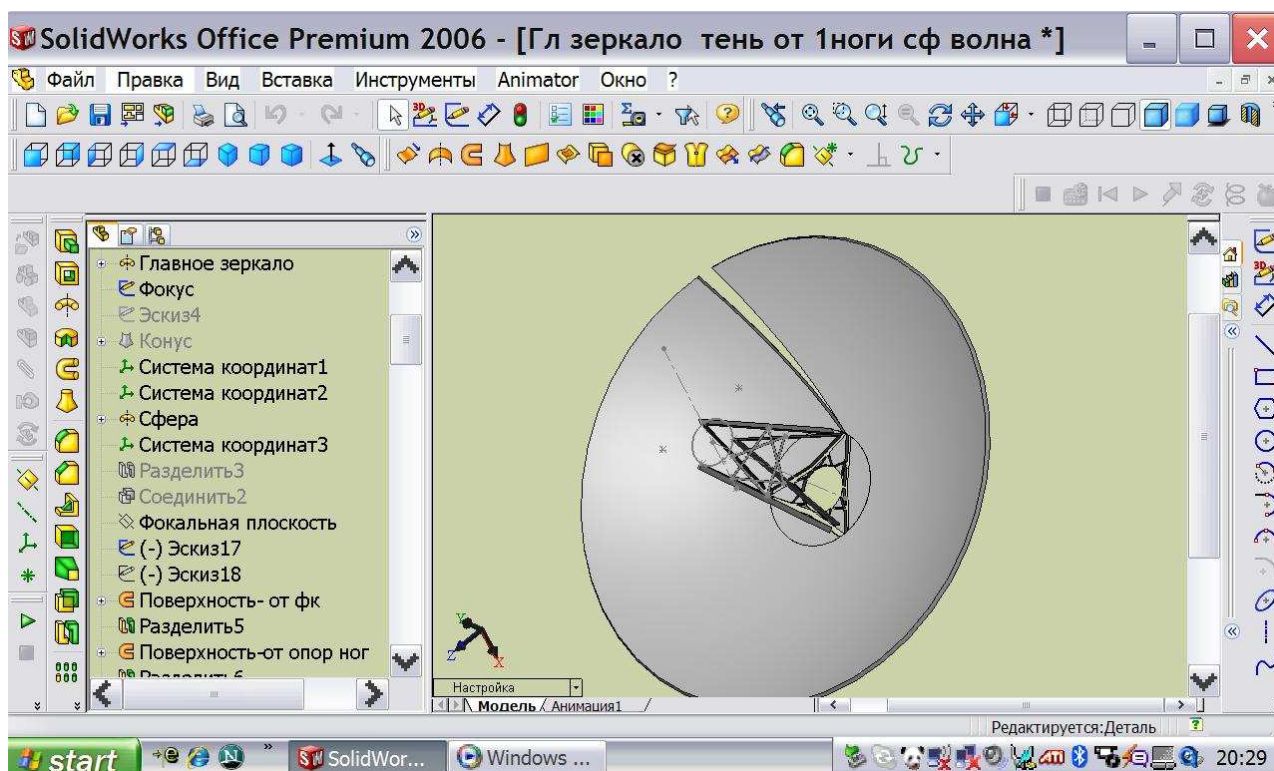


Рис. 11. Тень сферической волны на рефлекторе от одной штанги

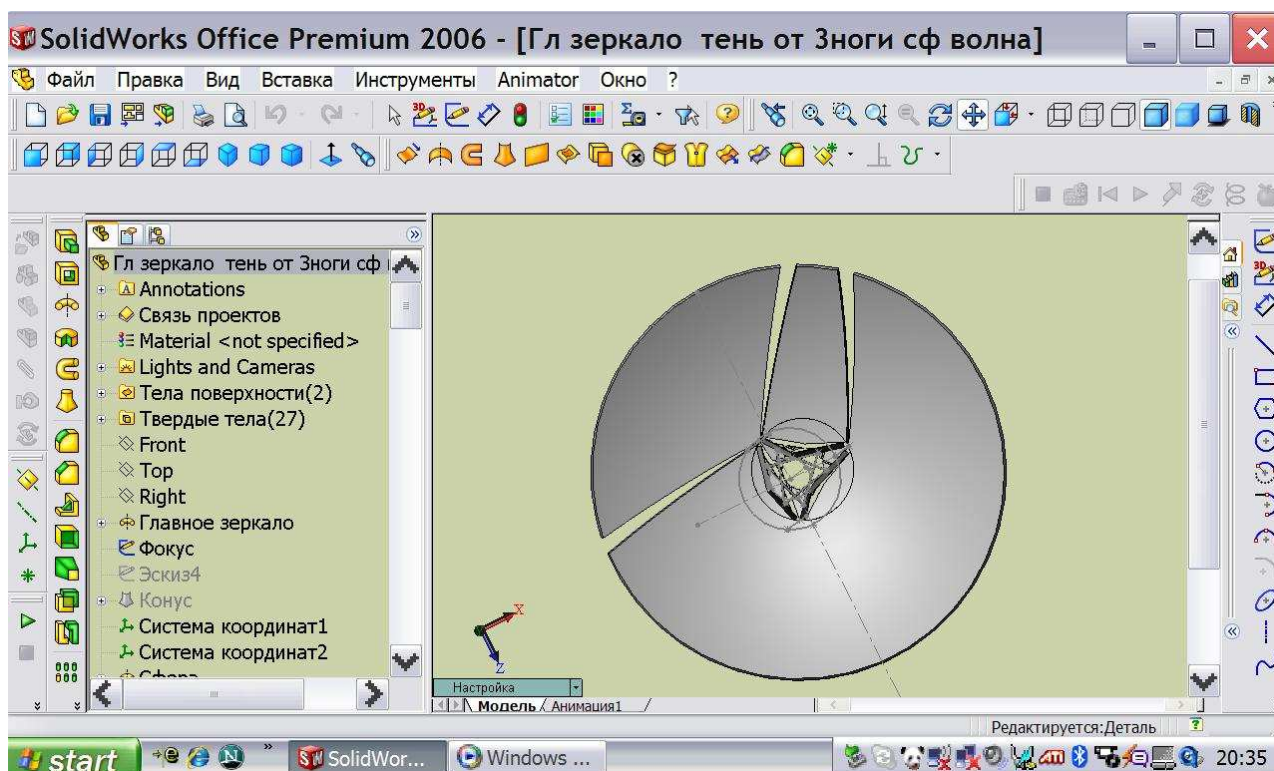


Рис. 12. Тень сферической волны на рефлекторе от трех штанг

Затем построим конус с вершиной в фокусе, опирающийся на внешнюю границу рефлектора (рис. 22).

Отсечем часть сферы, выступающую за границу конуса. Площадь оставшейся части сферы пропорциональна телесному углу, под которым рефлектор виден из фокуса (рис. 23).

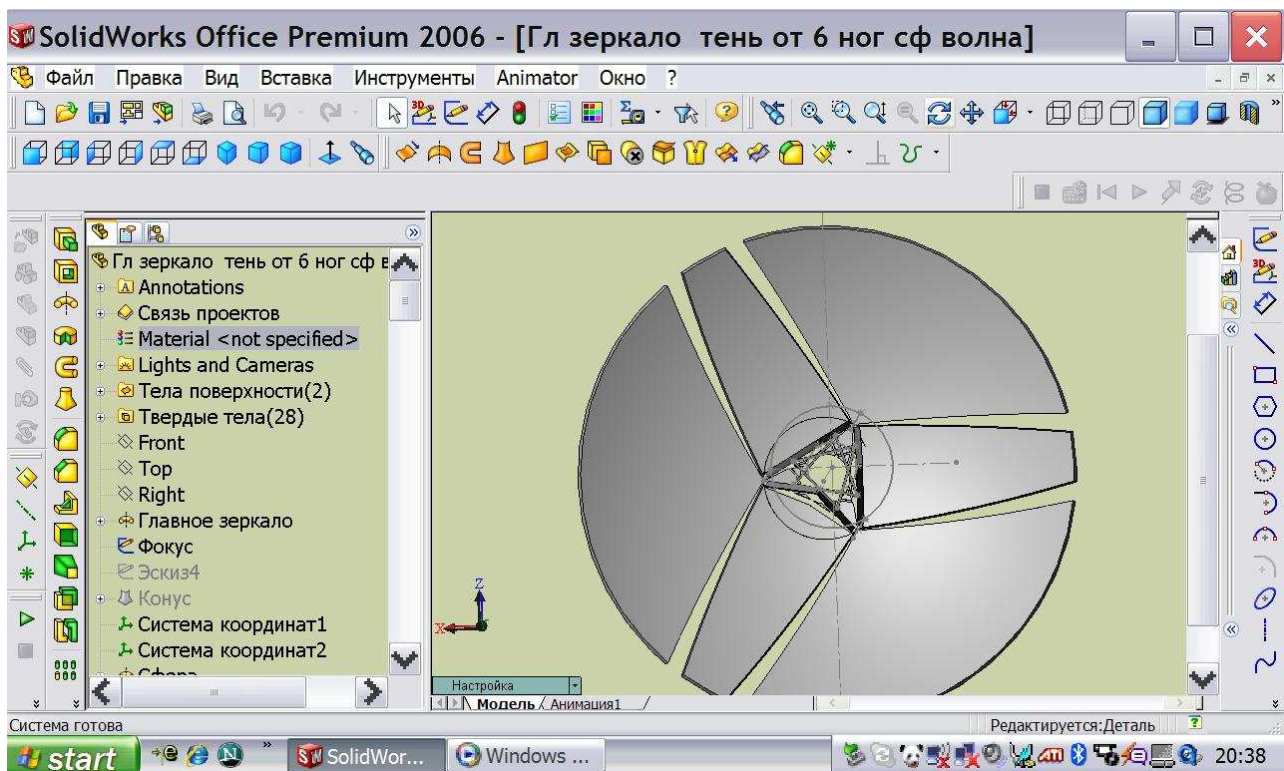


Рис. 13. Тень сферической волны от шести штанг

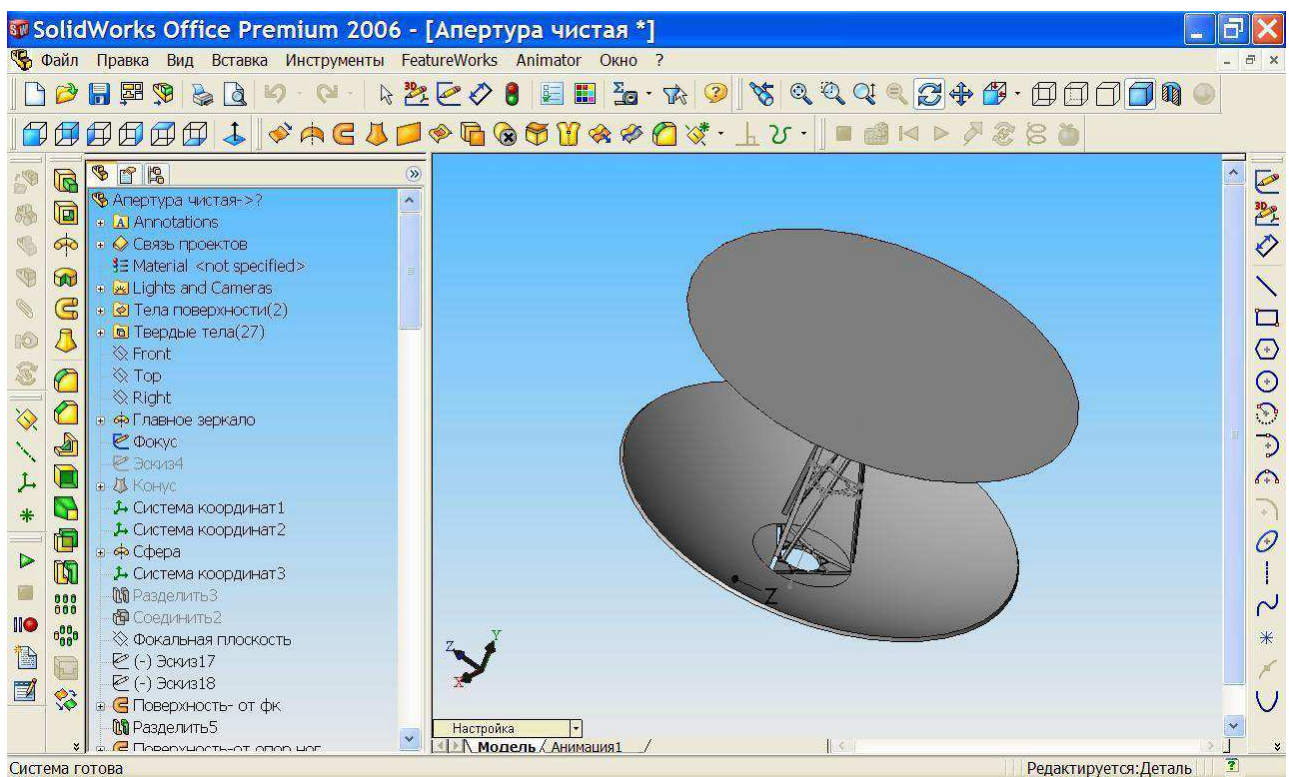


Рис. 14. Создание апертурного диска

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

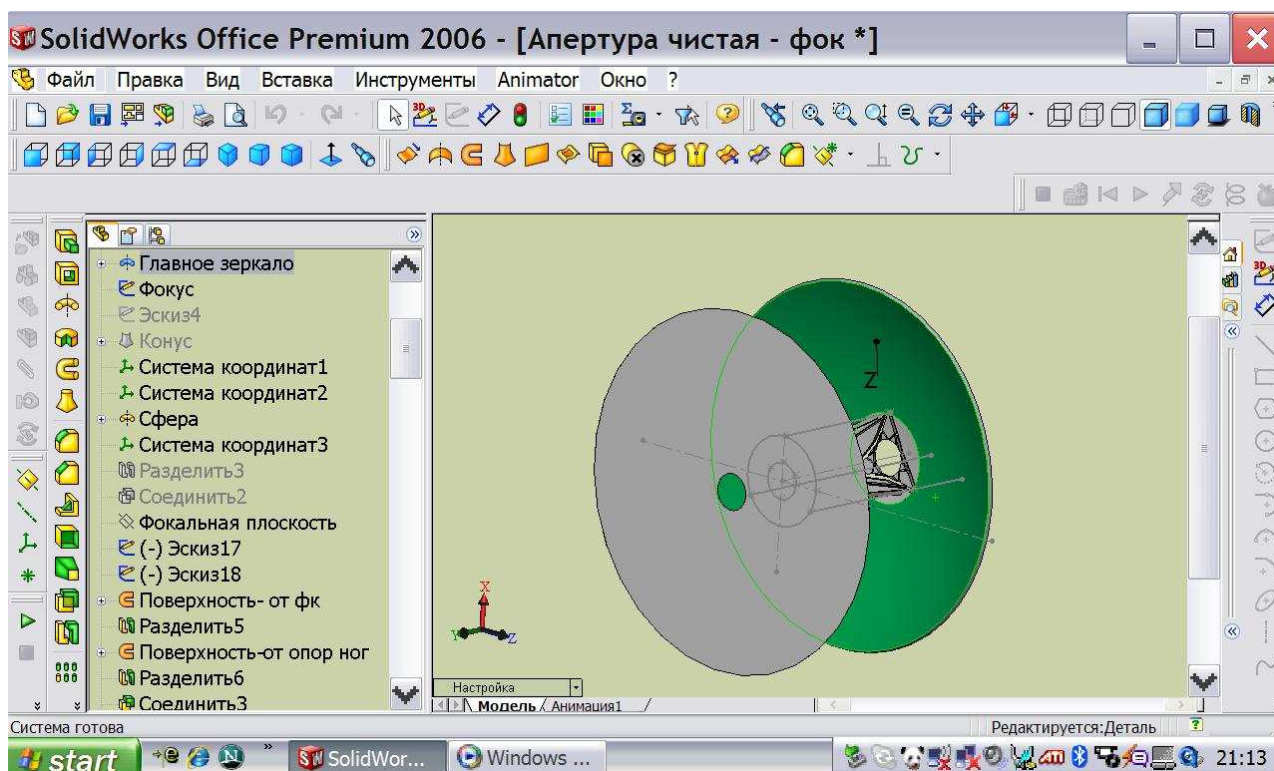


Рис. 15. Высечение тени фокального контейнера из апертурного диска

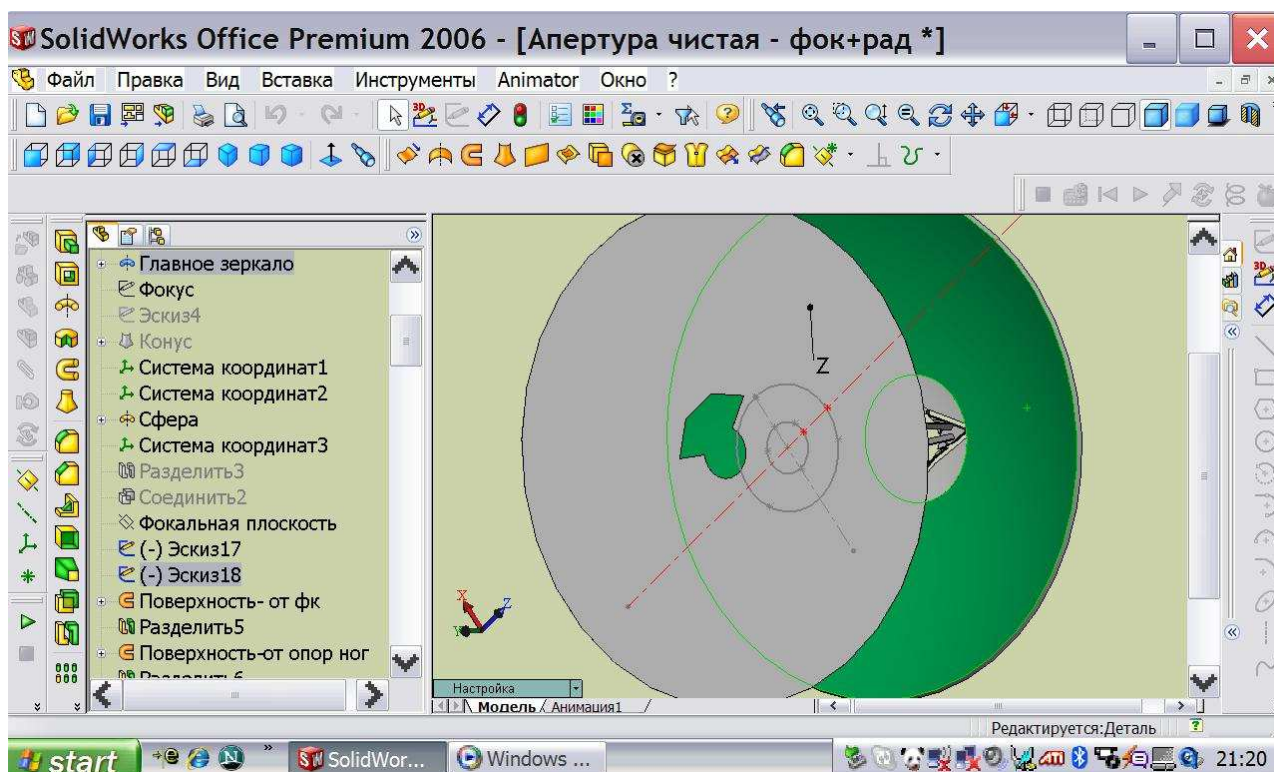


Рис. 16. Высечение тени радиаторов из апертурного диска

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_{s1} оставшейся части сферы (рис. 24). Эта площадь пропорциональна телесному углу,

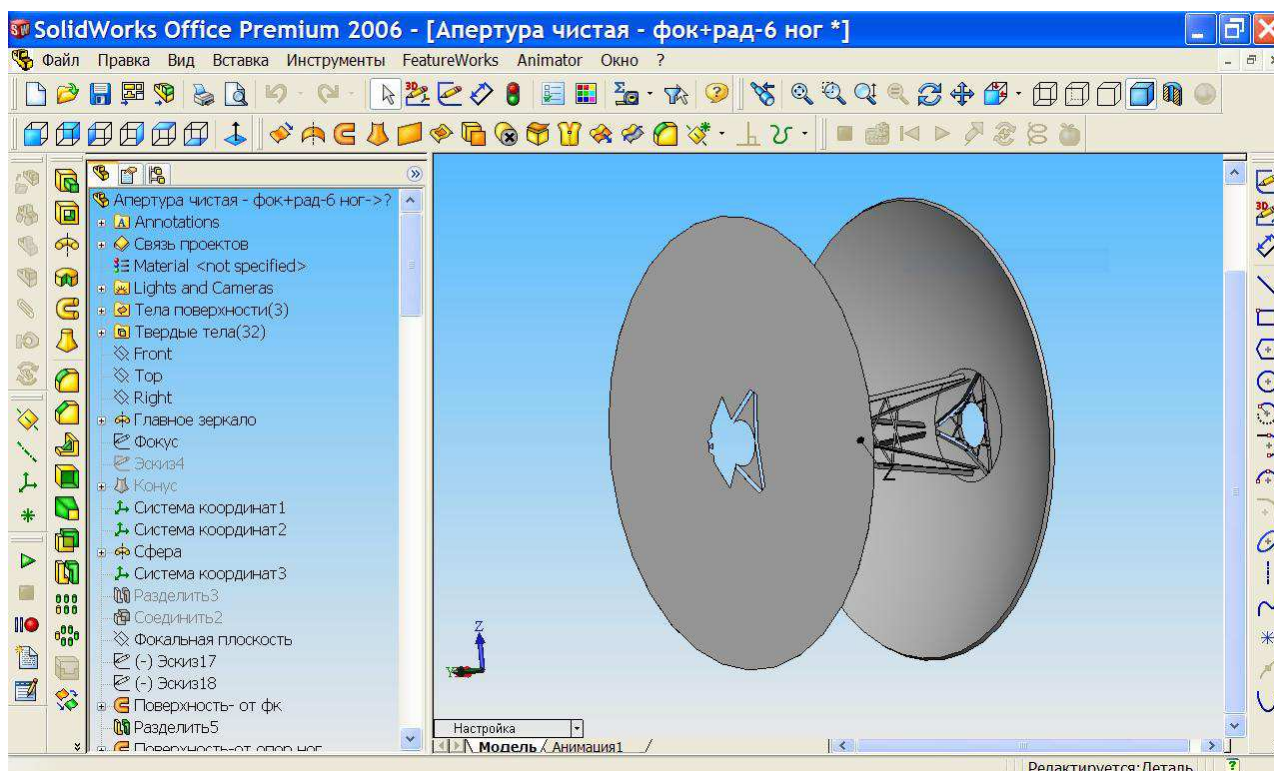


Рис. 17. Высечение тени штанг из апертурного диска

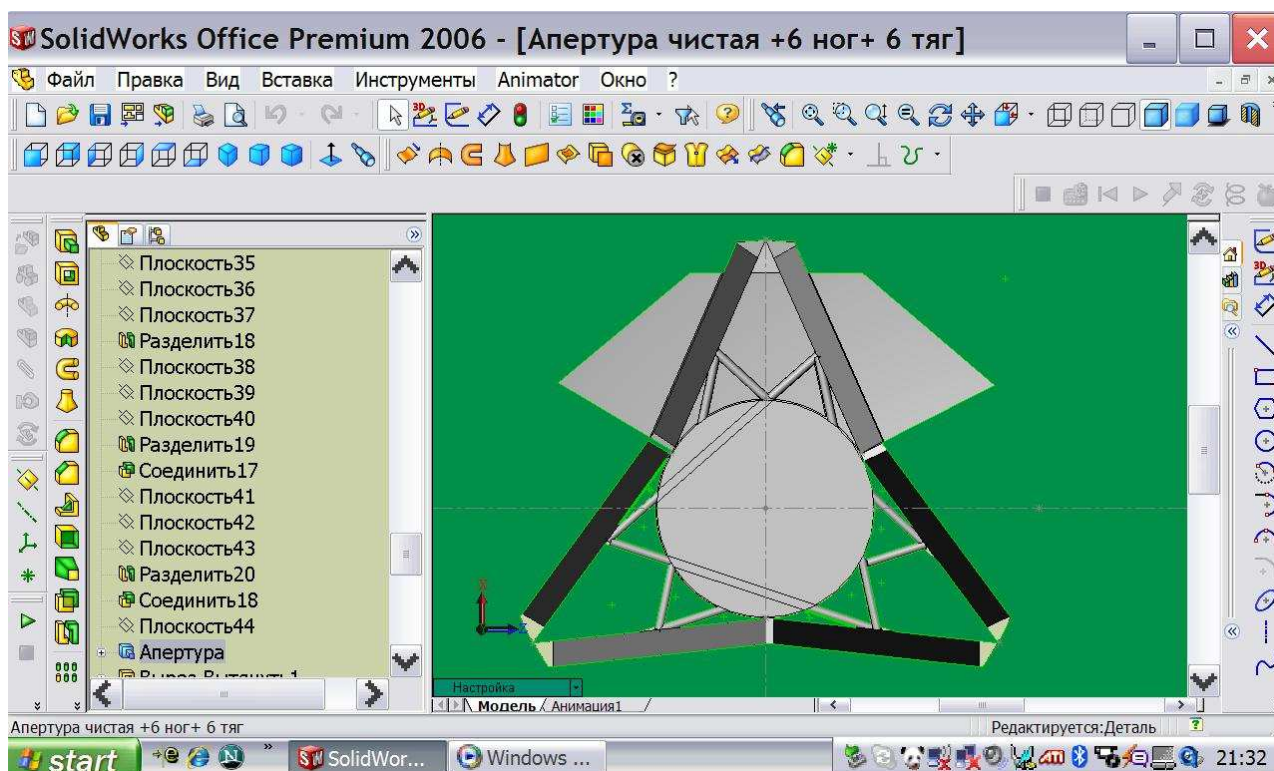


Рис. 18. Высечение из апертурного диска тени от поперечных тяг

под которым тени штанг видны из фокуса.

Из рис. 23, 24 видно, что $S_{s1} = 349,87$ условных единиц и $S_s = 5206,343$ условных единиц.

Потери энергии в сферической волне, вносимые штангами, определяются коэффициентом затенения

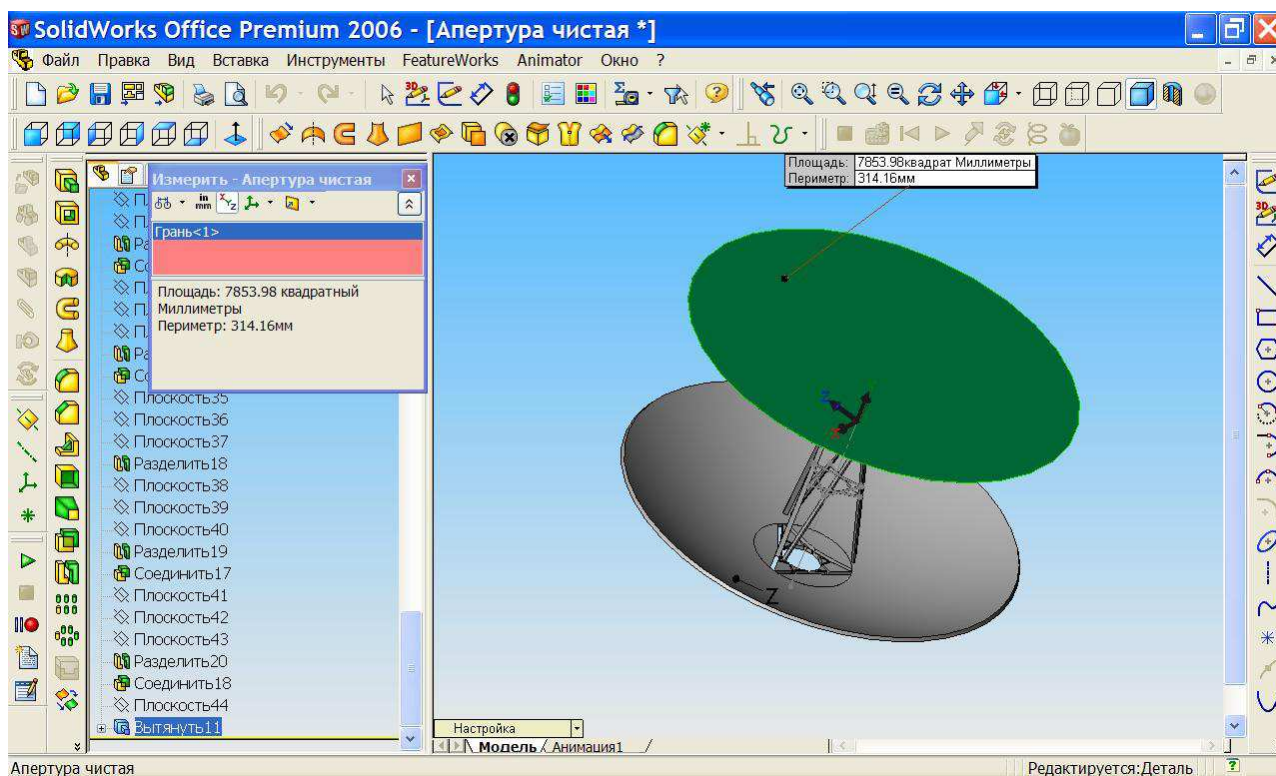


Рис. 19. Вычисление площади апертурного диска

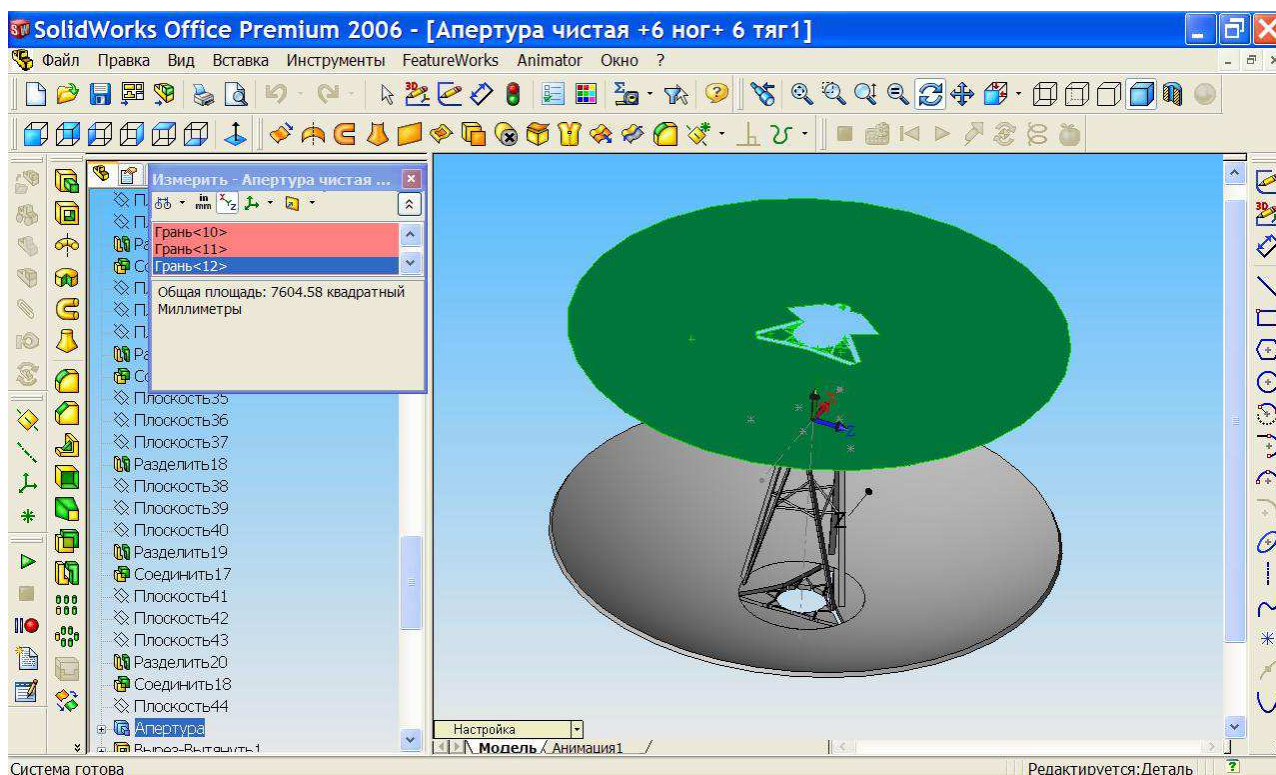


Рис. 20. Вычисление площади незатененной части апертурного диска

$K_{s1}: K_{s1} = \frac{349,87}{5206,34} = 0,0672$. Таким образом, штанги, удерживающие фокальный контейнер над поверхностью рефлектора, поглощая в сферической волне около 6,72 % потока энергии, существенно влияют на качество инструмента.

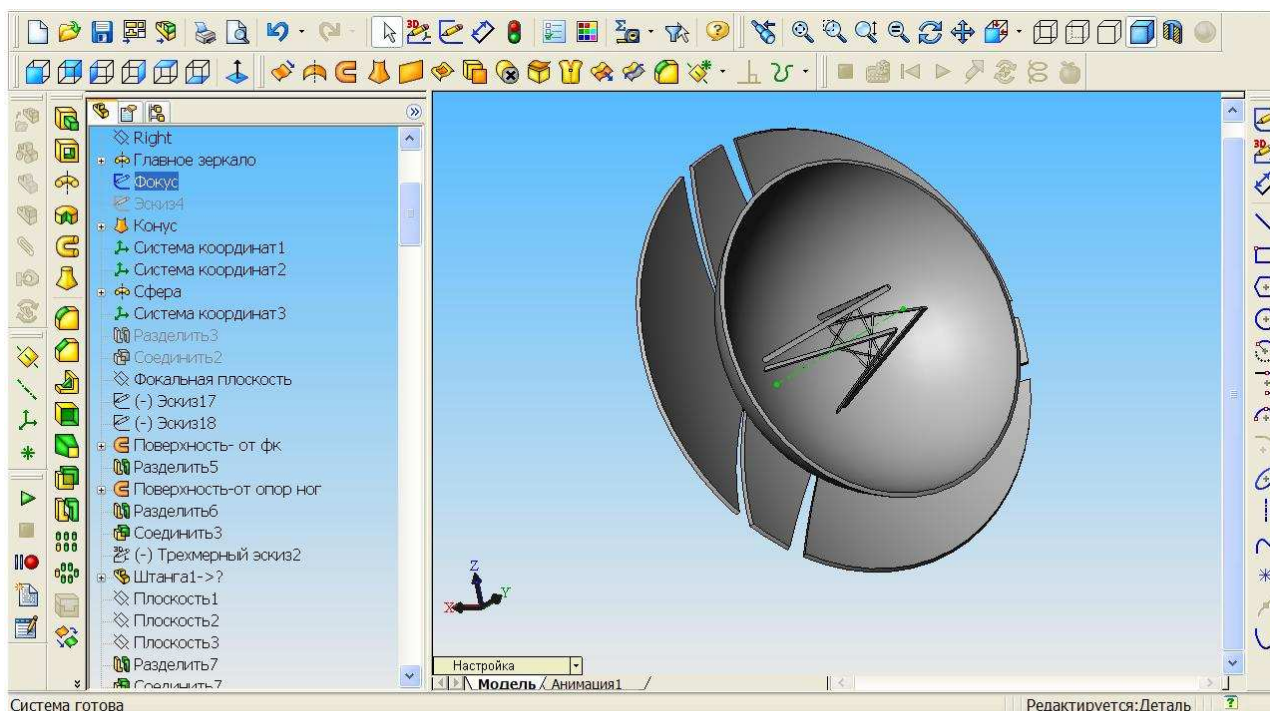


Рис. 21. Построение сферы

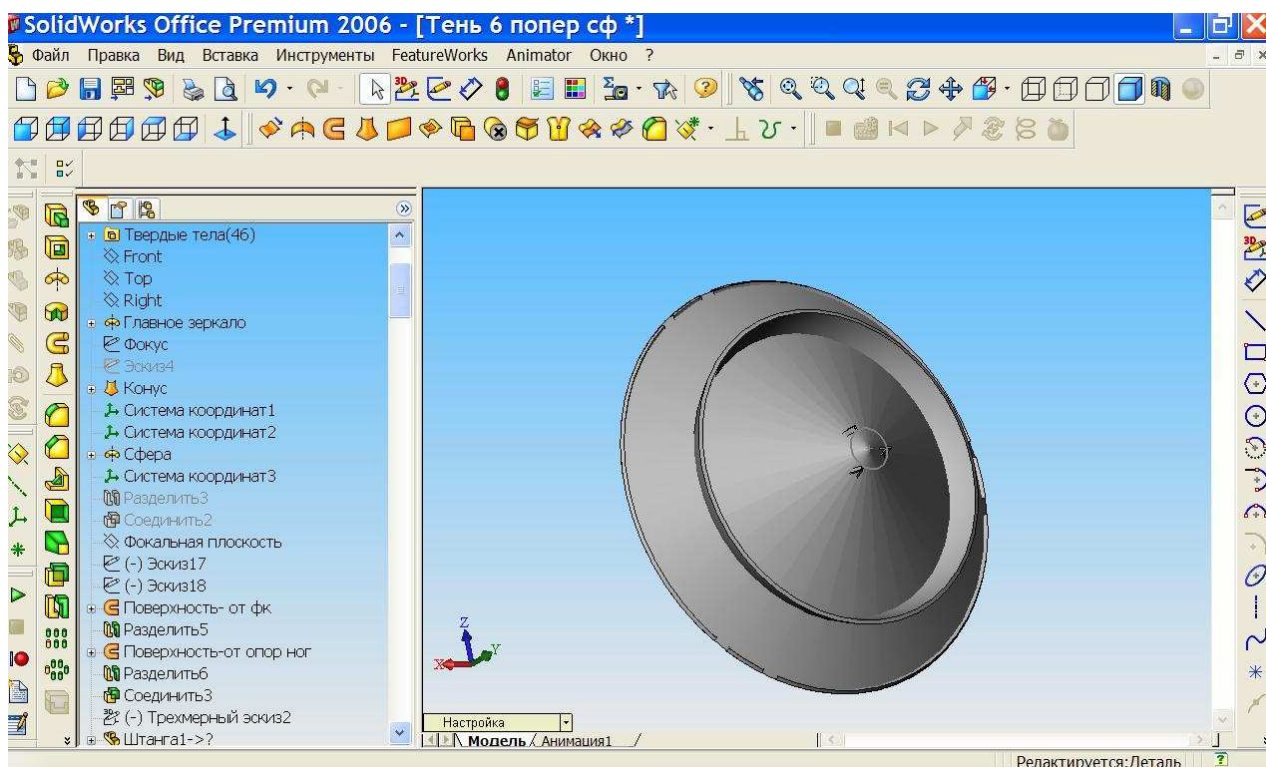


Рис. 22. Построение конуса

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).

Из рис. 19 для общей площади апертуры имеем $S_a = 7853,98$ условных единиц. Из рис. 26 находим

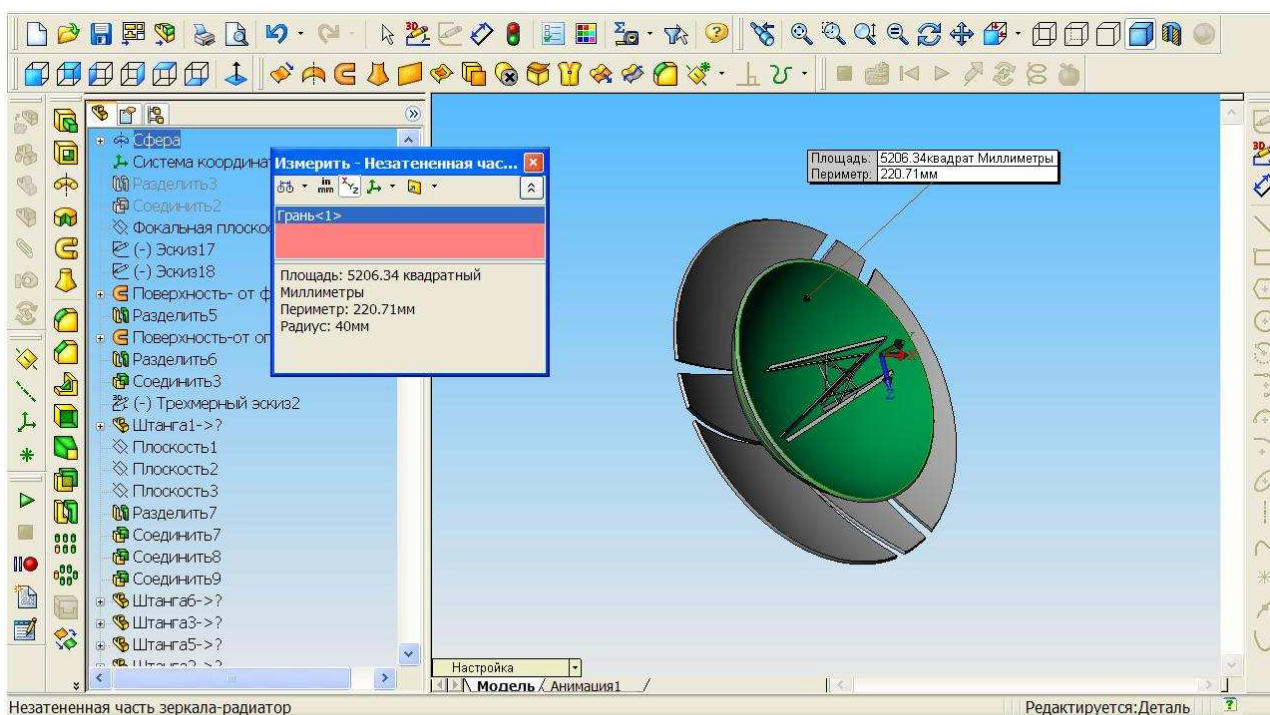


Рис. 23. Отсечение части сферы, выступающей за пределы конуса, и измерение площади оставшейся части сферы

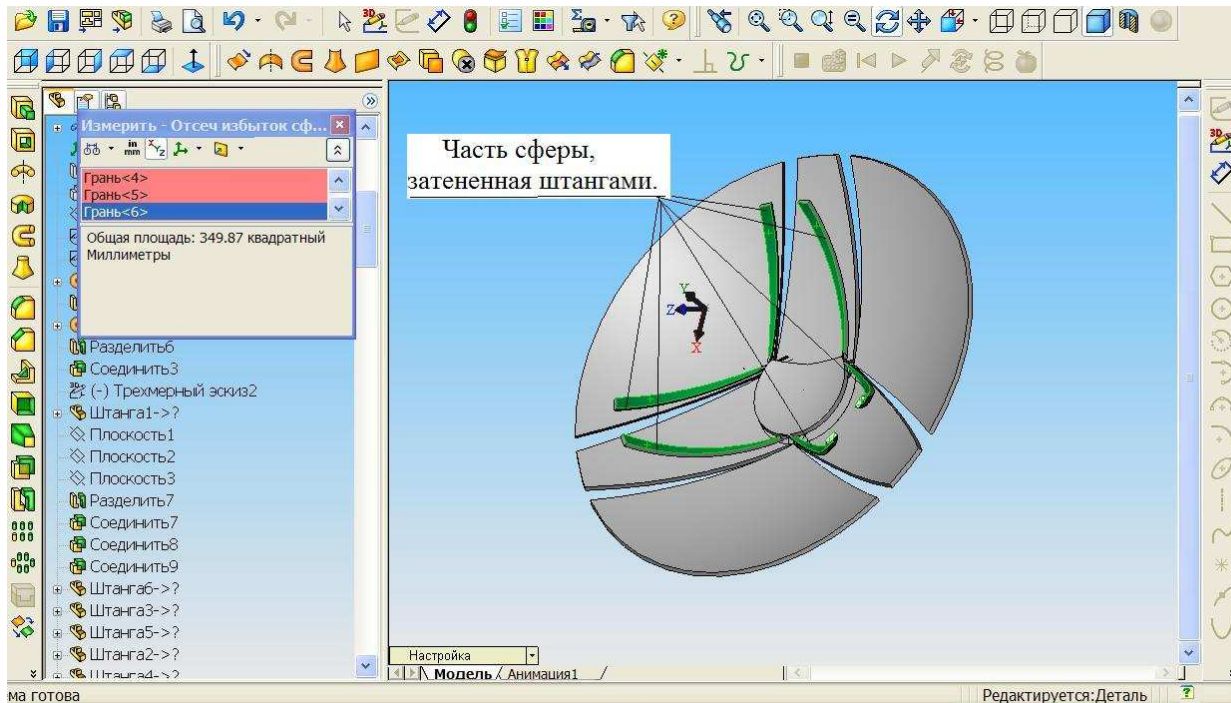


Рис. 24. Проекция на сферу тени от штанг и вычисление ее площади

общую площадь затененной части апертуры $S_{a\Sigma} = 847,45$ условных единиц. Вычисляем общий коэффициент затенения $K_{\Sigma} = \frac{847,45}{7853,98} = 0,1079$. Таким образом, общие потери приемного тракта за счет затенения

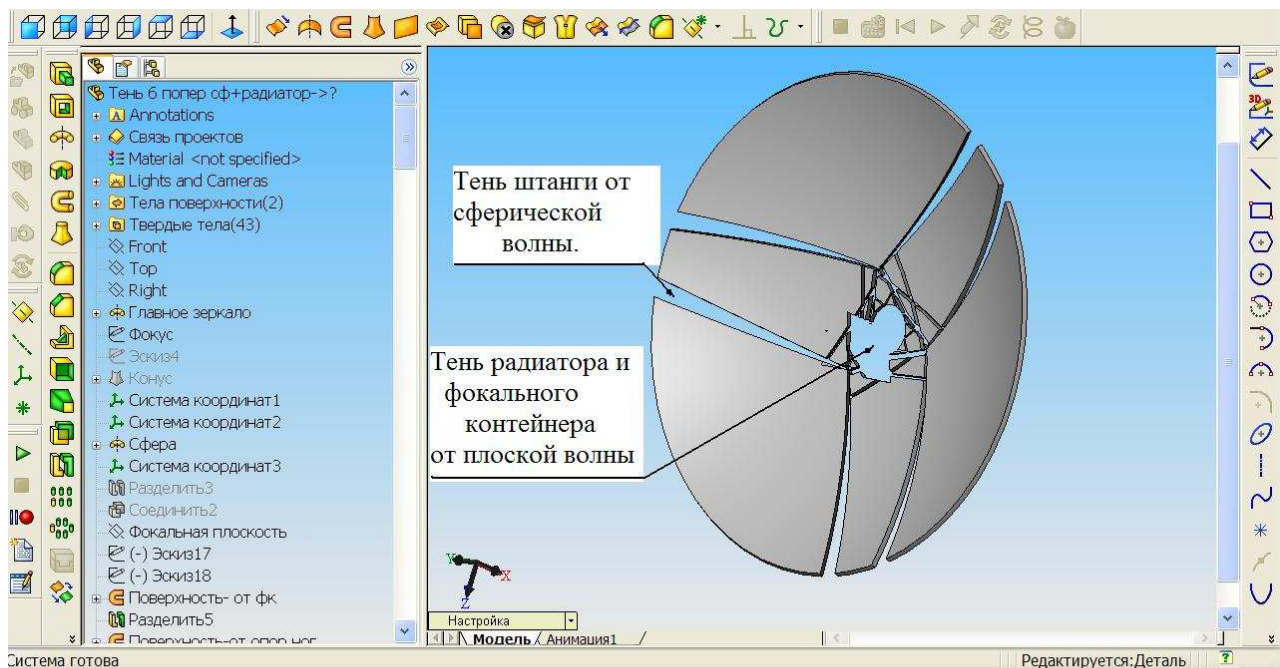


Рис. 25. Незатененная часть рефлектора (отсечены тени плоской и сферической волн)

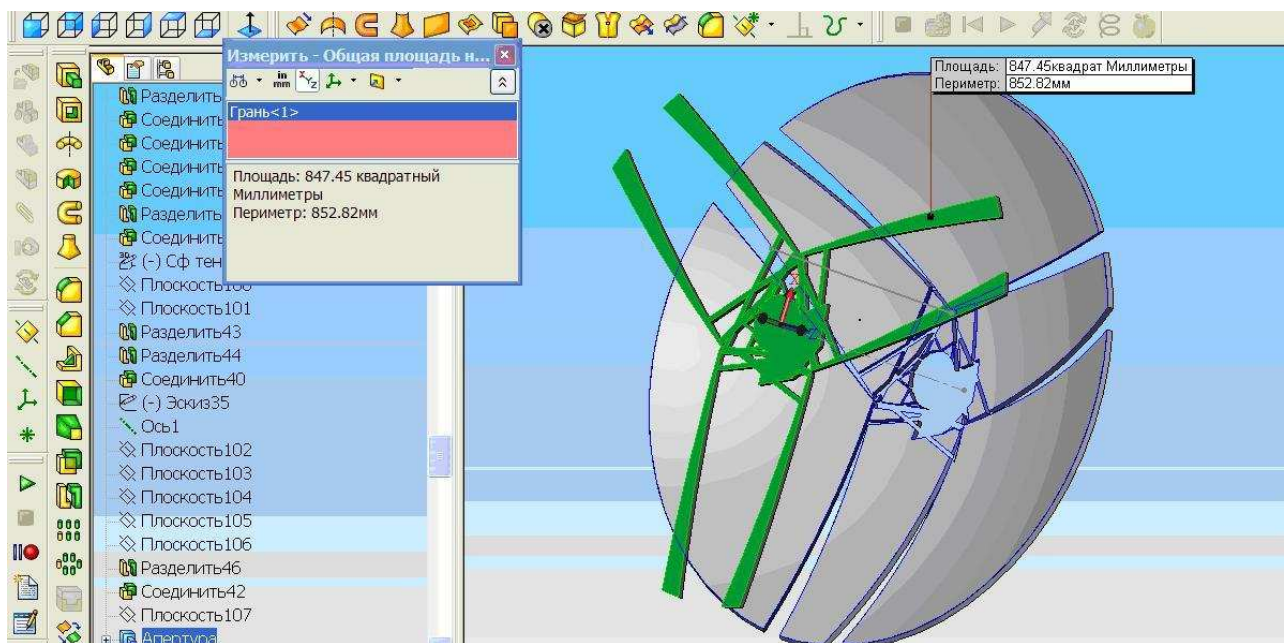


Рис. 26. Проекция общего затенения на плоскость апертуры и вычисление полного коэффициента затенения

составляют 10,8 %. При расчете коэффициентов затенения главного зеркала телескопа проекта “Радио-астрон” 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 x 120 x 40 мм, диаметр поперечных тяг — 40 мм.

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

8. Выводы. Предложена новая технология расчета геометрического затенения главного зеркала

большого радиотелескопа, основанная на использовании возможностей пакета Solid Works. Проведен оценочный расчет коэффициентов затенения рефлектора радиотелескопа проекта “Радиоастрон”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron>
2. *Jewell P.* The Green Bank telescope // NRAO Newsletters. 2003. N 94. 2.
3. *Macilwain C.* Green Bank dish may be last of the giants // Nature. 2000. **406**. 816.
4. <http://www.lmtgtm.org>
5. *Neugebauer G. et al.* The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission // Astrophys. J. 1984. **278**. L1–L6.
6. *Kessler M.F.* The Infrared Space Observatory (ISO) mission // Astron. Astrophys. 1996. **315**. L27–L31.
7. *Hirabayashi H.* First results from VSOP // Proc. of the Int. Astronomical Union Symp. N 184 on the Central Regions of the Galaxy and Galaxies. Kyoto, Japan, 1997.
8. *Kardashev N.S., Slysh V.I.* The Radioastron project // Proc. of the Int. Astronomical Union Symp. N 129 on the Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics. Cambridge: Kluwer, 1987.
9. *Arkhipov M.Yu., Baryshev A.M., Kardashev N.S., et al.* Deployable antennas for space radio telescope: radioastron and millimetron missions // Proc. of the 30th ESA Antenna Workshop. Noordwijk, Netherlands, 2008.
10. <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>
11. *Кардашев Н.С., Андреев В.В., Буякас В.И. и др.* Проект “Миллиметрон” // Тр. Физического ин-та им. П.Н. Лебедева. 2000. **228**. 112–128.
12. *Саятин С.Н., Соколов С.П. и др.* Проектирование опорной системы трансформируемых антенн лепесткового типа на примере антенны космического радиотелескопа “Радиоастрон”. Препринт Пр-1617 ИКИ РАН. М., 1989.
13. *Федорчук С.Д.* Определение оптического затенения рефлектора элементами конструкции КРТ по результатам макетирования. Научно-техн. отчет АМ1.50.00.21 Астрокосмического Центра ФИАН РАН. М., 2007.
14. *Planchard D.C., Planchard M.P.* Assembly modeling with SolidWorks. Mission: Schroff Development Corp., 2006.
15. *Алямовский А.А., Собакин А.А., Одинцов Е.В. и др.* Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

Поступила в редакцию
03.07.2008
