

УДК 629.73

**Л. И. Кныш**

Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНЦЕНТРАТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СИСТЕМЫ ПРИЁМА КОСМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

---

*Наведено результати чисельного дослідження енергетичних характеристик системи прийому тепла космічної сонячної енергетичної установки з концентратором. Виявлено суттєвий вплив аберацій поверхні дзеркала на теплообмін в системі «параболічний концентратор — теплоприймач». Визначено найбільш раціональний кут розкриття дзеркала. Показано неможливість відхилення апертури теплоприймача від фокальної площини концентратора без втрат теплової потужності системи.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из перспективных направлений крупномасштабного использования солнечной энергии на Земле и в космическом пространстве являются солнечные энергетические станции, имеющие в своём составе концентраторы. В настоящее время космическая энергетика идёт по пути совершенствования фотоэлектрического преобразования, повышая КПД как самих ФЭП, так и установки в целом. В тоже время параллельно рассматривается множество проектов, в основе которых лежит использование на орбите концентрированного солнечного излучения для энергоснабжения космических аппаратов, а также для решения других космических задач, требующих серьёзных энергетических затрат:

- уничтожение космического мусора;
- получение электроэнергии в космосе с последующей передачей её на Землю;
- освещение Земли с орбиты и др.

Некоторые из этих проектов уже прошли успешную апробацию на орбите. Так, в 1993 г. в России был реализован демонстрационный проект «Знамя-2», когда после расстыковки грузового корабля «Прогресс М-15» на нём был развер-

нут 20-метровый отражатель, с помощью которого была подсвечена значительная территория Европы. После неудачной попытки развернуть солнечный парус в 1999 г., проект решили не сворачивать и сейчас работы по нему продолжаются [[src.space.ru/inform-r.htm](http://src.space.ru/inform-r.htm)].

В настоящее время в рамках создания российской «силиконовой долины» рассматривается создание лазерно-оптической системы для передачи солнечной энергии из космоса на Землю [[www.intech-tr.ru](http://www.intech-tr.ru)].

Не прекращаются исследования по созданию на орбите солнечных электрических станций, работающих по замкнутому газотурбинному циклу Брайтона [7]. Основной элемент каждой из этих систем — концентратор солнечного излучения, как правило, в виде параболоида вращения. В Украине есть серьёзные наработки по технологии изготовления таких систем. В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины разработаны технологические процессы и изготовлены экспериментальные образцы концентраторов диаметром до 1.6 м, но есть возможность изготовить концентраторы значительно больших размеров [2].

Не менее важной задачей является создание математической модели теплообмена в системе

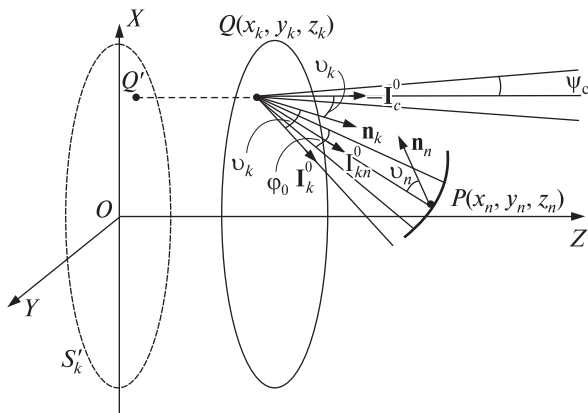


Рис. 1. Схема хода лучей в системе «концентратор — теплоприёмник»

концентрации солнечного излучения и проведения на её основе теоретических исследований, чему и посвящена настоящая статья.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРАЦИИ

На рис. 1 показан ход лучей в системе «концентратор — теплоприёмник» космической солнечной энергетической установки. Солнечное излучение улавливается концентратором, отражается от него и многократно увеличивая плотность своего потока, попадает на теплоприёмник, который располагается в фокальной плоскости концентратора. В теплоприёмнике организована система преобразования, тип которой зависит от типа и назначения энергетической установки.

Эффективность системы преобразования во многом зависит от геометрии концентратора. В связи с этим для создания математической модели процесса концентрации применялся комплексный подход, основанный на интегральном методе исследования лучистого теплообмена с элементами, свойственными задачам фотометрии и оптики [1]. Интегральные соотношения получены из фундаментальных законов теории лучистого теплообмена с учётом специфики процесса — наличие отражающих поверхностей с ярко выраженной шероховатостью (абберациями), что приводит к анизотропности диффузного отражения [5].

Полученное уравнение, характеризующее распределение потока энергии на поверхности теплоприёмника, расположенного в фокальной плоскости концентратора, имеет вид

$$E_{\text{ПР}} = \frac{E_C}{2\pi} \times \iint_{S_k} \frac{\beta_K f(\varphi) \cdot \xi(\mathbf{l}_{\text{КП}}) \cdot \chi(\mathbf{l}_{\text{КП}}) \cos(-\mathbf{l}_C^0, \mathbf{n}_K) \cos(\mathbf{l}_{\text{КП}}^0, -\mathbf{n}_{\text{ПР}}) dS_K}{I_{\text{КП}}^2 \int_0^{\varphi_0} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi},$$

где  $S_K$  — площадь поверхности концентратора,  $\text{м}^2$ ;  $E_C$  — солнечная постоянная,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\beta_K$  — отражательная способность материала зеркала;  $\cos(\mathbf{l}_{\text{КП}}^0, -\mathbf{n}_{\text{ПР}})$  — величина, характеризующая взаимное расположение концентратора и теплоприёмника в пространстве;  $\cos(-\mathbf{l}_C^0, \mathbf{n}_K)$  — величина, характеризующая ориентацию концентратора на Солнце;  $l_{\text{КП}}$  — длина вектора, соединяющего произвольную точку концентратора и теплоприёмника,  $\text{м}$ ;  $f(\varphi) = \frac{dI(\varphi)}{dI(0)}$ ,  $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$  —

вид функции индикатрисы, показывающий неравномерность распределения энергии в пучке, который идёт от Солнца к концентратору и от концентратора к теплоприёмнику;  $\chi(\mathbf{l}_{\text{КП}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathbf{l}_{\text{КП}} \cap S_{\text{ВХ}} \neq 0 \\ 0, & \text{если } \mathbf{l}_{\text{КП}} \cap S_{\text{ВХ}} = 0 \end{cases}$  — функция типа Хевисайда, характеризующая условие попадания отражённого луча в отверстие теплоприёмника;

$\xi(\mathbf{l}_{\text{КП}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\mathbf{l}_{\text{КП}}^0 \cdot \mathbf{l}_K^0) \geq \cos \varphi_0 \\ 0, & \text{если } (\mathbf{l}_{\text{КП}}^0 \cdot \mathbf{l}_K^0) < \cos \varphi_0 \end{cases}$  — функция

типа Хевисайда, показывающая, попал ли рассматриваемый луч, идущий от концентратора, в пучок лучей, падающий на теплоприёмник.

Необходимость введения функции  $\xi(\mathbf{l}_{\text{КП}})$  связана с особенностями первичного и вторичного излучателя. Неравномерное распределение энергии в пучке, идущем от Солнца, которое, как правило, не учитывается, в задачах концентрации становится критичным и подлежащим учёту. Кроме того, как было сказано выше, поверхность концентратора не является идеально гладкой, она имеет неточности (абберации), возникающие в процессе изготовления и эксплуатации.

## ВЫБОР МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНЦЕНТРАЦИИ

Метод учёта аббераций на поверхности зеркала предлагается согласовывать с выбранным методом решения задачи, который включает в себя и выбор упрощающих допущений.

Очевидно, что универсальным является экспериментальный метод определения неточностей поверхности концентратора. Он основан на разложении пространственного угла  $\delta_K$  между нормалью реального  $\mathbf{n}_K$  и математически идеального концентратора  $\mathbf{n}_K^H$  на два плоских угла  $\Delta\gamma_K, \Delta\nu_K$ , для определения величины которых есть специальные методики. На рис. 2 схематично показаны эти углы, при этом  $\mathbf{n}_K = \mathbf{n}_K(\mathbf{n}_K^H, \Delta\gamma_K, \Delta\nu_K)$ .

Эксперимент проводится для реального концентратора. Для проведения теоретических исследований необходимо определить метод учёта неточностей. Большинство современных теоретических исследований проведено, используя не угловые, а линейные параметры неточности. В частности, в работе [4] параметр неточности определяется как отношение возможного радиуса фокального пятна к координате крайней внешней точки концентратора. Такой подход хорошо согласуется с методами расчёта, основанными на геометрическом подходе. Для задачи, поставленной выше, предлагается метод, основанный на предположении, что распределение угловых неточностей на поверхности реального концентратора подчиняется какому-то вероятностному закону.

Это может быть закон нормального распределения Гаусса [8], что согласуется с экспериментальными данными:

$$P(\Delta\gamma_K, \Delta\nu_K) = \frac{1}{2\pi\sigma_\gamma\sigma_\nu} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\gamma_K^2}{\sigma_\gamma^2} + \frac{\Delta\nu_K^2}{\sigma_\nu^2}\right)\right).$$

Выбор вероятностного закона распределения неточностей связан и с выбором метода решения задачи. Она была решена численно методом Монте-Карло. Отметим, что всякий кратный интеграл допускает двойную вероятностную трактовку, соответственно этому есть два способа статистического интегрирования [3]. В основе одного из них лежит известное соотноше-

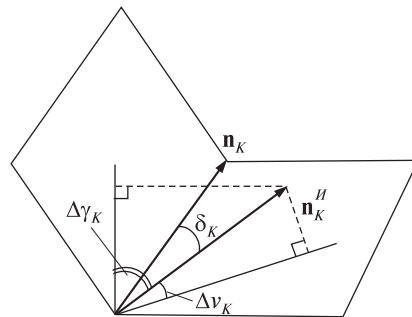


Рис. 2. К определению плоских углов  $\Delta\gamma_K$  и  $\Delta\nu_K$

ние между интегралом и вероятностью события, другой предполагает вычисление интеграла как математического ожидания функции некоторого двумерного случайного вектора. Так как первый способ требует предварительного задания экстремальных значений подынтегральной функции и обладает меньшей точностью, предпочтение было отдано второму.

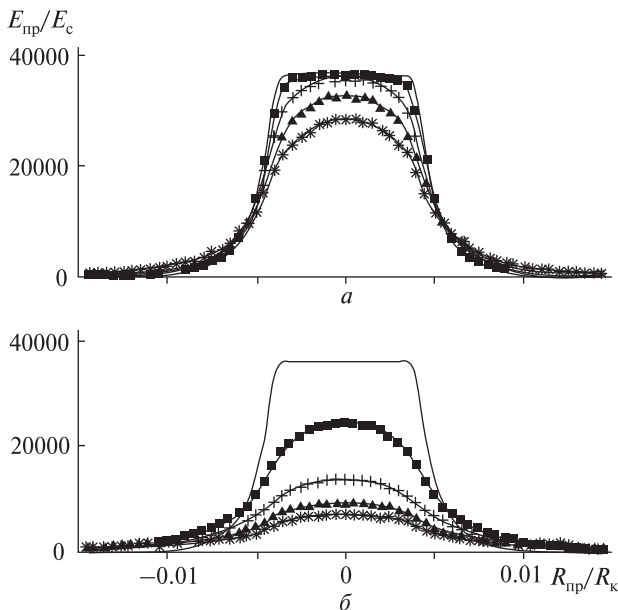
## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Моделирование проводилось в предположении, что концентратор точно ориентирован на Солнце, угловой размер отраженного пучка равен угловому размеру Солнца ( $\varphi_0 = \psi_C$ ), а распределение лучистых потоков в пучке по направлениям является равномерным ( $f(\varphi) = 1$ ).

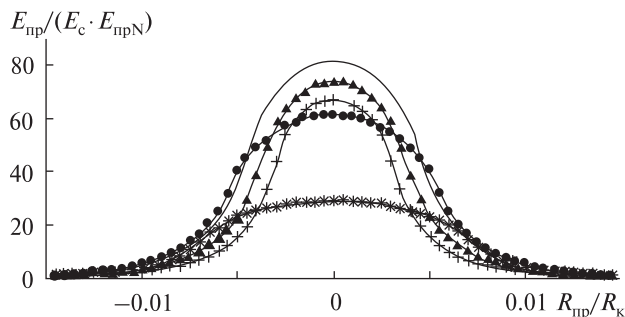
В качестве тестовой для численных экспериментов рассматривалась задача, которая была решена теоретически для случая концентратора идеальной геометрической формы [9].

Среднее квадратичное отклонение  $\sigma_\gamma$  нормали реального концентратора от идеального выбиралось в долях угла раскрытия Солнца  $\sigma_\gamma = A \cdot \psi_C$ . Предварительно были исследованы относительно точные зеркала, в которых  $A = 0 \dots 0.5$ .

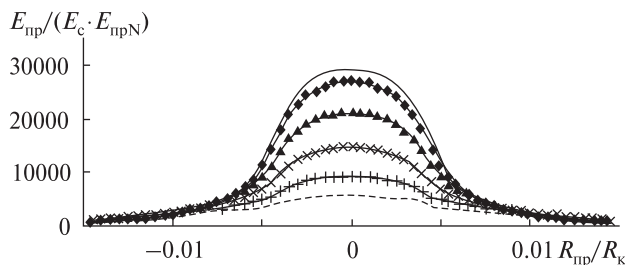
По рис. 3 можно проследить, как влияет небольшая неточность зеркала на энергетические характеристики теплоприёмника. Величину  $E_{\text{ПР}} / E_C$ , которая представляет собой отношение плотности теплового потока в рассматриваемой точке теплоприёмника к плотности теплового потока, падающего на концентратор (солнечной постоянной), можно рассматривать как относительную облучённость теплоприём-



**Рис. 3.** Влияние неточности поверхности зеркала при разных значениях  $A$  (кривые сверху вниз):  $a$  —  $A = 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5$ ;  $\delta$  —  $A = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$



**Рис. 4.** Влияние угла раскрытия  $U_k$  концентратора при  $A = 0.375$  (кривые сверху вниз): для  $U_k = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 50^\circ, 40^\circ$



**Рис. 5.** Изменение облучённости приёмника при отклонении теплоприёмника от фокальной плоскости на величину (сверху вниз):  $0, 0.2R_{пр}, 0.4R_{пр}, 0.6R_{пр}, 0.8R_{пр}, 1.0R_{пр}$

ника. Множитель  $A$  показывает, во сколько раз среднее квадратичное отклонение величины угла между нормальными реального и математически идеального концентратора (неточность поверхности) отличается от угла раскрытия Солнца  $\psi_c \approx 16'$ . Как видно, при угловом отклонении поверхности зеркала порядка  $0.5^\circ$  ( $A \approx 2$ ), облученность снижается практически на порядок. При этом распределение тепловых потоков на поверхности теплоприёмника становится более равномерным, а радиус фокального пятна растёт. В этом случае возникают проблемы, связанные с использованием теории подобия при исследовании рассматриваемого явления. Трудности с введением обобщённых переменных вообще характерны для задач лучистого теплообмена, сформулированных на фотометрической основе.

Тем не менее, на основе полученной математической модели удалось установить некоторые закономерности, характерные для параболических зеркал. В частности, был определён оптимальный угол раскрытия концентратора. На рис. 4 проиллюстрировано влияние угла раскрытия концентратора на энергетику теплоприёмника. По оси ординат отложена размерная величина  $(E_{пр} / E_c) \cdot 1 / E_{прN}$ , в которой  $E_{прN}$  — облучённость крайней точки теплоприёмника, попадающей в фокальное пятно. Введение такой величины позволило учесть размер фокального пятна. Как видно, энергетические характеристики наиболее высоки при угле порядка  $60^\circ$ , что полностью соответствует экспериментальным данным работы [8].

Третий фактор, влияние которого на теплообмен было исследовано — это расположение теплоприёмника относительно фокальной плоскости концентратора.

На рис. 5 представлено изменение энергетических характеристик теплоприёмника при незначительном отдалении его от фокуса. Как видно из графика, удаление от фокуса концентратора на расстояние, равное радиусу фокального пятна, почти на порядок снижает энергетические характеристики теплоприёмника. Для наглядности можно привести пример в абсолютных величинах. Так, для концентратора радиу-

сом 2 м радиус фокального пятна не превосходит 3 см, и отклонение теплоприёмника на такое расстояние существенно сказывается на его энергетике. Это свидетельствует о значительных проектных и технологических трудностях, связанных с вводом в эксплуатацию подобных систем в космосе и на Земле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При проектировании концентрирующих систем космического базирования для последующего высокотемпературного преобразования солнечной энергии требования точности изготовления и эксплуатации поверхности зеркал являются решающими.

2. Расположение входного отверстия теплоприёмника должно чётко совпадать с фокальной плоскостью концентратора для систем, проектируемых на определенный температурный уровень. Расположение входного отверстия в афокальных плоскостях существенно влияет на показатели теплообмена на поверхности теплоприёмника.

3. Наиболее рациональным можно считать угол раскрытия концентратора, близкий к 60°.

4. Созданная математическая модель позволяет рассчитывать зеркала любой геометрической формы с различными теплоприемниками. В частности, на основании созданной математической модели были рассчитаны параболоцилиндрические зеркала с трубчатыми теплоприёмниками, которые являются перспективными для использования на Земле. Результаты расчётов практически полностью совпали с результатами экспериментальных исследований на базе солнечного полигона АН Узбекистана [6].

1. *Гриликс В. А., Матвеев В. М., Полуектов В. П.* Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1975. — 248 с.

2. *Гудрамович В. С., Гайдученко А. П., Коваленко А. И.* Технологии изготовления устройств антенно-волновой техники и солнечной энергетики, основанные на методе электролитического формирования // *Космічна наука і технологія*. — 2001. — 7, № 2/3. — С. 66—77.
3. *Ермаков С. М., Михайлов Г. А.* Статистическое моделирование. — М.: Физматлит, 1982. — 295 с.
4. *Клычев Ш. И., Мухитдинов М. М., Бахрамов С. А.* Методика расчёта системы параболический концентратор-трубчатый приёмник солнечных теплоэнергетических установок // *Гелиотехника*. — 2004. — № 4. — С. 50—55.
5. *Кныш Л. И., Давыдов В. И.* Применение метода статистических испытаний для расчёта облучённости приёмника тепла концентрированным потоком солнечной энергии // *Вісник Дніпропетровського ун-ту. Механіка*. — 2009. — 17, № 5. — С. 51—59.
6. *Кохова И. И., Кабаков В. И., Эргашев С. Ф., Дробязгина О. С.* Результаты испытаний солнечной параболицилиндрической установки // *Гелиотехника*. — 1991. — № 2. — С. 14—16.
7. *Семёнов Ю. П.* Новые российские технологии в ракетно-космической технике последних лет // *Вестник Российской Академии наук*. — 2000. — 70, № 8. — С. 696—709.
8. *Сильверн Д.* Анализ требований к точности концентрирующих зеркал для солнечных энергетических установок // *Энергетические установки для космических аппаратов / Пер. с англ. под ред. Д. Д. Невяровского*. — М.: Мир, 1964. — С. 84—94.
9. *Simon A.* Calculation of the solar energy concentration in the focal spot of parabolic reflector // *J. Solar Energy Sci. and Engineering*. — 1968. — 2, N 2. — P. 25—28.

*Надійшла до редакції 16.05.11*

*L. I. Knysh*

## THE INFLUENCE OF CONCENTRATOR GEOMETRY ON THE ENERGY PARAMETERS OF THE RECEPTION SYSTEM OF THE SPACE SOLAR POWER PLANT

We give our results of numerical investigation of energy parameters for the heat reception system of a space solar power plant with the concentrator. A considerable influence of the mirror surface aberrations on the heat exchange in the system parabolic concentrator—heat receiver is revealed. The most rational aperture angle of the mirror is determined. It is shown that the heat receiver aperture can not be deflected from the concentrator focal plane without losses of heat power of the system.