

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

*На правах рукописи*

Д. П. Т Е П Л Я К О В

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ГЕЛИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ  
С ОТРАЖАЮЩИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Москва — 1957 г.

А 1

Научный руководитель  
доктор технических наук  
проф. В. А. БАУМ

130359.  
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
А.Н. Киргизской ССР

Годовой приход солнечной радиации на Землю по некоторым подсчетам в 20 000 раз превышает используемую человечеством в настоящее время энергию. Одной из особенностей этого вида энергии на Земле является значительная рассеянность (в среднем 700 ккал/м<sup>2</sup>час на площадку, ориентированную перпендикулярно к направлению на Солнце), и это затрудняет ее непосредственное использование в энергетических целях. Учитывая, что единица отражающей поверхности сегодня и останется, вероятно, на будущее дешевле, чем единица поглощающей поверхности (например, полупроводниковой, образованной фотоэлементами), следует считать перспективы использования солнечной радиации в энергетических масштабах связанными с концентраторами.

Явления лучистого теплообмена в гелиоустановках с отражающими концентраторами сложны и многообразны. Задача повышения эффективности использования солнечной энергии настоятельно требует подробного исследования всех элементов лучистого теплообмена в конкретных условиях работы этих установок. Тем большего внимания заслуживают процессы и явления, которые, не имея существенного значения для задач лучистого теплообмена теплотехнического характера, для гелиоустановок с отражающими концентраторами являются определяющими.

К таким явлениям в первую очередь относится концентрация прямой солнечной радиации при зеркальном отражении от поверхности, имеющей специальную геометрию (параболоид, параболоцилиндр и др.).

## I. ИДЕАЛИЗИРОВАННОЕ РЕШЕНИЕ

Для анализа закономерностей концентрации лучистой энергии Солнца зеркальным отражателем целесообразно в качестве исходной локальной характеристики поля излучения выбрать вектор переноса лучистой энергии, обозначаемый в дальнейшем ВПЛЭ. Эта характеристика состояния излучения в данной точке поля имеет, по-видимому, важнейшее значение при

исследовании направленного излучения и зеркального отражения лучистой энергии.

Для определения общих закономерностей поля концентрации на первом этапе решается идеализированная задача, которая предполагает, что угловые размеры источника излучения (Солнца) пренебрежимо малы (в пределе — нуль), а отражающая поверхность является абсолютно точной в геометрическом отношении.

Исходными данными при решении идеализированной задачи являются следующие положения:

1. Структура падающего на зеркало излучения — параллельный поток лучей плотностью  $E_0$  ккал/м<sup>2</sup>час.
2. Среда — полностью диатермична.
3. Влияние на поле концентрации посторонних источников излучения (в том числе диффузно излучающего небосвода) исключается.
4. Отражающая поверхность является «идеальным зеркалом», а коэффициент зеркального отражения  $R_3 \ll 1$  постоянен по поверхности зеркала и не зависит от угла падения лучей на отражающую поверхность.

Определению подлежит структура поля концентрации лучистой энергии, то есть величина и направление ВПЛЭ в каждой точке поля.

Допущенная идеализация позволяет найти, оперируя чисто геометрическими соотношениями, плотности излучения, падающего на противоположные стороны элементарных площадок, помещенных в точке А поля концентрации, одна из которых параллельна, а другая — перпендикулярна оптической оси (плоскости) отражателя\*:

<p>(а) Для параболоида</p> $\frac{E_{+r}}{E_0} = 0$ $\frac{E_{-z}}{E_0} = 1$ $\frac{E_{-r}}{E_0} = R_3 \frac{R}{r} \frac{dR}{dz}$ $\frac{E_{+z}}{E_0} = R_3 \frac{R}{r} \frac{dR}{dr}$	<p>(б) Для параболоцилиндра</p> $\frac{E_{+r}}{E_0} = 0 \quad (1)$ $\frac{E_{-z}}{E_0} = 1 \quad (2)$ $\frac{E_{-r}}{E_0} = R_3 \frac{dR}{dz} \quad (3')$ $\frac{E_{+z}}{E_0} = R_3 \frac{dR}{dr} \quad (4')$
--	---

\* Все последующие выводы даются параллельно для параболоидного (а) и параболоцилиндрического (б) концентраторов.

где  $r$  и  $z$  — координаты точки А в прямоугольной системе координат, когда ось  $z$  совпадает с оптической осью (плоскостью) концентратора, а ось  $r$  перпендикулярна ей;  $E$  — плотность излучения, падающего на соответствующую сторону намеченных площадок;  $R$  — расстояние от оптической оси (плоскости) концентратора до точки на отражающей поверхности, соответствующей намеченной точке А.

Имея в виду, что уравнение образующей зеркальной поверхности концентратора  $\rho_0 = \frac{p_0}{1 + \cos U}$  ( $p_0$  — фокальный параметр параболы),  $\frac{R}{r} = \frac{\rho_0}{\rho}$ ,  $dR = \rho_0 dU$  и  $dz = \frac{\rho dU}{\sin U}$ , преобразуем выражения (3') и (4') и получим для полярной системы координат:

$$\frac{E_{-r}}{E_0} = R_3 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \sin U \quad \left| \quad \frac{E_{-r}}{E_0} = R_3 \frac{\rho_0}{\rho} \sin U \quad (3)$$

$$\frac{E_{+z}}{E_0} = R_3 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \cos U \quad \left| \quad \frac{E_{+z}}{E_0} = R_3 \frac{\rho_0}{\rho} \cos U, \quad (4)$$

где  $\rho$  и  $U$  — координаты точки А в полярной системе координат, когда за полюс принят геометрический фокус, а за полярное направление — оптическая ось (след оптической плоскости).

Основываясь на том, что проекция ВПЛЭ на любое направление равна разности плотностей излучения, падающего на противоположные стороны плоского элемента, ориентированного перпендикулярно этому направлению, а рассматриваемые параллельно случаи сводятся к плоской задаче, получаем проекции ВПЛЭ для произвольной точки А ( $\rho, U$ ):

$$q_r = \mp E_0 R_3 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \sin U \quad \left| \quad q_r = \mp E_0 R_3 \frac{\rho_0}{\rho} \sin U \quad (5)$$

$$q_z = E_0 \left[ R_3 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \cos U - 1 \right] \quad \left| \quad q_z = E_0 \left( R_3 \frac{\rho_0}{\rho} \cos U - 1 \right) \quad (6)$$

(знак «+» в формуле (5) относится к точкам поля концентрации, знак «-» — к точкам поля рассеяния, когда гелиоприемник отсутствует).

Выражения (5) и (6) позволяют однозначно определить как величину, так и направление ВПЛЭ в любой точке рассматриваемого поля излучения:

$$|\vec{q}| = \sqrt{q_r^2 + q_z^2}$$

$$\cos(\hat{q}, z) = \frac{q_z}{|\vec{q}|}, \quad \cos(\hat{q}, r) = \frac{q_r}{|\vec{q}|}$$

Таким образом, поле излучения представляется как поле ВПЛЭ, определяемого в каждой точке полученными формулами.

Поле ВПЛЭ удобно разложить на два составляющих поля таким образом, что в каждой точке:

$$\bar{q} = \bar{q}_0 + \bar{q}_\Phi, \quad (7)$$

где  $\bar{q}_0$  — ВПЛЭ, соответствующий полю падающего на концентратор излучения,  $|\bar{q}_0| = E_0$ , а  $\bar{q}_\Phi$  — ВПЛЭ, соответствующий полю отраженного от концентратора излучения. При этом выражение для модуля вектора  $\bar{q}_\Phi$  приобретает ясный геометрический смысл:

$$|\bar{q}_\Phi| = E_0 R_3 \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^2 \quad \left| \quad |\bar{q}_\Phi| = E_0 R_3 \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (8)$$

а его направление соответствует строго фокальному.

Полученные решения позволяют перейти к оценке структуры рассматриваемого поля в целом посредством линий переноса лучистой энергии (ЛПЛЭ). Интегрирование дифференциального уравнения  $\frac{dr}{q_r} = \frac{dz}{q_z}$  приводит к уравнению семейства ЛПЛЭ в поле лучистой энергии в виде:

$$\rho^2 = \rho_0^2 R_3 - \frac{C_1}{\pi \sin^2 U} \quad \left| \quad \rho = \rho_0 R_3 - \frac{C_2}{\sin U}, \quad (9)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — произвольные постоянные. При  $C = 0$  частное решение дифференциального уравнения представляется в виде параболы с параметром:

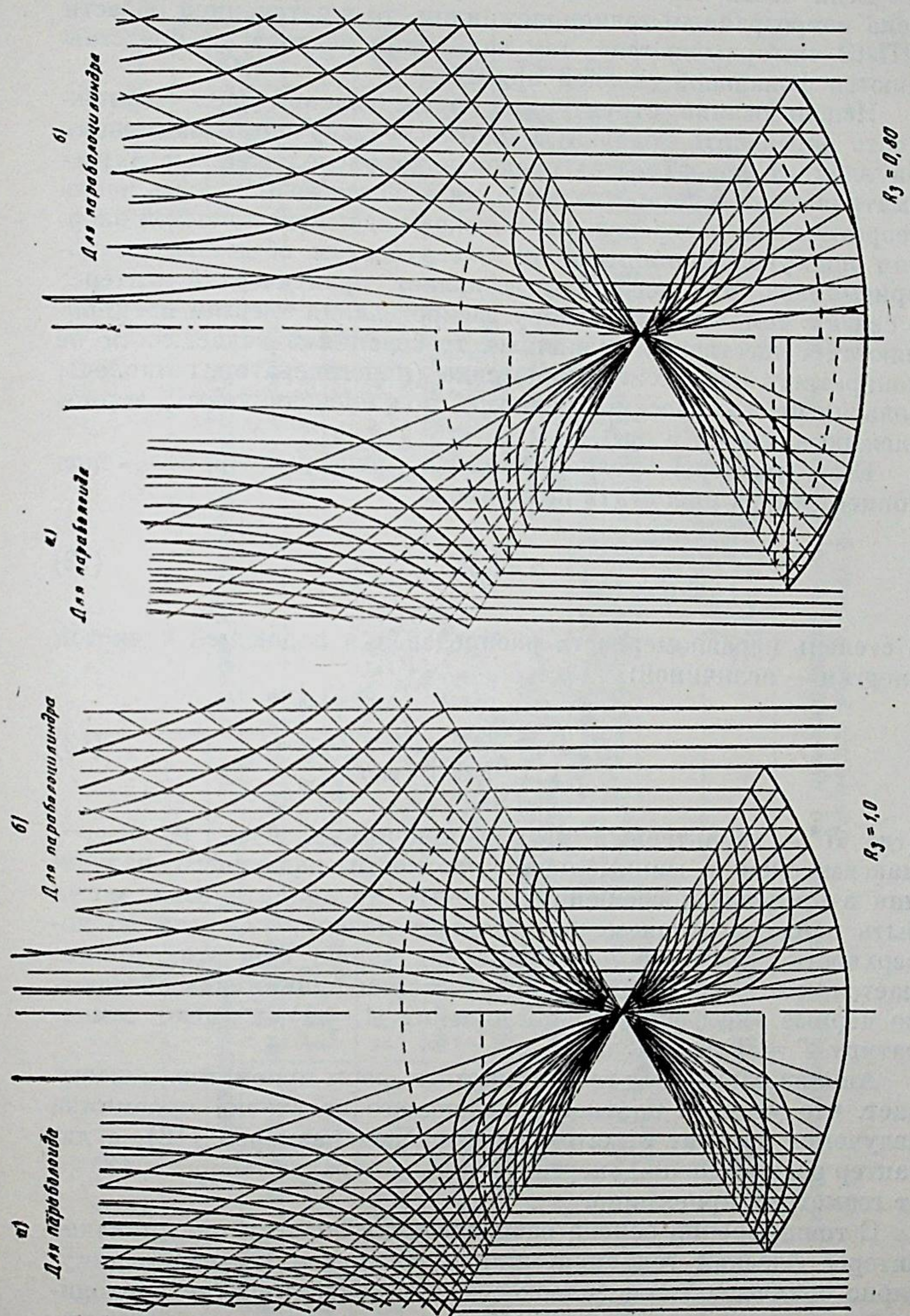
$$p = \rho_0 \sqrt{R_3} \quad \left| \quad p = \rho_0 R_3. \quad (10)$$

Для случая  $R_3 = 1$  она совпадает с исходной параболой, соответствующей отражающей поверхности концентратора.

Произвольные постоянные уравнения (9) удобно выразить в виде функции:

$$C_1 = \pi (R_3 R^2 - r^2) \quad \left| \quad C_2 = R_3 R - r, \quad (11)$$

что приводит к правилу графического построения ЛПЛЭ в исследуемом поле, которое полностью соответствует правилу графического сложения полей Максвелла (фиг. 1). В случае  $R_3 < 1$  это правило остается в силе, но роль отражающей поверхности играет воображаемый концентратор с параметром образующей параболы, определяемым выражением (10).



Фиг. 1. Структура поля концентрации и поля рассеяния в идеализированном случае

Если часть отражающей поверхности концентратора затенена непрозрачным гелиоприемником, то в затененной области ЛПЛЭ «выпрямляются», так как линии вектора  $\vec{\varphi}$  представляются фокальной связкой прямых.

Использование структурных представлений дает возможность определить локальную плотность излучения, падающего на элемент поверхности, произвольно расположенный в рассматриваемом поле. В связи с этим имеется возможность найти теоретическое распределение потоков падающей лучистой энергии по лучевоспринимающим поверхностям объемных гелиоприемников. Эта задача представляет практический интерес в связи с тем, что к характеру распределения энергии предъявляются существенно различные требования в зависимости от конкретного назначения приемника (парогенератор, гелиопечь, солнечный химический реактор, полупроводниковый термоэлектрогенератор и др.).

Если размеры гелиоприемника относительно размеров концентратора оценивать величиной:

$$n = \frac{R_0}{R^*}, \quad (12)$$

а степень неравномерности распределения падающей лучистой энергии — величиной:

$$\delta E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (13)$$

(где  $R^*$  — характерный размер приемника,  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  — максимальная и минимальная плотности падающего излучения в пределах «освещенной» зоны), то аналитически могут быть найдены закономерности распределения энергии по поверхности объемного приемника излучения. При этом принимается, что лучевоспринимающие стенки приемников абсолютно черные (коэффициент поглощения  $A = 1$ ) и имеют температуру  $T = 0^\circ \text{K}$  (таблица).

Анализ различных геометрических форм приемника показывает, что уровень плотности падающего на стенки приемника излучения зависит от его относительных размеров (12), а характер распределения энергии (степень неравномерности, 13) — от геометрии приемника.

С точки зрения закона распределения энергии представляет интерес плоский гелиоприемник, расположенный перпендикулярно оптической оси (плоскости) концентратора, не проходящий через геометрический фокус и полностью «перекрывающий» поле концентрации. Этот закон, найденный аналитически

Таблица

Индекс и схема приемника	Закон распределения энергии $E_{\text{пл}}$		Неравномерность распределения энергии $\delta E_{\text{пл}}$		Размеры и значение $\delta E_{\text{пл}}$ (%)	
	для параболоида	для параболоцилиндра	для параболоида	для параболоцилиндра	а)  а	б)  б
А	$E_0 R_0 \frac{n^2}{4 \cos^2 \varphi}$	$E_0 R_0 \frac{n}{2 \cos^2 \varphi}$	$\frac{\cos^4 \frac{\varphi}{2} - \cos^4 \frac{\varphi_{\max}}{2}}{\cos^4 \frac{\varphi}{2} + \cos^4 \frac{\varphi_{\max}}{2}}$	$\frac{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} - \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}$	n=10	27 15
Б	$E_0 R_0 \frac{n^2}{\cos^2 \varphi \cos \psi}$	$E_0 R_0 \frac{n}{8 \cos^2 \varphi}$	$\frac{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} \cos \psi_{\max} - \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos \psi}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} \cos \psi_{\max} + \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos \psi}$	$\frac{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} - \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}$	n=10	55 15
В	цилиндр	боковая стенка $E_0 R_0 n (1 - \cos \psi)$	$\frac{t \varphi^2 \cos^2 \psi_{\max} \sin \psi_{\max} - t \varphi^2 \cos^2 \psi \sin \psi}{t \varphi^2 \cos^2 \psi_{\max} \sin \psi_{\max} + t \varphi^2 \cos^2 \psi \sin \psi}$	боковая стенка $\frac{\cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}{2 - \cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}$	n=10	87 70
	полукруг	задняя стенка $E_0 R_0 \frac{n \cos^2 \psi}{2 \cos^2 \varphi}$	задняя стенка $\frac{\cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}{2 - \cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}$	$\frac{\cos^2 \psi_{\max} \cos^2 \varphi_{\max} - \cos^2 \psi \cos^2 \varphi}{\cos^2 \psi_{\max} \cos^2 \varphi_{\max} + \cos^2 \psi \cos^2 \varphi}$	$\frac{\cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}{2 - \cos^2 \psi_{\max} - \cos^2 \psi}$	$n_1=4$
Г	$E_0 R_0 \frac{n^2 \sin^2 \varphi + \psi}{4 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \psi}$	$E_0 R_0 \frac{n \sin^2 \varphi + \psi}{2 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \psi}$	$\frac{\sin^2 \varphi_{\max} \cos^2 \psi_{\max} - \sin^2 \varphi \cos^2 \psi}{\sin^2 \varphi_{\max} \cos^2 \psi_{\max} + \sin^2 \varphi \cos^2 \psi}$	$\frac{\sin^2 \varphi_{\max} - \sin^2 \varphi}{2 - \sin^2 \varphi_{\max} - \sin^2 \varphi}$	n=10	70 55
			$\frac{E_{\text{пл}} - E_{\text{пл}}}{E_{\text{пл}} + E_{\text{пл}}}$	$\frac{E_{\text{пл}} - E_{\text{пл}}}{E_{\text{пл}} + E_{\text{пл}}}$	$n=10$ $\frac{10^2 \cos^2 \varphi - 10^2}{10^2 \cos^2 \varphi + 10^2}$	10 7
Д	$E_0 R_0 n \cos \frac{\varphi}{2}$	$E_0 R_0 \cos \frac{\varphi}{2}$	$\frac{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} - \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}$	$\frac{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} - \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2} + \cos^2 \frac{\varphi}{2}}$	n=10 параболоид	7 7

Анализ распределения энергии по лучевоспринимающим стенкам объемных гелиоприемников некоторых характерных форм

на основании структурного представления поля концентрации, выражается формулой:

$$\left. \begin{aligned} (a) \quad E &= \frac{E_0 R_3 n^2 a_0^2}{(1 + a_0^2 r_0^2)^{1/2} [1 + (1 + a_0^2 r_0^2)^{1/2}]^2}; \\ (б) \quad E &= \frac{E_0 R_3 n a_0}{(1 + a_0^2 r_0^2)^{1/2} [1 + (1 + a_0^2 r_0^2)^{1/2}]}, \end{aligned} \right\} (14)$$

где  $r_0 = \frac{R}{R^*}$  — относительная координата,  $R^*$  — размер приемника, «перекрывающего» поле,  $a_0 = \operatorname{tg} U_{\max}$ . Аппроксимация выражений (14) к виду:

$$E = E_{\max} e^{-ar_0^2}, \quad (15)$$

который теоретически и экспериментально обоснован для реальных условий применительно к любой (в том числе и фокальной) плоскости, перпендикулярной к оптической оси (плоскости) концентратора, дает удовлетворительные результаты (среднее квадратическое отклонение составляет 12—14%).

Структурное представление поля концентрации допускает постановку «конфигурационной задачи»\*, заключающейся в определении геометрии приемника с заранее заданным законом распределения падающей лучистой энергии. Так, для «гелиоприемника равных тепловых напряжений» можно получить дифференциальное уравнение образующей в виде:

$$\rho'^2 = \varepsilon^2 \frac{\rho_0^4}{\rho^2} - \rho^2 \quad | \quad \rho'^2 = \varepsilon^2 \rho_0^2 - \rho^2, \quad (16)$$

где  $\varepsilon = \frac{E_0 R_3}{E^*}$ , а  $E^*$  — плотность излучения, падающего на лучевоспринимающую поверхность приемника, равномерная по этой поверхности. Уравнение (16) может быть использовано для анализа оптимальной геометрической формы полупроводникового термоэлектрогенератора, требующего равномерного распределения энергии.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

Идеализированная постановка задачи имеет в значительной степени условный характер с физической точки зрения. Например, параллельный поток лучистой энергии невозможен, а во-

\* Терминология заимствована у Ю. А. Суринова.

ображается как математическая абстракция. Это же относится к понятию «идеальное зеркало» и т. д. В силу этого идеализированная задача носит преимущественно геометрический характер и не охватывает всего комплекса физических явлений, сопровождающих концентрацию прямой радиации Солнца реальным отражающим концентратором. И хотя идеализированное решение вскрывает общие закономерности переноса лучистой энергии в поле концентрации, его результаты не могут полностью переноситься на реальную гелиоустановку, а могут заимствоваться лишь частично, при определенных ограничивающих условиях. Так, идеализированное решение тем лучше отражает реальные условия, чем меньший угловой размер имеет источник излучения и чем точнее выполнена отражающая поверхность (например, звезда и точный астрономический рефлектор). В целом же задача определения структуры поля концентрации в реальных условиях работы гелиоустановки представляет значительные трудности, и особенности реальной задачи могут быть проанализированы лишь при допущении ряда упрощающих предположений.

Геометрически реальная задача отличается от идеализированной тем, что источник излучения (Солнце) имеет конечный видимый угловой размер (в среднем  $\varphi_s = 32'$ ), а отражающая поверхность концентратора всегда имеет большие или меньшие отклонения от исходной геометрии.

Пренебрегая диффузной радиацией небосвода, можно считать, что поле падающей лучистой энергии характеризуется в каждой точке индикатриссой (телом распределения яркости), которая целиком располагается в пределах видимого телесного угла Солнца и может быть построена на основании известного распределения яркости по солнечному диску.

Учитывая расстояние до Солнца, а также центральную симметрию в распределении яркости по его диску, можно считать, что ВПЛЭ поля падающего излучения параллелен оптической оси (плоскости) концентратора. Т. е. с точки зрения структуры падающего излучения реальная задача не отличается от идеализированной.

Принципиальной особенностью реальной задачи является наличие диффузной составляющей при отражении солнечной радиации от реальных зеркал, применяемых в гелиотехнике. Индикатрисса отражения, дающая наиболее детальное представление об этом явлении, для рассматриваемого случая имеет, как правило, совокупность направлений, по которым яркость отраженных лучей имеет преимущественные значения. Положим, что для каждой точки отражающей поверхности действительная индикатрисса отражения аппроксимируется к некоторой условной (эквивалентной) индикатриссе, целиком распо-

женной в пределах кругового конуса с плоским углом  $\varphi$  при вершине, а яркость  $B$  этой индикатрисы одинакова по всем направлениям внутри конуса\*. Полагая также, что яркость  $B$  не зависит от угла падения лучей на отражающую поверхность, а геометрические оси всех эквивалентных отраженных пучков проходят через геометрический фокус концентратора\*\*, можно проанализировать основные закономерности переноса лучистой энергии в поле концентрации в реальных условиях.

Учитывая для этого, что атмосферный воздух можно считать диатермичной средой, в любой точке исследуемого поля можно построить индикатриссу отраженного излучения, которая характеризуется постоянным значением яркости  $B$  в пределах некоторого телесного угла, определяемого геометрическими построениями. Последующий переход от индикатриссы яркости к ВПЛЭ в каждой данной точке поля позволяет наметить качественную структуру переноса лучистой энергии в поле отражения.

В спектральном отношении для реальной задачи характерно: а) определенный спектральный состав прямой солнечной радиации, падающей на концентратор, б) вполне определенные селективные свойства материалов, применяемых в качестве зеркальных отражающих покрытий (стеклянные посеребренные зеркала, полпрованый алюминий), в) «шероховатость» реальных зеркальных поверхностей.

Учет селективных качеств отражающих материалов (зависимость монохроматического  $R_3$  от  $\lambda$ ) приводит к выводу о зависимости монохроматической структуры поля концентрации в реальных условиях от того, к какому интервалу длин волн излучения она (эта структура) относится. Характер этой зависимости может быть прослежен по результатам решения идеализированной задачи при  $R_3 < 1$ .

«Шероховатость» реальных зеркально отражающих поверхностей приводит к тому, что длинноволновая (инфракрасная) часть солнечного спектра при отражении рассеивается в меньшей степени, чем видимая и ультрафиолетовая части, а видимая часть рассеивается меньше, чем ультрафиолетовая. В этом проявляется известный, физически обоснованный факт, заключающийся в том, что чем больше длина волны излучения, тем более «гладкой» представляется реальная отражающая поверхность,

\* Такое предположение в сущности близко к допущению о равномерном распределении энергии по площадке, расположенной перпендикулярно геометрической оси элементарного отраженного пучка (Р. Апариси, F. Trombe, F. Sabannes).

\*\* Значительные геометрические неточности концентратора зависят от его конструкции и технологии изготовления и здесь не рассматриваются.

которая для коротковолнового излучения оказывается более «шероховатой»\*.

Хотя затронутые вопросы нуждаются в самостоятельной теоретической и экспериментальной разработке, уже сейчас можно указать пути и возможные результаты учета этого явления при настоящем рассмотрении. Практически при решении реальной задачи это может быть учтено тем, что величина раскрытия  $\varphi$  эквивалентного отраженного пучка будет рассматриваться как функция  $\lambda$  (по-прежнему имеем в виду возможность аппроксимации реальной монохроматической индикатриссы отражения к эквивалентной, оговоренной выше). При этом следует ожидать, что чем большим берется  $\lambda$ , тем меньший угол раскрытия  $\varphi$  будет иметь эквивалентный отраженный пучок. С этой точки зрения положение и размеры фокального изображения, геометрические очертания поля концентрации в целом зависят от того, к какому интервалу спектра относится рассмотрение.

Настоящая постановка вопроса приводит к выводу о различии спектрального состава отраженной лучистой энергии в пределах угла раскрытия элементарного отраженного пучка, относимого к интегральному излучению.

Наиболее осязаемое различие в спектральном составе отраженного солнечного излучения за счет «шероховатости» отражающей поверхности следует ожидать в пределах фокальной плоскости относительно точного\*\* концентратора. При этом ближе к оптической оси (плоскости) будут, по-видимому, сосредоточены инфракрасные лучи солнечного спектра, содержание которых должно убывать к периферии фокального изображения. Этот эффект пространственного «расслоения» спектра может иметь определяющее значение для выявления оптимальной конструкции гелиоприемников с четко выраженными свойствами селективного поглощения (фотохимические реакторы и др.).

Приводимый анализ особенностей реальной задачи должен рассматриваться в основном как постановка реальной задачи, но не как полное ее решение.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования структуры поля концентрации проводились на световых моделях гелиоустановок. Основ-

\* Геометрическая точность концентратора и «шероховатость» отражающей поверхности в данной постановке вопроса условно разделяются. Первая может рассматриваться как макро-, вторая — как микроточность.

\*\* Наличие заметных макронеполюсностей приведет, очевидно, к выравниванию спектрального состава отраженного излучения по фокальному изображению.

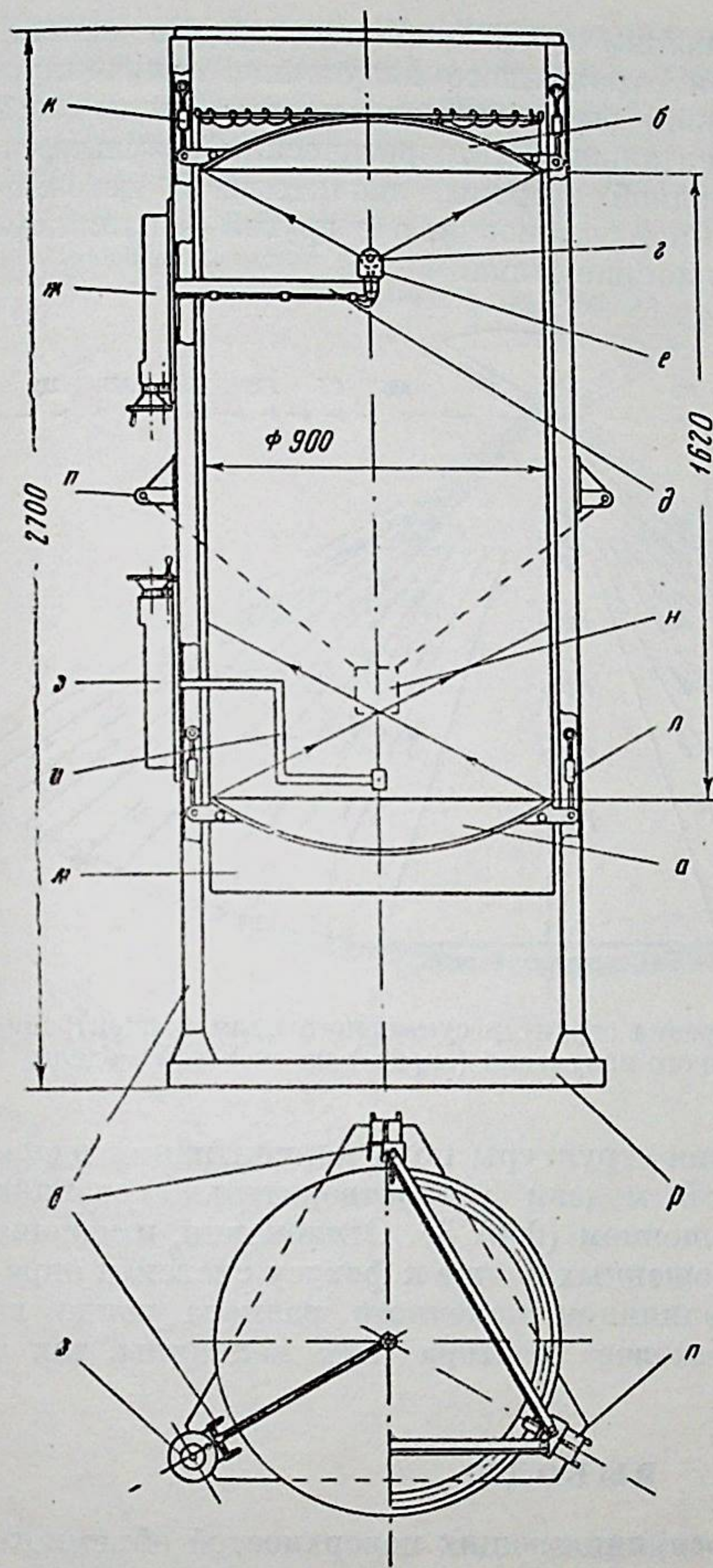
ное отличие поставленной экспериментальной задачи от задач, решаемых обычно на световых моделях, заключалось в двух обстоятельствах. Во-первых, световому моделированию подвергалось поле в основном направленного характера (результат наложения поля направленного излучения на поле зеркального отражения) и, во-вторых, экспериментальному определению подлежали световые векторы (в смысле, данном А. А. Гершуном) в различных точках светового поля модели. Эти две особенности определили как схемы световых моделей гелиоустановок, так и применяемую измерительную аппаратуру.

Так предварительные опыты были проделаны на параболоидной гелиоустановке с стеклянным посеребренным отражателем прожекторного типа диаметром 2 м, являющейся при искусственном освещении собственной световой моделью. При ночных опытах установка фокусировалась на неподвижный световой источник в виде сферического плафона из молочного полностью светорассеивающего стекла с помещенной внутри электролампой 2 квт. Источник был расположен в 16 м от установки, и его видимый угловой размер по отношению к установке составлял  $1^\circ$ . Источником освещения при измерениях структуры поля отражения вблизи фокуса параболоидной гелиоустановки диаметром 10 м (г. Ташкент) служила полная Луна, видимый угловой размер которой приблизительно равен солнечному. При опытах установка непрерывно фокусировалась на Луну, а измерения производились в полости объемного гелиоприемника (парогенератора). Последующие эксперименты проводились в лабораторных условиях на специально созданной световой модели гелиоустановки (фиг. 2).

В качестве чувствительных элементов при измерениях использовались селеновые фотоэлементы, которые для поставленных целей обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими известными способами измерения и регистрации световых потоков (их размеры могут быть выбраны минимальными, они постоянно готовы к измерениям, отличаются быстротой отсчета, прямолинейностью и достаточной устойчивостью характеристики, слабо выраженной угловой чувствительностью).

Измерения структуры поля концентрации на световых моделях гелиоустановок производились фотозондами-вектроскопами трех конструкций\*. Два из них имели в качестве остова текстолитовые кубики с размерами ребра 50 и 25 мм, на гранях которых устанавливались заранее или непосредственно при измерениях фотоэлементы. Третий фотозонд вовсе не имел какого-либо телесного элемента. Фотоэлемент этого зонда при

\* Идея создания подобных зондов высказана А. А. Гершуном.



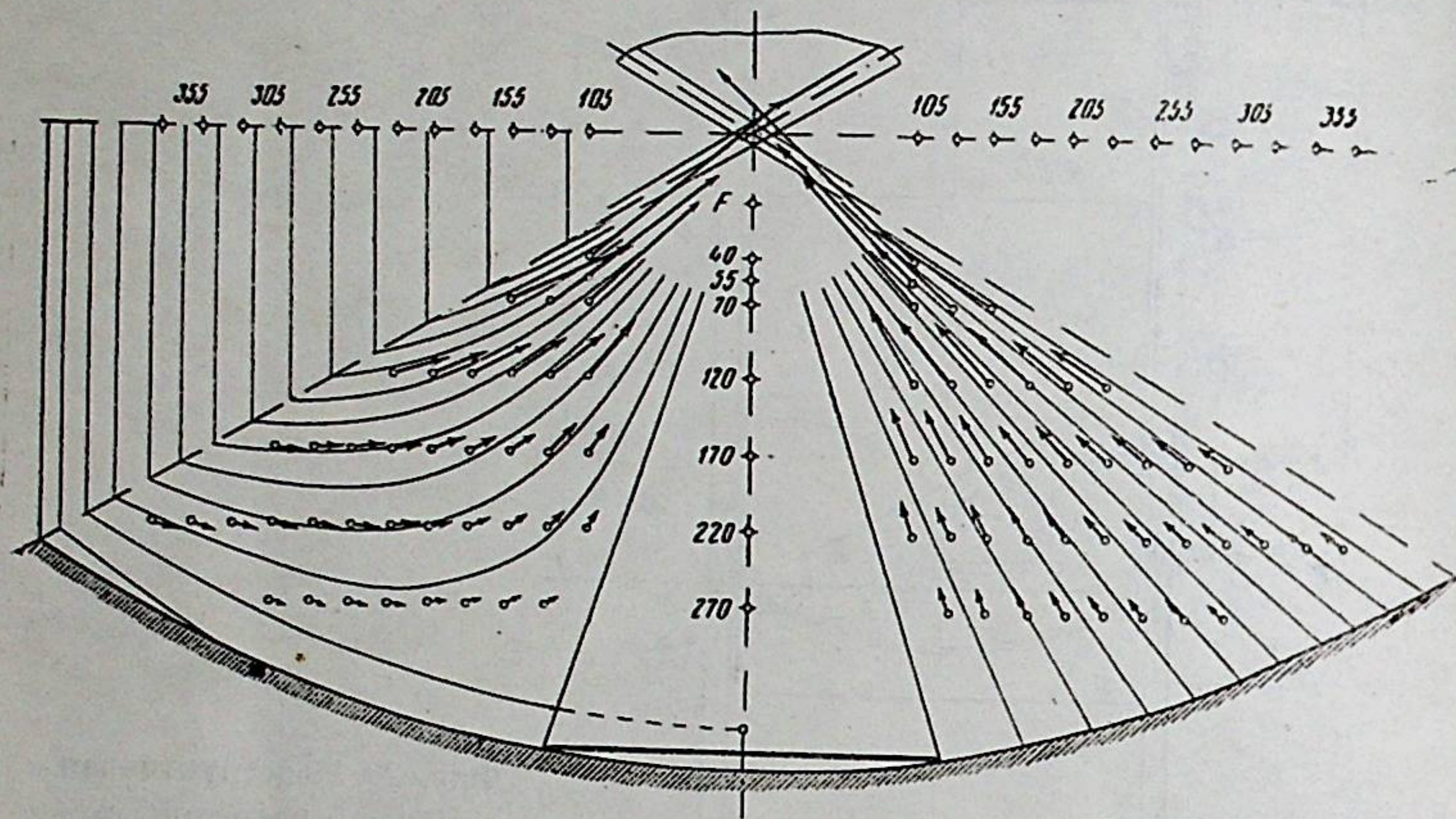
Фиг. 2. Конструктивная схема лабораторной световой модели гелиоустановки (а, б — зеркальные параболоиды, в — каркас, г — источник освещения, д — кронштейн осветителя, е — экран, ж, з — механизмы перемещения, и — кронштейн, к, л — подвеска зеркал, м — круговая штора, н — модель гелиоприемника, п — кронштейн, р — основание)

измерениях поворачивался (от руки) вокруг оси, совпадающей с плоскостью фотоэлемента, благодаря чему влияние конечного размера зонда на точность измерений предельно уменьшалось.

Результаты измерения структуры поля отраженного излучения вблизи фокуса параболоидной гелиоустановки диаметром



10 м при лунном освещении в основном подтвердили качественную структуру поля отраженного излучения, полученную на основании оговоренной выше аппроксимации. Имеющиеся расхождения экспериментальных и теоретических результатов объяснялись также, с одной стороны, значительной неточностью концентратора данной установки, а с другой — влиянием отражения света от гелиоприемника.



Фиг. 3. Результаты измерения структур суммарного поля концентрации (слева) и поля отраженного излучения (справа) на световой модели

Результаты измерения структуры поля концентрации вдали от фокуса лабораторной модели удовлетворительно совпали с идеализированным решением (фиг. 3). Отклонения, имеющие место для точек, расположенных ближе к фокусу системы, определялись в основном влиянием конечного размера зонда на точность измерения светового вектора (как величины, так и направления).

### ВЫВОДЫ

1. Геометрия лучевоспринимающих поверхностей объемного гелиоприемника должна назначаться в зависимости от конкретного назначения приемника (парогенератор, высокотемпературная гелиопечь, полупроводниковый термоэлектрогенератор и др.), а также в зависимости от размеров, типа и характеристик точности применяемого концентратора.

2. Результаты идеализированного решения тем ближе к реальным условиям, чем точнее выполнен концентратор и чем

дальше от фокуса находятся точки поля, рассматриваемые с точки зрения структуры переноса лучистой энергии. Тепловой расчет объемного гелиоприемника, лучевоспринимающие поверхности которого расположены не слишком близко к геометрическому фокусу точного концентратора, можно основывать на структурном представлении поля концентрации, используя идеализированное решение.

3. Определение структуры переноса лучистой энергии в поле концентрации в реальных условиях работы гелиоустановок требует специальных теоретических и экспериментальных исследований индикатриссы отражения прямой солнечной радиации от зеркал, применяемых в качестве отражающих поверхностей для гелиоустановок. Эти исследования должны учитывать спектральные явления при отражении, что совершенно необходимо при использовании приемников с выраженными свойствами селективного поглощения (фотохимические реакторы и др.).

4. Экспериментальные исследования полей направленного излучения и зеркального отражения на световых моделях возможны и целесообразны. Световые поля моделей гелиоустановок в том виде, как они использовались, воспроизводят основные закономерности переноса лучистой энергии в поле концентрации реальных гелиоустановок.

5. При экспериментальном изучении структуры поля излучения на световых моделях целесообразно применять зонды — вектроскопы с селеновыми фотоэлементами, подобные использованным. Точность измерения величины и направления светового вектора с помощью таких зондов зависит от размеров зонда, величины фотоактивной поверхности элемента и местоположения зонда в световом поле модели.

Материалы диссертации опубликованы в виде статьи в Сборнике трудов IV конференции молодых ученых, Изд. ЭНИН АН СССР, 1957 г. и в "Инженерно-физическом журнале" Изд. АН БССР, №4, 1958 г.

130359.

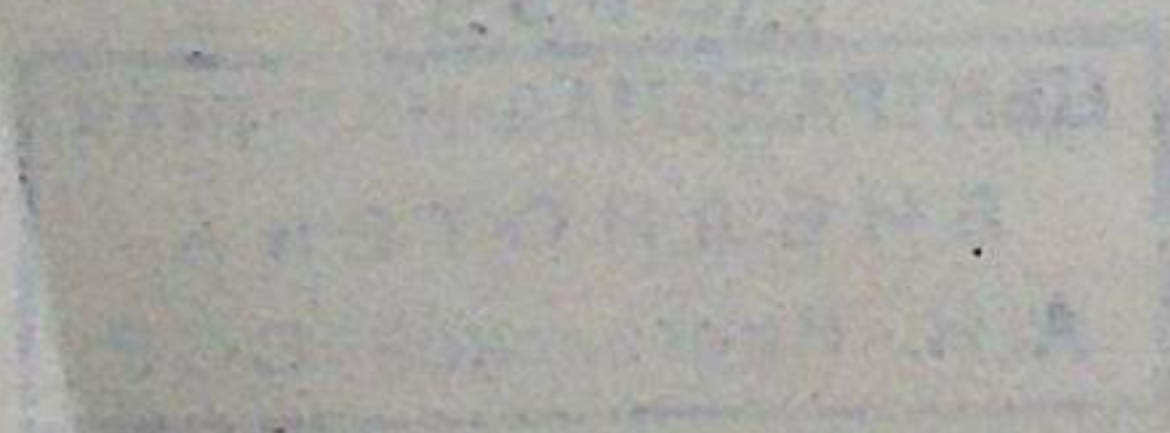
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
А. Н. Киргизской ССР

Для заметок

---

Для заметок

---



Подп. к печ. 19/XII 1957 г. Формат 60×92<sup>1/16</sup>  
Печ. л. 1,25. Уч.-изд. 1,25 л. Тираж 125 экз.  
Т-10838. Тип. зак. № 2116

Издательство Академии наук СССР  
Москва Б-64, Подсосенский пер., д. 21

---

2-я тип. Издательства АН СССР  
Москва Г-99, Шубинский пер., д. 10