

В. В. Леонов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с математическим моделированием формы и радиационных характеристик отражающей поверхности крупногабаритной зеркальной концентрирующей системы, работающей в составе высокотемпературной солнечной энергоустановки космического назначения. Основное внимание уделено определению энергетических характеристик таких систем с учетом дефектов отражающей поверхности.

E-mail: lv-05@mail.ru

Ключевые слова: солнечная энергетика, зеркальные концентрирующие системы, надувные отверждаемые конструкции.

Высокотемпературные солнечные энергоустановки (ВТСЭУ) предназначены для обеспечения космического аппарата (корабля, станции) тепловой энергией за счет приема и обработки энергии солнечного излучения с получением в рабочей зоне высоких температур [1]. Далее эта энергия может использоваться как непосредственно, например, в солнечных ракетных двигателях или плавильных системах, так и для генерации электроэнергии.

Солнечные лучи падают на поверхность космического аппарата в пределах малого телесного угла, определяемого радиусом Солнца и расстоянием до него, поэтому плотность потока солнечного излучения относительно невысока. Например, для орбиты Земли плотность солнечного излучения составляет $\sim 1380 \text{ Вт/м}^2$ при телесном угле $7 \cdot 10^{-5}$ ср [2]. Для получения в рабочей зоне высоких температур необходимо повысить плотность результирующего потока излучения. Этого можно добиться, изменив ход лучей таким образом, чтобы они приходили на приемную поверхность в пределах достаточно большого телесного угла, в результате чего, как следствие инвариантности яркости [2], плотность сконцентрированного потока будет во много раз больше плотности падающего излучения.

Сконцентрировать солнечное излучение можно с помощью линзовых и зеркальных концентрирующих систем (ЗКС) [1, 2]. Линзовые концентрирующие системы по сравнению с ЗКС характеризуются большей удельной массой и стоимостью, а также сложнее в изготовлении и эксплуатации. Хотя и существуют проекты создания космических аппаратов с применением линзовых концентрирующих

систем [3], но в целом они пока не нашли широкого применения в ВТСЭУ как наземного, так и космического базирования.

В задачах, связанных с проектированием как непосредственно ЗКС, так и образуемой ею совместно с приемником солнечной энергии системы концентратор–приемник (СКП), в первую очередь, интерес представляют энергетические характеристики сконцентрированного излучения [1, 2], а именно распределение тепловых потоков и температур по поверхности элементов системы.

Экспериментальное определение радиационных характеристик или точностных параметров поверхностей элементов СКП, а особенно крупногабаритных сверхлегких надувных ЗКС, требует проведения сложных экспериментов [2], имеющих значительные ограничения на интерпретацию результатов (зависимость от расстояния до Солнца, спектра излучения), а также ограничения, накладываемые вследствие больших габаритных размеров конструкции и наличия силы тяжести [2]. Поэтому особый интерес представляет разработка математической модели, позволяющей рассчитывать характеристики сложных зеркальных систем с учетом влияния условий эксплуатации, конструктивных особенностей, шероховатости и других дефектов поверхности.

Основные принципы построения ЗКС для ВТСЭУ. По числу отражающих элементов оптические схемы ЗКС подразделяются на одно- и многозеркальные [2]. Однозеркальные системы представляют собой конструктивно единую отражающую поверхность, имеют максимально возможные энергетические характеристики как по мощности, так и по концентрации лучистых потоков вследствие однократного отражения. Многозеркальные системы подразделяются на системы с однократным отражением, когда система плоских зеркал (фасет) образует единую отражательную поверхность, и системы с многократным отражением, применяемые для решения различных специальных задач [1, 2], например, вынос фокальной области за пределы зеркал или доконцентрации. Недостатками многозеркальных систем являются потеря мощности, обусловленная числом отражающих поверхностей, и более низкие по сравнению с однозеркальными системами точностные характеристики.

Создание ВТСЭУ большой мощности (~ 1 МВт и более) требует создания крупногабаритных ЗКС, размеры которых значительно превышают габаритные размеры транспортных отсеков существующих ракетносителей. Реализация подобных конструкций в космосе возможна принципиально двумя способами: 1) сборка (производство) из привезенных элементов или материалов; 2) развертывание (раскрытие) конструкции из транспортного положения в рабочее.

Первый способ, как правило, применяется при создании фасетных зеркал произвольной геометрии из профилированных или плоских элементов. Такие конструкции обеспечивают высокую точность

как отдельных facets, так и их ансамбля, но характеризуются относительно высокой удельной массой.

Реализацию второго способа можно обеспечить применением многозвенных (стержневых, лепестковых, зонтичных), бескаркасных (роторных) и надувных конструкций [4]. Применение многозвенных систем при создании конструкций, в которых габаритные размеры в рабочем положении в несколько раз превышают габаритные размеры в транспортном положении приводит к снижению их надежности из-за большого числа подвижных элементов. Роторные конструкции лучше всего подходят для создания плоских поверхностей отражателей и солнечных парусов. Использование надувных конструкций позволяет получить ЗКС, имеющую достаточно высокие точность, надежность, а также малую массу и минимальный объем в транспортном положении. Поэтому последний подход является одним из наиболее перспективных в настоящее время.

Недостатком надувных конструкций является то, что газ, необходимый для их развертывания и приведения в рабочее состояние, также нужен и для поддержания (сохранения) формы. Это требует наличия элементов ЗКС, находящихся под постоянным внутренним давлением, что снижает их надежность. Этот недостаток можно устранить, применяя отверждаемые материалы в надувных конструкциях. Преимущество таких материалов заключается в том, что при определенных внешних условиях они податливы, что позволяет их легко обрабатывать и плотно упаковывать, а при других — становятся прочными и жесткими. Это и позволяет сохранить форму надувной конструкции после стравливания газа, т.е. требование герметичности накладывается только на время, необходимое для ее отверждения. При этом многообразии применяемых материалов и подходов к отверждению позволяет получить конструкции, ни в чем не уступающие традиционным [5].

Моделирование отражающей поверхности. При моделировании технической системы на ЭВМ в целях проведения вычислительного эксперимента и определения требуемых характеристик данной системы ее заменяют геометрической моделью. При моделировании отражающей поверхности ее геометрическую модель удобно представить в виде набора более мелких геометрических элементов. Как правило, используются треугольные или четырехугольные элементы, из которых набираются более сложные поверхности, в том числе и криволинейные.

Форма отражающей поверхности. Максимальная теоретическая концентрирующая способность ($C = 11500$), т.е. отношение площади мишени концентратора к площади фокального пятна [2], достигается при использовании параболического концентратора. Именно этим

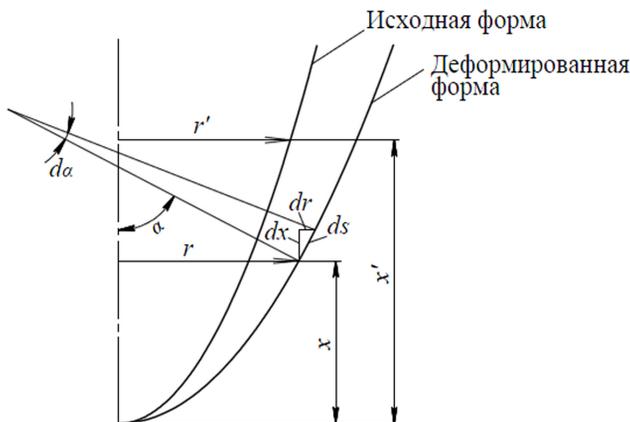


Рис. 1. Расчетная схема:

r , x , α — текущие радиус, высота и угол между осью вращения и нормалью к образующей оболочки; dr , dx , da — соответственно приращения радиуса, высоты и угла; ds — длина дуги образующей оболочки; штрихом обозначены параметры, относящиеся к исходной форме

в основном и определяется широкое применение параболоидных отражателей в однозеркальных ВТСЭУ, так как даже при всевозможных отступлениях от проектной конфигурации, обусловленных конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами, они обеспечивают получение высоких плотностей тепловых потоков в околофокальной зоне. К тому же эта форма легко обеспечивается при наддуве вследствие раскроя или предварительной горячей формовки отражающей поверхности. Однако необходимо учитывать, что рабочая форма надувной отверждаемой конструкции, особенно крупногабаритной, значительно отличается от ее исходной или раскройной формы из-за деформаций в процессе наддува (рис. 1).

Если предположить, что материал линейно-упругий, конструкция подчиняется безмоментной теории [6] для тонкостенных оболочек и нагружена только внутренним давлением, то связь между исходной и конечной формами можно установить следующими соотношениями:

$$r' = \frac{r}{1 + \varepsilon_2};$$

$$ds' = \frac{ds}{1 + \varepsilon_1};$$

$$dx = \sqrt{ds'^2 - dr'^2};$$

$$\varepsilon_1 = \frac{pf}{Eh} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} (1 - 2\mu + \mu \cos^2 \alpha);$$

$$\varepsilon_2 = \frac{pf}{Eh} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} (2 - \mu + \cos^2 \alpha),$$

где ε — деформация, p — давление наддува, f — фокусное расстояние,

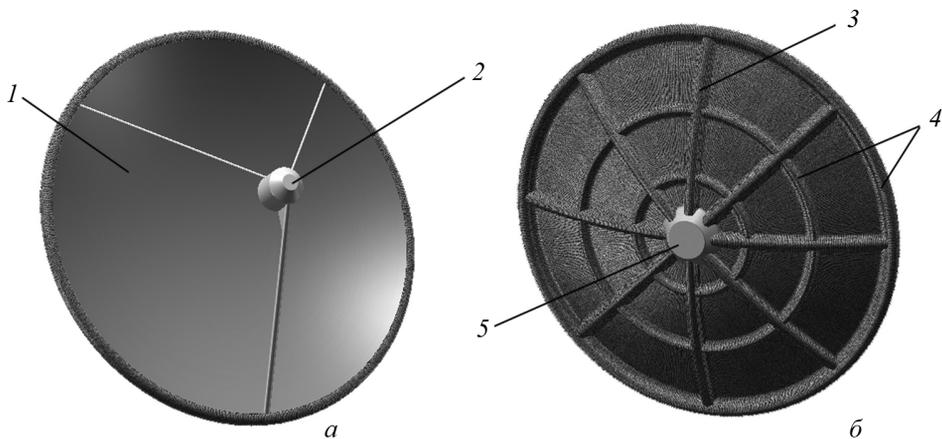


Рис. 2. Лицевая (а) и тыльная (б) стороны параболического концентратора с полостным приемником:

1 — концентратор; 2 — приемник; 3, 4 — радиальные и окружные ребра; 5 — основание концентратора

h — толщина оболочки, E — модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона.

Таким образом, в первом приближении можно определить исходную форму отражающей поверхности концентратора, которая после наддува и соответствующей деформации примет требуемую рабочую форму, а также ее погрешности при изменении давления наддува или свойств материала. При этом необходимо учитывать, что для обеспечения высокой формостабильности ЗКС в ее конструкции необходимы дополнительные ребра жесткости (рис. 2).

Дефекты отражающей поверхности. Реальные отражающие поверхности отличаются от идеальных (математических поверхностей) вследствие влияния как внешних сил и погрешностей изготовления, так и шероховатости, окисления и загрязнения.

Приведем следующую классификацию неровностей [2]:

- меганеровности — отклонения формы отражающей поверхности от идеальной в результате воздействия внешних сил и погрешности при изготовлении и разворачивании;
- макронеровности — отклонения от идеальной формы на площадках, много меньших площади зеркала, вызывают отклонение отраженных лучей от идеального направления;
- микронеровности — неровности с характерными размерами порядка длины волны, образуют микрорельеф зеркальной поверхности, на котором происходит дифракция излучения;
- субмикронеровности — неровности с характерными размерами, много меньшими длины волны (существенного влияния не оказывают, поэтому в инженерной практике ими пренебрегают).

Анализ основных подходов к описанию распространения радиационных тепловых потоков с учетом влияния макро- и микронеровностей (шероховатости) на радиационные свойства отражающих поверхностей показал, что поток излучения удобно представить в виде набора пучков излучения [7], а отражающую поверхность в этом случае в виде набора малых зеркал с различной ориентацией. При таком представлении пучки излучения, моделирующие световой луч, отражаются частично в направлении, противоположном углу падения, т.е. зеркально, и частично в разные стороны, т.е. диффузно. Такой подход позволяет рассматривать излучение с позиции геометрической оптики, что заложено в пучковой модели, сохраняя соответствие получаемых результатов реальной картине распространения излучения, отраженного от шероховатой поверхности.

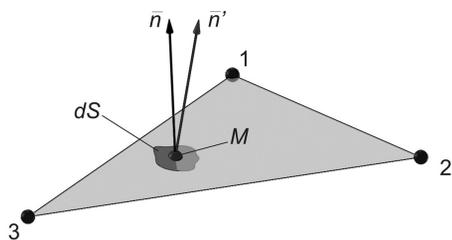


Рис. 3. Отклонение нормали к поверхности в точке M , моделирующее грань dS шероховатой поверхности

Основываясь на этом представлении, отражение от шероховатой поверхности можно рассматривать как зеркальное, т.е. происходящее в соответствии с законом Декарта–Снеллиуса [2]

$$\vec{l}_r = \vec{l}_i - 2\vec{n}'(\vec{n}' \cdot \vec{l}_i),$$

с учетом отклонения нормали к поверхности в точке падения пучка излучения. Здесь \vec{l}_r и \vec{l}_i — направляющие векторы отраженного и падающего луча соответственно, \vec{n}' — вектор нормали к поверхности с учетом шероховатости (рис. 3). При этом отклонение нормали достаточно хорошо описывается нормальным законом распределения значений среднеквадратического наклона $s_{ш}$ шероховатости для поверхностей с заданной степенью обработки, определяемой соотношением [2, 7]

$$s_{ш} = \frac{\sqrt{2}h_{ш}}{m_{ш}},$$

где $h_{ш}$ — среднеквадратическая высота шероховатости, $m_{ш}$ — шаг шероховатости.

Приведенный ранее подход к моделированию шероховатой поверхности позволяет закладывать в геометрическую модель только меганеровности, а макро- и микронеровности учитывать непосредственно в точке падения пучка излучения (см. рис. 3).

Расчет характеристик ЗКС. Для реализации приведенной модели отражающей поверхности были разработаны соответствующие

математические алгоритмы и программный комплекс [8], позволивший моделировать распределение радиационных тепловых потоков в зеркальных концентрирующих системах произвольной геометрии с учетом переменных радиационных характеристик отражающих поверхностей и воздействия окружающей среды. Это позволило вычислять диффузные и зеркальные угловые коэффициенты, индикатрисы отражения и поля температур.

В качестве основной системы для исследования была выбрана СКП, состоящая из параболического концентратора и сферического полостного приемника (см. рис. 2). Для данной системы было проведено исследование зависимости ее радиационных и энергетических характеристик от качества отражающих поверхностей, соотношения габаритных размеров элементов системы и точности ориентации на Солнце.

Основной энергетической характеристикой СКП солнечной энергии, которая в значительной мере определяет массу и габаритные размеры энергоустановки, является коэффициент полезного действия. При этом на практике выделяют геометрический η_{Γ} и энергетический $\eta_{\text{кп}}$ КПД [2].

Геометрический КПД определяется как отношение тепловой мощности $N_{\text{п}}$, попавшей на приемник, к полной тепловой мощности N_0 , отраженной рабочей поверхностью концентратора [2]. Значение η_{Γ} зависит от геометрических и оптико-механических параметров ЗКС, а также от геометрических размеров приемника, а в случае использования полостных приемников и от размеров входного отверстия приемника. Геометрический КПД учитывает только геометрические взаимосвязи в СКП и при увеличении отношения радиуса r_0 входного отверстия приемника к радиусу $r_{\text{к}}$ концентратора стремится к единице вне зависимости от характеристик ЗКС (рис. 4).

Здесь в качестве показателя точности поверхности используется мера точности по Апариси h_A [1, 2] — эмпирическая величина, ин-

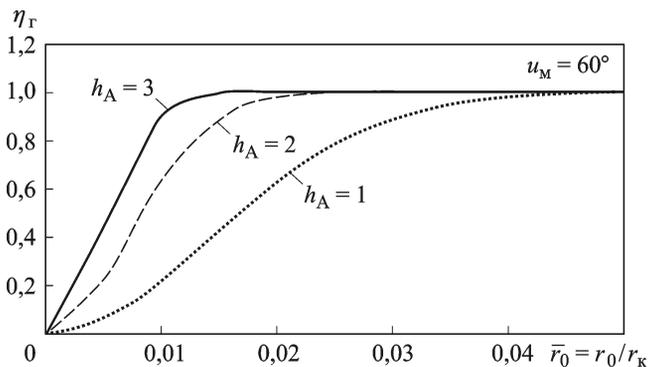


Рис. 4. Зависимость геометрического КПД от относительного радиуса входного отверстия приемника

тегрально учитывающая все возможные дефекты формы и поверхности зеркала концентратора. Если известна максимальная плотность теплового потока в фокальной плоскости, то h_A можно определить по следующему соотношению:

$$h_A = \sqrt{3 \cdot 10^{-4} \frac{q_{\max}}{E_0 \rho \sin^2 u_m}}.$$

Здесь ρ — коэффициент отражения рабочей поверхности (зеркала) концентратора, E_0 — солнечная постоянная, u_m — угол полуоткрытия концентратора.

Кроме потерь, вызванных несовершенством геометрической формы отражателя и дефектами отражающей поверхности, уменьшение эффективности СКП происходит за счет энергетических потерь, вызванных нагревом и переизлучением (вторичным излучением) ее элементов, в первую очередь приемником. Эти потери позволяют учесть энергетический КПД, определяемый как отношение полезной тепловой мощности N_T , поступающей от приемника к преобразователю, к тепловой мощности N_c , падающей на рабочую поверхность ЗКС [2]. На рис. 5 показана зависимость энергетического КПД от относительного радиуса входного отверстия приемника при различных рабочих температурах в приемнике, но одинаковых характеристиках отражательной поверхности.

Из приведенных графиков следует, что энергетический КПД сначала возрастает за счет увеличения доли отраженной энергии, попадающей в приемник. Затем, начиная с некоторого момента, он падает, поскольку доля дополнительной энергии, попавшей в приемник вследствие увеличения радиуса входного отверстия, меньше энергии, переизлучаемой приемником через это отверстие.

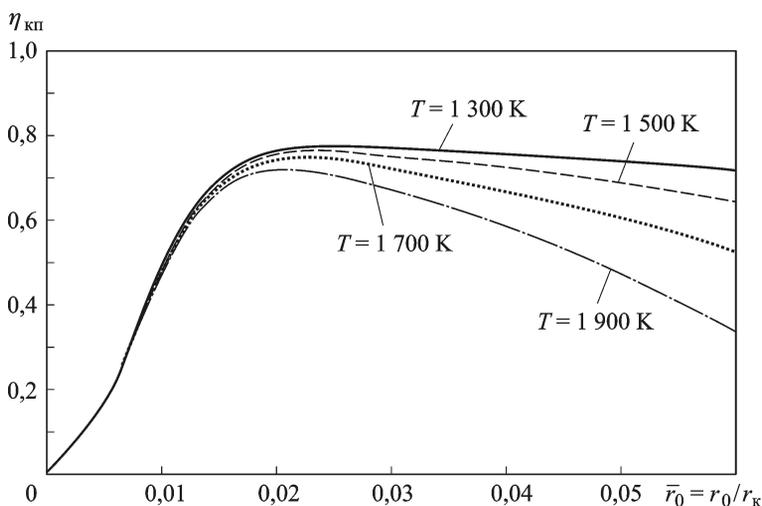


Рис. 5. Зависимость энергетического КПД от рабочей температуры приемника

Таким образом, можно утверждать, что для исследуемой системы существует оптимальное соотношение габаритных размеров концентратора и приемника (радиуса его входного отверстия). Причем если при рабочей температуре $T = 1300$ К это соотношение можно выбирать из диапазона $\bar{r}_0 = 0,02 \dots 0,03$, вводя дополнительные инженерные и технологические ограничения без ощутимых потерь в КПД, то при $T = 1900$ К этот диапазон сужается уже до $\bar{r}_0 = 0,02 \dots 0,022$.

Выводы. Разработанная математическая модель отражающей поверхности ЗКС ВТСЭУ космического назначения позволяет вычислять основные энергетические характеристики подобных систем, а также прогнозировать их изменение при различных условиях эксплуатации.

Математическое моделирование позволяет обеспечить значительное уменьшение материальных затрат, связанных с проектированием и отработкой подобных систем, по сравнению с традиционными экспериментальными методами. А возможность рассмотреть большое число вариантов в результате математического моделирования приведет к разработке рациональной конструкции ЗКС при обеспечении максимальной энергетической и массовой эффективности ВТСЭУ, что очень актуально для космической техники.

Работа выполнена по гранту поддержки ведущих научных школ № НШ-255.2012.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С к р е б у ш е в с к и й Б. С. Космические энергетические установки с преобразованием солнечной энергии. – М.: Машиностроение, 1992. – 224 с.
2. З а х и д о в Р. А., У м а р о в Г. А., В а й н е р А. А. Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. – Ташкент: Фан, 1977. – 144 с.
3. В и с с а р и о н о в В. И., Д е р ю г и н а Г. В., К у з н е ц о в а В. А., М а л и н и н Н. К. Солнечная энергетика. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 276 с.
4. Р а й к у н о в Г. Г., К о м к о в В. А., М е л ь н и к о в В. М., Х а р л о в Б. Н. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. – М.: Физматлит, 2009. – 448 с.
5. O n a t e E., K r o p l i n B. Textile composites and inflatable structures // Computational Methods in Applied Sciences. – Berlin: Springer, 2008. – 272 p.
6. У с ю к и н В. И. Строительная механика конструкций космической техники. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.
7. З а р у б и н В. С., Л е о н о в В. В. Математическое моделирование отражения излучения от зеркальной поверхности с учетом шероховатости // Вестник МГТУ. Сер. Естественные науки. – 2011. – Спец. выпуск “Прикладная математика”. – С. 45–50.
8. С в и д е т е л ь с т в о о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617855. Программный комплекс Tracer / В.В. Леонов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.10.2011.

Статья поступила в редакцию 15.05.2012