

В. С. З а р у б и н, Г. Н. К у в ы р к и н,
В. В. Л е о н о в

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОНЦЕНТРАТОР–ПРИЕМНИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрена математическая модель, позволяющая определять радиационные и энергетические характеристики системы концентратор–приемник. Основное внимание уделено моделированию радиационного теплообмена с применением методов Монте-Карло и учетом дефектов отражающей поверхности. Особый интерес это представляет при проектировании зеркальных концентрирующих систем и приемников для высокотемпературных солнечных энергоустановок как наземного, так и космического базирования.

E-mail: fn2@bmstu.ru

Ключевые слова: солнечная энергетика, зеркальные концентрирующие системы, радиационный теплообмен, математическое моделирование, методы Монте-Карло.

Солнечная энергетика и связанные с ней теория проектирования и разработки, создание солнечных энергоустановок (СЭУ) начали активно развиваться с конца 60-х годов прошлого века с запуском первых спутников и началом космической эры. В последние годы солнечная энергетика является одной из наиболее динамически развивающихся отраслей промышленности. Если в конце 2009 г. ее доля в структуре мирового производства электроэнергии составляла около 1 % [1], то к середине XXI в., по прогнозам экспертов Международного энергетического агентства (IEA) [1], при сохранении современной динамики развития она может достигнуть 25 %. В космосе более 98 % космических аппаратов используют низкотемпературные СЭУ, работающие с применением фотоэлектрических преобразователей. Разработка новых проектов по созданию космических солнечных электростанций, космических аппаратов с применением солнечных и электрореактивных ракетных двигателей, систем для освещения приполярных областей, энергосистем для космических станций и баз как на орбите, так и на поверхности других планет требует разработки и создания СЭУ большей мощности [2, 3]. Как показывает опыт эксплуатации СЭУ [1, 3, 4] в основном солнечных электростанций, для создания систем большой мощности наиболее эффективно использование высокотемпературных СЭУ (ВТСЭУ) с применением высокопотенциальных концентраторов солнечной энергии (параболических, сферических, параболоцилиндрических) или зеркальных концентрирующих систем (ЗКС), позволяющих значительно повысить плотность солнечной энергии в рабочей зоне.

При решении задач, связанных с проектированием ЗКС и приемников солнечной энергии, совместно образующих систему концентратор–приемник (СКП), в первую очередь интересны энергетические характеристики сконцентрированного излучения [3, 5]: распределение тепловых потоков и температур по поверхности элементов СКП.

Экспериментальное определение радиационных характеристик или точностных параметров поверхностей элементов СКП требует проведения сложных экспериментов [6], имеющих значительные ограничения на интерпретацию результатов (зависимость от расстояния до Солнца, спектра излучения, точности поверхности зеркал) [5]. Поэтому особый интерес представляет разработка математической модели, позволяющей рассчитывать характеристики сложных зеркальных систем с учетом влияния условий эксплуатации, конструктивных особенностей, шероховатости поверхности. Математическое моделирование позволит 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 при обеспечении максимальной энергетической и массовой эффективности ВТСЭУ, что очень актуально для космической техники.

Основные принципы построения СКП для ВТСЭУ. 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. Для получения в рабочей зоне высоких температур необходимо повысить плотность результирующего потока излучения. Этого можно добиться, изменив ход лучей так, чтобы они приходили на приемную поверхность в пределах достаточно большого телесного угла, в результате чего, как следствие инвариантности яркости [5], плотность сконцентрированного потока будет во много раз больше плотности падающего излучения.

Сконцентрировать солнечное излучение можно при помощи зеркальных и линзовых концентрирующих систем [3, 5]. 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 [1], но в целом они пока не нашли широкого применения в ВТСЭУ как наземного, так и космического базирования.

Основной классифицирующей характеристикой ЗКС является степень концентрации C [6], равная отношению площади миделя F_M ЗКС к площади фокального пятна F_Φ (рис. 1):

$$C = F_M / F_\Phi = (r_M / r_\Phi)^2.$$

Максимальная теоретическая концентрирующая способность достигается при использовании параболического концентратора ($C_{\max} = 11500$ при угле полуоткрытия параболоида $u = 45^\circ$). Именно этим в основном и определяется широкое применение параболических 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.

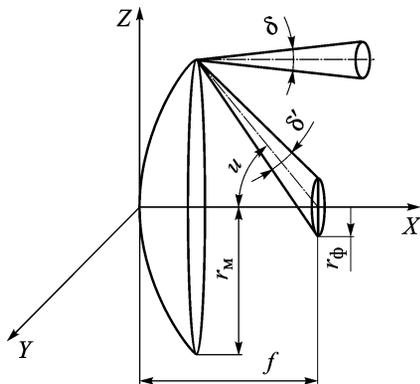


Рис. 1. Схема ЗКС с параболическим концентратором:

f — фокусное расстояние; u — угол полуоткрытия концентратора; r_M и r_Φ — радиусы миделя и фокального пятна; δ — угловой размер источника излучения

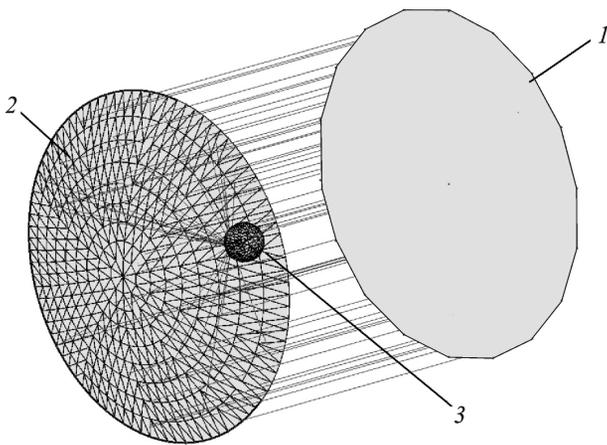


Рис. 2. Модель СКП:

1 — имитатор солнечного излучения; 2 — параболический концентратор; 3 — полостной сферический приемник

В качестве системы приема (приемника) сконцентрированного излучения могут выступать как специально спроектированные поверхностные и полостные приемники солнечного излучения, так и, например, поверхность расплавляемого материала в солнечной печи. Для мощных ВТСЭУ наиболее эффективно применение полостных приемников, обеспечивающих снятие тепловой энергии со всей поверхности полости и низкие потери от переизлучения в результате нагрева приемника. Наибольшую эффективность имеют сферические полостные приемники [7].

Таким образом, наибольшей эффективностью обладает СКП, состоящая из параболического зеркального концентратора и сферического полостного приемника (рис. 2). На примере этой системы в дальнейшем и будем проводить построение математической модели.

Основные характеристики СКП ВТСЭУ. Основной энергетической характеристикой СКП солнечной энергии, которая в значительной мере определяет массу и габаритные размеры энергоустановки, является КПД. При этом на практике выделяют геометрический η_r и энергетический $\eta_{кп}$ КПД [5, 7].

Геометрический КПД СКП определяется как отношение тепловой мощности N_p , попавшей на приемник, к полной тепловой мощности N_0 , отраженной рабочей поверхностью концентратора:

$$\eta_r = \frac{N_p}{N_0}. \quad (1)$$

Величина η_r 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 размеров приемника (входного отверстия) относительно габаритных размеров концентратора стремится к единице вне зависимости от характеристик ЗКС.

Энергетический КПД системы, определяемый как отношение полезной тепловой мощности N_t , поступающей от приемника к преобразователю, к тепловой мощности N_c , падающей на рабочую поверхность ЗКС, равен

$$\eta_{кп} = \frac{N_t}{N_c}. \quad (2)$$

Величина $\eta_{\text{кп}}$ зависит от геометрических и оптико-механических параметров всех элементов СКП и в отличие от геометрического КПД учитывает потери тепловой мощности приемником из-за излучения в результате нагрева. Поэтому при увеличении, например, отверстия полостного приемника энергетический КПД падает. Это позволяет определить оптимальное соотношение габаритных размеров ЗКП и приемника при заданных оптических характеристиках их рабочих поверхностей и требованиях к функционированию ВТСЭУ.

Таким образом, знание $\eta_{\text{кп}}$ позволяет определить геометрические и массовые характеристики СКП, а возможность промоделировать влияние различных параметров (условия функционирования, точность изготовления рабочих поверхностей и т.д.) позволяет принять рациональные конструктивные и технологические решения.

Проанализировав описанные основные характеристики СКП, можно сделать вывод, что основополагающим для их нахождения, а также для последующего принятия конструктивных и технологических решений является определение радиационных характеристик элементов СКП и связанных с ними полей отраженных тепловых потоков (облученности) и температур.

Моделирование радиационного теплообмена. За последние десятилетия было предложено и разработано множество методов как экспериментальных, так и вычислительных, позволяющих определять характеристики радиационного теплообмена в СКП различной конфигурации. Данные методы развивались параллельно с потребностями практики и возможностями вычислительной техники, постепенно усложняясь и повышая точность получаемых результатов.

Экспериментально было установлено [6], что распределение облученности в фокальном пятне реального парабооида хорошо аппроксимируется кривой Гаусса. В результате исследования точностных характеристик (абберограмм) зеркал, главным образом проводимых на прожекторных парабооидах [6], было установлено, что энергетические характеристики концентратора носят статистический характер и непосредственно связаны с распределением неровностей по рабочим поверхностям ЗКС. На основе этих исследований была предложена вероятностная модель радиационного теплообмена. Полноценная реализация этой модели стала возможна только в результате развития электронной вычислительной техники и связанных с ней численных методов.

Среди численных методов особый интерес представляют методы Монте-Карло [8, 9], которые впервые были применены к решению задач переноса энергии излучения Д.Р. Хауэллом [9]. В настоящее время общепризнанна эффективность методов Монте-Карло для статистического моделирования технических систем, находящихся под воздействием случайных факторов, в том числе и для задач теплообмена излучением.

При вероятностном подходе поток излучения, падающий на исследуемую поверхность и отражающийся от нее, удобно представить в виде набора дискретных порций (пучков) [1, 2, 4] определенной длины волны и энергии, суммарно реализующих спектр и плотность энергии излучения, например солнечного, в данной области пространства. Проследив движение каждого пучка (переотражение с потерей энергии) в рассматриваемой системе до момента либо его полного поглощения, либо вылета из этой системы, можно получить ее радиационные характеристики и распределение облученности. Такая модель позволяет моделировать поведение луча (потерю энергии, направление отражения) в точке его контакта с отражающей поверхностью (рис. 3) с помощью функций распределения случайных величин [8, 9] и избежать многих трудностей, присущих процессам усреднения зависимости радиационных свойств отражающей поверхности от длины волны, направления отражения и температуры.

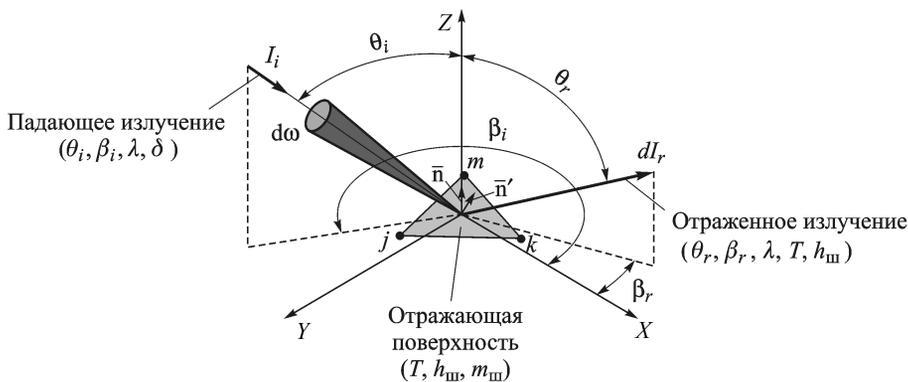


Рис. 3. Моделирование отражения излучения: (θ, β) — направление излучения (траектория пучка); λ — длина волны; T — температура поверхности; δ — угловой размер источника излучения; I — интенсивность излучения; ω — телесный угол; $h_{ш}$ — среднеквадратическая высота шероховатости; $m_{ш}$ — шаг шероховатости (индексы i и r относятся к падающему и отраженному излучениям)

Моделирование отражающих поверхностей. 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 [5]:

- меганеровности — отклонения отражающей поверхности от идеальной в результате воздействия внешних сил и погрешности при изготовлении;
- 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).

Для моделирования реальных (шероховатых) поверхностей обычно применяют два подхода [5]: поверхность считают либо детерминированной (обычно периодической), либо случайной. Первый подход дает точный результат для каждого конкретного случая, однако исключает возможность обобщения. Второй подход позволяет получить характеристики, усредненные по классу случайных функций, описывающих поверхность при некоторых фиксированных средних параметрах. Решение носит вероятностный характер, т.е. только в среднем совпадает с решениями для детерминированных поверхностей.

Вероятностно-статистический подход предпочтительнее при предварительном анализе рассматриваемых систем (например, СКП), проектно-конструкторских оценках, предварительной оптимизации и прогнозировании. Если же имеется готовая система или конструкция с известными оптическими характеристиками, то возможны как точное решение для данной системы, так и усредненное решение для систем с подобными поверхностями такого же класса обработки. При этом необходимо учитывать, что чем больше характеристик описывает случайную поверхность и чем ближе они к детерминированным величинам, тем точнее будет результат моделирования.

Для решения задач, направленных на определение характеристик распределения тепловых потоков и построение полей температур, поверхность

рассматриваемой геометрической модели удобно разбить на более мелкие составляющие. Как правило, используют треугольные элементы, из которых набирают более сложные поверхности, в том числе и криволинейные. Такой подход удобен также при последующем переходе к задачам теплопрочности и формостабильности с применением метода конечных элементов (МКЭ).

Вероятностно-статистический подход к созданию геометрической модели позволяет закладывать в нее только меганеровности, а макронеровности, т.е. непосредственно шероховатость, учитывают отклонением нормали в точке падения пучка излучения. При этом отклонение нормали достаточно хорошо описывается нормальным законом распределения значений среднеквадратического наклона s_{III} шероховатости для поверхностей с заданной степенью обработки, определяемой соотношением [5]

$$s_{III} = \frac{\sqrt{2}h_{III}}{m_{III}}.$$

Данный подход аналогичен методу, предложенному В.А. Грилихесом, — методу гауссового отклонения нормали [3].

При таком подходе к моделированию поверхности нет необходимости в особо мелком разбиении поверхности геометрической модели, что значительно экономит вычислительные ресурсы, а в качестве исходной нормали можно рассматривать как нормаль плоского треугольного элемента, так и исходной поверхности (по ее уравнению), если считать ее математически идеальной.

Моделирование полей температур. Уравнение стационарной теплопроводности в сплошной среде имеет вид [9, 10]

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

где T — температура; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} — коэффициенты теплопроводности в направлениях осей X , Y и Z .

Если на границе происходит конвективный теплообмен или задана плотность теплового потока, то граничное условие можно записать как

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_{\infty}) + q = 0, \quad (4)$$

где h — коэффициент теплообмена; T — температура на границе; T_{∞} — температура окружающей среды; l_x , l_y и l_z — направляющие косинусы вектора нормали к поверхности; q — плотность теплового потока.

Решение уравнения (3) с граничными условиями (4) для СКП произвольной формы удобно искать, переходя к МКЭ. Возможность использования МКЭ закладывалась при создании геометрической модели СКП, и поэтому данный переход не требует дополнительных вычислительных затрат.

Рабочие поверхности СКП, по существу, представляют собой оболочечные конструкции, получаемые из тонкой пластины или пленки путем предварительного деформирования (горячей формовкой, вытяжкой, штамповкой и другими методами [2, 3]) срединной плоскости в поверхности одинарной или двойной кривизны. В результате такой обработки получается тонкостенная конструкция, т.е. конструкция, размеры которой в одном из направлений значительно меньше остальных. Если предположить, что поведение непрерывной криволинейной поверхности достаточно точно характеризуется поверхностью, составленной из малых плоских элементов [10], то от трехмерной задачи по определению полей температур в тонкостенных конструкциях можно перейти к квазидвумерной задаче.

В данном случае для решения квазидвумерной задачи удобно использовать треугольные трехузловые конечные элементы (КЭ) [10]. При этом граничные условия (4) задаются на передней и задней гранях КЭ. Совместное решение получаемых в МКЭ матричных уравнений, записанных для каждого КЭ, позволяет найти распределение температур по рабочим поверхностям СКП.

В общем случае уравнение (3) с граничными условиями (4), а значит, и получаемые из них матричные уравнения являются нелинейными. Нелинейность вызвана зависимостью коэффициентов теплопроводности K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} и теплообмена h , а также плотности теплового потока q (через оптические характеристики поверхностей), от температуры. Учесть эту нелинейность можно, последовательно повторяя вычисления тепловых потоков и полей температур, итерационно уточняя полученные результаты. При этом в пределах каждого шага характеристики элементов конструкции считаются постоянными (зависят от температуры).

Алгоритм моделирование радиационного теплообмена в СКП. Алгоритм моделирования радиационного теплообмена состоит из следующих шагов.

1. Подготавливаем геометрическую модель исследуемой технической системы (в рассматриваемом случае — СКП). В зависимости от целей исследования задаем механические, оптические и другие свойства элементов геометрической модели.

2. Подготавливаем модель излучателя (может состоять из нескольких излучающих элементов). Устанавливаем область освещения и направление падающего излучения, что позволяет исследовать только необходимые зоны и сэкономить вычислительные ресурсы. Задаем длину волны излучения в случае монохроматического излучения или спектр, например для Солнца. Для каждого излучающего элемента устанавливаем число излучаемых пучков.

3. В зависимости от целей исследования задаем начальные и граничные условия.

4. Последовательно обходя все излучающие элементы, поочередно генерируем с их поверхности пучки излучения. Для этого в соответствии с подходом, присущим методам Монте-Карло, выбираем независимо из однородно распределенного ряда чисел от нуля до единицы случайные числа R , обеспечивающие заданный закон распределения спектральных и энергетических характеристик излучателя. Направления испускания пучка характеризуется углами θ_i и β_i в сферической системе координат с центром в месте его испускания.

5. Выполняя следующие шаги, прослеживаем историю движения каждого пучка до тех пор, пока он не покинет исследуемую систему (область) или не будет поглощен.

5.1. Находим точку пересечения траектории пучка с геометрической моделью. Предположим, что участок поверхности, на который падает пучок, имеет поглощательную способность α . В общем случае величина α может зависеть от длины волны и направления падения излучения, параметров шероховатости и температуры поверхности. Выбираем из однородно распределенного ряда чисел от нуля до единицы случайное число R_α . Если это число удовлетворяет условию

$$0 \leq R_\alpha \leq \alpha,$$

то падающая порция энергии поглощается.

5.2. Если случайное число R_α удовлетворяет условию

$$\alpha < R_\alpha \leq 1,$$

то рассматриваемая порция энергии будет отражена поверхностью в точке падения.

5.3. Направление отражения определяется функциями распределения случайных величин R_θ и R_β для каждого локального значения углов θ и β в зависимости от оптических свойств поверхности в точке падения:

– если поверхность зеркальная, то отражение происходит по закону Декарта–Снеллиуса [5]

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

где \vec{l}_r и \vec{l}_i – направляющие векторы отраженного и падающего лучей, \vec{n} – вектор нормали к поверхности;

– если поверхность шероховатая (реальная), то направление отражения луча определяется аналогично зеркальному отражению, но с добавлением значения среднеквадратического отклонения нормали к поверхности в соответствии с параметрами шероховатости;

– для случая диффузного отражения запишем

$$\sin^2 \theta = R_\theta \quad \text{и} \quad \beta = 2\pi R_\beta.$$

6. Проследив траектории всех пучков, по набранной статистике определяем радиационные характеристики как рабочих поверхностей СКП, так и системы в целом. В результате получаем индикатрисы отражения (поверхностного рассеяния), угловые коэффициенты и распределение тепловых потоков.

7. Полученные значения тепловых потоков позволяют перейти к решению тепловой задачи. Определение полей температур проводится МКЭ в квазидвумерной постановке.

При необходимости повторяем пункты 3–7, используя в качестве тепловых граничных условий значения полей температур, полученных на предыдущем шаге, в целях уточнения радиационных характеристик поверхностей, распределения тепловых потоков и полей температур.

Результаты моделирования. Для реализации приведенного алгоритма был разработан программный комплекс. Данный комплекс позволяет вычислять:

- индикатрисы отражения (рис. 4) для элементов конструкции и угловые коэффициенты для систем произвольной геометрии;
- распределение плотности тепловых потоков по рабочим поверхностям СКП произвольной геометрии (рис. 5);
- геометрический (1) и энергетический (2) КПД для СКП произвольной геометрии (рис. 6).

На рис. 4–6 приведены примеры получаемых результатов.

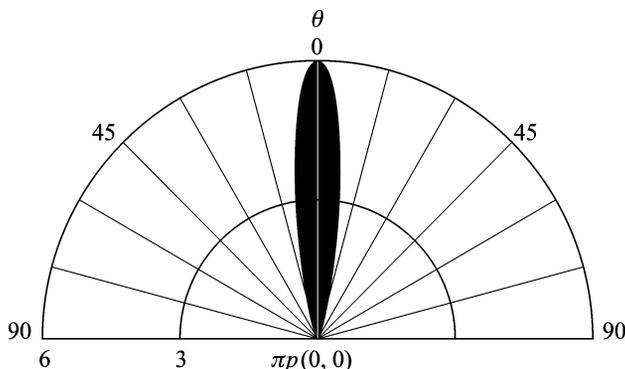


Рис. 4. Индикатриса отражения плоского образца из полированного алюминия при падении излучения по нормали к поверхности

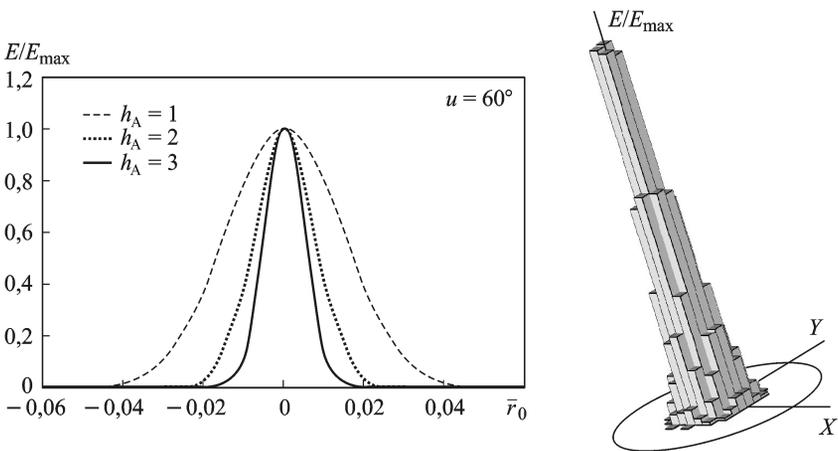


Рис. 5. Распределение плотности тепловых потоков в проекции на плоскость (а) и в пространстве (б), отраженных от концентратора, на входе в приемник для СКП, приведенной на рис. 2:

\bar{r}_0 — отношение радиуса входного отверстия приемника к радиусу концентратора; E — плотность сконцентрированного теплового потока; E_{\max} — максимальная плотность сконцентрированного теплового потока в центре фокального пятна; h_A — мера точности по Аппариси [3]

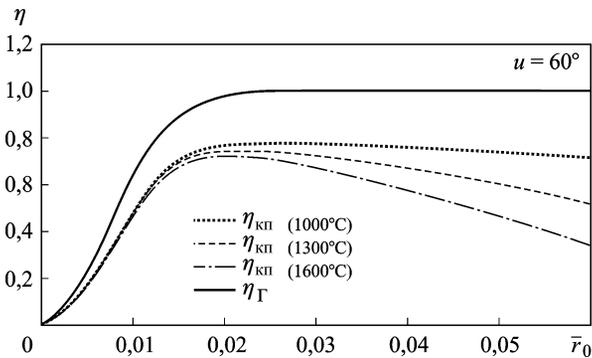


Рис. 6. Геометрический η_Γ и энергетический $\eta_{кп}$ КПД СКП, приведенной на рис. 2 ($\eta_{кп}$ показан в зависимости от температуры рабочей поверхности приемника)

Выводы. Разрабатываемая математическая модель СКП ВТСЭУ космического назначения позволяет вычислять основные энергетические характеристики подобных систем, а также проводить моделирование и прогнозирование их характеристик.

Полученные результаты для индикатрисы отражения хорошо согласуются с экспериментальными значениями, приведенными в работе [11], а для распределения плотности тепловых потоков и КПД СКП — с результатами, полученными по методу Аппариси (метод гауссового пучка), приведенными в работе [3].

Работа выполнена по гранту поддержки ведущих научных школ № НШ-4046.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy technology perspectives. – Paris: International Energy Agency, 2010. – 20 p.

2. Леонов В. В. Моделирование процесса теплообмена излучением в системе концентратор-приемник солнечной энергии // Тепловые процессы в технике. Наука и технологии. – 2009. – Т. 1, № 8. – С. 340–342.
3. Скребушевский Б. С. Космические энергетические установки с преобразованием солнечной энергии. – М.: Машиностроение, 1992. – 224 с.
4. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции / Г.Г. Райкунов, В.А. Комков, В.М. Мельников и др. – М.: Физматлит. 2009. – 448 с.
5. Захидов Р. А., Умаров Г. А., Вайнер А. А. Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. – Ташкент: Фан, 1977. – 144 с.
6. Захидов Р. А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем. – Ташкент: Фан, 1978. – 184 с.
7. Фаворский О. Н. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. – М.: Высш. шк., 1970. – 488 с.
8. Mahan J. R. Radiation heat transfer: a statistical approach. – New York: Wiley & Sons, 2002. – 500 p.
9. Siegel R., Howell J. R. Thermal radiation heat transfer. – New York: Taylor & Francis, 2002. – 857 p.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 538 с.
11. Пэрроу Э. М., Сесс Р. Д. Теплообмен излучением: Пер. с англ. – Л.: Энергия, 1977. – 294 с.

Статья поступила в редакцию 17.12.2010

Владимир Степанович Зарубин родился в 1933 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1957 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Автор более 250 научных работ в области математического моделирования термомеханических процессов в материалах и элементах конструкций.

V.S. Zarubin (b. 1933) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1957. D. Sc. (Eng.), professor of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Honored Science and Technology Worker of the Russian Federation, Laureate of RF Government Prize in Science and Technology. Author of more than 250 publications in the field of mathematical simulation of thermomechanical processes in materials and construction members.



Георгий Николаевич Кувыркин родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Автор более 160 научных работ в области прикладной математики и математического моделирования термомеханических процессов в материалах и элементах конструкций.

G.N. Kuvyrkin (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Laureate of RF Government Prize in Science and Technology. Author of more than 160 publications in the field of applied mathematics and mathematical simulation of thermomechanical processes in materials and construction members.

Виктор Витальевич Леонов родился в 1985 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Аспирант кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области радиационного теплообмена.

V.V. Leonov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Post-graduate of “Applied mathematics” department of the BMSTU. Author of 10 publications in the field of radiative heat transfer.