

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. И. ВАВИЛОВА

В. Б. ВЕЙНБЕРГ

ОПТИКА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВА-
НИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

1956

*Работа выполнена в Государственном ордена Ленина
Оптическом институте имени С. И. Вавилова*

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Излучения Солнца	4
Концентраторы солнечных лучей	4
Прозрачная изоляция солнечных установок	13
Передача энергии излучений теплоносителю солнечных установок	15
Условия наилучшего улавливания излучений Солнца и неба	20
Производительность солнечных установок	22
Список работ В. Б. Вейнберга, на которые в автореферате имеются ссылки	25

118746
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. Киргизской ССР

ОПТИКА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Автореферат диссертации

Введение

СССР в своей южной части располагает практически неограниченными ресурсами солнечной мощности. Можно показать, что на территории, которую занимает солнечная тепловая установка, поверхностная плотность используемой мощности не меньше, чем поверхностная плотность мощности на территории установок с другими источниками энергии, которыми пользуется человечество. Рассмотрение истории развития гелиотехники¹ и её современного состояния показывает, что всё же солнечная энергия используется только для естественного освещения и отопления зданий, теплиц и парников. Солнечные установки других назначений пока осуществлялись лишь как опытные и полупромышленные образцы. Из них наибольшее распространение получили солнечные водонагреватели. Ещё нет конструктивно отработанных и массово изготавливаемых типов солнечных тепловых установок, проверенных опытом многолетней эксплуатации. Это задерживает широкое применение солнечной энергии в народном хозяйстве страны. Однако мысли М. В. Ломоносова, Д. И. Менделеева, А. Мушо, Ф. Шумана, Б. П. Вейнберга, Д. С. Рождественского, Ч. Г. Аббота, С. И. Вавилова, М. В. Кирпичева и др. о необходимости применения энергии Солнца для службы человеку встречаются в СССР все более широкий отклик.

Настоящее исследование подводит итог 25-летним работам автора. В нём рассматривается решение некоторых задач проблемы широкого применения солнечной энергии для техниче-

¹ Не относя к гелиотехнике естественных фотохимических процессов.

ских целей, а именно: вопросы концентрации солнечных лучей, оптические свойства прозрачной тепловой изоляции солнечных установок, а также влияние оптических параметров элементов конструкции таких установок на их производительность. Часть работ автора, относящихся к этим вопросам, опубликована. Список некоторых из них дан в конце реферата. Многие положения, лишь упомянутые в реферате, в этих работах рассмотрены детально.

Излучения Солнца

Для работы солнечных установок определяющей характеристикой является энергетическая освещённость от Солнца. Существенна также энергетическая освещённость от неба и отражение излучений от земного покрова и предметов, соседних с солнечной установкой. Данные о суточном ходе этих величин на территории СССР представлены для дат, симметричных по склонению Солнца, в форме, удобной для расчётов, учитывающих вероятность типа погоды [11, 16]¹ и устойчивость её во времени и по территории.

С целью облегчения энергетических расчётов солнечных установок графики энергетической яркости неба построены в равновеликой проекции Ламберта с нанесением положений Солнца, соответствующих срединам промежутков времени, за которые от Солнца приходят одинаковые количества освещения.

Для возможности сопоставления различных типов солнечных установок рекомендованы типичные для юга Средней Азии комплексы характеристик геофизических элементов [6].

Чтобы облегчить выбор прозрачного материала тепловой изоляции солнечных установок и светопрёмов сооружений, приведены данные о спектральном составе и биологической активности излучений Солнца и неба [16, 19].

Концентраторы солнечных лучей

Концентрация солнечных лучей на поверхности приёмника обычно значительно повышает эффективность солнечных установок и расширяет круг возможных их применений. Для этого применимы линзовые и зеркальные системы, собирающие солнечные лучи в круглое или удлинённое фокальное пятно или же в фокальную полосу [2, 18].

¹ Цифры в квадратных скобках — ссылки на работы автора по списку в конце реферата.

Средняя энергетическая освещённость E в фокальном пятне идеальной тонкой системы не может превышать энергетическую освещённость E поверхности, перпендикулярной солнечным лучам более чем в $1/\alpha_0^2 = 11400$ раз, где α_0 — видимый угловой диаметр солнечного диска. В центре фокального пятна энергетическая освещённость может быть приблизительно в пять раз больше. Наибольшее её значение составляет около $40 \cdot 10^6$ ккал/м²час $\cong 5$ квт/см².

Энергетическая освещённость в фокальном пятне реальных линзовых или зеркальных систем меньше этих предельных значений, так как:

а) часть энергии теряется в линзе или же при отражении от зеркала,

б) концентратор неизбежно обладает аберрациями, как бы увеличивающими угол, в пределах которого могут лежать лучи, выходящие из элементов оптической системы,

в) форма поверхности приёмника, её расположение по отношению к Солнцу, форма контуров поверхности оптической системы и её апертура не всегда оптимальны.

Отношение средней по фокальному пятну энергетической освещённости к энергетической освещённости на поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, — величина концентрации солнечных лучей C — есть критерий для выбора типа концентратора и углов охвата оптической системы. Параметры оптической системы, обеспечивающие наибольшие значения C , зависят от расположения приёмника относительно Солнца и от формы его поверхности. Автором предложен общий метод отыскания решений таких задач [18], а для типичных случаев формы и расположения приёмника даны схемы оптимальных оптических систем.

Даже идеально изготовленная круглая дисковая ступенчатая не ахроматизированная стеклянная линза может обеспечить в среднем по фокальному пятну величину концентрации солнечных лучей C лишь около 500. Концентрация же, которую можно получить от цилиндрической не ахроматизированной стеклянной линзы на узкой длинной полосе, перпендикулярной солнечным лучам, ещё меньше и составляет лишь около 20.

Зеркальные системы позволяют осуществлять более высокие концентрации солнечных лучей. Так, на круглой площадке приёмника, обращённой в сторону, противоположную Солнцу,

параболоидальное зеркало с углом охвата зеркала $2\gamma = 90^\circ$ может обеспечить концентрацию

$$C = \frac{r}{\alpha^2}, \quad (1)$$

где r — коэффициент отражения зеркала,

α — угол при вершине конуса, ось которого проходит через фокус зеркала, в пределах которого лежат лучи, отражённые от бесконечно малого элемента поверхности зеркала.

Это наибольшее значение концентрации C может быть достигнуто и на шаровом приёмнике при угле охвата зеркала $2\gamma = 180^\circ$.

Для круглой площадки приёмника, лежащей в плоскости падения солнечных лучей, значение C может достигать лишь до 0,80 от значения (1), а для площадки, обращённой к Солнцу, для простого парабоидального зеркала — 0,76 от значения (1). Применяя ступенчатый отражатель, в последнем случае концентрацию можно довести почти до значения (1).

С помощью реальных высококачественных парабоидальных зеркал достижима концентрация солнечных лучей $C \cong 7000$. Для решения большинства практических задач использования солнечной энергии достаточны меньшие концентрации лучей, осуществимые с помощью приближённо парабоидальных, сферических, конических и парабо-цилиндрических зеркал.

Участок парабоида вблизи его вершины может быть заменен сферой. Сферическое зеркало при угле охвата $2\gamma = 40^\circ$ обеспечивает наибольшую концентрацию солнечных лучей $C \cong 2500$.

Приближённо парабоидальные зеркала могут быть составлены из плоских facets. При этом углы α в меридиональной и сагиттальной плоскостях больше, чем для парабоидального зеркала соответственно на:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_m &= \frac{C_m}{\rho} \sqrt{\frac{f}{\rho}}, \\ \alpha_c &= \frac{C_c}{\rho}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где C_m и C_c — размеры facets в меридиональном и сагиттальном сечении парабоида,

ρ — расстояние от центра facets до фокуса парабоида,

f — фокусное расстояние парабоида.

Если приближенно парабоидальный отражатель собран из сферических facets, радиусы кривизны которых взяты средними из радиусов кривизны R_m и R_c меридионального и сагиттального сечений соответствующей зоны парабоида, то в уравнениях (2) за C_m и C_c следует принимать величины в $\frac{R_m - R_c}{R_m + R_c}$ раз меньшие, чем соответствующие размеры сферических facets. При применении сферических facets их площадь может быть увеличена по сравнению с плоскими при той же величине концентрации C в фокальном пятне. На зонах, соответствующих углам охвата $2\gamma = 60, 120$ и 180° , переход от плоских facets к вогнутым допускает увеличение площади отдельных facets в 900, 50 и 9 раз без снижения концентрации.

Приближенно парабоидальные зеркала могут быть составлены из лент, вырезанных из эллиптических (в частном случае круговых) конусов. В таких системах фокальные пятна от отдельных полос сильно вытянуты и накладываются одно на другое. Ширина таких фокальных пятен близка к диаметру фокального пятна парабоидального зеркала, изготовленного с той же точностью, а длина — немного превышает наибольшую ширину лент. Расположение и форму зеркальных лент следует выбирать соответственно требуемому положению такого вытянутого фокального пятна. Вершины конусов, из которых вырезаны зеркальные ленты, должны лежать на продолжении большой оси удлиненного фокального пятна. Только одна из таких лент, образующие которой параллельны большой оси фокального пятна, может быть вырезана из параболического цилиндра.

Такие приближенно парабоидальные зеркала потребуют меньшего расхода материала на изготовление, чем точные обычные парабоидальные. Концентрации, практически осуществимые с помощью таких зеркал, лежат между значениями, соответствующими точным парабоидальным зеркалам и системам, составленным из плоских facets. Однако приближенно парабоидальные зеркала, собранные из парабо-цилиндрических лент, не могут обеспечить концентрацию солнечных лучей, много большую, чем системы, собранные из плоских зеркал, размеры которых близки к ширине лент. Поэтому изготовление таких систем не оправдано.

В работе рассмотрен класс зеркальных поверхностей, собирающих параллельные лучи в линию. Только зеркальная по-

верхность, образованная как огибающая поступательно перемещающегося параболоида, собирает лучи, параллельные оси параболоида, на следе его фокуса. Параболоид, образующий поверхность, при этом может плавно менять своё фокусное расстояние. Такая поверхность осуществима при выполнении следующего условия:

$$2 \frac{df}{d\varphi} < 1 + \cos\varphi, \quad (3)$$

где $\frac{df}{d\varphi}$ — производная фокусного расстояния образующего параболоида по длине фокальной кривой,
 φ — угол между фокальной кривой и направлением лучей.

Такая поверхность может быть составлена из элементарных лент, вырезанных из конусов второго порядка. Линия, соединяющая вершину конуса с фокусом ленты, вырезанной из этого конуса, касательна к фокальной кривой. Каждая из таких бесконечно узких лент находится в плоскости, пересекающей директрису образующего параболоида по той же прямой, по которой её пересекает плоскость, нормальная к фокальной линии в фокусе данной ленты.

По отношению к образующему параболоиду огибающие поверхности могут быть внешними или же внутренними. Часть поверхности может быть внешней, часть — внутренней огибающей.

Из поверхностей, собирающих параллельные лучи в линию, практический интерес представляют: разворачиваемые поверхности — параболические цилиндры, круговые конусы и эллиптические конусы (как элементы приближённых параболоидов) и неразворачиваемые — параболические торы.

Только параболо-цилиндрические зеркала собирают на фокальной линии все лучи, лежащие в плоскости симметрии зеркала, параллельной его образующим. Наибольшая величина концентрации, которую может обеспечить параболо-цилиндрическое зеркало, в среднем на фокальной полосе приёмника составляет

$$C = \frac{r}{a}. \quad (4)$$

Это имеет место, если приёмник обращён в сторону, противоположную Солнцу, а угол охвата зеркала составляет $2\gamma = 90^\circ$.

Если же приёмник лежит в плоскости солнечных лучей и в виде полосы вытянут в направлении, им перпендикулярном, C может достигать до 0,76, а для приёмника, обращённого к Солнцу — 0,59 от значения (4).

Если приёмник имеет форму цилиндра, ось которого перпендикулярна солнечным лучам, наибольшее значение C составляет 0,63 от вычисленного по формуле (4); придав же приёмнику форму призмы с ромбом в основании, можно увеличить концентрацию на 40%.

В солнечных паровых котлах приёмник может быть осуществлён в виде круглой трубы. Изолировав необлучаемую часть поверхности такого котла и раздвинув половины параболо-цилиндрического зеркала, можно довести концентрацию C на поверхности нагрева до 0,96 от значения (4).

Параболо-цилиндрические зеркала могут быть изготовлены с высокой точностью из плоских листов полированного металла, упруго выгнутых и прижатых к параболическим нервюрам.

С помощью параболо-цилиндрических зеркал, поворачиваемых вместе с двухщелевой изоляцией вокруг неподвижной трубки котла, расположенной по оси мира, могут быть достигнуты концентрации солнечных лучей порядка $C=30-60$, достаточные уже для получения пара высокого давления.

Параболо-цилиндрические зеркала, образующие которых вытянуты с востока на запад, могут быть неподвижными в течение дня. С помощью таких зеркал достижимы концентрации солнечных лучей порядка $C=2-4$ с двух сторон на вертикальном плоском котле, вытянутом с востока на запад. Котёл в этом случае обогревается с севера лучами, отражёнными от круто наклонённого зеркала, а с юга — от зеркала, полого расположенного вблизи земли. Эти системы могут быть применены для получения горячей воды или же пара низкого давления в тех случаях, когда необходима предельная простота эксплуатации.

На боковой поверхности цилиндрического приёмника с помощью параболо-торического зеркала можно получить концентрацию солнечных лучей на 75% большую, чем с помощью параболоидального зеркала. Приближённые параболо-торические зеркала могут быть составлены из лент, вырезанных из параболических цилиндров.

Круговые конические зеркала позволяют получать концентрации солнечных лучей вдвое большие, чем параболо-цилиндрические, однако такие системы, равно как и параболоидаль-

ные и параболо-торические зеркала, требуют поворота установки к Солнцу.

Из эллипсо-конических лент могут быть составлены приближённо параболоидальные зеркала, собирающие солнечные лучи на полосках на двух сторонах поверхности неподвижного цилиндрического приёмника, расположенного по оси мира, в изоляции которого оставлены с двух сторон щели для прохода солнечных лучей. Такие зеркала целесообразно монтировать на параллактической установке и поворачивать их вместе с изоляцией вокруг приёмника. С помощью этих систем достигимы концентрации \mathcal{C} солнечных лучей порядка нескольких сот, достаточные для перегрева пара.

Для получения больших концентраций солнечных лучей, необходимых для работы солнечных высокотемпературных печей, может быть применена система параболоидальных зеркал, собирающих лучи на двух отверстиях в противоположных вертикальных стенках печной камеры. Зеркалам в этом случае следует давать азимутально-зенитную наводку на Солнце, печную же камеру достаточно поворачивать вокруг вертикальной оси.

Концентрация больших мощностей излучений Солнца на неподвижном приёмнике может быть осуществлена с помощью отражателя с вогнутыми отдельными фацетами, каждая из которых поворачивается вокруг своих осей, посылая отражённые лучи на приёмник. Кривизна этих фацет в меридиональном и сагиттальном сечениях должна быть такой, чтобы размеры светового пятна на поверхности приёмника были минимальны в среднем за время работы системы. Оптимальная форма поворотных фацет отличается от участков поверхности параболоидов семейства, общий фокус которых совпадает с серединой поверхности нагрева, а ось соответствует полуденному положению Солнца в дни равноденствия.

Отступление от теоретического профиля зеркала приводит к увеличению на величину α_1 угла при вершине конуса, ось которого проходит через фокус зеркала, в пределах которого лежат лучи, отражённые от бесконечно малого элемента зеркала. Угол α_1 может служить для оценки точности изготовления зеркала, он составляет в зависимости от типа зеркал и способа их изготовления величины от 1" до нескольких градусов. Ориентировочные значения этих величин приведены в таблице 1.

Соответственно этим точностям каждый тип концентраторов при заданной технологии их изготовления позволяет соз-

Таблица 1

Ориентировочная точность изготовления различных типов зеркал

Тип зеркала	α_1
Астрономические зеркала	1"
Шлифованные стеклянные параболоидальные отражатели	8'—20'
Зеркала, выгнутые из плоских листов полированного металла, прижатых к стальным нервюрам	
Гальванические реплики со стеклянных параболоидальных матриц	15'—25'
Большие приближенно параболоидальные отражатели, собранные из вогнутых стеклянных фацет	40'—1°
Бетонные параболоидальные оболочки, оклеенные посеребрённым стеклом	2°—2,5°
Прессованные и давленные металлические и стеклянные отражатели	2°—6°
Отражатели, собранные из плоских стеклянных фацет	3°—6°
Прессованные и выдувные стеклянные зеркала	4°—8°

дать в среднем по площади фокального пятна концентрацию солнечных лучей, лежащую в пределах, указанных в таблице 2.

Эта таблица облегчает выбор типа концентратора, который может обеспечить получение концентрации, достаточной для определённых практических задач.

Существенной характеристикой для оценки отражателя является также его вес, отнесённый к m^2 проекции зеркальной поверхности на плоскость, перпендикулярную солнечным лучам. Значения этой величины приведены в таблице 3.

Как видно, зеркала, изготовленные из листового металла, требуют меньшего количества материала, чем стеклянные шлифованные и, особенно, монтированные на железобетонной оболочке.

В работе показано, что при создании солнечных генераторов пара больших производительностей, состоящих из параллельно соединённых солнечных паровых котлов, оптимальный

Таблица 2

Значения концентрации, средней по поверхности приёмника, которую могут обеспечить различные типы концентраторов солнечных лучей

Тип концентратора	Ц
Стеклянные и металлические параболоидальные прожекторные отражатели	7000—3000
Сферические зеркала	2500—2000
Отражатели, составленные из вогнутых стеклянных фацет	1000—700
Круглые ступенчатые линзы	500—200
Железобетонные отражатели, оклеенные посеребрённым стеклом	
Приближённо параболоидальные зеркала, составленные из эллипсо-конических лент	
Мозаичные зеркала	100—30
Конические зеркала	
Параболо-цилиндрические зеркала	40—20
Цилиндрические линзы	
Отдельные фацетные зеркала, поворачиваемые вокруг осей, удалённых от приёмника	
Зеркала, неподвижные в течение дня	4—2

Таблица 3

Веса различных типов отражателей, применимых для солнечных установок

Тип отражателя	Вес (в кг) отражателя, отнесённый к м ² проекции зеркальной поверхности
Зеркала, выгнутые из плоского полированного металла	5—20
Зеркала, составленные из плоских стеклянных фацет	
Прессованные и давленные зеркала	
Параболоидальные стеклянные и металлические зеркала	20—80
Мозаичные отражатели	50—500
Железобетонные оболочки, оклеенные посеребрённым стеклом	
Зеркала, составленные из вогнутых стеклянных фацет на металлической ферме	

размер площади зеркал каждого из котлов лежит в пределах от 10 до 40 м². Наивыгоднейший коэффициент заполнения зеркалами территории такой котельной составляет около 40%. При применении отдельных зеркал значительно больших размеров стоимость пара возрастает за счёт удорожания конструкций, несущих зеркала. Применение более мелких единиц и свободная расстановка котлов на территории котельной неэкономично из-за значительного развития сети трубопроводов. Более плотное расположение котлов приводит к значительным потерям энергии из-за значительного взаимного затенения ими солнечных лучей.

Прозрачная изоляция солнечных установок

Вторым существенным оптическим элементом большинства солнечных установок является их прозрачная тепловая изоляция. Основные её характеристики: коэффициент пропускания излучений Солнца, термическое сопротивление теплопередаче и теплоаккумуляционная способность.

Наиболее существенны оптические характеристики слоя: коэффициенты регулярного пропускания, отражения и поглощения, а также индикатриса рассеяния. Эти характеристики зависят от направления, состояния поляризации и спектрального состава излучений, падающих на слой. Соотношения между этими величинами можно получить, опираясь на закон обратимости, сформулированный А. А. Гершуном. В диссертации даны точные и приближённые соотношения; связывающие коэффициенты диффузного отражения и пропускания с индикатрисами яркости, а также коэффициенты отражения и пропускания диффузных излучений с индикатрисами отражения и пропускания. Для грубых расчётов коэффициенты пропускания T излучений, падающих на слой под углом i , можно вычислять по приближённой формуле вида:

$$T = T_0 \cos^2 \frac{T_0 - T_d}{T_d} i, \quad (5)$$

где T и T_d — коэффициенты пропускания слоя для лучей, нормально падающих на него, и для идеально диффузных излучений.

Оптические характеристики комбинации из двух слоёв связаны с характеристиками каждого из них. При выводе

уравнений, связывающих такие характеристики, учтены многократные отражения излучений между слоями. Эти зависимости позволили получить также приближённые формулы, связывающие характеристики системы из многих слоёв с характеристиками отдельных слоёв, её составляющих.

Оптические характеристики прозрачной изоляции, состоящей из остеклённых рам с переплётами, связаны с их конструкцией и окраской переплётов. Это отражено в выведенных формулах и составленных таблицах и графиках для вычисления этих характеристик. Оказывается, что индикатриса средней яркости рам с остеклённым переплётом несколько расширяется с приближением остекления к наружной поверхности рамы. Форма индикатрисы не зависит от угла падения, если поверхность горбылей идеально матовая. Коэффициент пропускания остеклённого переплёта с точностью, достаточной для большинства практических задач, можно считать функцией угла падения лучей и не учитывать положения плоскости их падения. В этом случае для вычисления коэффициента регулярного пропускания остеклённой ячейки переплёта достаточно знать отношение площади боковых стенок ячейки к площади её отверстия. Для остеклённых рам коэффициент диффузного пропускания ячейкой переплёта параллельного снопа лучей может быть представлен как произведение трёх величин: коэффициента регулярного пропускания диффузных излучений, множителя, зависящего от размеров и окраски переплёта, и коэффициента, зависящего только от угла падения лучей. Для вычисления коэффициента пропускания окна в стене можно заменять реальное окно схематизированным. Такие методы разработаны автором [16].

Обычные оконные стёкла незначительно поглощают излучения Солнца [10, 16]. Если температура нагретых элементов солнечной тепловой установки не превышает 200°C , их излучения практически не проходят сквозь стёкла. Излучения элементов, нагретых более чем до 600°C , заметно проходят сквозь стёкла. Это понижает термическое сопротивление прозрачной стеклянной изоляции и делает её мало оправданной для высокотемпературных солнечных установок [19]. В работе рассмотрены также другие типы изоляции, прозрачной для солнечных лучей. Уменьшение теплотерь поверхности нагрева солнечных установок возможно путём применения материалов и способов обработки их поверхностей, обеспечивающих повышенный коэффициент отражения в области $3-30\text{ мк}$.

Сопоставление различных типов прозрачной изоляции солнечных установок показало, что при заданных значениях коэффициентов теплопередачи от поверхности нагрева к окружающей атмосфере наибольшими коэффициентами пропускания нормально падающих лучей обладает ячейковая изоляция [1, 3], наименьшими — окна обычного типа в стенах. Наибольшими коэффициентами пропускания диффузных излучений обладает монолитная прозрачная изоляция и остеклённые переплёты, наименьшим — ячейковая изоляция.

Отношение коэффициента пропускания диффузного излучения к коэффициенту теплопередачи через прозрачную изоляцию характеризует её оптико-тепловую ценность. Эта характеристика позволяет выбрать наиболее выгодное расстояние между стёклами в ячейках рам в зависимости от размеров отдельных стёкол, а также сопоставлять различные системы прозрачной изоляции.

Наибольшей теплоаккумуляционной способностью обладает монолитная прозрачная изоляция и пустотелые стеклянные блоки, наименьшей — ячейковая изоляция и остеклённые рамы. Оказывается, что эффективная теплоаккумуляционная способность прозрачной изоляции, состоящей из однородного материала, близка к одной трети произведения веса изоляции на её теплоёмкость, если не учитывать термических сопротивлений теплопередачи от рабочего вещества до прозрачной изоляции и от прозрачной изоляции до окружающей атмосферы.

Передача энергии излучений теплоносителю солнечных установок

Условия передачи энергии излучений, поглощённых в элементах установки, к теплоносителю могут быть описаны следующим уравнением [20]:

$$q_p = q_y - k(t_p - t_o) - C \frac{dt_p}{d\tau}, \quad (6)$$

где q_p — поверхностная плотность теплового потока, отводимого из элемента нагревателя рабочим веществом,
 q_y — поверхностная плотность потока излучений Солнца, улавливаемых установкой, — величина, пропорциональная поверхностной плотности потока, поглощённого элементами установки,
 k — коэффициент теплопередачи от рабочего вещества к атмосферному воздуху,

t_p и t_o — температуры рабочего вещества в элементе нагревателя и окружающего атмосферного воздуха,

C — теплоаккумуляционная способность установки,

τ — время.

Произведение $k(t_p - t_o)$ это — условные (расчётные) теплотопотери установки. При установившемся режиме, если теплота подводится непосредственно к рабочему веществу, условные теплотопотери равны истинным теплотопотерям установки. При работе солнечных установок часть излучений Солнца поглощается в элементах системы, отделённых от рабочего вещества определёнными термическими сопротивлениями. Температуры таких элементов выше, а теплотопотери больше, чем были бы, если бы теплота подводилась непосредственно и только к рабочему веществу.

Произведение $C \frac{dt_p}{d\tau}$ — эффективный (расчётный) расход тепла на прогрев установки. Истинный расход тепла на изменение теплосодержания элементов системы больше указанного эффективного расхода тепла. Это различие компенсируется тем, что в период прогрева установки её истинные теплотопотери меньше, чем условные.

Поверхностная плотность потока излучений, улавливаемых установкой, равна плотности теплового потока, отводимого рабочим веществом, лишь в том случае, если его температура предельно близка к температуре окружающего воздуха. При установившемся режиме поверхностная плотность излучений, поглощаемых элементами установки, больше поверхностной плотности потока улавливаемых излучений на столько же, на сколько условные теплотопотери меньше истинных.

Только введение функций: поверхностной плотности улавливаемых излучений, условных теплотопотерь и эффективной теплоёмкости (вместо: поверхностной плотности поглощённых излучений, истинных теплотопотерь и расхода тепла на изменение теплосодержания системы) позволило дать удобную для расчётов, простую и в то же время достаточно строгую форму уравнению (6) энергетического баланса системы.

Величина q_p связана следующим уравнением (7) с яркостью B источников излучения, посылающих лучи на приёмник:

$$q_p = \int_{(4\pi)} Y B \omega = \bar{Y} E_o, \quad (7)$$

где E_o — пространственная энергетическая освещённость в месте расположения приёмника,

ω — телесный угол, в котором из приёмника видны источники излучения,

Y — коэффициент улавливания излучений, падающих на установку в данном определённом направлении,

\bar{Y} — коэффициент улавливания при заданном распределении по направлениям энергетической яркости источников излучений, освещающих установку.

Коэффициент улавливания для заданной конструкции солнечной установки может быть вычислен по её оптическим и тепловым характеристикам. Коэффициент улавливания излучений, падающих на плоский приёмник в данном направлении, связан с коэффициентами поглощения A_v отдельных слоёв приёмника и коэффициентами k_v и k_p теплопередачи от отдельных слоёв изоляции и от рабочего вещества через прозрачную изоляцию к окружающему воздуху следующим соотношением:

$$Y = \cos i \sum \frac{k_p}{k_v} A_v. \quad (8)$$

Коэффициент улавливания — основная оптико-тепловая характеристика солнечной тепловой установки. Он может быть определён как коэффициент полезного действия, какой имел бы приёмник, если бы температура рабочего вещества была предельно близка к температуре атмосферного воздуха (т. е. условные теплотопотери установки были равны нулю).

Распределение по направлениям в пространстве коэффициента улавливания параллельного снопа лучей (индикатриса улавливания) позволяет найти коэффициент улавливания излучений при любом заданном распределении яркости источников, облучающих солнечную установку.

Форма индикатрисы улавливания определяет условия, которым должны отвечать устройства для поворота установок к Солнцу. Широкие индикатрисы улавливания присущи плоским солнечным нагревателям со стекольной изоляцией и остеклению светопроёмов сооружений. Формы таких индикатрис улавливания близки к поверхностям, радиус-вектор которых меняется по закону косинуса угла падения лучей в степени 1,5—3 (см. уравнение (9)). Такие установки могут быть осуществлены неподвижными.

Чем выше концентрация солнечных лучей на поверхности приёмника, тем, как правило, острее их индикатриса улавливания. Для приёмников с высокой концентрацией солнечных

лучей форма индикатрисы улавливания приближается к поверхности, уравнение которой соответствует косинусу угла падения в степени 100—50000. Солнечные установки с такими индикатрисами требуют точной наводки на Солнце. Эти установки практически улавливают только прямые солнечные лучи и не чувствительны к диффузным излучениям.

Для установок с параболо-цилиндрическими зеркалами характерны плоские индикатрисы улавливания — широкие в плоскости фокальной линии и острые в плоскости, ей перпендикулярной. Производительность таких установок незначительно падает при отклонении солнечных лучей от направления максимального значения коэффициента улавливания, если это отклонение лежит в плоскости широкого сечения индикатрисы улавливания. Это позволяет без заметного снижения производительности поворачивать параболо-цилиндрические зеркала лишь вокруг оси мира, вдоль которой может быть расположен неподвижный котёл, игнорируя изменения склонения Солнца. Осуществляя же котёл достаточно широким, возможно расположить установку так, чтобы путь Солнца в течение дня лежал вблизи плоскости широкого сечения плоской индикатрисы улавливания таких установок. В этом случае система может быть неподвижной в течение дня.

Для нахождения плотности потока улавливаемых прямых излучений Солнца, излучений, отражённых от зеркал, и диффузных излучений, а также энергии, уловленной установкой за день, могут быть применены различные методы [4, 8, 9, 16]. Если индикатриса улавливания установки заранее найдена, то для расчёта улавливания прямых излучений Солнца удобен метод избранных моментов, соответствующих серединам интервалов, за которые от Солнца приходят одинаковые количества освещения [13, 14, 16]. Коэффициенты улавливания для направлений солнечных лучей, соответствующих избранным моментам, для неподвижных установок могут быть найдены путём нанесения на проекцию небосвода изолиний коэффициентов улавливания и положений Солнца, которое оно занимает в избранные моменты.

Для облегчения определения потоков излучений, уловленных неподвижным приёмником, вычислены таблицы этих величин для установок, индикатрисы улавливания которых выражаются косинусоидами вида:

$$U = U_0 \cos \frac{2y_0 - y_d}{y_d} i, \quad (9)$$

где U_0 и U_d — наибольшее по направлениям значение коэффициента улавливания приёмником параллельного снопа лучей и значение коэффициента улавливания диффузных излучений, имеющих равномерную по направлениям энергетическую яркость,

i — угол падения лучей на приёмник, отсчитанный от направления наибольшего значения коэффициента улавливания.

Расчёты улавливания излучений Солнца, выполненные для истинных индикатрис улавливания, показывают, что значения, вычисленные по уравнению (9), отличаются от них незначительно и ими можно пользоваться для большинства технических расчётов.

Для решения этой же задачи разработан угломерный метод. Применение этого метода удобно на моделях установок, поставленных в условия облучения, геометрически подобные природным. Для создания таких условий разработаны установки типа «искусственного Солнца и Земли». Модели в этом случае могут повторять лишь внешние габариты установки [14, 16].

Для расчёта улавливания потока излучений Солнца, отражённых от параболо-цилиндрических зеркал и от участков параболоидальных отражателей, контур которых близок к линии пересечения параболоида и конуса, могут быть применены аналитические методы [20].

Расчёт потока уловленных диффузных излучений может быть выполнен путём разбивки сферы на сферические пояса. Автором разработан графический метод расчёта потока излучений, уловленных установкой, при любых заданных распределениях по направлениям яркостей источников, облучающих установку, и произвольной индикатрисы улавливания.

Излучения, отражённые от приёмника, частично рассеиваются предметами, окружающими установку, и создают на приёмнике дополнительную энергетическую освещённость. Такая освещённость, созданная за счёт многократных отражений, может быть учтена уравнениями, вытекающими из закона сохранения энергии [7, 9].

Если имеется готовая установка, или же её модель, плотность потока уловленных излучений может быть найдена экспериментально фотометрическим или же калориметрическим методами.

Фотометрический метод основан на том, что освещённость поверхности нагрева приёмника в первом приближении пропорциональна поверхностной плотности потока излучений, уловленных установкой. Такие исследования можно выполнять на моделях установок в условиях, подобных естественным. Фотоэлектрический метод удобен для измерения величины потока излучений, улавливаемых установкой, а метод фотографической фотометрии — для исследования распределения по поверхности приёмника улавливаемых им излучений [8, 16]. Такие исследования могут обеспечивать достаточно высокую точность и при этом их результаты наглядны.

Модели установок для этих исследований, конечно, должны изготавливаться геометрически и светотехнически подобными натуре. В некоторых случаях для уменьшения габаритов моделей их боковые стенки могут быть сделаны из зеркал. Эти зеркала как бы расширяют и удлиняют модель по принципу «зеркальной бесконечности» [13]. Масштаб модели может быть выдержан при этом достаточно крупным.

Условия освещения моделей, подобные естественным, могут быть получены на установках типа искусственного неба и разработанных автором установках «искусственное Солнце и Земля» [16].

Калориметрический метод основан на анализе полных энергетических испытаний установки в естественных условиях, когда поток уловленных излучений может быть найден как сумма теплового потока, отведённого рабочим веществом, теплотеря и расхода тепла на прогрев установки [1, 4, 8]. Значения потоков излучения, уловленных установкой, вычисленные для данной её конструкции по оптическим и тепловым характеристикам её элементов, незначительно расходятся с результатами энергетических испытаний в условиях работы установки на солнце.

Условия наилучшего улавливания излучений Солнца и неба

Исследования условий улавливания излучений Солнца различными установками (в том числе парниками, теплицами и окнами зданий) позволяют сделать ряд выводов о роли отдельных факторов. Перечислим главнейшие из этих выводов.

Энергия, уловленная за день установками, поворачиваемыми за Солнцем, приблизительно вдвое больше, чем для неподвижных установок той же площади. Это обусловлено, в основном, увеличением продолжительности улавливания.

Установки с широкими индикатрисами можно приблизительно поворачивать в сторону Солнца. При этом они улавливают почти столько же энергии, как и установки, точно ориентированные на Солнце. Так, установки, поворачиваемые только вокруг оси мира, улавливают в среднем лишь на 3% меньше энергии, чем установки, точно следующие за Солнцем.

В балансе установок, работающих без концентрации солнечных лучей, и особенно неподвижных систем, например зданий, необходимо учитывать улавливание прямых солнечных излучений, излучений неба и излучений, отражённых от земли и окружающих предметов [5, 9]. Для таких установок наибольшая равномерность годового графика улавливания излучений получается при ориентации приёмника на юг и при крутом наклоне его поверхности [5, 8, 12, 14, 15, 16]. Вытянутое здание с окнами основных помещений на юг и вспомогательных — на север обладает наиболее благоприятным тепловым режимом помещений, окна которых улавливают зимой максимум энергии, а летом — минимум. Пилообразное остекление с крутыми остеклёнными скатами на юг и пологими, глухими — на север — одна из лучших систем верхнего света [13].

Горизонтальное расположение приёмника, напротив, усугубляет естественную неравномерность поступления энергии от Солнца в течение года. Аналогичны условия при крутом наклоне приёмников и ориентации их на восток или же на запад. Так, меридиональная планировка зданий нерациональна — летом помещения перегреваются солнечными лучами. Зимой в условиях средних и высоких широт помещения при такой планировке практически лишены солнечного света.

Чем шире индикатриса улавливания неподвижных установок, тем дольше в течение дня могут они работать и тем лучше используются ими диффузные излучения. Энергия уловленных диффузных излучений зависит также от расположения сооружений, окружающих установку. Это особенно существенно при исследовании вопросов естественного освещения зданий. Для обычных окон тангенс угла их затенения соседними зданиями численно близок к относительному уменьшению за счёт затенения потока диффузных излучений, проникающих в окна [16]. Тангенс угла затенения может быть быстро найден при разработке проекта. В существующем здании он может быть измерен с помощью специального угломера или же другими приёмами. Затеняющее действие соседних сооружений, по отношению к прямым солнечным лучам, тем значительнее, чем выше широта места. За полярным кругом

посёлки рационально размещать на южных склонах холмов [12].

Хотя ориентация окон на юг наиболее рациональна, однако обычно все окна помещений не могут быть ориентированы на юг. При выборе формы здания и составлении его плана следует учитывать, что выступы из плоскости восточного и западного фасадов, если они расположены у южного конца здания, сильно затеняют окна. Если здание состоит из низких и высоких частей, то последние следует располагать с севера, чтобы они не затеняли низкие части здания [14]. Затенение фасадов, выходящих на площадку, ограниченную с трёх или четырёх сторон стенами, больше, чем фасадов, обращённых на улицу, что следует учитывать при выборе ширины разрывов между зданиями [16].

Способы корректирования годового графика улавливания окнами зданий солнечной энергии путём направления в них дополнительных лучей, отражённых от зеркал, не получили распространения. Для южных фасадов предложены такие схемы козырьков над окнами, размещения высокоствольных деревьев вблизи одноэтажных зданий и установки горизонтальных щитков в пространстве между зимней и летней рамами, при которых в летние и весенние месяцы автоматически ограничивается доступ солнечных лучей в помещения. Затеняющее действие этих устройств естественно меняется с изменением склонения Солнца. В зимние и осенние месяцы такие системы не задерживают солнечных лучей, проникающих в помещение. Защита помещений от весеннего и летнего перегрева возможна с помощью неподвижных щитков и при других ориентациях окон, но требует наклонного расположения щитков [16].

Рассмотрены также требования к системам, вводимым в действие по желанию человека, сопоставлены различные схемы и рекомендованы новые системы [17].

Производительность солнечных установок

Работу тепловой солнечной установки, рабочее вещество в которой подогревается до заданной температуры (если вся выработанная ею теплота используется потребителем), можно разбить на стадии: утреннего прогрева, работы, вечернего остывания и ночного остывания.

Во время утреннего прогрева нарастает поток улавливаемой энергии и повышаются температуры элементов установки. За время прогрева в среднем поток теплотерь составляет около $\frac{1}{3}$ его значения, соответствующего установившемуся режиму работы системы.

Во время второй стадии — работы солнечной установки — уловленные излучения расходуются только на нагревание рабочего вещества и теплотери системы. При этом теплосодержание рабочего вещества, протекающего через котёл установки, повышается, достигая требуемого в месте выхода из котла. Для расчёта теплотерь системы за время её работы можно пользоваться среднеэффективной температурой котла, являющейся функцией отношений теплотерь в местах входа и выхода рабочего вещества из котла к поверхностной плотности потока уловленных излучений.

Вечернее остывание начинается с момента, когда потока уловленных излучений уже недостаточно, чтобы компенсировать теплотери установки.

При ночном остывании теплотери компенсируются только теплотой, аккумулированной установкой. Исследование этой стадии существенно для установок большой теплоёмкости, а также для выяснения, насколько может предельно понизиться температура в системе.

Расчёт суточной производительности солнечных установок может быть выполнен путём построения интегрального дневного графика улавливания энергии. Такой метод значительно облегчает подобные расчёты. Дальнейшее упрощение расчётов возможно путём типизации интегральных кривых улавливания. Производительность установки в этом случае может быть представлена как функция энергии уловленных за день излучений и отношений: 1) расхода теплоты на прогрев системы к энергии, уловленной за день, и 2) потока теплотерь к наибольшему значению потока излучений, уловленных установкой. Такое упрощение методов расчёта делает реальным отыскание оптимальных решений путём сопоставления разнообразных конструкций установок и их элементов.

* * *

С. И. Вавилов не сомневался в том, что технике «рано или поздно, скорее всего, что рано, придётся обратиться к первоисточнику» энергии на Земле, т. е. к Солнцу. Включение мощности Солнца в общую энергетику страны может идти в на-

правлении такой планировки и конструкции зданий и светопроемов, при которых обеспечивается сокращение расхода топлива на отопление и электроэнергии на освещение, и, конечно, по пути перевода производств на энергию от солнечных установок.

Автор надеется, что разработанные им методы и выполненное исследование оптических элементов гелиотехнических установок будут полезными в работе оптиков, теплотехников, механиков, технологов, химиков и архитекторов, которые совместными усилиями заставят Солнце полноценно служить человеку.

**Список работ В. Б. ВЕЙНБЕРГА,
на которые в автореферате имеются ссылки**

1. Некоторые данные по расчёту и экономике гелиотехнических установок. Юбилейный сборник Научно-технического кружка Технологического института им. Ленинградского Совета, 43—54, 1928.
2. Обзор патентной литературы по использованию солнечной энергии для технических целей. Вестник Комитета по делам изобретений. № 10, 28—44 и № 11, 1—28, 1930.
3. Опыты 1929 г. с моделью ячеякового поглотителя лучистой энергии Солнца. Совместно с Б. П. Вейнбергом. Журнал прикладной физики, 7, № 1, 59—82, 1930.
4. Теория солнечных опреснителей и вопрос о выборе наилучшего типа солнечного опреснителя. Разделы III и V книги «Солнечные опреснители». Всес. НИИ водоснабжения и санитарной техники. Ленинградское отд. 19—43, 51—54, 1933.
5. Инсоляция школьных помещений в Ленинграде. Журн. «Советская педиатрия» № 8—9, 259—267, 1934.
6. Геофизические данные, необходимые для расчёта гелиотехнических установок. Журн. «Метеорологический Вестник», № 1—2, вып. 41, 1—3, 1934.
7. К методике оценки влияния окраски помещения на его естественное освещение. Труды Всес. электротехнической ассоциации, том IV, 28—39, 1935.
8. Инсоляция школьных зданий в Ленинграде. Ленинградский ин-т охраны здоровья детей и подростков. Биомедгиз, 78 стр., 1935.
9. Новые методы изучения естественного освещения. Совместно с А. А. Гершуном. Журн. «Светотехника» № 6, 1—5, 1935 и журн. «Lux» № 7, 1937.
10. Пропускание света и загрязнённость оконных стёкол в Ленинграде. Журн. «Советская педиатрия», № 9, 120—128, 1936.
11. «Актинометр» и «Актинометрия». Большая техническая энциклопедия, т. 1, 511—518, 1937.
12. Состояние освещения и обследование глаз школьников Кировска. Совместно с Н. Г. Крачковской. Журн. «Педиатрия» № 3, 130—141, 1937.
13. Опыт изучения освещённости теплиц лабораторным методом. Совместно с В. А. Зеленковым. Труды по сельскохозяйственной метеорологии, вып. XXV, 176—200, Гидрометеорологическое изд. Л.—М., 1938.
14. Солнечный свет и планировка зданий. Совместно с К. А. Левбергом. Журн. «Светотехника» № 2, 37—43, 1938.
15. Нормы естественного освещения и инсоляции. Школы. «Санитарные правила для детских учреждений». Гос. санитарная инспекция Лен.

горздравотдела и Ленинградской обл. НИИ охраны здоровья детей и подростков. Изд. 2, 1940, Ленинград.

16. Естественное освещение школ. Гос. изд. по строительству и архитектуре, 173 стр., 1951.

17. Шторы. Сборник рефератов Респ. научн. иссл. педиатрического института «В помощь практическому врачу», 109—113, Медгиз, Ленинградское отд., 1952.

18. Зеркала, концентрирующие солнечные лучи. Труды Гос. ордена Ленина Оптического ин-та им. С. И. Вавилова, т. XXIII, вып. 140, 56 стр., 1954.

19. Спектральные характеристики приёмников солнечной радиации. Сдано в печать в гелиотехнический сборник Энергетического института им. Г. М. Кржижановского АН СССР, 1954.

20. Коэффициент улавливания приёмником радиации, отражённой от параболо-цилиндрических и параболоидальных зеркал. Сдано в печать в гелиотехнический сборник Энергетического института имени Г. М. Кржижановского АН СССР, 1954.

В. Б. Вейнберг