

**ELECTRICITE SOLAIRE  
SOLAR ELECTRICITY**

COLLOQUE INTERNATIONAL—  
TOULOUSE, 1-5 MARS 1976

INTERNATIONAL CONFERENCE—  
TOULOUSE, MARCH 1-5, 1976

**СОЛНЕЧНАЯ  
ЭНЕРГЕТИКА**

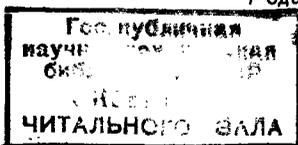
ПЕРЕВОД  
С АНГЛИЙСКОГО И ФРАНЦУЗСКОГО  
ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
Д-РОВ ТЕХН. НАУК  
Ю. Н. МАЛЕВСКОГО  
И М. М. КОЛТУНА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
МОСКВА 1979

В книгу включены наиболее интересные доклады зарубежных авторов, представленные на конференцию ЮНЕСКО по использованию солнечной энергии, которая состоялась в 1976 г. в г. Тулузе (Франция). В части докладов анализируется первый опыт США, Франции, Японии и других стран в области термодинамических расчетов и создания солнечных электростанций различных мощностей. Другие доклады посвящены физике и технологии изготовления солнечных фотоэлементов различных типов, контактов для них и их оптических покрытий. Приводятся результаты испытаний и эксплуатации солнечных фотоэлектрических генераторов наземного применения.

Книга рассчитана на специалистов, инженеров-энергетиков и физиков, занимающихся разработкой систем преобразования солнечной энергии в электрическую.

Редакция литературы по новой технике



15

9-79-31680

28983

2306000000

С 30317-164 164-79  
041 (01)-79

© Перевод на русский язык, "Мир", 1979.

## Предисловие редакторов перевода

Издательство "Мир" предлагает вниманию читателей книгу, посвященную одной из интересных проблем энергетики — преобразованию солнечной энергии в электрическую.

В книгу включены наиболее интересные доклады зарубежных авторов, представленные на конференцию ЮНЕСКО по использованию солнечной энергии, которая состоялась в 1976 г. в г. Тулузе (Франция). Доклады советских специалистов были опубликованы после конференции в отечественных научно-технических изданиях, в том числе в журнале "Гелиотехника".

Интерес к преобразованию солнечной энергии в электрическую возрос в последние годы в связи с энергетическим кризисом, охватившим капиталистический мир, и ростом общего потребления энергии.

Какое место займет солнечная энергетика в мировом топливно-энергетическом балансе и какие усилия потребуются на преодоление технических и экономических трудностей на пути ее развития, покажет ближайшее будущее. В современной литературе нет недостатка в прогнозах на эту тему, которые стали возможными благодаря успехам, достигнутым в области преобразования солнечной энергии в электрическую и тепловую, а также появлению новых экономичных конструкторских и технологических решений, которые явились основой для перехода от лабораторных и демонстрационных установок к опытно-промышленным. По разным оценкам, к 2000 г. доля используемой солнечной энергии наряду с традиционными источниками энергии для разных районов мира составит 2–7%.

Известно много способов преобразования солнечной энергии в электрическую. Наиболее эффективными из них являются паротурбинный метод, используемый на обычных топливных электростанциях, и фотоэлектрический, который надежно апробирован при осуществлении многолетней программы исследования космического пространства.

Впервые идея создания солнечной электростанции промышленного типа была выдвинута советским инженером Н. В. Линицким более 40 лет назад. Тогда же им была предложена схема такой станции, которую сейчас принято называть схемой солнечной станции с центральным приемником, или башенной схемой. В этой схеме парогенератор (приемник солнечного излучения) размещается на высокой башне, окруженной полем зеркальных отражателей (гелиостатов), с помощью которых солнечная радиация фокусируется на тепловоспринимающей поверхности этого приемника. На основе этой концепции в конце 50-х годов в Государственном энергетическом институте им. Г. М. Кржижановского под руководством проф. В. А. Баума был разработан проект первой в СССР солнечной электростанции мощностью до 2,5 МВт.

С начала 70-х годов вопрос об экономической целесообразности солнечных электростанций стал в ряде стран мира предметом внимательного изучения. В промышленно развитых странах работы в данном направлении проводятся в рамках национальных программ. Специфика этих работ заключается в том, что солнечные электростанции в зависимости от природных и климатических условий района их предполагаемого размещения и условий потребления энергии должны создаваться по сугубо индивидуальным проектам. Тем не менее типовые решения основных элементов таких станций (парогенератор, аккумулятор, гелиостаты) и их комбинаций вполне возможны. Если в ближайшие 5 – 10 лет удастся существенно снизить стоимость высокотемпературных фотопреобразователей и разработать поточную технологию их производства, то появятся дополнительные возможности значительного повышения к.п.д. преобразования солнечной энергии в электрическую – до 30% и более – благодаря комбинации таких преобразователей с традиционным паросиловым циклом. Современные научные представления и практические разработки в данной области дают основание надеяться, что эти возможности будут реализованы.

Тулузская конференция, посвященная проблемам солнечной энергетики, представляет интерес прежде всего потому, что это первый в истории развития энергетики форум ученых разных стран, на котором вопрос об актуальности солнечной энергетики поднят на уровень промышленных оценок. Здесь же было отмечено, что солнечная энергетика имеет реальные перспективы. Сейчас это практически подтверждается научно-техническими разработками и реализацией первых проектов опытно-промышленных солнечных станций на основе паротурбинного цикла в Италии, Японии, Франции и других странах,

а также опытных солнечных паросиловых станций в США [5 МВт (тепл.)], Италии и Франции, фотоэлектрических электрогенераторов мощностью до 25 кВт и станций малой мощности до 1 кВт для водоснабжения в удаленных сельскохозяйственных районах.

На конференции была подчеркнута важность объединения усилий специалистов разных стран в изучении солнечных ресурсов и повсеместного систематического накопления сведений по характеру прихода солнечной радиации на земную поверхность в разных широтах с целью обобщения этих данных и составления статистически надежных актинометрических карт, необходимых для практических расчетов. Актуальность этих работ в первую очередь связана с периодичностью прихода солнечной радиации, ее малой энергетической плотностью и возможными перерывами в поступлении из-за облачности. Чтобы эффективно использовать солнечную энергию, необходимо разработать экономичные способы повышения плотности первичного потока радиации, а также аккумуляирования полученной энергии на оптимальном температурном уровне.

В трудах конференции нашли отражение практически все представляющие интерес оптические схемы солнечных энергетических станций, в том числе системы плоских коллекторов для температур  $\sim 100^\circ\text{C}$ , системы параболоцилиндров, обеспечивающие достижение температур свыше  $200^\circ\text{C}$ , крупные параболоиды в блоке с газотурбинной установкой, работающей при температуре  $600^\circ\text{C}$ , и поля гелиостатов солнечной станции башенного типа.

Уровень термодинамической эффективности солнечных станций можно существенно повысить путем улучшения термодинамических характеристик приемных поверхностей, в частности благодаря применению селективных покрытий и структурных ячеистых конфигураций. Этому вопросу посвящен ряд работ, результаты которых находят все более широкое применение.

Для читателя представят также интерес результаты технико-экономического анализа стоимостных показателей солнечных энергетических станций разных типов, а также их сравнение с традиционными станциями по занимаемой территории и материалоемкости.

Большое внимание на конференции было уделено успехам, достигнутым в последние годы при разработке фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии, который среди других методов прямого преобразования энергии занимает ведущее место. В СССР такие работы успешно ведутся коллективом ученых под руководством чл.-корр. АН СССР Н. С. Лидоренко.

Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен возможностью создания на его основе солнечных элементов с к.п.д., превышающим 15%, и с исключительной стабильностью параметров, которая подтверждена в ходе их многолетней эксплуатации в космических аппаратах разных стран. За последние годы значительно возросло число фундаментальных и прикладных работ по созданию новых типов солнечных элементов, область применения которых существенно расширилась. Усилия исследователей направлены на решение сложных вопросов, связанных с теорией солнечных элементов, работающих в условиях сильных освещенностей; механизмом переноса тока в полупроводниковых гетероструктурах, на границе раздела металл — полупроводник и металл — изолятор — полупроводник; с оптимизацией структуры тонкопленочных фотоэлементов; анализом особенностей поглощения и преобразования света в тонких полупроводниковых пленках.

Целью работ, проводимых научными центрами СССР, США, Франции, ФРГ и других стран, является не только увеличение к.п.д. солнечных элементов, но и создание на их основе наземных энергетических установок различной мощности с большим сроком службы. Экономический анализ показывает, что стоимость электроэнергии, получаемой с помощью наземных энергетических установок, будет сравнима со стоимостью электроэнергии, вырабатываемой традиционными энергоисточниками, при условии снижения затрат (не менее чем на два-три порядка) на изготовление установок.

Наиболее перспективными направлениями решения этой задачи являются использование недорогих концентраторов солнечной энергии и разработка дешевого полностью автоматизированного технологического процесса получения тонких солнечных элементов, что позволяет на один-два порядка сократить расходы дорогостоящего полупроводникового материала. Однако такое решение задачи оправдано только в том случае, если к.п.д. преобразования солнечной энергии имеют значения, характерные для солнечных элементов обычной толщины, работающих при однократных солнечных потоках и температурах, близких к комнатной. В настоящее время достигнуты первые успехи в этом направлении: созданы фотоэлементы, к.п.д. которых не ухудшаются при увеличении плотности потока солнечного излучения на два-три порядка; разработаны тонкопленочные фотоэлементы, толщина которых в десятки и сотни раз меньше толщины обычных монокристаллических элементов; проведены испытания первых конструкций энергетических установок с солнечными элементами.

Труды Тулузской конференции представляют большой интерес, поскольку в них широко освещены основные проблемы, связанные

с разработкой и испытанием солнечных элементов и батарей. Тулузская конференция выгодно отличается от других конференций и симпозиумов, рассматривающих отдельные узкие вопросы полупроводниковой фотоэнергетики. Это в значительной степени облегчило задачу редакторов перевода, которые стремились наиболее полно представить ведущие направления в области солнечной энергетики.

Подобный сборник зарубежных работ, посвященный практическим проблемам солнечной энергетики, выпускается в СССР впервые. В связи с постоянно растущим интересом к возобновляемым источникам энергии можно надеяться, что эта книга окажется полезной широкому кругу специалистов, занимающихся разработкой систем преобразования солнечной энергии в электрическую.

Перевод выполнен М.П. Гавриловой, М.Б. Гарф и канд. техн. наук С.И. Смирновым.

*Ю.Н. Малевский  
М.М. Колтун*

Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен возможностью создания на его основе солнечных элементов с к.п.д., превышающим 15%, и с исключительной стабильностью параметров, которая подтверждена в ходе их многолетней эксплуатации в космических аппаратах разных стран. За последние годы значительно возросло число фундаментальных и прикладных работ по созданию новых типов солнечных элементов, область применения которых существенно расширилась. Усилия исследователей направлены на решение сложных вопросов, связанных с теорией солнечных элементов, работающих в условиях сильных освещенностей; механизмом переноса тока в полупроводниковых гетероструктурах, на границе раздела металл – полупроводник и металл – изолятор – полупроводник; с оптимизацией структуры тонкопленочных фотоэлементов; анализом особенностей поглощения и преобразования света в тонких полупроводниковых пленках.

Целью работ, проводимых научными центрами СССР, США, Франции, ФРГ и других стран, является не только увеличение к.п.д. солнечных элементов, но и создание на их основе наземных энергетических установок различной мощности с большим сроком службы. Экономический анализ показывает, что стоимость электроэнергии, получаемой с помощью наземных энергетических установок, будет сравнима со стоимостью электроэнергии, вырабатываемой традиционными энергоисточниками, при условии снижения затрат (не менее чем на два-три порядка) на изготовление установок.

Наиболее перспективными направлениями решения этой задачи являются использование недорогих концентраторов солнечной энергии и разработка дешевого полностью автоматизированного технологического процесса получения тонких солнечных элементов, что позволяет на один-два порядка сократить расходы дорогостоящего полупроводникового материала. Однако такое решение задачи оправдано только в том случае, если к.п.д. преобразования солнечной энергии имеют значения, характерные для солнечных элементов обычной толщины, работающих при однократных солнечных потоках и температурах, близких к комнатной. В настоящее время достигнуты первые успехи в этом направлении: созданы фотоэлементы, к.п.д. которых не ухудшаются при увеличении плотности потока солнечного излучения на два-три порядка; разработаны тонкопленочные фотоэлементы, толщина которых в десятки и сотни раз меньше толщины обычных монокристаллических элементов; проведены испытания первых конструкций энергетических установок с солнечными элементами.

Труды Тулузской конференции представляют большой интерес, поскольку в них широко освещены основные проблемы, связанные

с разработкой и испытанием солнечных элементов и батарей. Тулузская конференция выгодно отличается от других конференций и симпозиумов, рассматривающих отдельные узкие вопросы полупроводниковой фотоэнергетики. Это в значительной степени облегчило задачу редакторов перевода, которые стремились наиболее полно представить ведущие направления в области солнечной энергетики.

Подобный сборник зарубежных работ, посвященный практическим проблемам солнечной энергетики, выпускается в СССР впервые. В связи с постоянно растущим интересом к возобновляемым источникам энергии можно надеяться, что эта книга окажется полезной широкому кругу специалистов, занимающихся разработкой систем преобразования солнечной энергии в электрическую.

Перевод выполнен М.П. Гавриловой, М.Б. Гарф и канд. техн. наук С.И. Смирновым.

*Ю.Н. Малевский*

*М.М. Колтун*

## Предисловие

На Международной конференции в Тулузе был отмечен факт вступления человечества в решающую фазу использования солнечной энергии. Следует поблагодарить Национальный центр космических исследований и Национальный центр научных исследований за инициативу организации этой конференции и публикацию ее трудов, представляющих исключительный интерес.

Девяносто шесть специалистов пятнадцати национальностей из тридцати шести стран сообщили о результатах своих исследований. Все это отражает усилия человечества, предпринятые в последней четверти XX в. с целью открытия, изучения и скорейшего освоения этой естественной и постоянно возобновляемой чистой энергии. Тот факт, что впервые столь представительная конференция была посвящена только преобразованию солнечной энергии в электричество, свидетельствует о фундаментальности исследований.

Действительно, в течение нескольких последних лет, главным образом из-за мирового энергетического кризиса, исследования проводились столь стремительными темпами и привели к столь важным достижениям, что их можно назвать историческими. При таком обилии идей, результатов и проектов не менее примечательна забота о конкретных приложениях, являющаяся свидетельством подлинного прогресса.

Яркой демонстрацией этой динамики, предпринятых попыток и достигнутого прогресса стала конференция в Тулузе. Сборник, в котором опубликованы труды этой конференции, представляет собой основной документ и является новым и важным этапом на пути освоения новых видов энергии.

*Жан-Клод Колли,  
председатель конференции*

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Сравнение электростанций различных типов  
по занимаемой территории, материалоемкости  
и энергоотдаче

С. Дей Оувнс <sup>1)</sup>

## ВВЕДЕНИЕ

Сравнение различных источников энергии часто носит качественный характер. Например, существует мнение, что при использовании солнечной энергии требуется значительно больше территории для размещения оборудования, чем при использовании любого другого источника энергии. Более точный вывод возможен только на основании количественных оценок.

В данной работе различные производящие электроэнергию системы сравниваются по занимаемой ими территории, расходу материалов (в том числе дефицитных), энергоотдаче и количеству обслуживающего персонала. Рассматривается также вопрос о возможных ограничениях использования того или иного источника энергии, связанных с указанными параметрами. Вопросы экономики и защиты окружающей среды не рассматриваются.

Как будет показано ниже, точных значений исследованных параметров получить нельзя. Вместо них приводятся соотношения порядков величин. Высказываются также некоторые соображения относительно аккумуляции энергии.

Исходные данные заимствованы из литературных источников или сообщены непосредственно специалистами. В работе представлены также новые результаты, полученные автором. Все расчеты были проведены в предположении, что нагрузка любой системы постоянна в течение суток. Так, для солнечной электрической станции мощностью 100 МВт, работающей 12 ч в сутки, расчеты выполнялись для постоянной нагрузки 50 МВт.

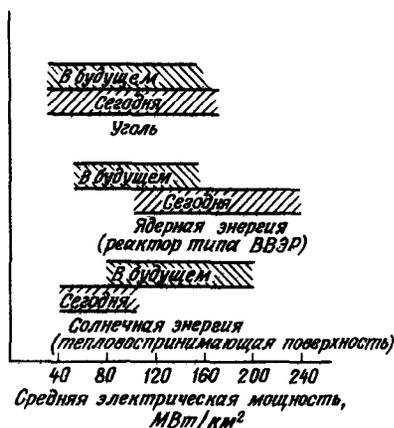
<sup>1)</sup> С. Daey Ouwens, Rijksuniversiteit Utrecht, Holland.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ

Правомерен вопрос, что понимать под использованием территории. Можно ли одинаково оценивать использование пустынных земель и использование сельскохозяйственных угодий или земель, имеющих рекреационную ценность? Как оценивать использование для установки солнечных коллекторов крыш зданий или площадок над крытыми стоянками автомашин? Следует ли включать в расчет земли под линиями электропередач? В данной работе будем учитывать только площади, занятые непосредственно электростанциями, и будем оценивать все эти площади одинаковым образом.

Можно было бы принимать в расчет также площади, необходимые для размещения производств строительных и конструкционных материалов. В следующем разделе будет показано, что эти площади (по крайней мере для производства основных материалов) практически одинаковы для электростанций различных типов. Однако положение меняется, если рассматривать условия производства дефицитных материалов.

На фиг. 1 приведены некоторые полученные результаты.



Фиг. 1. Использование территории под различные источники энергии (средние показатели).

В будущем положение солнечных систем улучшится, а атомных и топливных станций ухудшится. (ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор, получивший распространение в большинстве стран мира. — Прим. ред.)

## СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

Рассмотрим район, где средняя плотность потока солнечной радиации на горизонтальной поверхности может быть принята равной  $240 \text{ Вт/м}^2$  ( $2100 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$ ). При этом на поверхности неподвижных наклонных коллекторов в таком районе плотность потока может составлять с учетом диффузной радиации более  $300 \text{ Вт/м}^2$ . В работе [1] для расчета гелиостатов рекомендуется значение  $360 \text{ Вт/м}^2$  (с учетом только прямой радиации). Примем осторожную оценку  $330 \text{ Вт/м}^2$ , а с учетом диффузной радиации  $360 \text{ Вт/м}^2$  [2]. Дополнительные площади под систему аккумулирования энергии и турбогенераторы не учитывались, так как предполагалось, что на крышах зданий, где размещено это оборудование, располагаются также и солнечные коллекторы.

Удельная электрическая мощность электростанции с гелиостатами при общем к.п.д. 25% составит  $\sim 80 \text{ МВт}$  на  $1 \text{ км}^2$  поверхности гелиостатов [1, 3]. Если учесть всю занятую солнечной станцией территорию, то эта цифра снизится до  $40 \text{ МВт/км}^2$ . Имеются потенциальные возможности повысить отражающую способность зеркал гелиостатов, а также улучшить к.п.д. цикла преобразования тепловой энергии путем применения в качестве надстройки цикла МГД-генераторов, термоионных или термоэлектронных преобразователей. Можно применить параболоцилиндрический концентратор, на тепловоспринимающем трубчатом коллекторе которого установлены солнечные батареи. Для парообразования в таком коллекторе используется тепловая энергия, отводимая от солнечных батарей. Анализ, выполненный с помощью вычислительных машин, показал, что при использовании кремниевых солнечных батарей, работающих при температуре  $\sim 100^\circ \text{C}$ , высокий к.п.д. может быть достигнут при степени концентрации солнечного излучения не менее 40 [4]. В таком коллекторе небольшая часть трубы, свободная от батарей, будет использоваться для перегрева пара. Таким образом, в будущем значения к.п.д. могут достигать 50%, что, вероятно, позволит получать  $160 - 180 \text{ МВт}$  электрической мощности с  $1 \text{ км}^2$  поверхности коллекторов, или  $\sim 90 \text{ МВт}$  с  $1 \text{ км}^2$  площади земли, занятой всей системой.

Удельная электрическая мощность фотобатарей с к.п.д. 15% может составлять  $45 \text{ МВт/км}^2$ , а при наличии следящей системы — более  $60 \text{ МВт}$  на  $1 \text{ км}^2$  поверхности батарей. Если в будущем их к.п.д. удастся повысить до 25%, то удельные электрические мощности составят 60 и  $100 \text{ МВт/км}^2$  соответственно.

Удельная (на единицу тепловоспринимающей поверхности коллектора) мощность является, по-видимому, наиболее логичным показателем, особенно в тех случаях, когда речь идет о небольшой отдельной установке, например параболической.

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

Здесь рассмотрены только водо-водяные реакторы, для которых расчеты более сложны, чем в предыдущем случае, так как необходимо оценить территории, требуемые для добычи и обогащения ядерного топлива, площади, непосредственно занятые электростанцией, регенерационными установками, и т.п. Все исходные данные для расчета были заимствованы из литературных источников.

С учетом территорий, занятых под здания для всех перечисленных объектов, удельная электрическая мощность составляет 240 МВт/км<sup>2</sup> [5]. Если, однако, к этой площади добавить территории вокруг ядерного реактора, то получим 60 – 120 МВт/км<sup>2</sup>. (В расчете учитывалась зона безопасности АЭС мощностью 300 МВт [6] и предполагалось, что зоны безопасности АЭС большей мощности имеют те же размеры.) В расчете не учитывались зоны безопасности установок по обогащению и регенерации топлива. Кроме того, к используемой территории не были отнесены те участки земли вокруг АЭС, на которых плотность населения ограничена [7]. Все это означает, что на практике площадь используемой территории будет больше.

В дальнейшем эта площадь будет возрастать по мере перехода к разработке более бедной урановой руды. Следует иметь в виду, что богатые руды образуют лишь небольшую часть залежей урана [8], и поскольку из 1 т руды с концентрацией урана ~0,01% можно получить такое же количество энергии, как из 1 т угля [9], то площади, занятые под добычу этих ископаемых, будут примерно одинаковыми.

Разумеется, здесь, как и в случае солнечной энергетики, также существуют возможности для повышения к.п.д. Однако при этом надо учитывать, что, во-первых, общий к.п.д. АЭС в настоящее время уже выше к.п.д. преобразования солнечной энергии, а поэтому можно говорить лишь об относительно небольшом увеличении эффективности производства энергии и, во-вторых, получение с помощью ядерных реакторов более высоких температур, которые необходимы для преобразователей энергии, используемых в качестве надстройки цикла, весьма проблематично. Но даже если и будут достигнуты более высокие значения к.п.д., то это едва ли компенсирует увеличение площади земель, занятых под добычу урановой руды. Можно предполагать,

что в будущем удельная электрическая мощность АЭС составит 50 – 150 МВт/км<sup>2</sup>.

### УГОЛЬ

В качестве примера органических топлив рассмотрим уголь. Исходя из площадей, занятых непосредственно шахтами, станциями и т.п., удельная электрическая мощность, по имеющимся данным, составляет 170 МВт/км<sup>2</sup>. С учетом всех земель, занятых под добычу угля, эта величина снижается до 30 МВт/км<sup>2</sup> [5]. Разумеется, существует огромная разница между шахтной и открытой разработкой угольных месторождений. Но в ближайшее время будет преобладать последняя.

Как и в случае атомной энергетики, в будущем будут разрабатываться менее богатые месторождения, в связи с чем площадь используемых территорий будет возрастать. Примем для этого случая величину удельной электрической мощности 30 – 150 МВт/км<sup>2</sup>.

### ПРОЧИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим кратко остальные источники энергии. Удельная электрическая мощность *ветроагрегатов* составляет менее 10 МВт/км<sup>2</sup>. Вокруг ветроагрегатов необходимо предусматривать свободную от застроек территорию для восстановления структуры течения воздушных потоков. Хотя в настоящее время не существует общего мнения относительно необходимого расстояния между ветроагрегатами, максимальную удельную электрическую мощность ветроагрегата можно принять равной 10 МВт/км<sup>2</sup>. Выработка энергии с использованием *биомассы* также будет довольно низкой. В природе преобразование солнечной энергии в органические вещества происходит с к.п.д., равным 1 – 2%. Возможно, что благодаря оптимизации процесса фотосинтеза этот к.п.д. удастся повысить до 6%. В этом случае к.п.д. производства электроэнергии из органической массы составит 2%. Таким образом, можно ожидать, что в районах с благоприятным климатом удельная мощность такого способа производства электрической энергии достигнет 5 МВт/км<sup>2</sup>. При использовании температурных градиентов вод океана, естественно, не нужны земельные территории. Сложнее проанализировать *гидроэнергетические* объекты. Требуемые площади водохранилищ в зависимости от местных природных условий меняются в широких пределах. При этом следует учитывать, что водохранилища могут использоваться и для других целей. В целом

удельная электрическая мощность гидроэлектростанций составит менее 10 МВт/км<sup>2</sup>. Что касается *термоядерного синтеза*, то ситуация пока еще очень неопределенна. Если не будут созданы реакторы на основе широко распространенных материалов, то серьезной проблемой может стать использование земли под добычу низкосортных руд для извлечения редких материалов.

Существующие в настоящее время *геотермальные электростанции* занимают небольшие территории. Однако нельзя с уверенностью сказать, какая площадь потребуется для электростанций, использующих энергию нагретых пород. В настоящее время существует несколько *приливных электростанций*. Как и в случае гидроэлектростанций, их удельная электрическая мощность относительно мала и составляет менее 10 МВт/км<sup>2</sup>. Однако для этих электростанций, как и для других объектов, использующих энергию океана, вообще не требуются участки суши.

### МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ

Анализируя расход материалов, будем определять только прямые затраты без учета расхода материалов на их производство. Одна из трудностей анализа заключается в том, что удельный (в расчете на 1 кВт) расход материалов для больших систем обычно меньше, чем для небольших. Хотя мы сравниваем только крупные электростанции (мощностью более 100 МВт), полученные данные можно отнести и к меньшим установкам, которые обычно используются в качестве автономных источников энергии. При этом уменьшается расход материалов на линии электропередач (в Нидерландах, например, на 1 кВт установленной мощности для этих линий расходуется 100–200 кг материалов). Полученные данные приведены в табл. 1.

### СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

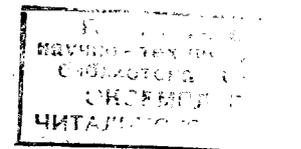
Были рассмотрены два способа использования солнечной энергии. *Тепловые системы*. По данным работ [10, 11], удельная материалоемкость поля гелиостатов составляет 400–600 кг/кВт. Для фундамента и башни требуется ~1000 кг бетона на 1 кВт. Согласно работе [12] для систем коллекторов с неподвижными отражателями и подвижными теплоприемниками требуется меньший расход материалов.

Таблица 1

Материалоемкость нескольких источников энергии (кг на 1 кВт установленной мощности) без учета затрат материалов на передачу и аккумуляцию энергии

Энергия	Материалоемкость, кг/кВт			Потребность в аккумуляции энергии	Потребность в дефицитных материалах
	коллектор	бетон	металл		
Солнечная преобразование в тепловую					
в настоящее время	300–800	300–1000	15	+	–
в будущем	200–400	400	15	+	–
фотобатареи					
в настоящее время	1100	все материалы		+	–
в будущем	400				
Ядерная (атомные реакторы на обычной воде)		800–900	50–70	–	+
Органического ископаемого топлива (нефть североморских промыслов)		500	40	–	–
Ветря (на море)		1800	260	+	–
Геотермальная		200	90	–	–
Тепловая энергия океана		1800	200	–	–
Органических веществ		100	30	–	–
Термоядерного синтеза		?	>40	–	+

Оценка материалоемкости солнечных станций проводилась в сравнении с солнечными теплицами. Для солнечной станции с удельной электрической мощностью 60 МВт/км<sup>2</sup> на 1 кВт требуется 150 кг металла, 210 кг стекла и более 300 кг бетона [13]. Окончательный выбор наиболее подходящих материалов (стекла, стали, бетона, древесины) для солнечных коллекторов еще не сделан, и поэтому предполагается, что расход обычных материалов составит 300–600 кг/кВт, а расход



бетона для фундамента 300–1000 кг/кВт. Расход материалов на теплообменники и электрогенераторы определялся по соответствующим данным для тепловых электростанций, а именно 70 кг бетона и 10 кг металла на 1 кВт [14]. Отметим, что для тепловых электростанций на органическом топливе указываются цифры 40 и 50 кг металла на 1 кВт [15, 16]. Поскольку при использовании системы гелиостатов плотность потока энергии и температура в теплообменниках достаточно велики по сравнению с другими системами, принятое низкое значение удельного расхода металла 15 кг/кВт можно считать вполне оправданным. Если в будущем удастся вдвое повысить к.п.д., то расход материалов сократится на ~50%. Так как при более высоких значениях к.п.д. понадобятся некоторые дополнительные материалы, будем полагать, что на коллектор потребуется 200–400 кг, а на все остальное 400 кг бетона и 15 кг металлов на 1 кВт мощности.

**Фотобатареи.** Вес фотобатарей в герметизирующей оболочке составляет ~1100 кг/кВт (без системы слежения за Солнцем и опорных устройств) [17].

В связи с тем что в будущем ожидается повышение к.п.д. прямого преобразования солнечной энергии в электрическую до 25%, по-видимому, вполне реально ожидать снижения веса батарей до 400 кг/кВт. Например, уже в настоящее время для солнечных батарей, используемых на космических аппаратах (в собранном виде), удельный расход материалов в пересчете для наземных условий составляет 60 кг/кВт. [18].

Если в будущем более широко будут использоваться в качестве конструкционных материалов такие возобновляемые в природных условиях материалы, как древесина (например, в коллекторах фирмы "Сандиа"), то сравнение по материалоемкости может потерять смысл.

В целом можно утверждать, что для создания солнечных энергетических установок дефицитных материалов не требуется.

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

В работах [14, 19] приведены подробные данные по материалоемкости АЭС. Менее известен расход материалов на обогащение и регенерацию топлива. Поэтому для определения общего расхода материалов мы вынуждены были воспользоваться имеющимися данными по материалоемкости АЭС с учетом соответствующего количества материалов на остальные объекты, пропорционального капиталовложениям [20–22]. В результате все цифры увеличились на 20%. В целом

в атомной энергетике удельный расход бетона составляет 700–800 кг и металла 40–60 кг. Кроме того, были сделаны приближенные оценки расхода материалов на захоронение радиоактивных отходов, в соответствии с которыми необходимо ~10 кг металла и не менее 100 кг бетона в расчете на 1 кВт (данные осреднены за 20-летний срок службы АЭС). Поскольку при этом не учитывались некоторые дополнительные расходы, например на перевозку, реальные цифры, по-видимому, будут несколько выше.

К дефицитным материалам относятся циркалой (0,2 кг/кВт [19]) и, возможно, свинец (0,3 кг/кВт), если осуществлять захоронение высокоактивных отходов в контейнерах из стекла и свинца [23].

### ОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО

Существует много способов использования органических топлив. Уголь сжигают непосредственно или газифицируют. В данной статье не представляется возможным проанализировать применение всех видов органического топлива (горючих сланцев, битуминозных песков и т.п.) и все возможные способы их переработки. В качестве примера была рассмотрена только нефть североморских промыслов. По ориентировочным оценкам, на сооружение одной только буровой платформы необходимо затратить 400 кг бетона и 20 кг черных металлов в расчете на 1 кВт. Экономические оценки, выполненные для таких топлив, как горючие сланцы и битуминозные пески, показывают, что удельный расход материалов при их использовании не будет значительно отличаться от расхода материалов при добыче североморской нефти. Для получения данных, соответствующих всему циклу использования топлива, к указанным значениям расхода материалов были прибавлены значения расхода для тепловых электростанций [14].

### ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

По данным работы [24], расход материалов на ветроагрегаты, расположенные в море, составляет 1800 кг бетона и 260 кг черных металлов в расчете на 1 кВт. Эти цифры представляют собой лишь грубую оценку. Для ветроагрегатов, расположенных на суше, необходимо затратить не менее 150 кг металла на 1 кВт. Например, при сооружении известного ветроагрегата Путнема [25] удельный расход металла составил 400 кг/кВт. Кроме того, определенное количество бетона расходуется на фундамент (обоснованной оценкой, по-видимому, будет величина 100 кг/кВт).

### ЭНЕРГИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Несмотря на то что пока остаются неясными как реализация физического процесса, так и окончательная структура реактора, уже имеются некоторые общие соображения относительно конструкции последнего. В качестве приближенных значений потребности в материалах в расчете на 1 кВт мощности реактора можно принять 15 кг стали и 15 кг более дефицитных материалов. Сюда необходимо прибавить расход материалов на теплообменные устройства и электрогенератор. Расход бетона может оказаться меньше, чем в случае водо-водяных реакторов. Приведенное в работе [26] значение удельного расхода бетона 40 кг/кВт, по-видимому, занижено. Однако в настоящее время еще рано говорить о достаточно точных цифрах. Вполне возможно, что при осуществлении термоядерного синтеза потребуется большое количество таких редких материалов, как ниобий и гелий. Если не удастся найти им замену, то может возникнуть ряд трудных проблем. Стремление увеличить срок службы термоядерных реакторов также может привести к значительному росту удельного расхода материалов.

### ПРОЧИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

В соответствии с данными работы [27] при использовании геотермальной энергии на 1 кВт установленной мощности требуется 200 кг бетона и 90 кг металла. Эти цифры, по-видимому, сильно завышены, так как мало отличаются от соответствующих цифр для тепловых электростанций на органическом топливе. Для установок, использующих тепловую энергию океана, потребность в материалах в целом может составить ~2000 кг/кВт, в том числе 1800 кг придется, вероятно, на бетон и ~200 кг — на металлы [28].

При рассмотрении органических веществ в качестве источника энергии исходные значения материалоемкости принимались такими же, как и для тепловых электростанций, и затем увеличивались на 50%, чтобы учесть расход материалов на системы выращивания биомассы.

### ЭНЕРГООТДАЧА

В последнее время большое внимание привлекла проблема оценки энергоотдачи различных систем преобразования энергии. В этом отношении довольно подробная информация имеется по АЭС. Что касается солнечной и ветровой энергии, то некоторые результаты проведенных нами расчетов приведены в работе [29]. Одной из основных трудностей является определение и интерпретация полученных дан-

ных. Мы пытались сравнить все системы по одним и тем же показателям. При этом не делалось различия между тепловым и электрическим киловатт-часом. В общем виде энергоотдача системы определялась как отношение количества энергии, выработанной системой за срок службы, к количеству энергии, затраченной на производство материалов и оборудование для этой системы. Эти расходы энергии можно определить либо по данным о материалоемкости, либо по соответствующим экономическим показателям. В последнем случае, как правило, получаются более высокие значения, так как экономические показатели учитывают проценты на капитал и заработную плату. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Энергоотдача некоторых источников энергии

Энергия	Энергоотдача
Солнечная преобразование в тепловую	
в настоящее время	10 — 20
в будущем	30 — 50
фотобатареи в будущем	20 — 100
Ядерная	
в настоящее время	13 (± 3)
в будущем	< 6
Органического ископаемого топлива	> 15
Ветра	> 20
Геотермальная	15
Органических веществ	> 20
Тепловая энергия океана	> 10
Термоядерного синтеза	?

### СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

Исходя из максимального расхода материалов, было получено значение энергоотдачи, равное 20, а при расчете по экономическим показателям, равное 10 [30]. Если допустить, что в будущем возможно удвоение к.п.д. преобразования солнечной энергии, то энергоотдача, по всей вероятности, достигнет значений 30 — 50. Наибольшее значение при этом соответствует оценкам, выполненным для солнечных батарей [31]. Следует отметить, что современные солнечные батареи, судя по недостаточно полным опубликованным данным по этому вопросу [32], имеют довольно низкую энергоотдачу.

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

К настоящему времени опубликовано несколько работ, посвященных энергоотдаче АЭС [19, 33]. Регенерация топлива и захоронение радиоактивных отходов обычно не учитываются. Поскольку большая часть добываемых урановых руд имеет низкое качество, представляет интерес рассмотреть данные для руд не только с высоким, но и с низким содержанием урана. При использовании богатых руд (0,3%) энергоотдача АЭС составляет  $13 (\pm 3)$ , а для бедных руд этот показатель снижается до  $\sim 6$  [33]. Почти для всех типов реакторов  $\sim 50\%$  энергозатрат приходится на топливный цикл (при использовании богатых руд), а остальная часть — на реактор [33].

### ОРГАНИЧЕСКИЕ ВИДЫ ТОПЛИВ

Для нефти североморских промыслов расчет энергоотдачи как по экономическим показателям, так и на основе данных по расходу материалов дает значение, превышающее 20. Для нефтеносного сланца и процесса газификации угля энергоотдача составляет более 15. При этом следует отметить, что  $\sim 60\%$  добытого топлива расходуется на процесс его переработки, а этот расход энергии в величине энергоотдачи не учитывается [31].

### ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

На основе немногочисленных опубликованных данных по расходу материалов на ветроагрегаты следует, что их энергоотдача составляет как минимум 20.

### ЭНЕРГИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Исходя из данных по расходу материалов и первоначальным капиталовложениям, можно ожидать высоких значений энергоотдачи. Однако применение редких материалов, получаемых из низкосортных руд, может привести к существенному снижению этого показателя.

### ПРОЧИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Энергоотдача существующих геотермальных электростанций достигает 15 [27]. Можно ожидать, что для электростанций, использующих тепловую энергию океана, этот показатель превысит 15. Станции, работающие на биомассе, будут иметь энергоотдачу, сопоставимую

с аналогичным показателем для тепловых электростанций на обычном топливе, т.е. более 20.

### ОБСЛУЖИВАЮЩИЙ ПЕРСОНАЛ

В случае применения нового источника энергии, каковым является солнечная энергия, важно определить число людей, занятых изготовлением и обслуживанием таких систем. Поскольку расходы материалов для всех источников энергии примерно одинаковы, можно ожидать, что потребность в рабочей силе при изготовлении этих систем также не будет существенно различаться. Что касается обслуживания, то ситуация может измениться. Отметим, во-первых, что в Голландии на каждый мегаватт установленной мощности приходится  $\sim 2$  человека обслуживающего персонала [34]. В это число входит административный персонал, лица, обеспечивающие службу распределения энергии и т.п. Непосредственно на тепловых электростанциях штатный коэффициент составляет всего 0,2 чел./МВт [35]. Для атомных электростанций обслуживающий персонал на  $\sim 50\%$  больше [35]. Рассмотрим топливный цикл на примере угля. В работе [36] для угледобычи приводится величина 1,5 чел./МВт. Как уже отмечалось, тонна низкокачественной урановой руды (0,01%) дает столько же энергии, сколько и тонна угля. В связи с этим можно считать, что в будущем для добычи урана будут характерны приведенные выше цифры. По приблизительным оценкам удельные затраты труда на регенерацию ядерного топлива и захоронение отходов составляют 0,05 чел./МВт [20].

В будущем на обслуживание электростанций, работающих на угольном или ядерном топливе, потребуется 3–4 чел./МВт.

Предположим, что для обслуживания солнечной электростанции, включая систему распределения энергии, требуется такой же персонал, что и для системы, работающей на нефтяном или газовом топливе (т.е. 2 чел./МВт). Кроме того, учтем дополнительный персонал, необходимый для обслуживания солнечных коллекторов. Будем считать, что на очистку и обслуживание гелиостата или параболического концентратора требуется 1 ч/год. По грубой оценке это соответствует 0,25 чел./МВт. Таким образом, на всю солнечную электростанцию и систему обслуживания потребуется 2–3 чел./МВт.

Отсюда следует, что обслуживающего персонала для солнечной электростанции потребуется не больше, а, возможно, меньше, чем для электростанций, работающих на угле или ядерном топливе, полу-

Таблица 3

Количество персонала,  
обслуживающего всю систему получения электроэнергии,  
на 1 МВт установленной мощности (штатный коэффициент)

Энергия	Штатный коэффициент, чел./МВт
Солнечная	2 – 3
Ядерная <sup>1</sup>	3 – 4
Угля	3 – 4
Очистка коллекторов	0,25

<sup>1</sup> Низкосортные руды.

чаемом из низкокачественной урановой руды. Эти результаты представлены в табл. 3.

#### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Интересно рассмотреть вопрос о том, не возникнут ли в будущем какие-либо существенные трудности, ограничивающие широкое использование того или иного источника энергии при условии высокого уровня потребления электроэнергии. Предположим, что население земного шара составляет 10 млрд. чел., а уровень установленной электрической мощности на душу населения достигает 4 кВт ( $\sim 12$  кВт · ч тепловой энергии).

С точки зрения использования земной поверхности это означает, что даже при низком уровне удельной электрической мощности 50 МВт/км<sup>2</sup> производящие электроэнергию системы будут занимать 10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>, т.е. менее 0,2% всей поверхности суши.

Потребность в материалах составит на душу населения  $\sim 200$  кг/год в предположении, что удельная материалоемкость энергосистем в среднем будет равна 1000 кг/кВт, а срок службы оборудования – 20 годам. Сравнивая эту величину материалоемкости с потреблением негорючих материалов в США, равным 3400 кг/год на душу населения [37], можно видеть, что на производство электроэнергии потребуются менее 10% этой величины.

Энергоотдача органических топлив и урана в будущем уменьшится. В результате энергоотдача солнечных электростанций будет иметь лучшие показатели.

Упомянутая выше величина потребления энергии означает, что если в будущем потребность в обслуживающем персонале составит

3 чел./МВт, то из каждых 100 рабочих один будет занят на электростанциях. Это представляется вполне приемлемым.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По ряду причин данные, представленные в предыдущих разделах, можно рассматривать только как весьма приближенные. Некоторые из этих причин указаны ниже.

1. В первую очередь рассмотрим коэффициент использования оборудования, определяющий часть времени, в течение которого станция вырабатывает электроэнергию. Для солнечных систем с термодинамическим циклом этот показатель пока не установлен, но, вероятно, он будет достаточно высоким. Такие системы состоят из узлов, для ремонта и обслуживания которых не требуется остановки всей станции. В станции башенного типа энергия к теплоприемнику подводится только путем излучения. Поэтому можно ожидать, что число отказов для такой станции будет невелико. Хорошо известно, что солнечные батареи имеют высокий коэффициент использования. На атомных электростанциях коэффициент использования может достигать в лучшем случае 85% [38]. В действительности этот показатель не превышает 70%, а коэффициент использования установленной мощности составляет  $\sim 60\%$  [39]. Это означает, что выработка энергии на АЭС составляет менее 60% теоретически возможной. Согласно [40], средний коэффициент использования установленной мощности АЭС составляет даже  $\sim 50\%$ . Таким образом, проблема состоит не столько в том, что потребитель получает меньше электроэнергии, а в том, что необходимо сооружение большего числа электростанций для покрытия всей нагрузки. Статистические расчеты показывают, что если коэффициент использования оборудования – случайная величина, то для обеспечения надежного энергоснабжения необходимо по крайней мере вдвое больше ядерных реакторов [41]. Таким образом, низкий уровень коэффициента использования оборудования и коэффициента использования установленной мощности, определяющий потребность в дополнительных электростанциях, может привести к тому, что установленная мощность электростанций в 2 или даже в 3 раза должна превышать нагрузку.

2. Срок службы различных систем выработки электроэнергии будет неодинаков из-за совершенно различных условий работы оборудования (температуры, радиации и т.д.). Практика показывает, что в наземных условиях срок службы солнечных батарей может быть очень

большим, тогда как при работе батарей в космосе он резко сокращается вследствие радиационных повреждений. Для ядерных реакторов срок службы пока неизвестен. По различным оценкам он составляет 15 – 25 лет.

3. Возможности вторичного использования материалов для различных систем неодинаковы. Радиоактивные материалы, сброшенные в море, вообще никогда не могут быть использованы вторично. Возможность использования возобновляемых в природе таких материалов, как, например, древесина в конструкциях солнечных коллекторов, затрудняет анализ данных.

4. Затруднительно также сопоставление централизованных и автономных источников энергии. Следует отметить, что на электрические сети приходится 60% капиталовложений в централизованную энергосистему в целом [34]. Ограничение в будущем плотности населения в районах расположения электростанций может привести к увеличению протяженности линий электропередач [7]. Существенное влияние на показатели могут оказать также и новые ограничения, связанные с защитой окружающей среды. Кроме того, показатели для небольших и крупных станций могут значительно отличаться друг от друга.

5. Автономные энергоустановки часто проектируются с расчетом на полное использование энергии, что еще больше затрудняет сопоставление систем, производящих электроэнергию.

6. Значения многих показателей могут измениться со временем. Кроме того, они зависят и от расположения энергоустановок. Так, для электростанций в отдаленных районах необходимы дополнительные затраты энергии и материалов на перевозку топлива. Процессы получения энергии в будущем могут стать более эффективными.

7. Трудно также дать точное определение рассмотренным показателям. В особенности это касается определения энергоотдачи, относительно которого пока нет единого мнения [42].

В связи с изложенными выше причинами показатели для различных источников энергии можно считать "одинаковыми", если они отличаются не более чем в 3 раза.

Для различных источников энергии (в особенности использующих солнечную радиацию) большое значение имеет аккумулярование. Однако существует так много способов аккумулярования и эти способы так сильно зависят от локальных условий, что их трудно оценить количественно. Рассмотрим в общих чертах один из способов аккумулярования энергии для солнечных тепловых установок. О возможности использования в качестве надстройки цикла солнечных батарей

или термоионных генераторов уже упоминалось в разделе, посвященном занимаемым территориям. Эти устройства дают постоянный ток низкого напряжения и, по-видимому, являются идеальными источниками энергии для производства водорода путем электролиза. Полученный таким образом водород можно хранить на месте производства или транспортировать по системе трубопроводов. Тепло, выделяющееся при сжигании водорода, можно использовать для получения пара. В этом случае на электростанции должны быть дополнительно установлены только электролизер и теплообменник. Если к.п.д. надстройки цикла составляет 15%, а к.п.д. последующего преобразователя 30% (общий к.п.д. ~ 45%), то в данном случае можно аккумулировать 15% энергии. Такую систему можно сочетать с кратковременными (на период день – ночь) аккумулярованием тепла.

## ВЫВОДЫ

Как мы выяснили, между значениями рассмотренных показателей для различных систем производства электроэнергии нет существенной разницы. В значительной мере это объясняется теми неопределенностями, о которых шла речь в предыдущем разделе. Исключение может составлять случай, когда в качестве основного конструкционного материала солнечных коллекторов используется металл. В этом случае солнечные электростанции имеют значительно большую металлоемкость, чем другие системы.

В будущем, бесспорно, появится информация, необходимая для более тщательного сравнения различных источников энергии. В настоящее же время, по-видимому, преждевременно использовать рассмотренные показатели для суждения о достоинствах или недостатках этих источников энергии.

Возможная в будущем ситуация, когда одновременно будут иметь место как высокое потребление энергии на душу населения, так и численность населения, не налагает реальных ограничений на широкое использование всех рассмотренных источников энергии.

Таким образом, источник энергии, по-видимому, целесообразно выбирать в соответствии с другими критериями, учитывая, например, экологические и социальные аспекты их использования.

## Литература

1. Blake F.A., Walton J.D., *Solar Energy*, **17**, 213 (1975).
2. Backus C.E., *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 1032 (1975).
3. Morrow W.E., *Technology Review*, p. 31 (December 1973).
4. Florscheutz L.W., The conference record of the 11th photovoltaic specialists conference (IEEE 1975), p. 318.
5. WASH No. 1535, AEC, Washington D.C.
6. Graham J., *Fast Reactor Safety*, Academic Press, New York, 1971, p. 275 (информация основана на документах АЕС).
7. T.I.D. — 14844 (23 May 1962) and T-160 (9 April 1974), AEC, Washington D.C.
8. Bupp I.C., Derian J.C., *Technology Review*, p. 27 (July — August 1974).
9. Day M.C., *Bulletin of the Atomic Scientists*, p. 52 (December 1975).
10. Blackmon J.B., Vant-Hull L.L., Hildebrandt A.F., Extended Abstracts, ISES 75 (International Solar Energy Society), Los Angeles, paper No. 50/4, 1975.
11. Vant-Hull L.L. (Un. of Houston), частное сообщение.
12. Russell J.L., *Power Engineering*, p. 39 (November 1974).
13. Spek J.C., *ITT Publication*, No. 76 (September 1972) (Wageningen-Holland) (на голландском языке).
14. Ritchings F.A. (Ebasco Services), *De Ingenieur*, **83**, A 392 (Juni 1971).
15. Boon E.F., (T.N.O.) Holland, частное сообщение.
16. Van Korpen C., (Eindhoven Un. of Technology, Holland), частное сообщение.
17. Durand H. (Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, France), частное сообщение.
18. Schmidt E.F., *Unkonventionelle Energiewandler*, Elitera, Berlin, 1975.
19. Kistemaker J., Report about energy analysis, F.O.M. Institute, 1975, Amsterdam, Holland (на голландском языке).
20. Issel W., Knoch W., *Atomwirtschaft*, p. 339 (Juli — August 1975).
21. Atoomenergie en haar Toepassingen, **17**, 101 (1975) (на голландском языке).
22. Braatz U., *Atom und Strom*, p. 88 (September — Oktober 1975).
23. Heimerl W., *Atomwirtschaft*, p. 347 (Juli — August 1975).
24. Bordes C., Report made by I.H.C. Gusto B.V., Schiedam, Holland, 1974 (на голландском языке).
25. Putnam P.C., *Power from the wind*, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 1974.
26. WASH 1239, February 1973, AEC, Washington D.C.
27. Gilliland M.W., *Science*, **189**, 1051 (1975).
28. Dugger G.L., *Astronautics and Aeronautics*, p. 58 (November 1975).
29. Ouwens C. Daey, Report about energy accounting, L.S.E.O., 178, 1975, Landelijke Stuurgroep Energie Onderzoek (на голландском языке).
30. Selcuk M.K., Caputo R.S., Truscello V.C., Report for ISES' 75, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
31. Leach G., *Energy Policy*, **3**, 332 (1975).
32. Iles P.A., Report of Centralab, El Monte, California.

33. Chapman P.F., *Energy Policy*, **3**, 285 (1975).
34. Data from a survey of the dutch electricity system, 1974.
35. Hermans M.E.A. (KEMA, Arnhem, Holland), частное сообщение.
36. Häfele W. et al., *Atomwirtschaft*, p. 498 (Oktober 1975).
37. Goeller H.E., Weinberg A.M., *Science and Public Policy*, p. 479 (November 1975).
38. Roth B.F., *Atom und Strom*, p. 90 (September — Oktober 1975).
39. Moraw G., Pinter M., Szeless A., *Atomwirtschaft*, p. 559 (November 1975).
40. *Not Man Apart*, **5**, No. 5, 14 (March 1975).
41. Ouwens C. Daey, Report about availability and number of reactors, 1975 (на голландском языке).

## Системы термодинамического преобразования солнечной энергии

Ж. Мартинэ, Ж. Пёб<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечное излучение, падающее на Землю, обладает следующими характерными особенностями:

средней плотностью потока при нормальном падении лучей в безоблачную погоду, равной  $1 \text{ кВт/м}^2$  ;

периодичностью прихода из-за смены дня и ночи и изменения характера инсоляции в течение года;

перерывами в поступлении как из-за кратковременной облачности (чаще всего продолжительностью менее 1 ч), так и из-за затяжных облачных или дождевых периодов (длительностью до 2 – 3 дней);

поступлением с поверхности, которую в первом приближении можно считать черной, при средней температуре, определенной в видимой части спектра,  $6000 \text{ К}$ .

При термодинамическом преобразовании этой энергии в электрическую требуется практически постоянно действующая система, чтобы изменения тепловых режимов не вносили серьезных ограничений и чтобы не возникло затруднений, связанных с регулировкой и управлением. Желательно также, чтобы такая система по ряду причин допускала изменение производства электроэнергии во времени (например, в часы пик).

Поэтому подобная термодинамическая система должна иметь аккумулирующее устройство для исключения или по крайней мере уменьшения случайных колебаний режимов эксплуатации или обеспечения необходимого изменения производства энергии во времени. Из-за трудностей, присущих аккумулированию электрической или механической энергии (например, при перекачке больших количеств воды), предпочтение отдается тепловому аккумулированию.

<sup>1)</sup> J. Martinet, J.L. Peube, Professeurs à l'Université de Poitiers.

## ОБЩАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Система термодинамического преобразования солнечной энергии должна состоять из следующих компонентов:

- системы улавливания падающей радиации;
- приемной системы, преобразующей энергию солнечного излучения в тепловую, которая передается теплоносителю;
- системы переноса теплоносителя от приемника к аккумулятору или к одному или нескольким теплообменникам, в которых нагревается рабочее тело;

- теплового аккумулятора;

- теплообменников (одного или нескольких), образующих горячий и холодный источники тепловой машины;

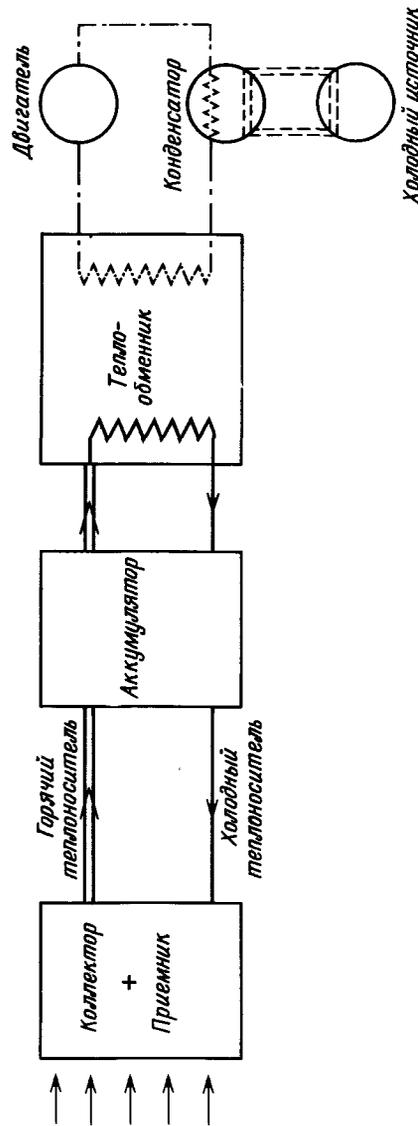
Возможны две принципиальные схемы (фиг. 1 и 2).

В первой схеме в приемнике нагревается теплоноситель и обеспечивается таким образом тепловая нагрузка аккумулятора. При этом рабочее тело нагревается независимо от режимов поступления солнечной радиации, если, конечно, аккумулятор не разряжен полностью. Таким образом, аккумулятор постоянно играет роль буфера, а связь системы приемник – аккумулятор с тепловой машиной осуществляется с помощью по меньшей мере одного теплообменника.

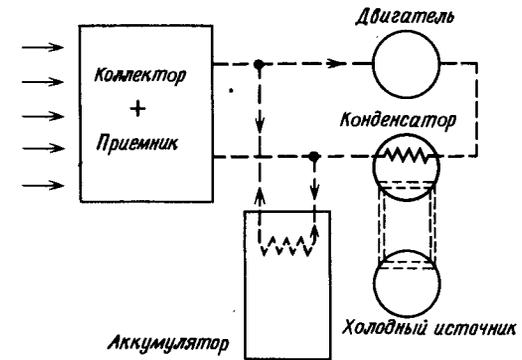
Во второй схеме в приемнике непосредственно нагревается рабочее тело. Зарядка аккумулятора обеспечивается путем отвода части нагретого рабочего тела, а связь с тепловой машиной происходит непосредственно, без промежуточных устройств.

В первой схеме по сравнению со второй имеет место в среднем большое снижение температурного напора (при аккумулировании, возврате теплоносителя и в процессе теплообмена). Во второй схеме потери наблюдаются лишь при аккумулировании и возврате. Однако в первом случае тепловая машина и ее вспомогательные устройства не подвержены случайным колебаниям температуры даже при отсутствии системы регулирования. Кроме того, во многих случаях теплоноситель сам играет роль теплового аккумулятора.

Факторы, определяющие выбор параметров термодинамической системы, довольно многочисленны. Рассмотрим эти факторы вкратце, а также четыре метода приема солнечной радиации. При этом следует отметить, что, если в принципе с помощью концентратора можно было бы достичь температуры  $6000 \text{ К}$ , использование таких высоких температур на практике было бы ограничено свойствами конструкционных материалов для тепловых машин.



Фиг. 1



Фиг. 2.

### КОНЦЕНТРАЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Прямая радиация без концентрации позволяет получить температуры порядка  $100^{\circ}\text{C}$ .

Малая степень концентрации (порядка 100) получается при использовании отражающих поверхностей, обеспечивающих концентрацию при любом направлении прихода солнечных лучей. Слежение за Солнцем осуществляется в этом случае с помощью упрощенной системы управления. К устройствам такого типа относятся параболические отражатели, ось которых либо горизонтальна, либо параллельна оси мира. Сравнительно невысокие значения концентрации объясняются псевдостабильным характером изображения, образованного в солнечном пятне. Управляется такая установка в соответствии с изменением только одного компонента дневного перемещения этого пятна. Второй компонент перемещения при этом не учитывается, и принимаются лишь меры к тому, чтобы фокальное изображение не выходило за пределы поверхности приемника концентрированного излучения, которая поэтому оказывается больше поверхности стигматического изображения.

Умеренная степень концентрации (порядка 1000) получается при использовании большого числа плоских или фокусирующих гелиостатов, управляемых по двум вращательным степеням свободы. Изображения Солнца, соответствующие отдельным гелиостатам, накладываются при этом друг на друга.

Высокая степень концентрации осуществляется единой оптической системой (плоские гелиостаты и параболический отражатель).

Она позволяет достичь весьма высоких температур. Именно такая система применена на солнечной печи в Одейо.

### СОЛНЕЧНЫЙ КОТЕЛ

Такой котел состоит в основном из панелей с трубами, через которые протекает теплоноситель. Вся эта система предназначена для поглощения солнечной радиации. При исследовании математической модели такого котла было установлено, что в первом приближении влияние концентрации излучения и геометрии котла можно рассматривать отдельно. Действительно, при заданной температуре стенки котла увеличение концентрации приводит к уменьшению относительного значения потерь, происходящих за счет обратного инфракрасного излучения. Кроме того, падающая солнечная радиация в конечном счете поглощается тем лучше, чем ближе форма котла к форме полости, играющей роль черного тела. Это единственно правильный путь нахождения наивыгоднейшей формы котла. В нерабочие периоды (ночью или в пасмурную погоду) необходимо принимать меры для снижения как радиационных тепловых потерь, так и потерь за счет конвекции и теплопроводности. Поэтому полезно предусматривать устройство для закрывания входного отверстия полости, а также общую теплоизоляцию установки. Вопрос борьбы с потерями особенно важен для энергетических станций большой мощности с концентрацией радиации. В таких установках паровой котел с пароперегревателем должен выдерживать значительное давление (более 10 МПа), что в случае повторных циклов может привести к появлению механической и термической усталости. Для котлов, работающих при высокой температуре теплоносителя (400 – 600 °С), необходимо полностью исключить возможность его затвердевания в нерабочие периоды<sup>1)</sup>. Та же проблема снижения потерь, хотя и в меньшей степени, возникает для котлов, работающих при более низких температурах (например, 200 °С), или для солнечных энергетических станций средней мощности, работающих при малой концентрации излучения. С целью повышения к.п.д. котлов, работающих при низкой или средней температуре, можно применять специальные устройства, уменьшающие радиационные потери.

Что касается расхода теплоносителя в контуре, то, очевидно, он должен быть достаточным для отвода получаемой котлом тепловой энергии. Хотя явления теплопередачи в жидкостях довольно

<sup>1)</sup> Имеется в виду возможность применения в качестве теплоносителя солей, например натриевых. — Прим. ред.

сложны, тем не менее известно, что существуют предельные значения тепловых потоков, при превышении которых перенос тепла существенно ухудшается. Например, труба, в которой испаряется вода, способна воспринимать тепловые потоки 700 – 800 Вт/см<sup>2</sup>, в то время как перегреватель водяного пара – не более 50 Вт/см<sup>2</sup>. Заметим, также, что без изменения агрегатного состояния теплоноситель может поглотить только вполне определенное количество тепла.

Поэтому, за исключением случаев применения испарительных котлов, при нагревании теплоносителей или получении необходимого перегрева пара следует иметь поверхности, явно превышающие по площади минимальную поверхность, на которой концентрируется солнечная радиация. Отсюда вытекает необходимость изготовления котлов в виде полости, вход в которую соответствует сечению пучка концентрированного излучения.

### ТЕХНИКА АККУМУЛИРОВАНИЯ

В настоящее время техника аккумулирования развита недостаточно. Тепловой аккумулятор является дорогостоящим элементом системы. Именно этим определяются требования к выбору аккумулирующего тепло материала. На практике этот выбор довольно ограничен. В результате для повышения экономичности системы теплового аккумулирования максимальную продолжительность работы аккумулятора приходится ограничивать десятком часов (одной ночью). При современных экономических условиях и состоянии техники практически можно рассчитывать на продолжительность работы аккумулятора лишь такого порядка.

Выбор аккумулирующего материала связан также с требуемым уровнем температуры и количеством тепловой энергии, которую необходимо аккумулировать. В частности, для наилучшего использования тепла, запасенного в аккумуляторе, следует свести к минимуму перепад температур между аккумулирующим материалом и нагреваемым рабочим телом. При этом рабочее тело в процессе испарения при постоянной температуре поглощает значительное количество тепла. В этих условиях изменение температуры аккумулирующего материала в процессе охлаждения в зависимости от интенсивности теплопередачи должно происходить по такому же закону, как и для рабочего тела.

В том случае, если повышение температуры воды осуществляется за счет ее теплоемкости, естественно применять такой тип аккумуля-

мулирования, при котором использовался бы материал, претерпевающий изменение состояния при тех же условиях, что и рабочее тело. Это позволило бы исключить или по крайней мере уменьшить термодинамические необратимые потери, сохраняя для аккумулированного тепла характеристики, требуемые потребителям. При этом задача аккумулирования все же не в полной мере разрешается, например в случае аккумулирования с фазовыми переходами, которое связано с преодолением многих трудностей конструктивного и технологического характера (громоздкость, поиски оптимальных теплофизических характеристик, исследование явлений кристаллизации и борьба с коррозией на стенках).

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Тип цикла и природа рабочего тела определяются областью рабочих температур теплового двигателя. Это предполагает в первую очередь взаимосвязь между характеристиками системы концентрации, аккумулятора и параметрами цикла. Например, в солнечной электростанции без концентрации максимальная температура горячего источника будет  $\sim 100^\circ\text{C}$ . В этом случае можно говорить лишь о цикле с испарением и использованием рабочих тел типа фреона. Однако, когда температура горячего источника превышает  $200^\circ\text{C}$ , можно применять паровые циклы, в том числе циклы Ренкина или Хирна. Однако в цикле Ренкина образующаяся при конденсации смесь жидкости и пара вызывает износ подвижных частей. Несмотря на то что цикл Хирна, в котором применяется перегрев при постоянном давлении, позволяет улучшить к.п.д., все же его к.п.д. существенно ниже, чем цикла Карно. Ниже для сравнения приведены расчетные значения к.п.д. трех циклов:

Цикл	Интервал температур, $^\circ\text{C}$	Параметры цикла	К.п.д.
Карно	40 – 268		0,42
Ренкина	40 – 268	Пар под давлением 5 МПа	0,385
Хирна	40 – 450	Испарение при $266^\circ\text{C}$ ; пар под давлением 5 МПа	0,380
Карно	40 – 450		0,567

Конечно, при рассмотрении этих циклов можно иметь в виду различные улучшения (промежуточный перегрев, отбор), но они не меняют существа вопроса. Кроме того, существует верхний предел температуры перегрева, связанный с пределами механической и химичес-

кой прочности стали. На практике эта температура не превышает  $550^\circ\text{C}$ . Более того, погоня за высокими температурами не приводит, как это видно из таблицы, к явному выигрышу в к.п.д.

Таким образом, если в солнечной установке имеет место концентрация (пусть даже невысокая), предпочтение отдается пароводяным циклам. Если же при этом осуществляется перегрев, то задача определения уровня этого перегрева решается не так, как в случае паровых машин, работающих на горючем, когда температура продуктов сгорания остается весьма высокой. При разработке солнечной станции малой мощности небольшое увеличение к.п.д., вызванное перегревом, должно постоянно сопоставляться с ростом технических трудностей и увеличением капитальных затрат. При этом предполагается, что в современных условиях применение перегрева не будет экономически оправданным. Однако не исключено, что такая точка зрения может измениться в случае серийного сооружения станций.

Наконец, из того, что удельные затраты на преобразование солнечной энергии при значительных мощностях в весьма малой степени зависят от концентрации, вовсе не следует, что оптимальная стоимость электроэнергии соответствует наиболее высокой температуре перегрева, в то время как усовершенствование техники аккумулирования может позволить выиграть несколько градусов или даже несколько десятков градусов.

### ХОЛОДНЫЙ ИСТОЧНИК

Тип холодного источника, который не играет определяющей роли в системе, все же остается важным фактором. По-видимому, не всегда следует ориентироваться на классический охладитель (холодная вода в большом количестве). Например, влажное воздушное охлаждение требует гораздо меньших расходов. Но в местах с жарким климатом чаще всего приходится рассчитывать на сухое воздушное охлаждение, хотя оно дороже влажного в связи с необходимостью применения больших поверхностей.

### ТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ

Для уровня мощности в несколько десятков мегаватт невыгодно использовать устройство для промежуточного перегрева пара, поскольку его стоимость не окупается приростом мощности.

Для таких мощностей можно рекомендовать два типа двигателей:

1) для солнечных станций, включенных в энергосеть, наиболее подходящими, по-видимому, будут турбины, несмотря на узкий диапа-

зон рабочих режимов и конструктивную сложность, связанную с динамическими и кинематическими особенностями;

2) для автономных станций с переменной нагрузкой могут оказаться более эффективными поршневые двигатели, для которых не требуется высокого уровня кинетической энергии и область рабочих режимов которых более широка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка солнечной электростанции основана на критериях, отличных от обычно применяемых при разработке станции классического типа. Поэтому создание таких станций требует проведения дополнительных исследований или по крайней мере расширения ранее проведенных работ.

Тем не менее некоторые аналогии все же имеют место и уже сейчас позволяют сделать некоторые предварительные рекомендации, например, относительно использования возможных термодинамических циклов. Основную работу предстоит провести в трех областях: концентрации, аккумуляирования и термодинамических циклов, но еще больше в части их взаимодействия.

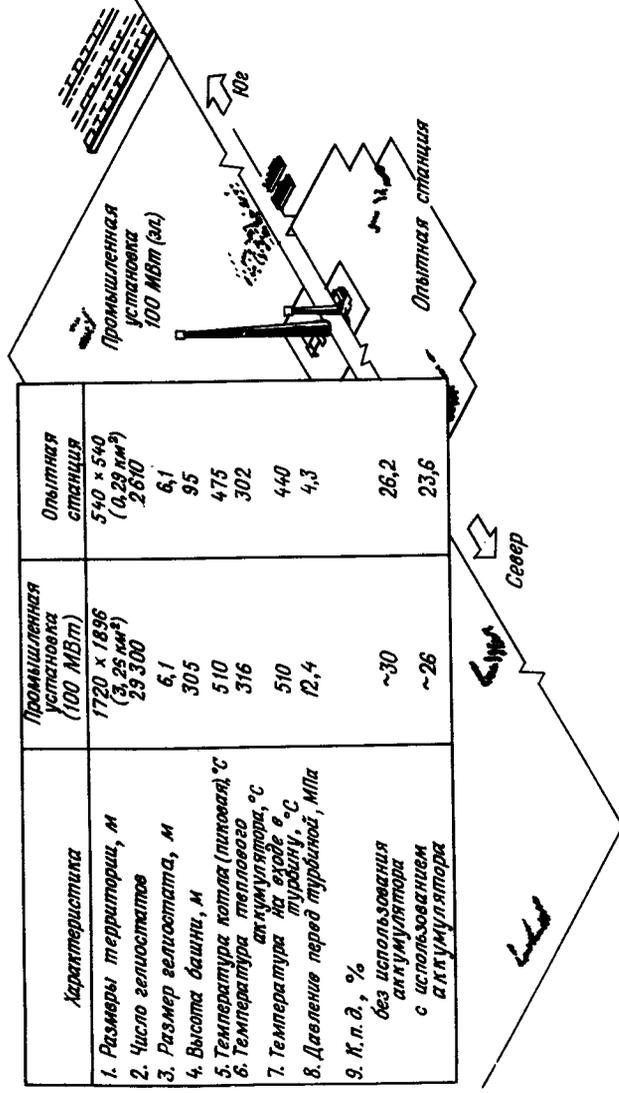
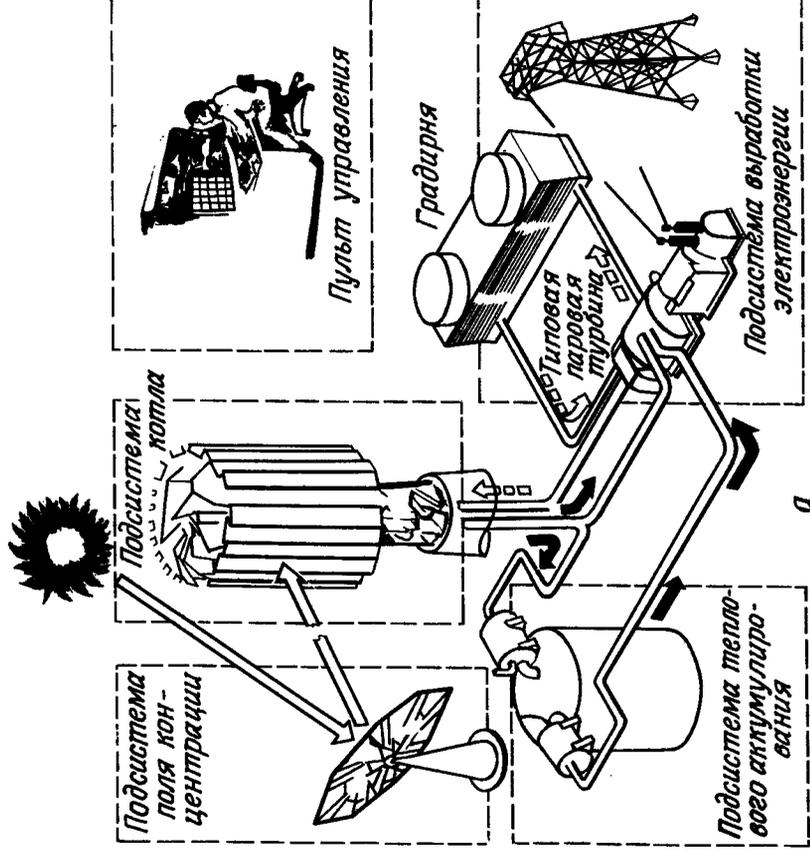
## Солнечная станция башенного типа для выработки тепловой и электрической энергии

Л.Л. Вант-Халл <sup>1)</sup>

На конференции ЮНЕСКО, состоявшейся в Париже в 1973 г., был представлен мой доклад, в котором рассматривались основные концепции солнечной станции башенного типа, а также сообщалось о поддержке, впервые оказанной правительством Соединенных Штатов исследованиям в данной области. В этой работе подчеркивалось, что исследования и разработки солнечных тепловых электрических станций получили развитие в связи с нехваткой топлива и положением на Ближнем Востоке и появлением к этому времени ряда жизнеспособных и удачных инженерных решений. Многие из выполненных ранее исследований были посвящены рассредоточенным приемникам солнечной энергии. Работы в этом направлении продолжаются и сейчас. Сложность схемы размещения единичных коллекторов, необходимость применения высокотемпературных селективных покрытий, высокая стоимость, малая эффективность системы приема энергии, а также снижение эффективности в связи с невысокими рабочими температурами — все это явилось причиной медленного прогресса в разработке опытной станции такого типа. В течение 1973 — 1974 гг. были проведены предварительные исследования по оптимизации конструктивных элементов станции и системы в целом для шести возможных вариантов, включая исследование солнечной станции башенного типа, завершённое конструктивными проработками, которые планируется реализовать в опытной станции мощностью 10 МВт к концу 1980 г. и демонстрационной станции мощностью 50 — 100 МВт до 1985 г. [1].

Ниже рассматриваются основные особенности крупномасштабной солнечной станции башенного типа (фиг. 1). Основное назначение станции состоит в производстве электроэнергии для передачи ее

<sup>1)</sup> L.L. Vant-Hull, Solar Energy Laboratory, University of Houston, Houston, Texas 77004.



Фиг. 1. Предварительный вариант системы солнечной энергетической станции с центральным приемником, разработанный фирмой "Макдоннелл - Дуглас", Хьюстонским университетом, фирмами "Рокетдайн", "Шелдал" и "Стирнс - Роджер". а - структура станции с центральным приемником; б - основные характеристики промышленной и опытной станций.

в общую энергосистему по приемлемой цене и в экономически оправданном количестве. Экономические оценки в отношении масштаба станции и трудозатрат показали целесообразность использования на станции крупных турбоэлектрогенераторов мощностью 100 МВт и выше. Для таких генераторов типичными параметрами являются температура 500 °С и давление 15 МПа. При этой температуре потери излучением составляют  $\sim 20$  кВт/м<sup>2</sup>; такого же уровня достигают и конвективные потери. В этих условиях для снижения тепловых потерь представляется возможным либо применять селективные покрытия и прозрачную изоляцию, либо повышать концентрацию потока излучения до величины, соответствующей допустимому уровню потерь 30 – 50 кВт/м<sup>2</sup>. Последний из указанных способов положен в основу рассматриваемой солнечной станции башенного типа. При использовании поверхности приемника с примерно одинаковыми излучательной и поглощательной способностями и в условиях максимальных конвективных потерь тепловые потери при низких уровнях облучения составят  $\sim 20$  кВт/м<sup>2</sup>, возрастая до 50 кВт/м<sup>2</sup> при предельно возможной облученности. Таким образом, с учетом указанных потерь, в том числе и потерь при отражении, для обеспечения на приемнике кратности солнечной радиации  $\sim 500$  "солнц" требуется концентрация  $\sim 1000$ . Поскольку такие концентрации практически невозможно обеспечить с помощью линейных концентраторов, приходится рассматривать концентрирующие устройства, фокусирующие радиацию в "точку" приемника. Конечно, такие устройства требуют слежения за видимым движением Солнца путем вращения вокруг двух осей, однако дополнительный расход энергии по сравнению с одноосевой схемой слежения не особенно велик. Требуемую концентрацию можно без труда обеспечить с помощью небольших параболоидов, например диаметром 6 м, однако они имеют два существенных недостатка. Во-первых, для каждого такого отражателя требуется достаточно сложный по конструкции высокотемпературный приемник, который размещается в его фокальной области. Во-вторых, для съема энергии с 10 – 20 тыс. параболоидных отражателей, обеспечивающих привод генератора мощностью 100 МВт, необходим дорогой высокотемпературный теплообменный контур, соединяющий рассредоточенные концентраторы.

В случае станции башенного типа все параболоиды заменяются практически плоскими отражателями тех же размеров. В условиях промышленного производства при использовании флоат-процесса изготовления стекла плоские отражатели значительно дешевле заменяемых ими параболоидов, имеющих существенный прогиб. Каждый ге-

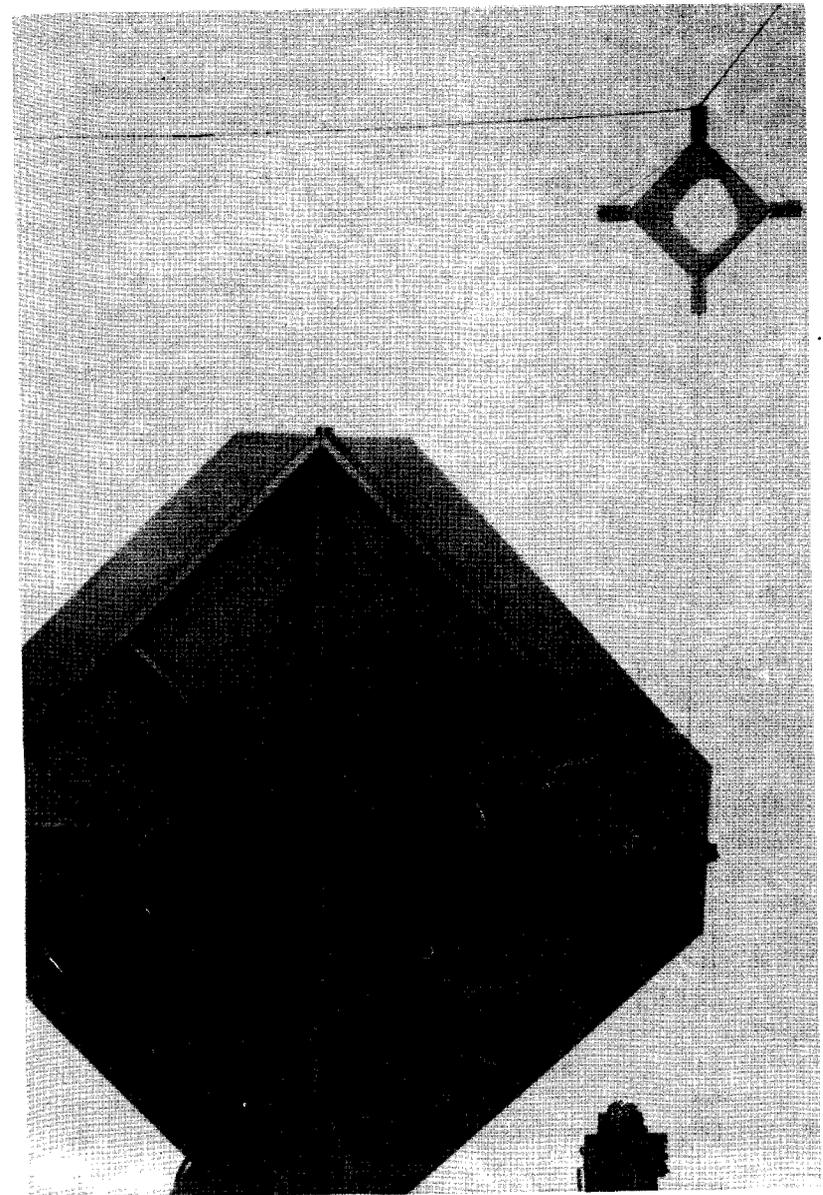
лиостат отображает "солнце" на элемент поверхности центрального приемника, который для снижения влияния взаимного затенения гелиостатов поднят над поверхностью земли. Таким образом, энергия передается к приемнику оптическим способом вместо транспортной сети паропроводов, требуемой в случае применения системы с рассредоточенными коллекторами. Один такой приемник, аналогичный по своим размерам и параметрам паровому котлу обычного типа, заменяет собой тысячи локальных приемников. Поскольку стоимость гелиостатов составляет основную долю стоимости системы сбора солнечной энергии, основное внимание необходимо обратить на конструктивную разработку гелиостатов для облегчения их изготовления и максимального удешевления при массовом производстве. Кроме того, система должна быть создана в определенном масштабе, позволяющем применить гелиостаты с наиболее экономически оправданными размерами при серийном изготовлении и монтаже, которые в то же время обеспечивают получение перегрева пара до 500 °С.

Угловой размер Солнца равен 9,3 мрад; кроме того, хорошо известно, что управляющие механизмы, разработанные для привода параболоидных радаров, прожекторов и т.п., могут надежно функционировать с точностью в пределах 3 мрад с помощью либо вычислительной машины, либо оптического датчика и устройства обратной связи. Устройства, обеспечивающие меньшую точность, ненамного дешевле указанных; если же требования к точности повышать, то стоимость системы возрастает. В связи с этим минимальный диаметр отображения такого поля гелиостатов, как в системе Франсия, определяется произведением 10 – 12 мрад на расстояние от приемника до края поля отражения, состоящего из дисковых фокусирующих зеркал (без учета аберрации). Однако при использовании плоских гелиостатов угловой размер каждого из них по отношению к фокусу не должен превышать 5 – 10 мрад, с тем чтобы исключить значительное увеличение фокального изображения.

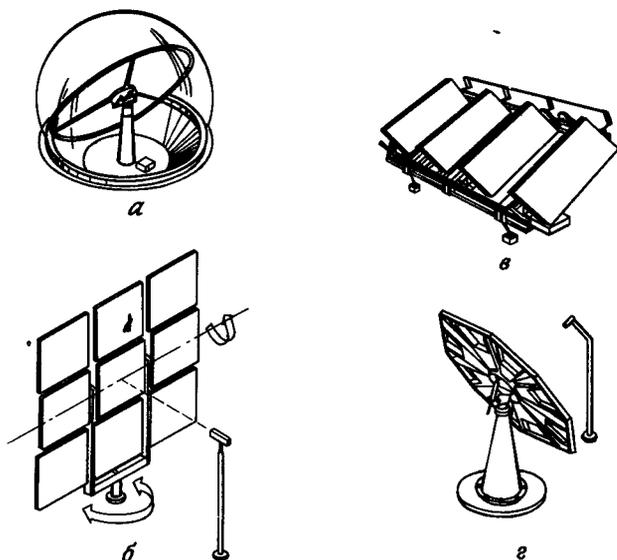
В первых публикациях на эту тему, принадлежащих советским специалистам, указывается на существенное возрастание стоимости, отнесенной к 1 м<sup>2</sup> параболоидного отражателя площадью более 100 м<sup>2</sup>. Это позволило авторам упомянутых работ утверждать, что большие параболоидные отражатели можно с успехом заменить составной системой из отдельных зеркальных элементов с индивидуальным приводом, например системой из 2200 зеркал радиусом 2 м, концентрирующих солнечное излучение на мишень, размещенную на высоте 88 м. Мы независимо пришли к тому же заключению, которое было подтвер-

ждено также Тромбом на установке из 63 гелиостатов размерами  $6,5 \times 7$  м каждый. Дополнительным фактором, позволяющим создать действительно экономичную систему, была разработка флоат-процесса производства стекла по методу Пилкинтонна. Исключительно высокое качество плоскости такого стекла даже в больших листах позволяет отказаться, например, от 180 единичных зеркал размерами по  $0,5 \times 0,5$  м, индивидуально закрепленных и выверенных для исключения искажения, как в установке Тромба, и воспользоваться всего несколькими крупными листами. Качество оптического изображения такого гелиостата показано на фиг. 2. Этот двухэлементный отражатель имеет размеры  $3,7 \times 3,7$  м. В данном опыте квадратная мишень удалена от гелиостата на 120 м и имеет без учета концевых панелей размеры  $7,5 \times 7,5$  м. Оптическое качество гелиостата при его работе на расстояниях 220 и 900 м было также удовлетворительным. На расстоянии 900 м получалось явно выраженное пятно диаметром 7,5 м с крыльями протяженностью до  $\sim 12$  м.

В этом гелиостате конструкции фирмы "Макдоннелл – Дуглас" два листа флоат-стекла закреплены на несущей стальной ферме. Азимутально-зенитальное вращение гелиостата осуществляется с помощью двух электромоторов мощностью  $1/30$  л.с. каждый ( $\sim 30$  Вт). Фотоэлектрический датчик, состоящий из четырех квадратных, последовательно затеняемых элементов и размещенный на одной оси с мишенью, регистрирует отклонение отраженного луча по азимуту и высоте и с помощью системы преобразования в координатах  $x - y$  приводит в действие азимутальный и зенитальный приводы, обеспечивающие правильное направление отраженного луча. Поскольку характеристики этого опытного гелиостата во всех отношениях оказались вполне удовлетворительными, то его конструктивные принципы и результаты системного анализа стоимостных показателей были положены в основу проектирования гелиостата, который должен выпускаться в условиях массового крупномасштабного производства [2]. Как показано на фиг. 3, гелиостат, отвечающий условию минимальной стоимости как с учетом точности, так и требований эксплуатации, представляет собой восьмиугольную конструкцию, имеющую в плане размеры  $6,1 \times 6,1$  м. Для облегчения транспортировки гелиостат составляется из восьми плотно подогнанных усеченных треугольных сегментов, укрепленных на втулке диаметром 1 м. При необходимости для обеспечения небольшого фокусирующего эффекта эти плоские сегменты могут быть слегка наклонены по отношению к базе гелиостата. Для гелиостатов меньших размеров заметную роль начинает играть стои-



Фиг. 2. Двухэлементный гелиостат размерами  $3,7 \times 3,7$  м во время испытаний.  
Мишень  $7,6 \times 7,6$  м расположена южнее гелиостата на расстоянии 92 м на высоте 80 м.



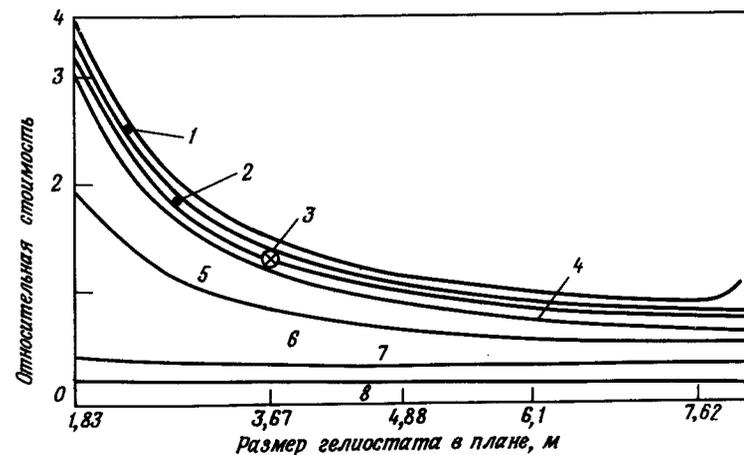
Фиг. 3. Различные варианты конструкции гелиостатов для опытной станции. а — гелиостат фирмы "Боинг"; б — гелиостат фирмы "Мартин — Мариетта"; в — гелиостат фирмы "Ханиуэлл"; г — гелиостат фирмы "Макдоннелл — Дуглас".

мость системы слежения, включающей фотоэлектрический датчик и исполнительный механизм. Для значительно более крупных гелиостатов на первый план выдвигаются, как указывали советские исследователи, конструкторские проблемы, а также трудности, связанные с эксплуатацией и транспортировкой. Другие подрядчики ЭРДА<sup>1)</sup> также считают, что разрабатываемые ими единичные гелиостаты должны иметь примерно такие же размеры. Гелиостат фирмы "Мартин-Мариетта" составлен из девяти зеркальных отражателей площадью по 2 м<sup>2</sup>, искривленных для обеспечения фокусировки. В гелиостате фирмы "Ханиуэлл" предусматривается конструктивное совмещение четырех одновременно управляемых плоских отражателей размерами по 2,5 × 4 м, которые вращаются вокруг параллельных осей, имеющих общий одинаковый наклон относительно перпендикулярной им горизонтальной оси.

<sup>1)</sup> Управление по разработке и исследованию в области энергетики (ЭРДА) было создано в 1975 г. Работы ЭРДА проводятся в следующих направлениях: ископаемое топливо, солнечная, геотермальная и другие виды возобновляемых источников энергии, атомная энергия, рациональное использование энергии и защита окружающей среды. — Прим. ред.

Поскольку стоимость гелиостатов составляет  $\sim 80\%$  стоимости всей подсистемы сбора солнечной энергии, то основные усилия при их разработке должны быть направлены на предельно возможное снижение затрат при сохранении требуемых эксплуатационных качеств (фиг. 4). Основная задача при этом состоит в создании максимально экономичного гелиостата и последующем размещении подобных гелиостатов в поле отражения таким образом, чтобы свести к минимуму стоимость энергии, обеспечиваемой системой сбора энергии. Исследования режимов работы поля гелиостатов для 35° с.ш. (юго-западный район пустынь США) показывает, что сбор отраженной энергии становится неэффективным при краевых углах более 70° или при расстояниях, превышающих 3,5 высоты башни. Полагая произведение 10 мрад × 3,5h равным 6,1, получаем минимальную высоту башни h, при которой обеспечиваются хорошие оптические характеристики, равной 170 м.

Подробные расчеты по определению плотности размещения гелиостатов и их взаимного затенения показывают, что гелиостаты должны

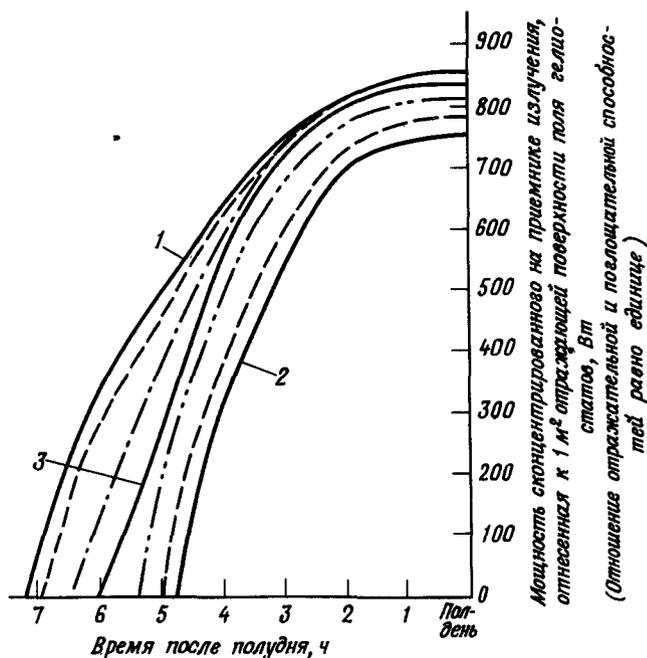


Фиг. 4. Относительная стоимость гелиостата в зависимости от его габаритов.

Восьмисегментная стальная опорная ферма; стальное конусное основание; производительность 28 000 в год; монтажные работы на месте установки; стекольный завод находится не на территории станции.

1 — транспортировка оптической системы и узлов; 2 — окончательная наладка и контроль; 3 — однолистовый отражатель размерами 3,7 × 3,7 м; 4 — подготовка фундамента, включая монтаж; 5, 6 — юстировка и слежение; 7 — несущая конструкция; 8 — отражающая поверхность.

занимать  $\sim 1/3$  территории, что при высоте башни 170 м обеспечивает уровень электрической мощности  $\sim 50$  МВт. Выбранная нами система с башней, вдвое более высокой (330 м), должна обеспечивать тепловую мощность  $\sim 600$  МВт в течение 5–9 ч ясного дня (в зависимости от времени года). В сочетании с тепловым аккумулятором, рассчитанным на 6-часовое действие, такая система будет обеспечивать работу электрогенератора мощностью 100 МВт в течение 8–14 ч в условиях ясного дня. Приемник конструкции фирмы "Рокетдайн" диаметром 17,3 м и высотой 25 м вырабатывает пар с температурой перегрева  $510^\circ\text{C}$  при давлении 15 МПа. Для обеспечения пиковой



Фиг. 5. Суточные кривые энергообеспеченности для оптимизированной на зимние условия работы системы коллекторов, расположенной на широте  $35^\circ$  с.ш.

При условии что отражательная и поглощательная способности равны 0,9, а зеркальная поверхность площадью  $0,8 \text{ км}^2$  рассредоточена на территории  $2,4 \text{ км}^2$  вокруг башни высотой 330 м, приемник станции имеет в пиковом режиме тепловую мощность 550 МВт или не менее 350 МВт в течение 6 или 9 ч соответственно в ясный зимний или летний день.

1 — летнее солнцестояние; 2 — зимнее солнцестояние; 3 — равноденствие.

плотности потока излучения при давлении 0,6 МПа один из трех гелиостатов направлен в центр приемника, другой — на 5 м выше центральной линии и третий — на 5 м ниже [3]. В приемнике в процессе нагревания вода превращается в перегретый пар за один проход при постоянном регулировании потока в панелях, с тем чтобы свести к минимуму влияние различного поступления энергии на разные панели и временные флуктуации потока радиации. Из опыта известно, что "хорошо спроектированная" система для условий полдня может иметь следующие показатели: косинус угла падения солнечного излучения на зеркало 0,85; отражательная способность зеркала 0,92; доля отраженного от зеркала излучения 0,95–0,98; доля отраженного излучения, воспринятого приемником, 0,99–0,95; поглощательная способность приемника 0,92; доля энергии поглощенного приемником излучения, переданная пару, 0,92; при этом полный к.п.д. системы коллекторов составляет  $\sim 63\%$ , т.е.

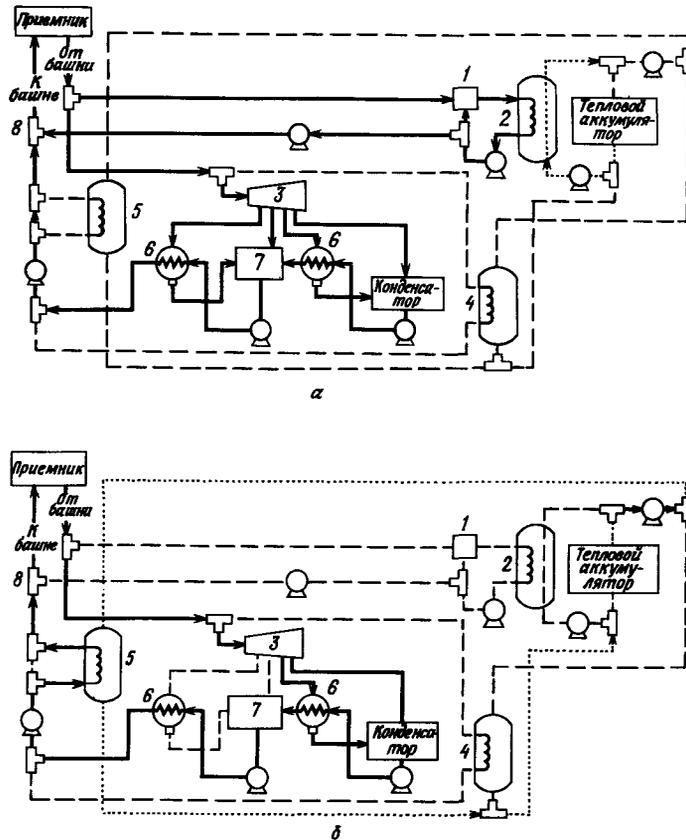
Мощность  $P$  (тепл.)  $\approx 0,63 \times$  (Плотность потока солнечной радиации)  $\times$  (Площадь зеркал).

Суточное изменение энергии отраженной от поля гелиостатов радиации для каждого месяца года на широте  $35^\circ$  с.ш., показано на фиг. 5.

Структура поля гелиостатов была оптимизирована, исходя из зимних условий работы в утренние и послеполуденные часы, что обеспечивает повышение производительности соответственно в полдень и в летнее время. Поэтому эти суточные кривые мало отличаются друг от друга, несмотря на существенное изменение в течение года плотности потока прямой солнечной радиации, достигающей Земли.

Основной термодинамический цикл станции показан на фиг. 6. В обычном режиме работы питательная вода подается насосом в приемник, где превращается в перегретый пар с температурой  $510^\circ\text{C}$ . На входе в турбину тепловая мощность составляет  $100/\epsilon^1$  МВт. При этом некоторое избыточное количество пара направляется в тепловой аккумулятор, где отдает тепло, полученное в результате перегрева. Для повышения к.п.д. цикла Ренкина пар из турбины отбирается в нескольких точках для подогрева питательной воды до  $260^\circ\text{C}$ . В периоды, когда солнечная радиация имеет малую плотность или поступает с перерывами, весь пар направляется только в тепловой ак-

<sup>1)</sup>  $\epsilon$  — коэффициент, учитывающий изменение мощности турбины в зависимости от режима поступления солнечной радиации и графика потребления энергии. — Прим. ред.



Фиг. 6. Типичные режимы работы солнечной теплостанции. Предусмотрена также возможность работы станции от аккумулятора в ночное время и в периоды переменной облачности, когда вся энергия от приемника направляется в аккумулятор.

а — схема работы станции при нормальном уровне солнечной радиации;  
б — схема работы станции при пониженном уровне солнечной радиации.

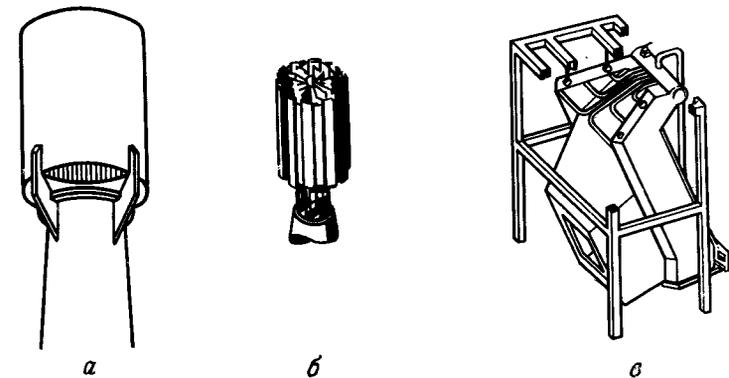
--- линия периодического включения; ..... рабочая жидкость теплового аккумулятора (постоянно действующая линия); — пар и вода (постоянно действующая линия).

1 — смеситель для охлаждения перегретого пара; 2 — теплообменник аккумулятора; 3 — турбина; 4 — парогенератор; 5 — дополнительный подогреватель питательной воды; 6 — подогреватель питательной воды; 7 — подогреватель деаэратора; 8 — тепловой смеситель.

кумулятор при температуре  $\sim 340^\circ\text{C}$ . От теплового аккумулятора турбина может работать в любое время на уровне мощности, составляющем  $\sim 70\%$  номинальной мощности. При этом возможны различные комбинированные режимы. Для переноса тепла от пара к аккумулирующей насадке из раздробленных камней применяется углеводородсодержащая жидкость, которая находится с насадкой в непосредственном контакте.

Программа по солнечным станциям, как видно из фиг. 3 и 7, имеет много вариантов. Наряду с нашим исследованием системы с открытым приемником группа организаций во главе с фирмой "Ханиуэлл" разрабатывают систему, включающую центральный полостной приемник с многоэлементными наклонными гелиостатами. Изучается также ряд низко- и высокотемпературных тепловых аккумуляторов с плавкими насадками. Другой группой разработчиков, возглавляемой фирмой "Мартин — Мариетта", создан полостной, относительно небольшой по размерам и ориентированный на север приемник, который работает в сочетании с фокусирующими гелиостатами. Он будет использован в системе из 14 параллельно включенных приемников (тепловая мощность каждого 50 МВт) для привода генератора мощностью 100 МВт. Предполагается, что избыток тепловой энергии будет направляться в масляные аккумуляторы, имеющие две серии емкостей, разделенные на низко- и высокотемпературные.

Хьюстонским университетом совместно с фирмой "Макдоннелл — Дуглас", которая выполнила также основной объем проектных работ,



Фиг. 7. Типы приемников для опытных станций.  
а — полостной приемник фирмы "Хениуэлл"; б — открытый приемник фирмы "Макдоннелл — Дуглас"; в — полостной приемник фирмы "Мартин — Мариетта"

был проведен подробный экономический анализ системы солнечной станции башенного типа. В результате были получены следующие стоимости 1 кВт установленной электрической мощности (в ценах 1975 г., долл. США) для станции электрической мощностью 300 МВт, состоящей из трех блоков по 100 МВт каждый, включающих тепловой аккумулятор, рассчитанный на 6 ч работы, в предположении ввода в действие по одному модулю ежегодно:

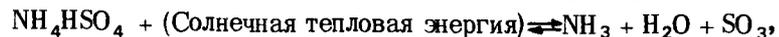
Электростанция	203
Аккумуляция энергии	100
Система сбора солнечной энергии	489
Приемник, башня и насосное оборудование	97
Непредусмотренное и резервное оборудование	44
Итого	933

К этому следует прибавить процент на вложенный капитал в период сооружения станции (12%) и расходы на содержание управленческого аппарата (10%), что определяет окончательную стоимость на уровне 1145 долл./кВт (электр.). Ввод в действие более чем одной такой станции в год, а также улучшение технических решений приведут в будущем к снижению затрат.

Программой дальнейших разработок планируется решить проблему теплостойкости теплоприемника путем создания высокоэффективной системы, охлаждаемой жидким металлом, которая в свою очередь позволит повысить к.п.д. станции в целом. Кроме того, потенциальные возможности солнечных станций башенного типа могут быть географически расширены [5] за счет использования тепловой и вырабатываемой электрической энергии в базовом режиме путем проведения таких обратимых химических реакций [6], как



Исследуются также другие виды реакций и типы реагентов, которые можно либо легко накапливать, либо транспортировать в виде жидкости и которые имеют высокие значения удельной энергоемкости. В частности, для дальнейших исследований выбрана реакция



которая, исходя из условий обратимости реакции, может быть использована для выработки тепловой энергии при температуре 500 °С [8]. С учетом этих возможностей электрическая мощность солнечной станции, которую планируется разработать для юго-западных штатов страны, может быть легко утроена по сравнению с ранее полученной оценкой 40 ГВт.

## Литература

1. ERDA and Sandia briefings, e.g., Central Receiver Solar Thermal Power Systems, Sandia Livermore document, January 1976.
2. Designs, Fabrication and Test of a Heliostat for a Central Receiver Solar Thermal Power Plant, Technical Report No. 2, University of Houston and McDonnell Douglas Astronautics Co., NSF Grant No. GI-39456.
3. Solar Tower Receiver Study, Rocketdyne, Technical Report, No. 1, University of Houston and McDonnell Douglas, NSF RANN Grant No. GI-39456.
4. Solar Thermal Power Systems Based on Optical Transmission, Progress Report 1, 2 and Final Report, University of Houston and McDonnell Douglas, NSF RANN Grant No. GI-39456.
5. Vant-Hull L.L., Boer K.W., Solar Energy Resources, Subgroup on Electrical Energy Production, Proceedings of the Portland Conference on Magnitude and Deployment Schedule of Energy Resources, July, 1975.
6. Hildebrandt A.F., Solar Tower Thermal-Chemical Energy Cycles, Hydrogen Energy Fundamentals Symposium, Miami, Florida, March 1975.
7. Wentworth W.E., Chen E., Simple Thermal Decomposition Reaction for Storage of Solar Energy, *Solar Energy*, 18 (1976).
8. Prengle H.W., Chi-Hua Sun, Operational Chemical Storage Cycles for Utilization of Solar Energy to Produce Heat or Electric Power, University of Houston (готовится к печати).

## Исследование солнечной энергетической станции башенного типа

К. Фукуда, Х. Хигучи, К. Яанаги, А. Йосихара <sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с принятой в 1974 г. программой "Солнечный свет", субсидируемой Управлением научно-технологических разработок в промышленности, фирма "Мицубиси хеви индастриз" занимается исследованием и разработкой солнечной энергетической станции башенного типа.

В 1975 г. в Хиросиме (Япония) была построена опытная установка тепловой мощностью 10 кВт<sup>2)</sup> для экспериментального исследования системы концентрации солнечной энергии.

При этом были получены следующие результаты:

1. С помощью зеркал удалось сконцентрировать только  $\sim 6$  кВт тепловой мощности солнечного излучения.

2. К.п.д. преобразования солнечной энергии в тепловую при температуре поверхности приемника  $220^\circ\text{C}$  составил  $\sim 50\%$ .

Были исследованы также технические возможности создания электрической опытной станции мощностью 1 МВт, которая должна быть построена в 1980 г.

Основные характеристики такой электростанции:

Занимаемая площадь	117 × 117 м
Высота башни	58,5 м
Размеры зеркала гелиостата	3,84 × 3,84 м
Число гелиостатов	$\sim 800$

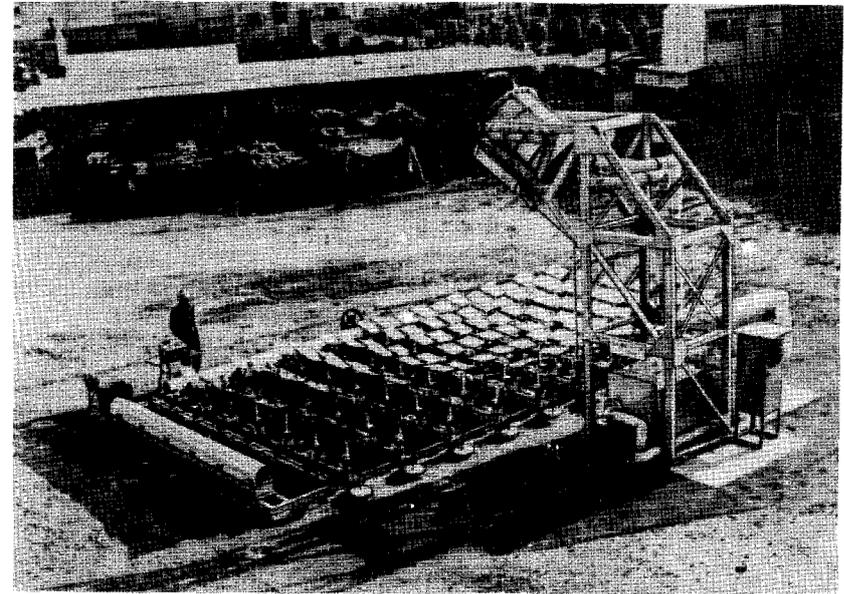
<sup>1)</sup> К. Fukuda, H. Higuchi, K. Yanagi, A. Yoshihara, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Hiroshima, Japan.

<sup>2)</sup> Имеется в виду тепловая мощность солнечного излучения, падающего на отражающую поверхность установки. — Прим. ред.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОПЫТНОЙ ТЕПЛОЙ УСТАНОВКЕ БАШЕННОГО ТИПА МОЩНОСТЬЮ 10 кВт

### КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

На фиг. 1 показан общий вид установки, а в табл. 1 приведены ее основные характеристики.



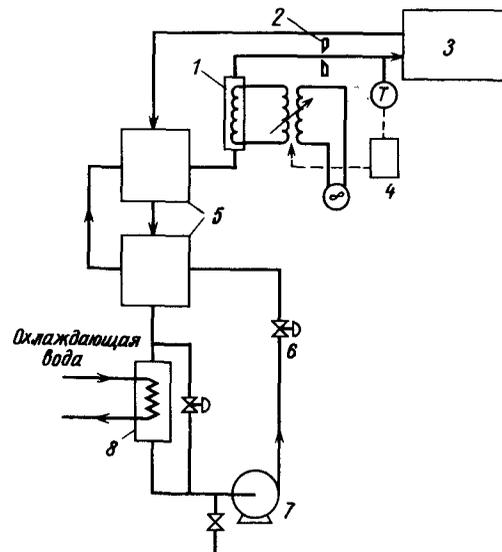
Фиг. 1. Общий вид опытной установки тепловой мощностью 10 кВт.

Таблица 1

Основные технические характеристики опытной установки тепловой мощностью 10 кВт

Высота башни	3 м
Занимаемая площадь	4 × 8 м
Гелиостат	
(10 рядов восток — запад, 6 рядов север — юг)	60 шт.
Размеры зеркала	0,3 × 0,4 м
Число зеркал	120

Система слежения слежение возврат	Автоматическое Ручной
Теплоприемник размеры окна полости теплоприемная поверхность	Полостного типа 0,5 × 0,6 м Трубы из нержавеющей стали, химически обработанные снаружи расплавленной солью
Теплоноситель расход контур	Воздух 128 м <sup>3</sup> /ч (при нормальных условиях) Принудительная циркуляция
Тепловой аккумулятор	Отсутствует
Турбина и генератор	Отсутствуют



Фиг. 2. Контур системы теплопередачи.

1 — нагреватель; 2 — измерительная диафрагма; 3 — теплоприемник; 4 — регулятор; 5 — теплообменник; 6 — регулирующий вентиль; 7 — вентилятор; 8 — охладитель.

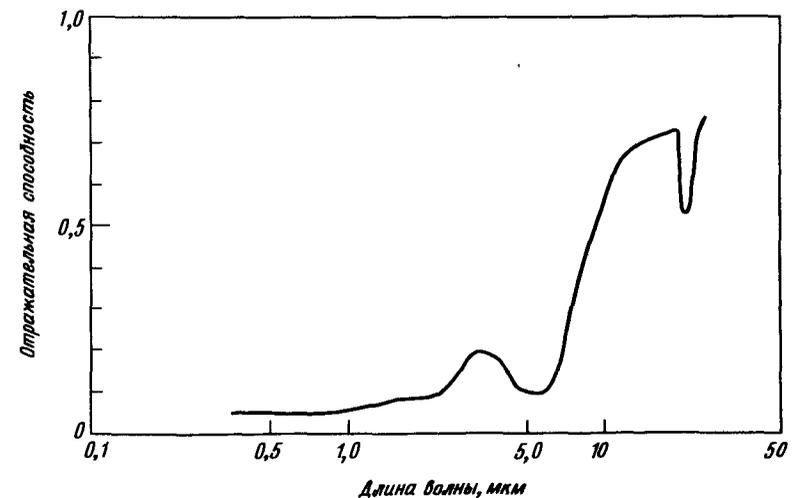
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОНТУР

На фиг. 2 показан контур системы теплопередачи опытной установки. Предварительно подогретый воздух продувается вентилятором через теплообменники. Температура воздуха на входе в теплоприемник может регулироваться электроподогревателем для изучения влияния этой температуры на режим работы установки. Количество поглощенного тепла определяется по расходу воздуха и разности температур на входе и выходе из теплоприемника. Поток воздуха циркулирует, проходя нагреватель предварительного подогрева и теплообменник с охлаждающей водой.

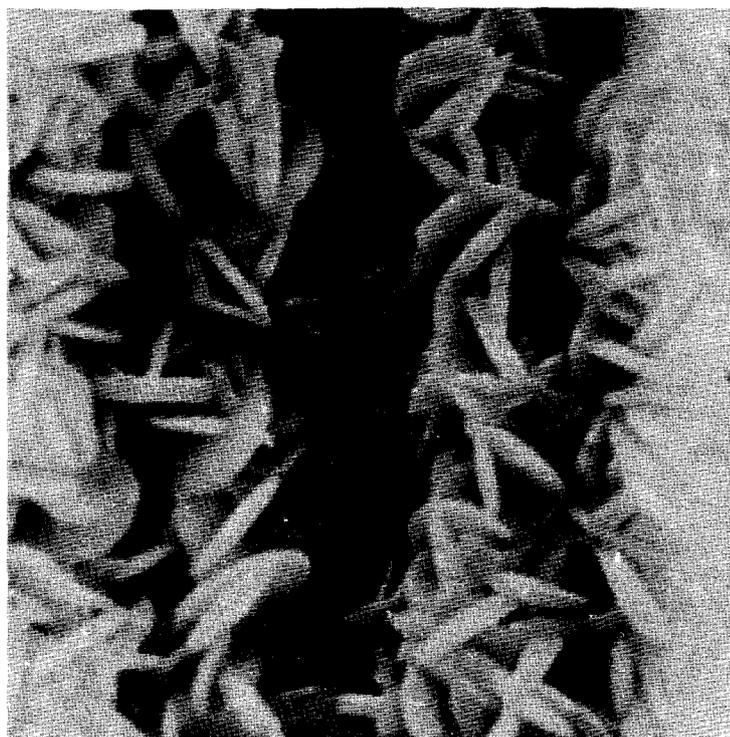
### СЕЛЕКТИВНАЯ ПОГЛОЩАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Селективная поглощающая поверхность на нержавеющей стали образована путем химической обработки последней расплавленными солями.

Оптическая характеристика теплоприемной поверхности приведена на фиг. 3. На фиг. 4 показана микроструктура селективной поверхности. Фотоснимок получен с помощью сканирующего электронного микроскопа. Игольчатые кристаллы представляют собой железохромистую окись.



Фиг. 3. Спектральная отражательная способность селективной поверхности.



1 мм

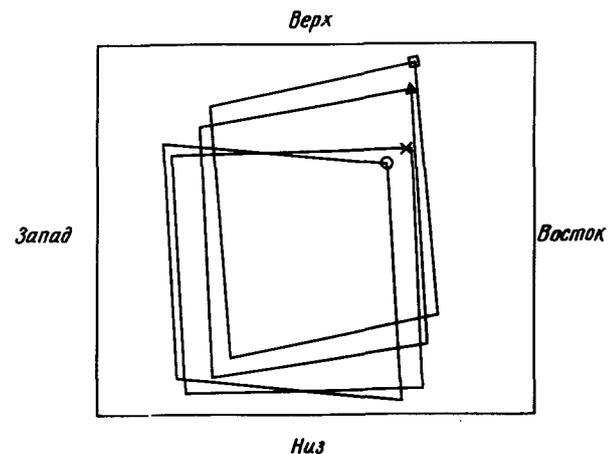
Фиг. 4. Микроструктура селективной поверхности.

#### ТОЧНОСТЬ СЛЕЖЕНИЯ

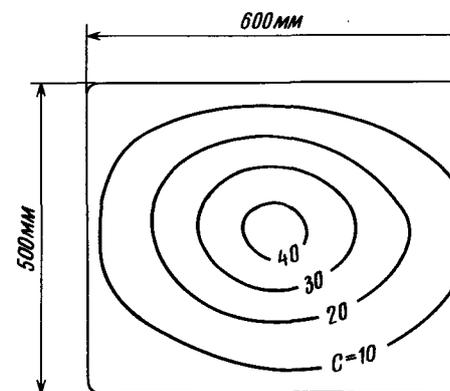
На фиг. 5 показан пример точности наведения изображения ближайшего к башне гелиостата. За время от 10 ч 40 мин до 14 ч 10 мин изображение зеркала в пределах окна приемника перемещается незначительно. Соответствующая точность наведения должна составлять  $\sim 0,2^\circ$ . Однако средняя для всех гелиостатов точность наведения составляет  $\sim 1^\circ$ .

#### ПОЛЕ КОНЦЕНТРАЦИИ

На фиг. 6 приведен пример распределения теплового потока по теплоприемной поверхности. Сплошными линиями обозначены линии равных концентраций. Максимальная концентрация составляет  $\sim 60$ .

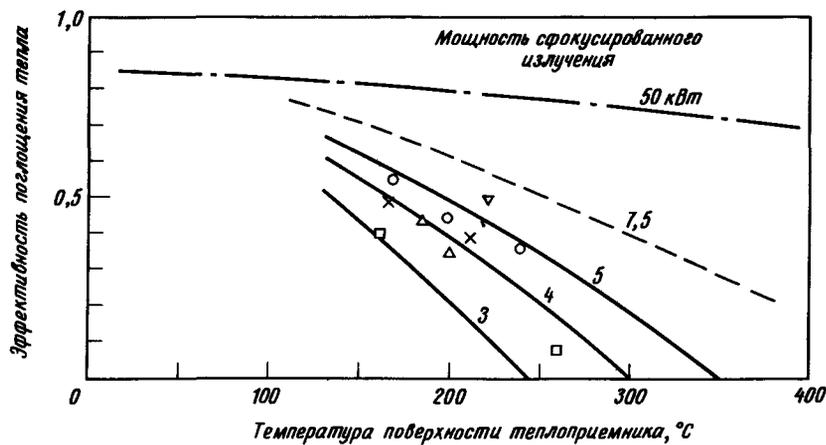


Фиг. 5. Отраженное изображение зеркала в пределах окна теплоприемника. Изображение отраженного луча (20 октября 1975 г.): о 10 ч 40 мин; × 11 ч 40 мин; Δ 13 ч 10 мин; □ 14 ч 10 мин.



Фиг. 6. Распределение теплового потока в плоскости окна теплоприемника. (14 августа 1975 г., 14 ч 20 мин).  
Прямая радиация  $0,83 \text{ кВт/м}^2$ ; мощность сфокусированного излучения  $4,03 \text{ кВт}$ ;  $C$  — концентрация.

Эти данные были получены в эксперименте путем измерения тепловых потоков с помощью теплометров.



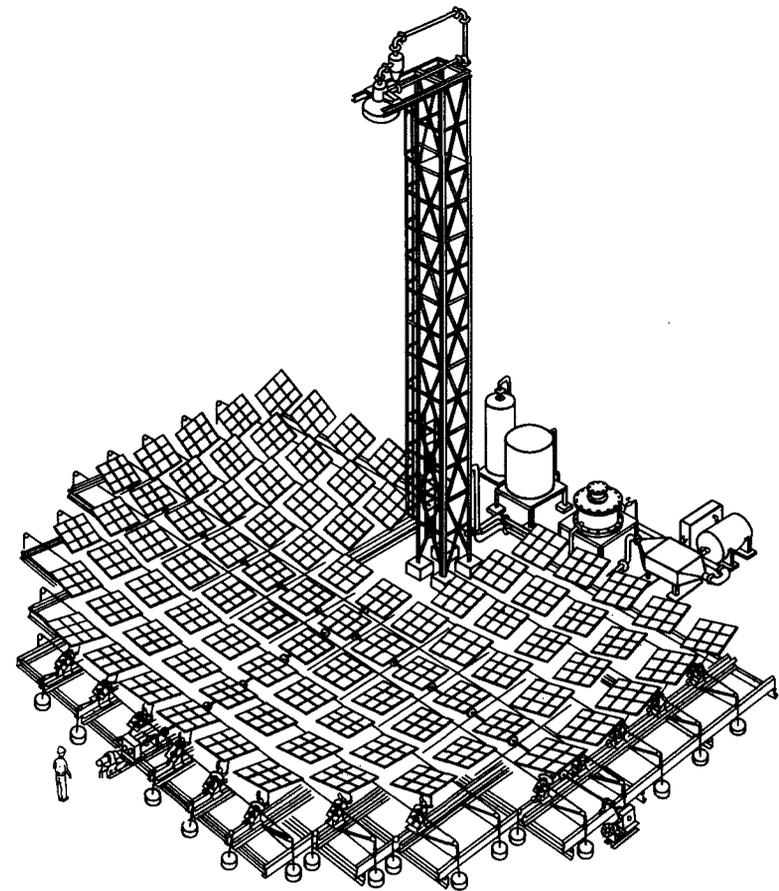
Фиг. 7. Эффективность поглощения твпа теплоприемником. Мощность сфокусированного излучения: ∇ 6,2 кВт; о 4,5 – 5,0 кВт; Δ 4,0 – 4,5 кВт; × 3,5 – 4,0 кВт; □ 3,0 – 3,5 кВт.

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕПЛА

На фиг. 7 приведены данные по эффективности поглощения тепла в зависимости от температуры теплоприемной поверхности. Эффективность поглощения при повышении температуры снижается вследствие возрастания тепловых потерь. Сплошные линии соответствуют эффективностям поглощения при постоянных мощностях сфокусированного излучения. Они получены расчетным путем с использованием результатов экспериментального определения тепловых потерь. Экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с этими кривыми.

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Планируется создание более крупной опытной установки. На фиг. 8 приведен общий вид этой установки. Фокусируя солнечное излучение мощностью ~50 кВт, можно получить температуру рабочего тела ~500 °C. Эта более крупная опытная установка должна быть создана в июле 1976 г.

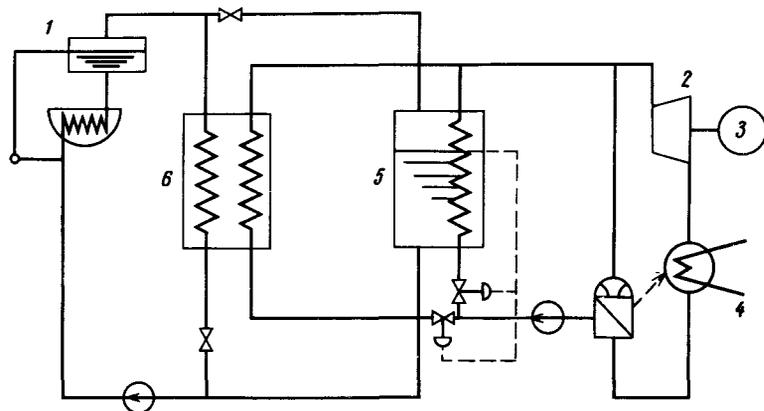


Фиг. 8. Опытная солнечная установка башенного типа мощностью ~50 кВт.

#### ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ОПЫТНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ БАШЕННОГО ТИПА ТЕПЛОЙ МОЩНОСТЬЮ 1 МВт

#### ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О КОНТУРЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Основная схема контуров системы теплопередачи показана на фиг. 9. Как для первичного, так и для вторичного контуров теплоно-



Фиг. 9. Схема паросиловых контуров.

1 — теплоприемник; 2 — турбина; 3 — генератор; 4 — конденсатор; 5 — теплообменник; 6 — тепловой аккумулятор.

сителем является пар. Будет рассмотрена также одноконтурная система, в которой в качестве теплоносителя также используется пар.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ожидаемые технические характеристики рассматриваемой опытной электростанции приведены в табл. 2. Во время летнего солнцестояния полезная мощность составляет 1,2 МВт, включая 0,2 МВт на собственные нужды станции.

Таблица 2

Технические характеристики опытной станции мощностью 1 МВт

Мощность	1,2 МВт (в период летнего солнцестояния)
Занимаемая площадь	117 × 117 м
Размеры зеркала	3,84 × 3,84 м
Количество зеркал	841
Высота башни	58,5 м
Размер теплоприемника	9 м (диаметр)
Турбина	Паровая

#### СХЕМА ГЕЛИОСТАТА

На фиг. 10 представлена конструктивная схема гелиостата для рассматриваемой опытной станции, основанная на принципе слежения за Солнцем подобно установке Генуэзского университета. Это так называемая шарнирно-кулисная схема. Проведена также предварительная конструктивная разработка схемы гелиостата, установленного в координатах по странам света. Планируется экспериментальное изучение обеих схем путем промышленного изготовления крупных образцов.

#### ГРУППИРОВКА ГЕЛИОСТАТОВ

Если движение каждого гелиостата осуществляется независимо, то на нем устанавливается свой привод (например, электромотор). При этом стоимость гелиостата, естественно, возрастает.

Рассмотрим группировку гелиостатов для случая установки их в координатах по странам света. На фиг. 11 показан пример такой группировки для опытной станции мощностью 1 МВт. Все гелиостаты каждой группы, за исключением крайних, перемешаются одинаково. Условие группировки определяется точностью наведения, которая должна выдерживаться в пределах каждой группы. Группы размещаются симметрично относительно оси север — юг, проходящей через основание башни, размещенной в центре поля. Группы, расположенные вблизи башни с северной стороны, содержат больше гелиостатов, чем южные группы вдали от башни.



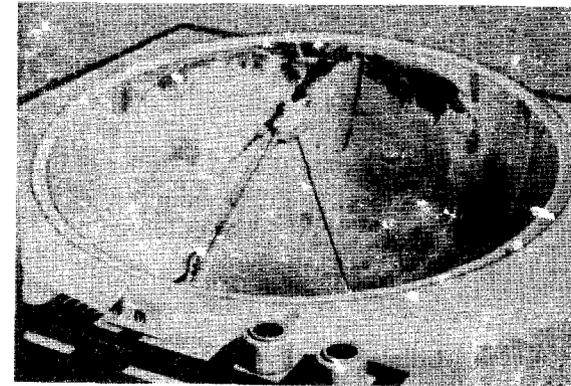
## Солнечная энергетическая станция модульного типа с неподвижным концентратором, работающая по циклу Брайтона

А.Б. Мейнел, Д.Б. Мак-Кенни, М.П. Мейнел<sup>1)</sup>

Неспособность солнечных энергетических станций с гелиостатами и центральным приемником противостоять воздействию ураганных ветров побудила нас обратиться к изучению возможности применения неподвижного концентратора. Идею использования неподвижной полусферической чаши, которая при сравнении с другими вариантами оказалась весьма интересной, впервые выдвинул Адамс еще в 1878 г. в Бомбее. Не так давно та же схема была вновь предложена Стьюардом и Мейнелом. В основу этой концепции заложена возможность весьма эффективного использования полной симметрии сферического отражателя с тем, чтобы фокусное изображение солнца при любом его положении на небосводе не менялось, оставаясь при этом из-за сферической аберрации в значительной мере размытым. Однако это размытое изображение оказывается вытянутым в направлении от параксиального фокуса до отражающей поверхности. Основная трудность при реализации данной схемы состоит в согласовании положения размытого изображения с видимым движением солнца. Достоинствами такой системы являются фиксированное положение концентратора, а также малая масса движущейся фокальной опорной фермы по сравнению с массой металла, которую необходимо перемещать при слежении с помощью гелиостатов.

Наряду с положительными особенностями такой системы следует отметить и два существенных ее недостатка. Первый состоит в том, что максимальный диаметр концентратора не должен превышать 50 – 100 м. В противном случае стоимость системы резко возрастает. Это означает, что электрическая мощность одного модуля,

<sup>1)</sup> А.В. Meinel, D.B. Mc Kenney, \*M.P. Meinel, Helio Associates, Inc. and \*University of Arizona, Tucson.

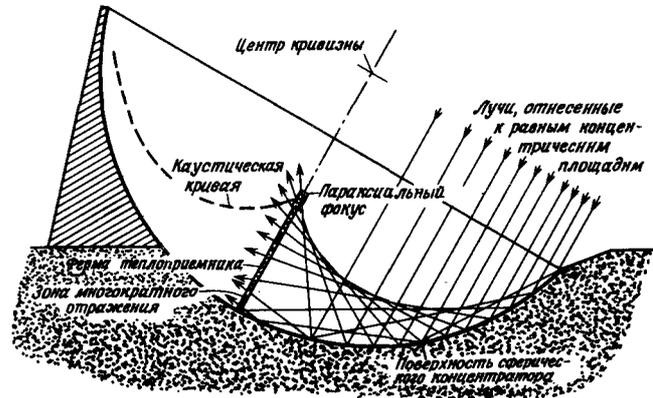


Фиг. 1. Масштабная модель неподвижного полусферического концентратора с несущей теплоприемной опорой, движущейся относительно центра кривизны отражателя.

равная 0,5 – 1,0 МВт, оказывается недостаточной для эффективного использования паротурбинного оборудования. Вторым недостатком связан с передачей энергии от подвижного теплоприемника к неподвижной распределительной сети, снабжающей энергией потребителя. С другой стороны, весьма существенным преимуществом данной системы является невысокая стоимость полноразмерного демонстрационного модуля, который может быть сооружен за короткий срок, что в свою очередь уменьшает затраты и риск.

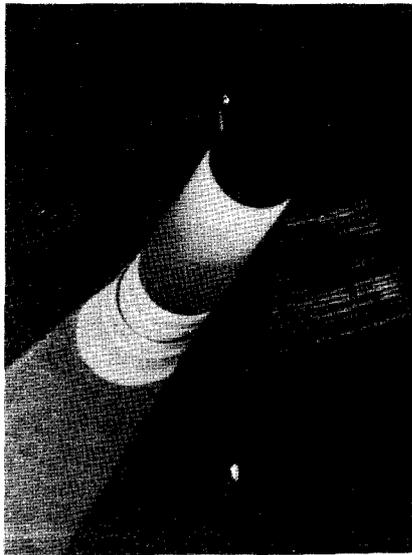
Общий вид модели 75-метрового модуля с неподвижным концентратором с рассредоточенным фокусом показан на фиг. 1. Теплоприемник здесь совершает вращательное движение относительно центра кривизны отражателя. Рассматривались также и другие способы установки теплоприемника и его слежения за солнцем, позволяющие использовать меньшую по высоте опору. Несущая теплоприемник опорная ферма так "следит" за солнцем, что размытое изображение постоянно остается коаксиальным относительно нижней половины опоры. На фиг. 2 показана геометрическая оптика сферического отражателя, включая обычную "каустику" и начальное распределение облученности вдоль длины теплоприемника.

В рассматриваемой системе условия теплопередачи в значительной мере усложняются вследствие неравномерного распределения вдоль фокальной линии плотности потока излучения. Как видно из фиг. 3, это распределение характеризуется двумя максимумами концентрации потока излучения: в точке вблизи параксиального фокуса



Фиг. 2. Сферическая абберация и "каустическая" кривая для сферического концентратора.

Обратите внимание на случаи даойного отражения аблизии основания теплоприемника.



Фиг. 3. Распределение освещенности вдоль цилиндра, расположенного концентрически относительно линейного фокуса полусферического концентратора.

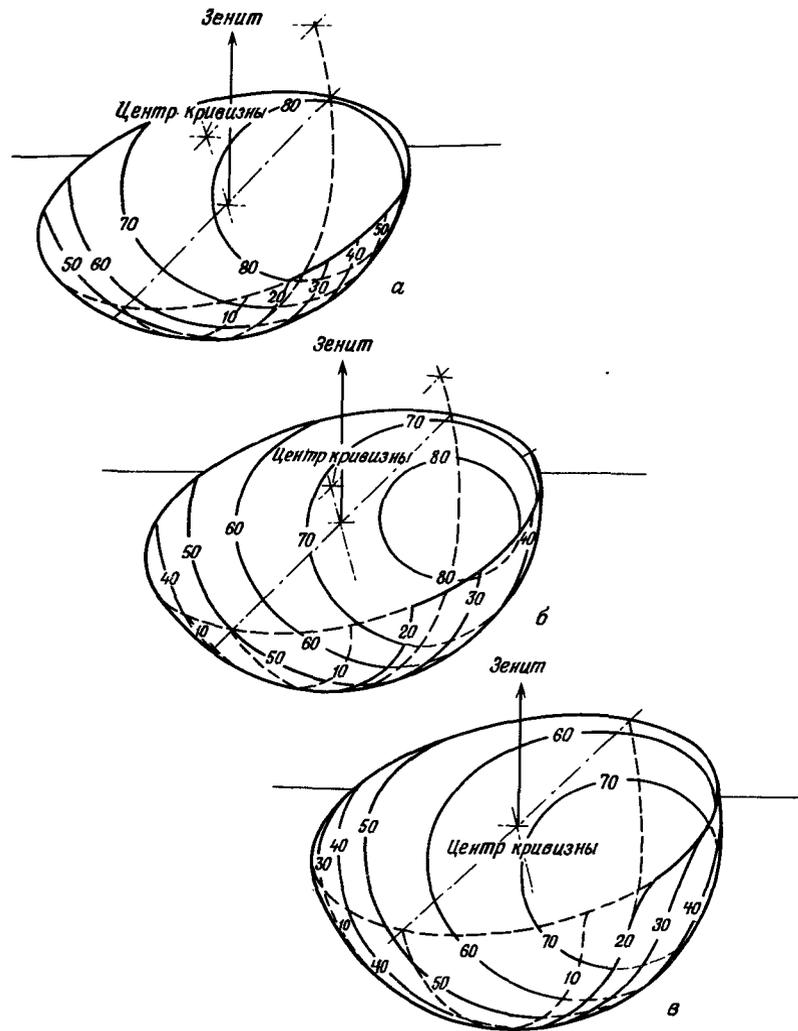
Обратите внимание на нижнюю часть теплоприемника, где виден результат многократного отражения; видно также отражение опоры в сферическом зеркале.

и около поверхности отражателя. Второй максимум возникает вследствие многократного отражения от зеркальной поверхности и характеризуется почти такой же плотностью потока излучения, как и максимум вблизи параксиального фокуса. Следует отметить, что каждый входящий в чашу солнечный луч пересекает линейное изображение солнца. Это означает, что отражающая поверхность чаши используется полностью. Изменение в течение дня энергии улавливаемого излучения такое же, как и в случае наклонного плоского коллектора, но если взять укороченный теплоприемник, заведомо зная, что в какой-то период времени поверхность концентратора будет использоваться неполностью, то по характеру изменения суточной производительности данная система может быть подобна следящему за солнцем гелиостату. Эта ситуация аналогична случаю введения коэффициента использования отражающей поверхности для станций с центральными приемниками.

На фиг. 4 приведены значения годовой эффективности использования разных частей поверхности чаши. Полная полусфера не является оптимальным вариантом, поскольку края чаши затеняют улавливающую излучение апертуру. При снижении среза полусферы эффективность использования ее поверхности возрастает. При угле понижения среза  $20^\circ$  часть площади чаши, которая используется в году более чем на 80%, существенно возрастает. В дальнейшем при оптимизации экономической эффективности концентратора южную часть чаши, которая используется не более чем на 10–20%, можно не учитывать.

Теплоприемник обычно имеет цилиндрическую форму и воспринимает падающее излучение внешней боковой поверхностью. Приемник такой конфигурации характеризуется максимальными тепловыми потерями за счет конвекции, излучения и действия ветра, высокий уровень которых, однако, можно считать вполне допустимым, поскольку получаемое при этом максимальное значение концентрации потока излучения составляет 100–200, а минимальное  $\sim 50$ . Разработано несколько теплоприемников других форм, обеспечивающих эффективное поглощение потока солнечного излучения с помощью методов подавления тепловых потерь без применения полости. Так или иначе все эти усовершенствования призваны повысить экономическую эффективность, которую предстоит еще оценить.

Относительно небольшие размеры модуля (диаметр 50–100 м) определяют и подход к выбору наиболее приемлемого в данном случае термодинамического цикла. Один такой модуль по мощности оказывается слишком малым для эффективного использования паросилового цикла Ренкина, если не иметь в виду суммирования тепловых



Фиг. 4. Годовая эффективность использования концентратора, имеющего наклон к югу  $20^\circ$ .

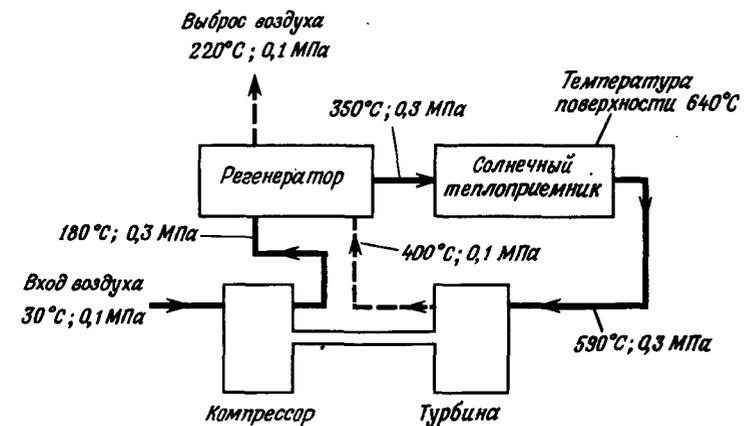
а — для полусферы с углом понижения среза  $20^\circ$ ; б — для полусферы с углом понижения среза  $10^\circ$ ; в — для полной полусферы.

мощностей многих модулей. Однако многомодульная система невыгодна, поскольку передача пара от каждого модуля к центральному посту может сопровождаться большими тепловыми потерями. В то же время при использовании такой схемы можно легко обеспечить

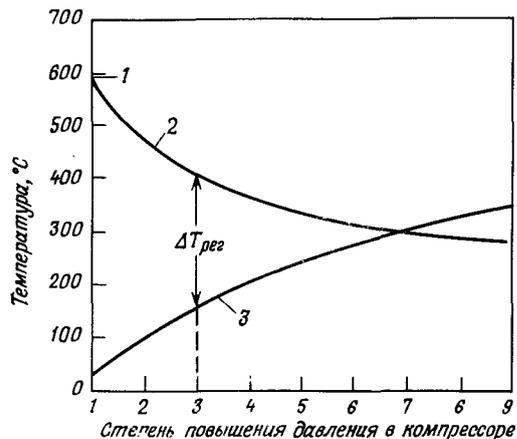
подачу энергии от дополнительного источника, расположенного за пределами концентратора. Помимо этого, следует иметь в виду трудность передачи пара высокого давления через гибкий тракт от теплоприемника к неподвижным элементам конструкции.

В качестве возможного термодинамического цикла здесь рассматривается цикл Брайтона. К преимуществам этого цикла следует отнести возможность применения небольших агрегатов для интервала электрической мощности  $0,5 - 1$  МВт, быстрые пуск и остановку, а также использование в качестве рабочего тела воздуха, благодаря чему отпадает потребность в воде и градирне (весьма важное обстоятельство при эксплуатации электростанций в пустынных районах). Турбину можно разместить в несущей опоре теплоприемника, и тогда между подвижной и неподвижной частями системы будет передаваться только электрическая энергия. Недостатками этого цикла являются меньший по сравнению с циклом Ренкина к.п.д. и более высокие рабочие температуры солнечного теплоприемника.

На фиг. 5 показана блок-схема цикла, состоящая из четырех подсистем. Компрессор всасывает воздух при температуре окружающей среды и перед солнечным теплоприемником адиабатически его сжимает. Затем нагретый воздух расширяется в турбине. Количество тепла, подводимого к солнечному теплоприемнику, можно снизить благодаря применению регенерации, при которой часть тепла воздуха, выходящего из турбины, передается проходящему через регенератор сжатому воздуху. На схеме фиг. 5 указаны типичные значения температур и давлений в каждой характерной точке системы.



Фиг. 5. Блок-схема типичного цикла Брайтона для солнечной установки.



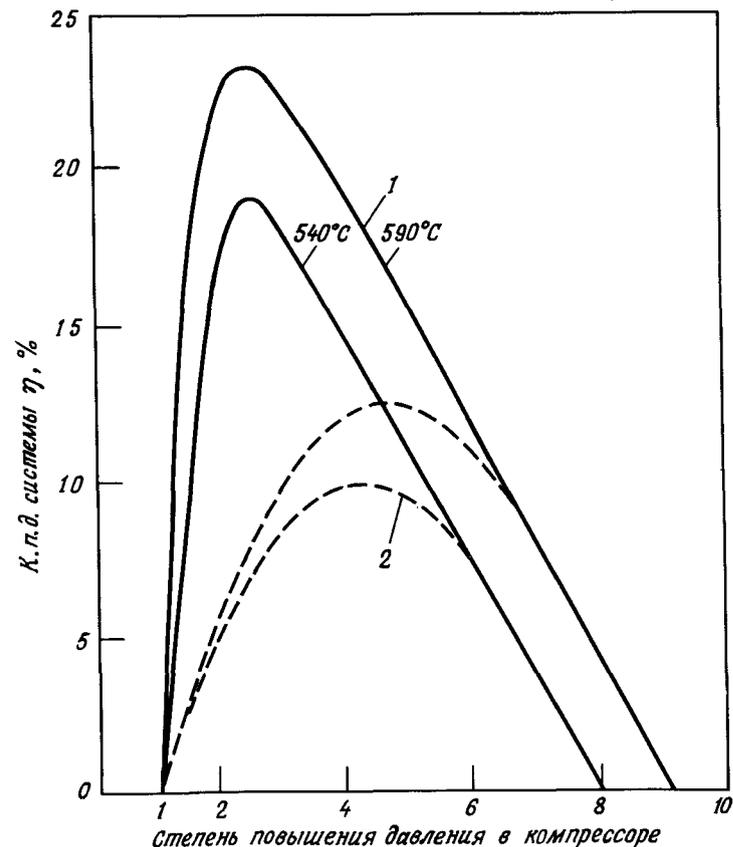
Фиг. 6. Изменение температур на выходе из компрессора и турбины в зависимости от степени повышения давления в компрессоре.

Показана область использования регенератора.

1 — температура на входе в турбину; 2 — температура на выходе из турбины; 3 — температура на выходе из компрессора.

Обычно уровень температуры в солнечном теплоприемнике значительно ниже, чем в камере сгорания реактивного двигателя, из-за ограничений, связанных с материалами теплоприемника, и низкой эффективности теплопередачи от стенки к потоку газа. Этот более низкий температурный уровень определяет величину оптимального давления в системе и в конечном счете ее к.п.д. На фиг. 6 показано изменение температуры воздуха на выходе из компрессора, которая возрастает с увеличением степени повышения давления. С другой стороны, с ростом степени повышения давления увеличивается и перепад температур на турбине, имеющей на входе  $590^\circ\text{C}$ . Таким образом, при применении регенератора для передачи части неиспользованного тепла на выходе из турбины сжатому воздуху рабочие параметры системы должны соответствовать режиму ее работы до точки пересечения этих двух кривых на фиг. 6. При этом степень повышения давления для турбины солнечного цикла Брайтона будет существенно ниже, чем для авиационной турбины.

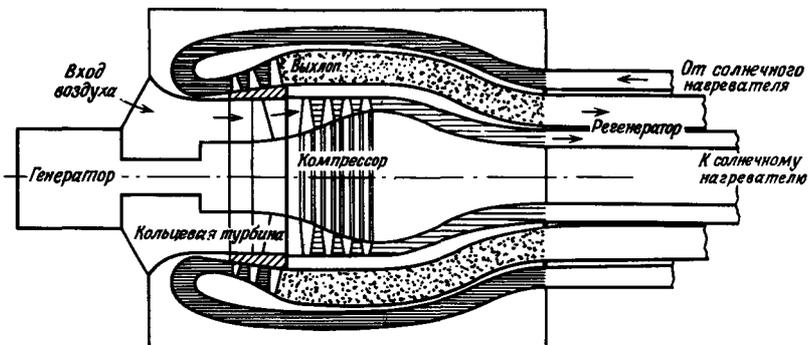
На фиг. 7 приведена зависимость к.п.д. системы от степени повышения давления в компрессоре. Без регенератора к.п.д. системы, рассчитанный на основе реальных значений к.п.д. турбин, очень низок. При введении регенерации к.п.д. системы возрастает, однако оптимальное значение степени повышения давления все же остается



Фиг. 7. Зависимость к.п.д. цикла Брайтона от температуры на входе в турбину и степени повышения давления в компрессоре при наличии регенератора (1) и без него (2).

Приведенные здесь значения к.п.д. вычислены для температур воздуха, которые можно получить в солнечных коллекторах. В расчетах к.п.д. компрессора и турбины приняты равными соответственно 0,82 и 0,86. Потери энергии в солнечном коллекторе не учитывались;  $540$  и  $590^\circ\text{C}$  — температуры на входе в турбину.

низким ( $\sim 3$ ), а к.п.д. составляет  $\sim 20\%$ . С увеличением температуры на входе в турбину к.п.д. системы быстро растет, но этот путь требует проведения обширных исследований по разработке солнечных теплоприемников, способных работать при температурах, значительно превышающих  $600^\circ\text{C}$ .



Фиг. 8. Одна из возможных конструктивных схем турбогенератора, работающего по солнечному циклу Брайтона с регенерацией.

Одна из возможных конструктивных схем турбогенератора для цикла Брайтона показана на фиг. 8. Размещение в корпусе такой турбины регенератора с достаточно развитой поверхностью для получения требуемого повышения температуры на  $175^{\circ}\text{C}$  усложняет конструкцию. В этой конструкции применена кольцевая турбина, с тем чтобы выхлоп направлялся вдоль длины опоры теплоприемника. В настоящее время разрабатывается несколько турбин других типов.

Настоящее исследование проводится частично по контракту с научно-исследовательским электроэнергетическим институтом, а частично – совместно с фирмой "Гелиоассошиэйтс".

## Солнечная электростанция мощностью 10 МВт с ограниченным временем действия

А.Ф. Ромеро<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрена схема станции для энергоснабжения города Эрмосильо (шт. Сонора) в северо-западной части Мексики. Основная цель создания таких станций, несмотря на ограничение времени их работы световым днем (8 – 12 ч в сутки), состоит в экономии природного топлива. Дальнейшие усилия, возможно, будут направлены на разработку надежного способа аккумуляции энергии и расширение периода работы для выработки энергии в течение дня и ночи. Однако в данной статье непрерывный режим работы станции не рассматривается, поскольку его реализация потребовала бы очень высоких начальных капиталовложений.

### ВЫБОР МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИИ

После рассмотрения ряда возможных вариантов был выбран город Эрмосильо, шт. Сонора, в северо-западной части страны. Это засушливый район, где солнце сияет регулярно в течение 95% светового времени года [1]. О серьезности проблемы засухи свидетельствует тот факт, что в 1975 г. из-за недостатка дождей в течение трех предшествующих лет здесь погибли от жажды 300 тыс. голов крупного рогатого скота.

Кроме неизменной регулярности солнечного сияния, упомянутый район отличается высокой плотностью солнечной радиации, достигающей  $0,8 - 0,95 \text{ кВт/м}^2$  в среднем за солнечный день, который в этой части страны, расположенной на  $30^{\circ}$  с.ш., длится 10 – 13 ч [1].

<sup>1)</sup> А.Ф. Romero, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

## ВЫБОР ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Упомянутый выше район, где расположен город Эрмосильо, характеризуется острой нехваткой воды и высокой ее стоимостью. В связи с этим правительство приняло решение приобрести французскую солнечную насосную установку [2] для города Каборка (шт. Сонора), в окрестности которого стоимость 1 кВт установленной мощности может достигать 120 тыс. франц. фр. [2]. С учетом сказанного в качестве рабочего тела для станции был выбран воздух как наиболее доступный и дешевый в использовании теплоноситель. Несмотря на ряд серьезных трудностей, все инженерные проблемы, связанные с созданием такой станции, должны быть решены, ибо другого выхода в настоящее время не существует. Следует также иметь в виду предельно низкую стоимость земельных участков в данном районе из-за непосредственной близости пустыни Юма.

Следуя предложению, выдвинутому Ярвиненом в 1975 г. на X Международной конференции по методам и технике преобразования энергии [3], для преобразования солнечной энергии был выбран открытый цикл Брайтона (газовая турбина).

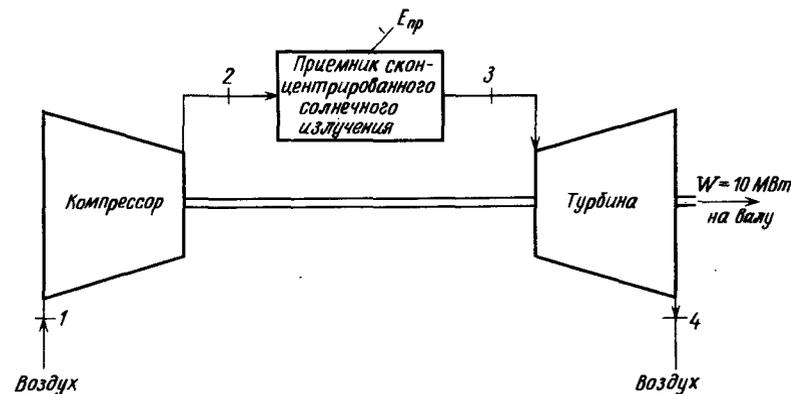
## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

В этом разделе приведены обычные термодинамические расчеты, с которыми можно ознакомиться в любой книге по технической термодинамике, включая книгу Рейнольдса и Перкинса [4], цитируемую в данной работе. Упомянутый выше открытый цикл Брайтона схематично представлен на фиг. 1, где обычная камера сгорания заменена солнечным коллектором<sup>1)</sup>. На вход в компрессор воздух поступает при атмосферном давлении, которое для Эрмосильо составляет  $p_1 = 99,57$  кПа, и средней температуре  $T_1 = 299$  К [5]. Температура воздуха на выходе из солнечного приемника ограничена величиной  $T_3 = 1023$  К, определяемой механической прочностью материала труб.

Как показано в работе [4], максимум мощности, достигаемый между двумя температурными уровнями в цикле Брайтона, определяется из условия

$$\frac{d\dot{W}}{dT_2} = 0, \quad T_2 = (T_1 T_3)^{1/2}, \quad (1)$$

<sup>1)</sup> В понятие "солнечный коллектор" автор включает поле гелиостатов и размещенный на башне приемник. — Прим. ред.



Фиг. 1. Схема преобразования солнечной энергии по открытому циклу Брайтона.

откуда для идеального цикла Брайтона  $T_2 = 577,5$  К, а затем из термодинамического соотношения

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{k/(k-1)} \quad (2)$$

получаем

$$p_2 = 983,94 \text{ кПа.}$$

Найденное затем значение степени повышения давления

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = 9,89$$

округляем до величины

$$r_p = 10, \quad (3)$$

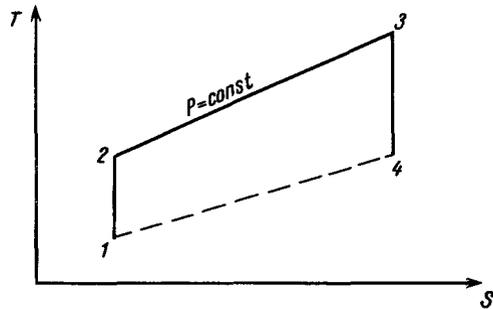
что соответствует

$$p_2 = 995,7 \text{ кПа}$$

и

$$T_2 = 577,27 \text{ К.}$$

Для выбранных интервалов давления и температуры с достаточным основанием можно полагать, что воздух в этом состоянии ведет себя как идеальный газ, а то, что величина коэффициента сжимаемости  $Z = pV/RT$  составляет не менее 0,98, подтверждает правоту такого допущения.



Фиг. 2. Идеальная  $T - S$ -диаграмма трех процессов открытого цикла Брайтона.

При этом допущении температура газа на выходе из турбины определяется из выражения

$$T_4 = \frac{T_3}{r_p^{(k-1)/k}} = 529,8 \text{ К.} \quad (4)$$

На фиг. 2 показан идеальный цикл Брайтона. Термический к.п.д. такого цикла равен

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}, \quad (5)$$

или

$$\eta_t = 48,21\%.$$

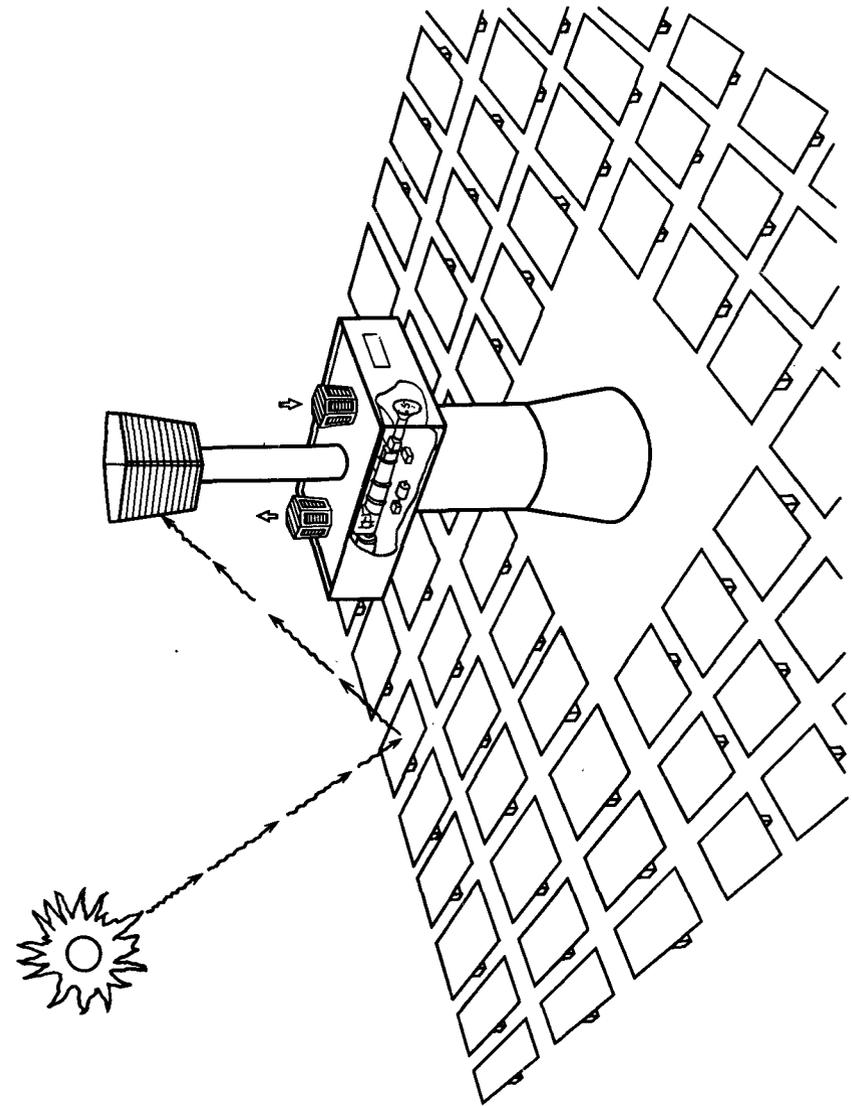
Для сравнения отметим, что к.п.д. цикла Карно для двух рассматриваемых температурных уровней составляет

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{\text{нижн}}}{T_{\text{верхн}}} = 70,8\%.$$

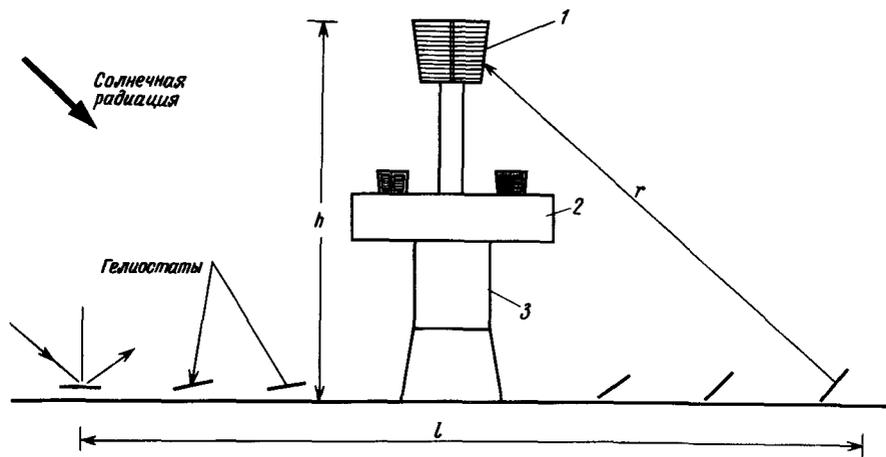
### ПОЛЕ ОТРАЖЕНИЯ

#### И СОЛНЕЧНЫЙ ПРИЕМНИК СКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Тепловая энергия, передаваемая воздуху в солнечном приемнике, получена путем концентрации солнечного излучения с помощью поля плоских зеркал (фиг. 3 и 4).



Фиг. 3. Схематическое изображение солнечной станции.



Фиг. 4. Геометрия поля гелиостатов.

1 — приемник; 2 — помещение турбогенератора; 3 — башня;  $l$  — линейный размер поля (площадь  $l^2$ ).

Величина общей площади зеркал функционально связана с уровнем суммарной (или требуемой) энергии поглощенного излучения и с энергией падающего солнечного излучения.

Полный к.п.д. преобразования солнечной энергии по открытому циклу Брайтона определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{полн}} = \eta_t \eta_{\text{комп}} \eta_{\text{турб}} \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{зерк}} \eta_{\text{поля}}, \quad (6)$$

отраж

где

$\eta_t = 0,48$  — термический к.п.д. идеального цикла (рассчитанный выше);

$\eta_{\text{комп}} = 0,85$  — к.п.д. компрессора (по данным изготовителя);

$\eta_{\text{турб}} = 0,90$  — к.п.д. турбины (по данным изготовителя);

$\eta_{\text{пр}} = 0,73$  — к.п.д. солнечного приемника (определение дано ниже);

$\eta_{\text{зерк}} = 0,88$  — к.п.д. отдельного зеркального отражения [3];

$\eta_{\text{поля}} = 0,39$  — к.п.д. поля отражения [3].

Величина к.п.д. солнечного приемника определена методом проб и ошибок, который состоит в том, что, задавая значение к.п.д., рас-

четы повторяют до тех пор, пока полученная величина с достаточной точностью не совпадет с заданной.

В результате расчета по формуле (6) получаем

$$\eta_{\text{полн}} = 0,0872 = 8,72\%, \quad (7)$$

$$\text{Мощность (полн.)} = \frac{\text{Мощность (на валу)}}{\eta_{\text{полн}}}$$

Теперь можно определить, какой мощности солнечного излучения и величине площади плоских отражателей, воспринимающих это излучение, соответствует полученное выше сравнительно низкое значение полного к.п.д.:

$$\text{Мощность (полн.)} = \frac{10 \text{ МВт}}{0,0872} = 115,22 \text{ МВт}$$

$$A = \frac{\text{Мощность (полн.)}}{I \text{ (на установку)}} = \frac{115,22 \text{ МВт}}{21\,000 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})} = 157\,404 \text{ м}^2.$$

Высота центральной башни  $h$  определяется по следующей эмпирической формуле [3]:

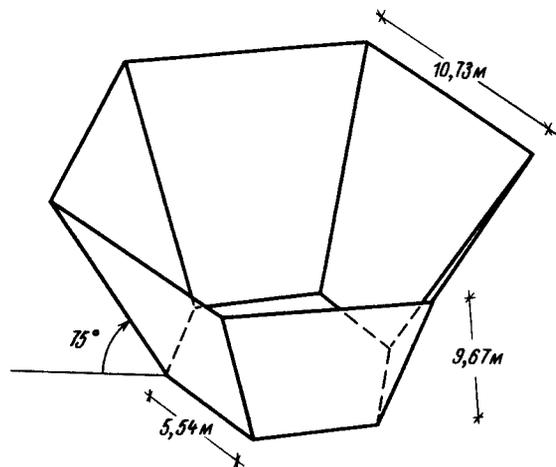
$$h = 0,167 \sqrt{A}, \quad (8)$$

$$h = 66,17 \text{ м.}$$

Из-за низкой плотности рабочего тела магистральные трубопроводы<sup>1)</sup> должны иметь достаточно большой диаметр, что в свою очередь вызывает ряд таких технических проблем, как возникновение термических напряжений в трубопроводах и переменных удлинений, а также необходимость применения дорогостоящих легированных сталей и т.п. Именно этими причинами объясняется решение разместить турбогенераторное оборудование как можно ближе к верхней части башни. При этом можно надеяться, что увеличение стоимости башни будет компенсировано за счет упрощения разработки магистральных трубопроводов из-за снижения в них конструкционных напряжений. В настоящее время проводится более детальный анализ этого вопроса.

Солнечный приемник сконцентрированного излучения имеет вид обычного теплообменника, расчет которого проводился по общепринятым уравнениям теплового баланса (первый закон термодинамики), а также по известным эмпирическим уравнениям теплообмена, подоб-

<sup>1)</sup> Имеются в виду подъемные и опускные (по отношению к размещенному на башне приемнику) воздуховоды между компрессором, приемником и турбиной (фиг. 1). — Прим. ред.



Фиг. 5. Геометрическая форма солнечного приемника сконцентрированного излучения.

ным соотношению Колберна для течения внутри труб при условии, что за поверхность теплообмена принята внутренняя поверхность труб:

$$\frac{h_i}{c_p G} = 0,023 \left( \frac{\mu_f}{D_h G} \right)^{0,2} Pr^{-2/3}. \quad (9)$$

Падение давления в теплообменнике, определенное по расчетным значениям диаметра труб солнечного приемника (51 мм) и средней скорости потока (21,34 м/с), не превышает 2% давления на входе в него, что подтверждает правомерность предположения о постоянстве давления.

Используя вновь метод проб и ошибок, находим в итоге, что площадь приемника составляет 976 м<sup>2</sup>, а число труб для протока воздуха равно 334.

На фиг. 5 показана геометрическая форма теплообменника, внутренняя (необлучаемая) поверхность которого для максимального снижения тепловых потерь изолирована слоем бетона и минеральной ваты.

Величина упомянутого в предыдущем разделе к.п.д. приемника определена достаточно простым способом по найденным расчетным путем значениям тепловых потоков:

$E_{тп}$  — потери энергии теплопроводностью через изоляцию;

$E_{изп}$  — потери энергии за счет излучения;  
 $E_{к}$  — потери энергии за счет естественной конвекции;  
 $E_{пр}$  — энергия излучения, поступающего на поверхность приемника;

$$E_{пр} = E_{тп} + E_{изп} + E_{к} + E_{возд};$$

$$\eta_{пр} = \frac{E_{возд}}{E_{пр}} = 73\%.$$

### ОСНОВНЫЕ МАГИСТРАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Основные ограничения для этих конструктивных элементов станции определяются величиной термических напряжений, которые с учетом давления после компрессора можно определить по следующей формуле [6]:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left( \frac{pD}{t - 0,165} - 0,8 p \right). \quad (10)$$

Для подъемных трубопроводов из стандартных стальных труб (сталь SA-53) диаметром 76,2 см величина  $\sigma$  составляет 12 000 Н/см<sup>2</sup>, а для опускных трубопроводов, работающих в более тяжелых температурных условиях, допустимое напряжение для такого сплава, как SA-312TP-316 (16Cr - 13Ni - 3Mo), не превышает

$$\sigma_a = 996,1 \text{ Н/см}^2.$$

К тому же опускной трубопровод должен быть выполнен из двух труб диаметром 61 см каждая, что в известной степени оправдывает высокое размещение турбогенераторного оборудования.

### ВЫВОДЫ

С учетом роста цен на ископаемое топливо энергетическая станция с центральной башней в ближайшие годы может стать экономически выгодной за счет экономии ископаемого топлива, даже если она работает только в течение светового дня.

По приближенной оценке стоимость 1 кВт установленной мощности для такой станции составляет ~1800 долл. по сравнению с 200 - 300 долл. для обычных топливных энергетических станций.

В настоящее время ведутся серьезные исследования, направленные на повышение эффективности отдельных зеркальных отражателей,

солнечного приемника сконцентрированного излучения и поля гелиостатов, что позволит в значительной степени сократить начальные капитальные затраты. Однако на сегодняшний день полный к.п.д. станции пока невелик и составляет только 8,72%, а средства для разработки опытной установки весьма ограничены, что особенно характерно для развивающихся стран с наиболее благоприятными условиями для использования солнечной энергии.

На тихоокеанском побережье Мексики в среднем в течение 95% светлого времени года ярко светит солнце, т.е. можно считать, что в этом районе всегда солнечно.

В заключение хотелось бы подчеркнуть важность разработки программ сотрудничества по использованию солнечной энергии, которые призваны исключить дублирование усилий при проведении исследований и обеспечить более эффективное расходование средств.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Этот доклад был подготовлен при поддержке декана инженерного факультета Университета Мехико, а также благодаря участию студентов Е. Лариоса, Е. Лемуса, В. Лопеца и Ф. Тревино, выполнивших все громоздкие расчеты методом проб и ошибок.

### Литература

1. Almanza R., López S., Solar Global Radiation in Mexico, through insolation data, publication 357, University of Mexico, Instituto de Ingenieria, October, 1975 (на испанском языке).
2. Girardier J.P., Les micro-centrales solaires à capteurs plans, Colloque International Electricité Solaire, Mars 1976, Toulouse, France (см. стр. 85 данного сборника).
3. Jarvinen P.O., Solar-Heated-Air Turbine Generating Systems, M.I.T. Lincoln Laboratory, X Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference, Newark, Del., September 1975.
4. Reynolds W.C., Perkins J., Engineering Thermodynamics, McGraw Hill Book Co., N.Y., 1973.
5. National Census 1970, информационный бюллетень министра промышленности и торговли Мексики (на испанском языке).
6. Boiler and Pressure Vessel Code, American Society of Mechanical Engineers, N.Y., 1975.

## Солнечные энергетические станции малой мощности с плоскими коллекторами

Ж.-П. Жирардьё<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

При преобразовании энергии Солнца в электроэнергию необходимо объективно учитывать недостатки и преимущества такой энергии, однако это часто упускают из вида в процессе теоретических разработок на уровне проектов или даже при выборе направлений исследований.

Продолжая работы проф. Массона (Дакарский университет), группа Французского общества теплотехнических и гелиотехнических исследований (СОФРЭТЭС), а также университетские центры, с которыми она сотрудничает, приобрели за последние 15 лет определенный опыт в использовании солнечной энергии. Достаточно сказать, что в настоящее время 20 солнечных энергетических станций успешно работают (из которых одна в Мексике) и 13 находятся в процессе строительства.

Приведенные ниже материалы основаны на результатах этого опыта.

### ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Свойства солнечной энергии хорошо известны. Однако следует подчеркнуть, насколько важно при проектировании солнечных энергетических станций правильно оценивать метеорологические факторы. Действительно, часто место постройки выбирают, исходя лишь из одного критерия: годового числа часов солнечного сияния. При этом нередко пренебрегают другим важным фактором — облачностью.

В качестве примера можно указать, что на одном из островов в Атлантическом океане продолжительность солнечного сияния, измеряемая на протяжении более 10 лет, достигает 2800 — 3000 ч в год.

<sup>1)</sup> J.-P. Girardier, Société Française d'Etudes Thermiques et d'Énergie Solaire, Montargis.

При этом, однако, 30 сут в году облачность составляет менее 20%, а в течение 120 сут она превышает 80%. Это означает, что станция, построенная в таком месте, 4 мес в году должна работать при облачности 80%. В противоположность общепринятому мнению такие случаи отнюдь не редки даже для тропических районов с, казалось бы, особенно благоприятным солнечным климатом.

Таким образом, возникает задача обеспечения регулярности эксплуатации, которая становится основным критерием при переходе от лабораторных исследований к практическому использованию солнечных установок.

### ВЫБОР ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Первоначально цель группы СОФРЭТЭС состояла в разработке солнечных водоподъемных установок. При этом было учтено все сказанное выше, а также необходимость создания надежных и простых в эксплуатации систем. Была выбрана термодинамическая схема с плоскими неподвижными коллекторами, работающими при температуре горячей воды 60 – 100°С.

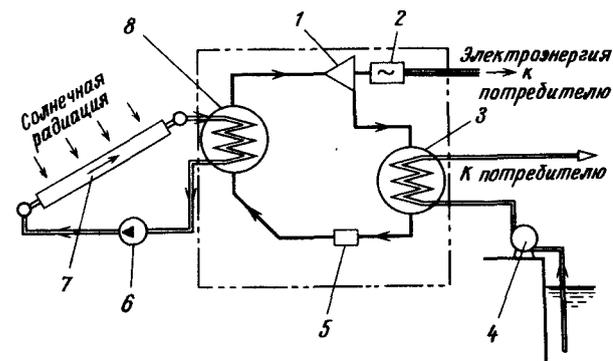
Конечно, установки с прямым преобразованием солнечной энергии в электрическую отвечали заданным критериям, но на сегодняшний день по экономическим соображениям пришлось отказаться от таких схем.

При создании солнечных электростанций необходимо сочетать такие установки с системами аккумуляции энергии. В диапазоне мощностей 5 – 500 кВт наиболее экономичным будет, по-видимому, тепловой аккумулятор.

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ПЛОСКИМИ КОЛЛЕКТОРАМИ

В принципе работа такой системы мало отличается от работы упомянутых солнечных водоподъемников.

На фиг. 1 показана принципиальная схема небольшой солнечной энергетической станции в Сан-Луис де ля Паз в Мексике, работающей по циклу Ренкина. Источником тепла является горячая вода, циркулирующая по замкнутому контуру через ряд неподвижных коллекторов. Температура воды меняется в пределах 57 – 90°С. Поднятая насосом вода используется для охлаждения конденсатора. При контакте с источником тепла испаряется промежуточное рабочее тело (в рас-



Фиг. 1. Принципиальная схема солнечной энергетической станции в Сан-Луис де ля Паз (Мексика).

1 – турбина; 2 – генератор переменного тока; 3 – конденсатор; 4 – водоподъемный насос; 5 – питательный насос; 6 – циркуляционный насос; 7 – коллектор; 8 – испаритель.

сматриваемом случае фреон-11), находящееся под давлением 0,3 – 0,4 МПа. Пары фреона расширяются в замкнутом турбогенераторе и конденсируются при охлаждении поднятой водой. Затем с помощью насоса конденсат вновь подается к испарителю. При этом жидкостный контур герметически замкнут.

Созданные ранее солнечные водоподъемники работали по такому же принципу, однако вместо турбогенератора они имели поршневой двигатель, который был непосредственно связан с размещенным в колодце насосом.

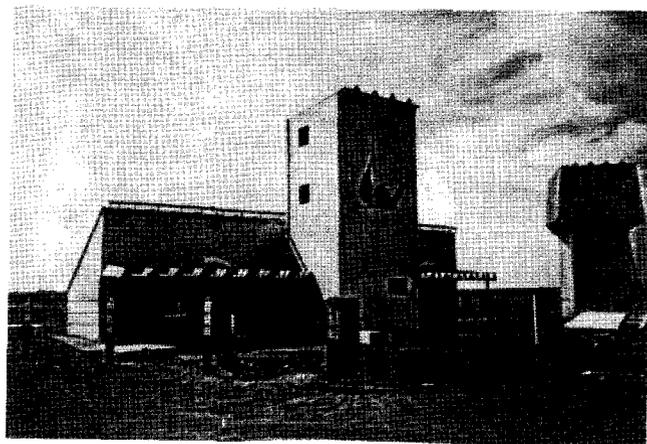
Для аккумуляции энергии можно отводить часть теплового потока от источника тепла к резервуару с горячей водой.

### СХЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ

На первом этапе группа СОФРЭТЭС занималась в основном проблемой подъема воды в соответствии с потребностями развивающихся стран, расположенных в тропических зонах.

Были рассмотрены следующие проблемы: водоснабжение в сельской местности, водоснабжение пастбищ, создание мощных насосных станций для орошения.

**Пример.** На фиг. 2 показана солнечная станция в Каборка (Мексика), имеющая следующие характеристики:



Фиг. 2. Солнечная станция в Квборка.

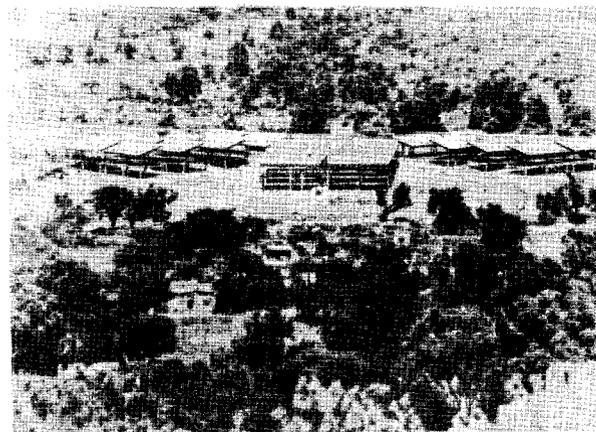
Площадь тепловоспринимающей поверхности	80 м <sup>2</sup>
Среднесуточная производительность	18 м <sup>3</sup>
Полный напор	45 м
Источник воды	Скважина глубиной 80 м

Интересно отметить, что появление станции такого типа в населенном пункте зачастую влияет на дальнейшее его развитие. Обычно здание, на котором устанавливаются коллекторы, используется под школу или диспансер. Возникает центр, вокруг которого концентрируется население, и создаются условия для строительства других комплексов. Так, например, с тех пор как в Диуала (Мали) работает такой диспансер, там появилась группа лечебных учреждений, а в настоящее время строится колледж.

На фиг. 3 показана станция в Сан-Луис де ля Паз (Мексика). Эта станция была построена объединением "Прометей" по соглашению между СОФРЭТЭС и Комиссариатом по атомной энергии Франции в соответствии с программой по использованию солнечной энергии ТОНАТИОН.

Станция, введенная в эксплуатацию 15 сентября 1975 г. имеет следующие характеристики:

Площадь поверхности коллекторов	1500 м <sup>2</sup>
Производительность	150 м <sup>3</sup> /ч
Полный напор	25 – 40 м



Фиг. 3. Солнечная станция в Сан-Луис де ля Паз.

Период рабочего времени	4 – 6 ч
Полезная мощность	30 – 33 кВт

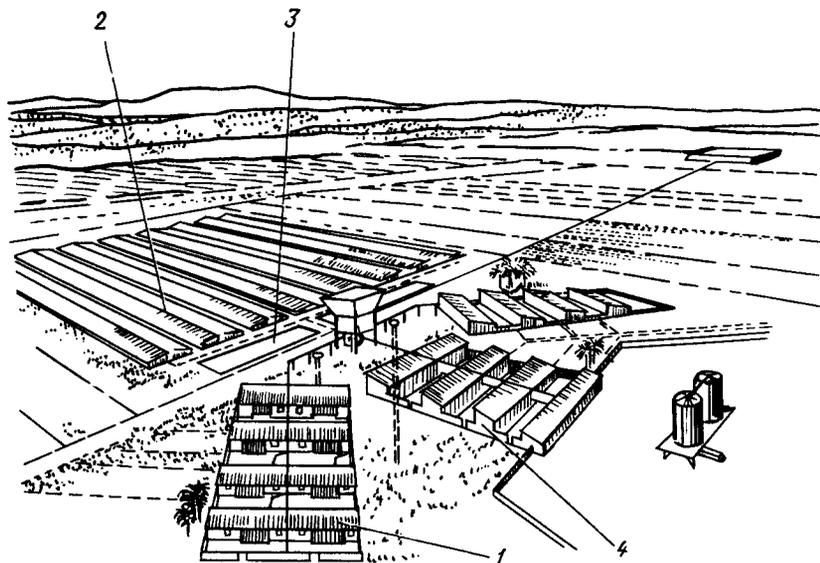
Здесь идет речь о средней мощности за период рабочего времени. Об этом приходится упоминать в связи с употреблением различных характерных мощностей при различных способах получения энергии. Так, например, при фотоэлектрическом преобразовании энергии говорят о максимальной или пиковой мощности. Мы же имеем в виду среднюю мощность за период рабочего времени, которая примерно в два раза меньше максимальной.

Создание данной станции является важным этапом в использовании солнечной энергии для интервала мощностей в несколько десятков киловатт.

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК

По-видимому, солнечные установки можно с успехом применять для электроснабжения небольших изолированных центров, энергетические потребности которых, как правило, невелики и определяются прежде всего сельскохозяйственными нуждами.

Можно считать, что в настоящее время на 1 кВт средней мощности требуется поверхность коллекторов, равная 40 м<sup>2</sup>. Мы стремимся создавать полностью автономные комбинированные установки, в которых часть мощности расходуется на подъем воды для ирригации



Фиг. 4. Изолированный сельскохозяйственный центр.

1 — коллекторы; 2 — устройства для аккумуляции тепла; 3 — поднятая в бассейн вода в количестве, достаточном для орошения угодий площадью от 10 до нескольких сот гектаров; 4 — сельскохозяйственные постройки и часть жилых зданий, использованные для размещения коллекторов.

или водоснабжения населения, а часть — для круглосуточного производства электроэнергии.

Разработанные нами солнечные коллекторы хорошо вписываются в архитектуру зданий. При этом развиваются идеи Александровых, разработавших архитектурное оформление большинства наших построек.

На фиг. 4 схематично изображен изолированный центр (это могло бы быть, например, кооперативное хозяйство) с системой автономных коллекторов.

### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Экономическая оценка описанных систем связана с определенными трудностями, так как приходится сравнивать, по существу, экспериментальные установки с классическими схемами, проверенными многолетней практикой.

Однако для интересующих нас пределов мощности важно иметь в виду, что обычные виды энергии либо зачастую отсутствуют, либо

их производство обходится недопустимо дорого из-за недогрузки генерирующих устройств.

В качестве примера можно указать, что стоимость 1 кВт·ч энергии в лишенных централизованного энергоснабжения районах составляет 0,5 – 2 фр. Солнечные станции, которые мы в настоящее время в состоянии построить, позволяют производить электроэнергию стоимостью 0,8 – 1 фр./кВт·ч. Однако, чтобы это решение было конкурентоспособным, станция должна вырабатывать электроэнергию круглосуточно. При работе станции по термодинамической схеме стоимость 1 кВт·ч уменьшается, поскольку, несмотря на увеличение поверхности коллекторов, электромеханический узел сохраняется неизменным. При этом, конечно, следует учитывать и стоимость аккумуляторных устройств. Существенно то, что в этом направлении может быть достигнут значительный прогресс.

Для примера можно указать, что с момента постройки в 1973 г. в Мавритании станции Шингетти себестоимость вырабатываемой там электроэнергии снизилась вдвое.

В настоящее время мы считаем, что в ближайшие 2 года благодаря содействию Генерального представительства научно-технических исследований мы сможем предложить всем развивающимся странам в тропических районах такие технические решения использования солнечной энергии, которые будут рентабельны для местных условий потребления.

### ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОТРУДНИЧЕСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

Необходимо, чтобы исследование и разработка солнечных энергетических установок в развивающихся странах осуществлялись в тесном контакте с будущими потребителями. Это условие является обязательным при выборе технического решения. Во многих странах имеются достаточно компетентные научные и производственные организации, способные принять участие в совместных разработках.

Мы считаем, что для развивающихся стран термодинамические солнечные станции должны представлять определенный интерес, так как наиболее дорогие элементы таких установок — коллекторы — могут изготавливаться на месте. Тогда постройка солнечных станций может осуществляться в рамках тесного сотрудничества между специализированными лабораториями и странами-потребителями.

## ВЫВОДЫ

Станция в Сан-Луис де ля Паз, которая, насколько нам известно, является в настоящее время одной из немногих действующих термодинамических станций, представляет собой лишь первый шаг в данном направлении. Можно надеяться, что термодинамические преобразователи получат такое же развитие, как и фотоэлементы. Для многочисленных сфер потребления оба эти достижения техники смогут, по-видимому, дополнять друг друга. Зарождающееся научное сотрудничество в ближайшие годы принесет, несомненно, много интересных нововведений.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ

## Взаимосвязь между полем гелиостатов и термодинамической системой солнечной станции башенного типа

Б. Дессю, Ш. Мерсье, Ф. Фарабо, Ж. Абатю<sup>1)</sup>

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке солнечной электрической станции с термодинамическим циклом преобразования энергии размер начальных капиталовложений играет первостепенную роль, поскольку "солнечное горючее" можно считать бесплатным. Чтобы такие вложения были рентабельными, общий к.п.д. системы должен быть как можно более высоким, но не за счет применения слишком сложных технических решений или недопустимого сокращения срока службы. Выбор этих решений зависит от солнечных ресурсов в данном районе, а также политики капиталовложений в данной стране (уровня модернизации).

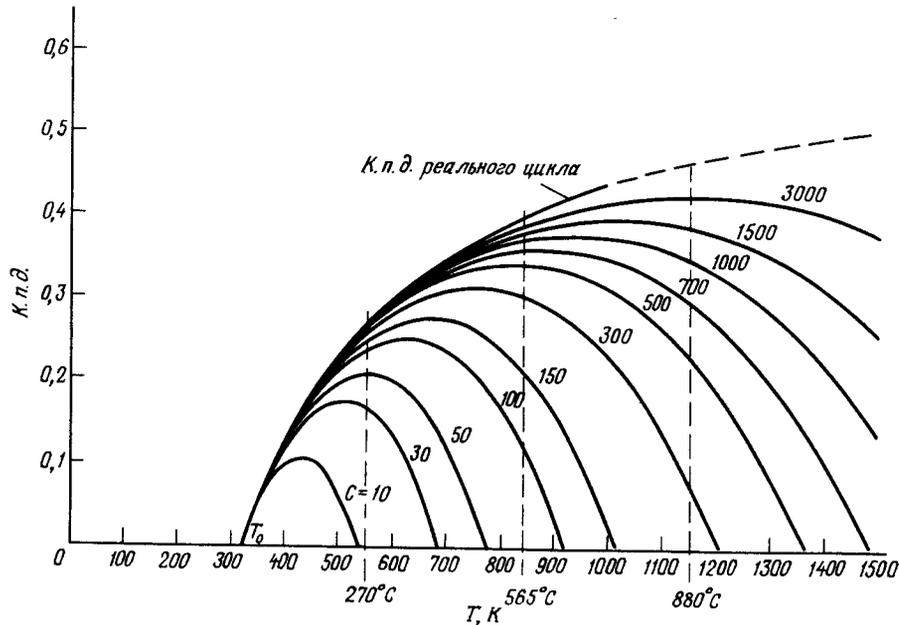
Общий к.п.д. солнечной системы можно представить в виде следующего произведения

$$\eta = \eta_c \eta_R \eta_{TH} , \quad (1)$$

где  $\eta_c$  — к.п.д. приема солнечной радиации, учитывающий коэффициент отражения зеркальной поверхности, геометрический к.п.д. поля гелиостатов (затенение,  $\cos i$  и т.д.) и коэффициент качества, который можно охарактеризовать как среднюю степень концентрации поля отражателей;  $\eta_R$  — к.п.д. приемника, определяющий эффективность преобразования сконцентрированной солнечной энергии в тепловую энергию и передачи этой энергии теплоносителю (к.п.д. приемника учитывает потери энергии за счет отражения, конвекции и излучения);  $\eta_{TH}$  — к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую с помощью термодинамической машины и генератора.

По виду выражения (1) создается впечатление, что для достижения максимального общего к.п.д. станции достаточно получить максимальные значения каждого из приведенных множителей. Однако

<sup>1)</sup> B. Dessus, C. Mersier, F. Pharabod, E.D.F., Direction des études et recherches, Chatou; J.L. Abatut, C.N.R.S., LAAS, Toulouse.



Фиг. 1. Изменение  $\eta$  в функции температуры.  $C$  — коэффициент концентрации, осредненный по полю отражения.

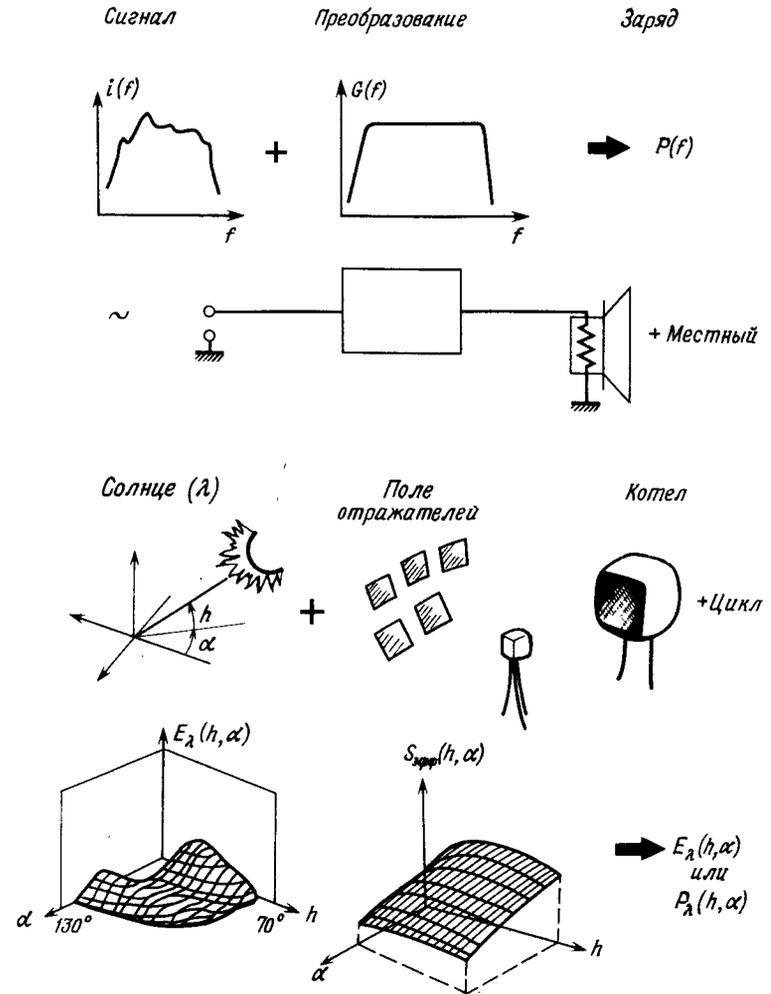
такой подход нельзя признать корректным, поскольку он не учитывает взаимосвязи между входящими в это выражение сомножителями. Эта взаимосвязь показана на фиг. 1. Видно, например, что попытка увеличить температуру термодинамического цикла является нереальной, если одновременно нельзя изменить значение концентрации.

Ниже будет показано, что между такими элементами станции, как коллектор, приемник и термодинамическая система преобразования энергии, существуют неоднозначные связи.

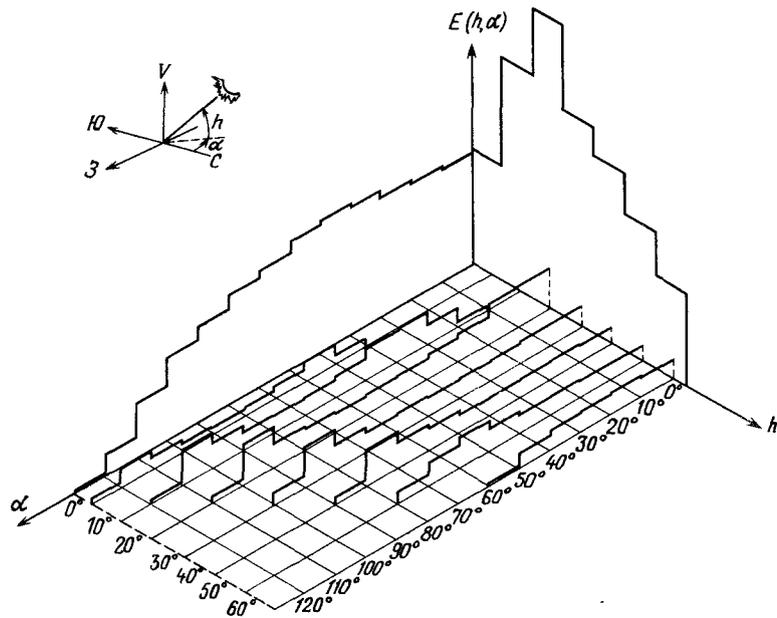
Одновременно при компоновке солнечной энергетической станции, кроме к.п.д., должен учитываться также критерий, характеризующий тип станции либо по максимальной пиковой мощности, либо по максимальной выработке энергии за срок службы станции. Выбор типа станции оказывает решающее влияние как на компоновку поля отражателей, так и на разработку аккумулятора. Вопросы аккумулярования подробно рассматриваются в других работах, поэтому здесь мы остановимся только на анализе трех сомножителей в выражении для к.п.д., с тем чтобы уточнить взаимосвязи, определяющие пределы выбора каждого из элементов системы.

### КОМПОНОВКА ПОЛЯ ГЕЛИОСТАТОВ

Для решения этой задачи был использован метод электроанalogии (фиг. 2). Была составлена цепь, содержащая электрический сигнал, усилитель и динамик. Солнечный сигнал можно представить в виде спектра сигналов в двумерном пространстве. Рабочая поверхность поля отражения воспринимает такой сигнал, преобразует его



Фиг. 2. Метод электроанalogии.

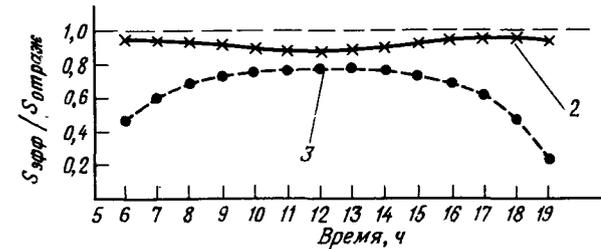
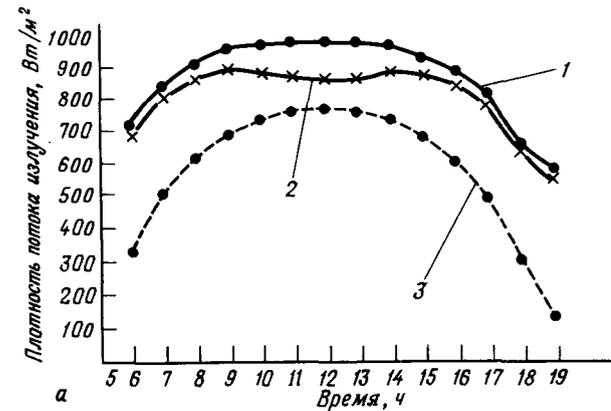


Фиг. 3. Распределение энергии солнечной радиации (широта  $45^\circ$ ).

и направляет к приемнику. Очевидно, что угловое распределение солнечного сигнала является основой выбора компоновки поля отражателей.

Для иллюстрации этого положения рассмотрим два различных по типу поля: одно обеспечивает максимальную пиковую мощность в полдень 21 июня, другое — максимальную выработку энергии за годовой период. На фиг. 3 показано, что максимум годовичного распределения солнечной энергии в наших широтах соответствует высоте солнцестояния между  $25$  и  $30^\circ$ . Поэтому, если требуется обеспечить максимальную за год выработку энергии, нужно сконструировать поле отражателей таким образом, чтобы его к.п.д. достигал максимального значения именно в этих условиях. Если же нужно получить максимальную пиковую мощность в полдень 21 июня, то следует выбрать такую компоновку поля, чтобы оптимальный к.п.д. достигался при высоте солнцестояния  $70^\circ$ .

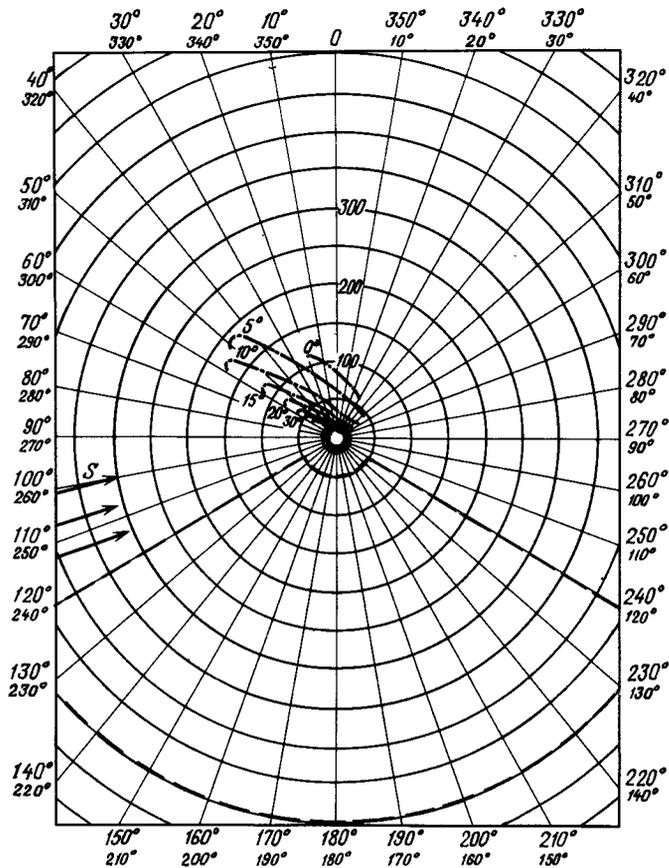
Рассмотрим теперь эффективность поля отражения, отнесенную к  $1 \text{ м}^2$  установленной площади отражающей поверхности. Легко видеть, что поля различных типов имеют существенно различные эффективности.



Фиг. 4. Суммарная энергия излучения, отнесенная к  $1 \text{ м}^2$  (21 июня): неподвижное поле отражателей,  $E_1 = 7,86 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ; подвижное поле отражателей,  $E_2 = 10,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ;  $E_2/E_1 = 1,33$ ; высота башни  $100 \text{ м}$ ; наклон  $12^\circ$ ; отражатели  $7 \times 7 \text{ м}$ ; котел  $15 \times 15 \text{ м}$ .

1 — плотность потока прямого солнечного излучения; 2 — плотность потока излучения, отраженного подвижным полем отражателей; 3 — плотность потока излучения, отраженного неподвижным полем отражателей.

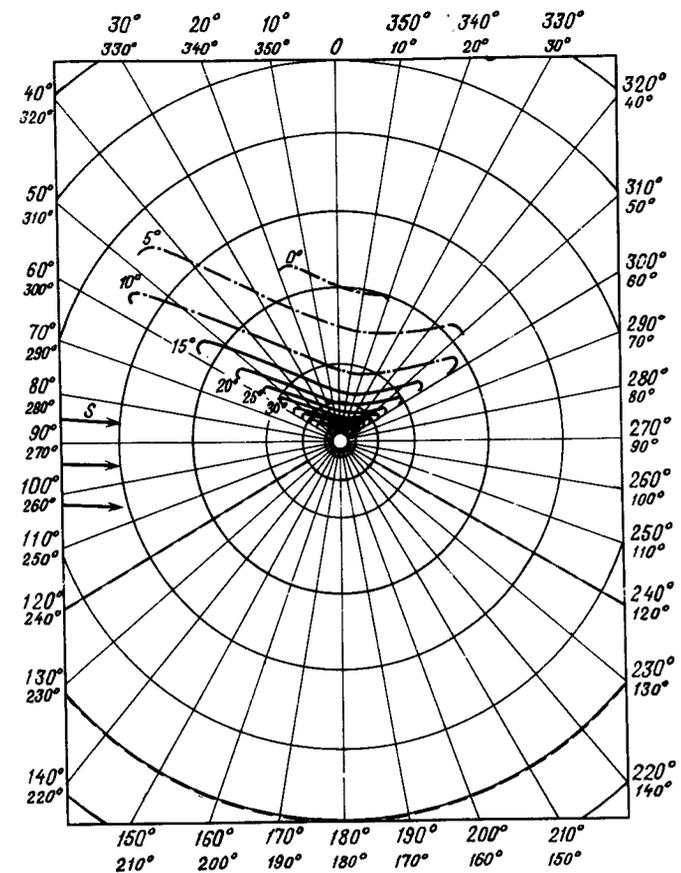
Для иллюстрации сравним поле неподвижных отражателей и поле отражателей, движущихся по рельсам для слежения за видимым движением солнца. На фиг. 4 представлены эти два случая для 21 июня. Видно, что мощности излучения, отраженного  $1 \text{ м}^2$  зеркальной поверхности этих двух полей, существенно различны. В частности, для подвижного поля эта мощность близка к плотности потока прямого сол-



Фиг. 5. Распределение плотности потока отраженного излучения для плоского поля отражателей (21 июня, 5 ч, позднее солнцестояние). Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $12^\circ, 107^\circ, 0,51 \text{ кВт/м}^2$ );  $P_{\text{сумм}} = 17 \text{ МВт}$  (затенение 50%).

нечного излучения (фиг. 4,а). Еще более наглядно это видно на фиг. 4,б, где для обоих полей приведены кривые дневного изменения  $\cos i$ , т.е. отношения действующей в данный момент отражающей поверхности ко всей отражающей поверхности.

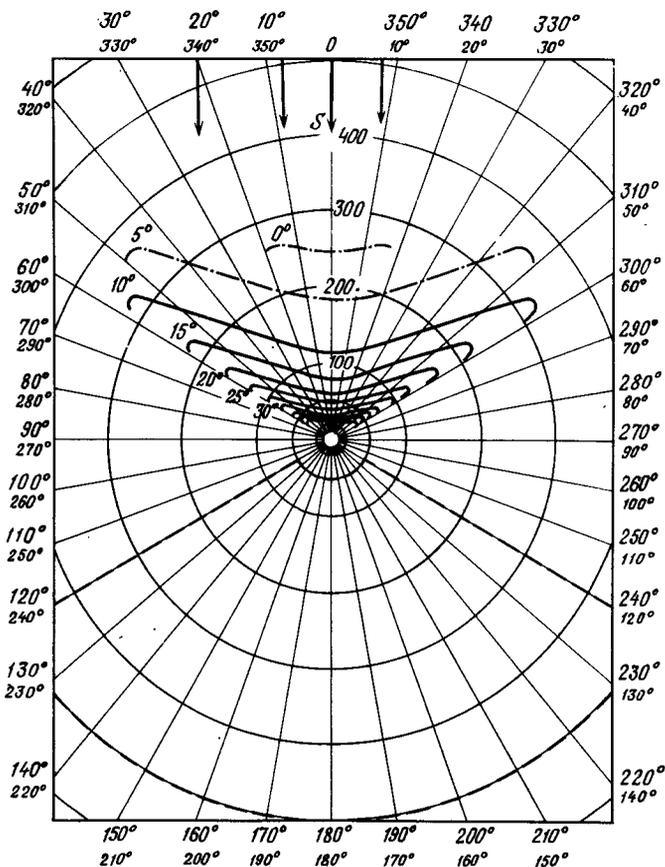
При сравнении величин энергий излучения, отраженного  $1 \text{ м}^2$  зеркал в течение 21 июня, видно, что подвижное поле позволяет получить на 33% больше энергии, чем неподвижное. Эти кривые приведены лишь в качестве примера, однако они наглядно показывают влия-



Фиг. 6. Распределение плотности потока отраженного излучения для плоского поля отражателей (21 июня, 8 ч, позднее солнцестояние). Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $41^\circ, 85^\circ, 0,90 \text{ кВт/м}^2$ );  $P_{\text{сумм}} = 41,6 \text{ МВт}$ .

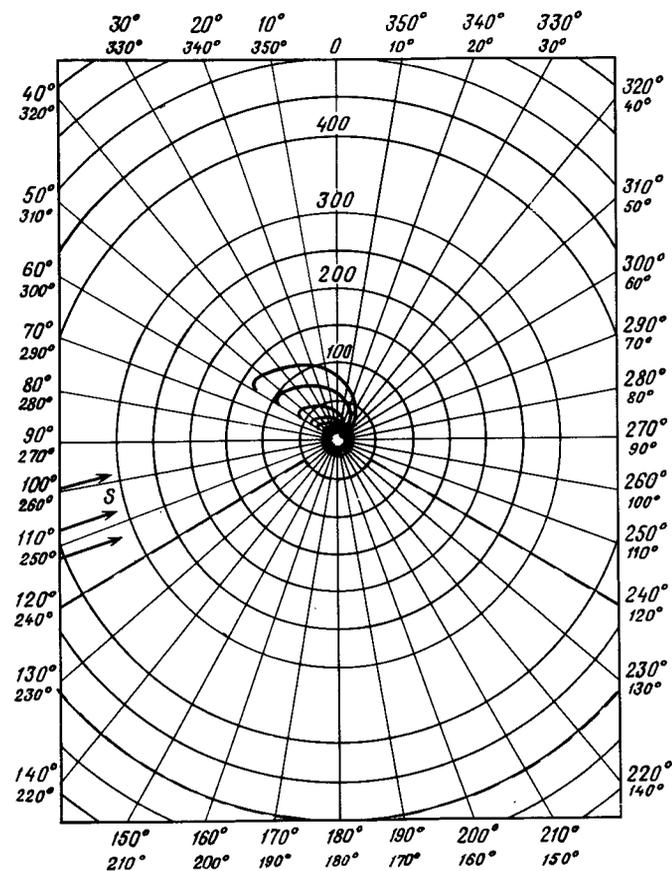
ние типа поля на изменение по времени плотности потока отраженного излучения и на эффективность ее приема.

Обратимся теперь к другому фактору, имеющему большое значение при разработке солнечной электростанции. Речь идет о распределении потока солнечного излучения по тепловоспринимающей поверхности приемника. Действительно, на кривых фиг. 1 коэффициент концентрации  $C$ , играющий роль параметра, был определен путем осреднения концентрации по всему полю отражения.



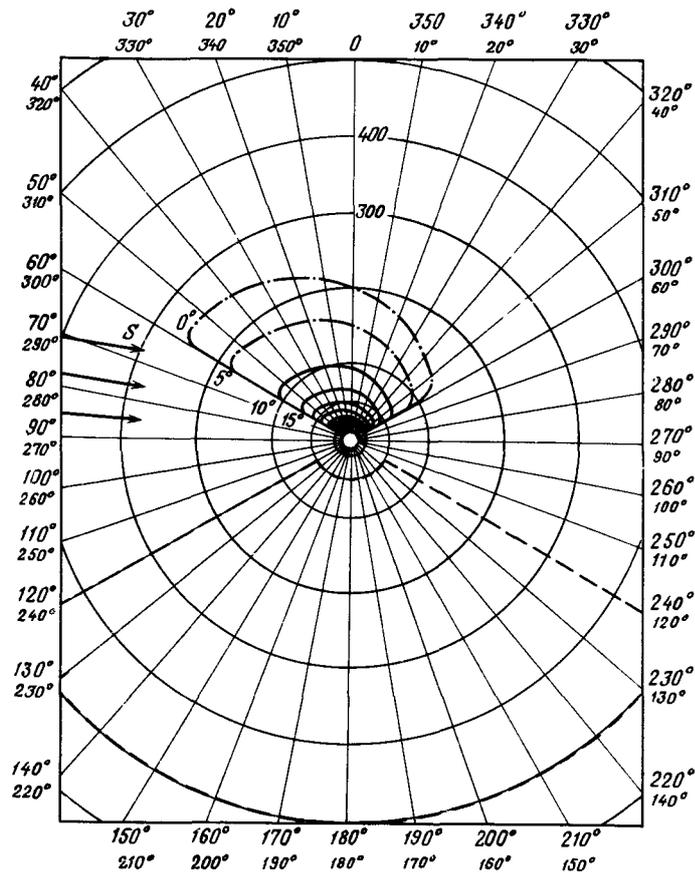
Фиг. 7. Распределение плотности потока отраженного излучения для плоского поля отражателей (21 июня, 12 ч, летнее солнцестояние). Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $69^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $0,97 \text{ кВт/м}^2$ );  $P_{\text{сумм}} = 50,7 \text{ МВт}$ .

Важным фактором является также распределение потока солнечного излучения вблизи фокуса, где размещается котел. Зная это распределение, можно выбрать форму котла в зависимости от типа цикла, который предполагается использовать в каждом конкретном случае. При этом геометрическая компоновка поля тоже имеет большое значение. Это иллюстрируется кривыми распределения потока солнечного излучения за фокальным изображением для двух неподвижных



Фиг. 8. Распределение плотности потока отраженного излучения для поля отражателей, расположенных на конической поверхности (21 июня, 5 ч, летнее солнцестояние). Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $12^\circ$ ,  $107^\circ$ ,  $0,51 \text{ кВт/м}^2$ );  $P_{\text{сумм}} = 17 \text{ МВт}$  (затенение 50%).

полей радиусом 500 м, фокусирующих излучение на котел, установленный на башне высотой 100 м. Одно поле размещено на плоскости, наклоненной под углом  $12^\circ$  в виде сектора с центральным углом  $120^\circ$ , второе — на части конусной поверхности с теми же параметрами. На фиг. 5 – 14 показаны распределения потоков излучения в разные моменты времени базисного дня – 21 июня. Они представляют (в сферических координатах с началом в центре котла и осями, направлен-

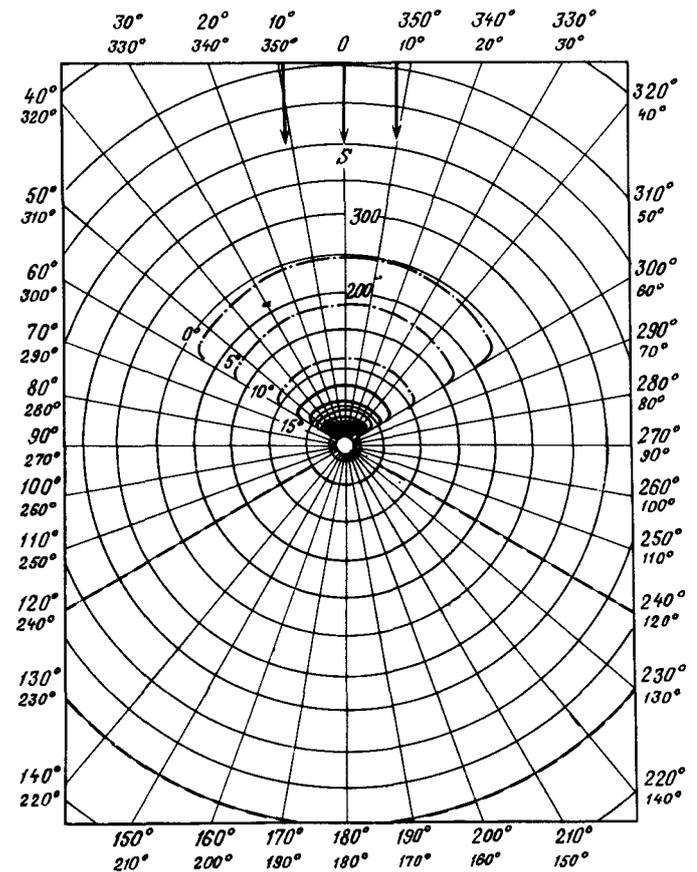


Фиг. 9. Распределение плотности потока отраженного излучения для поля отражателей, расположенных на конической поверхности (21 июня, 8 ч, летнее солнцестояние).

Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $41^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $0,90 \text{ кВт/м}^2$ );  
 $P_{\text{сумм}} = 41,6 \text{ МВт}$ .

ными на восток – запад, север – юг и вертикально) значение вектора потока, отраженного полем гелиостатов в направлении, указанном на фигурах.

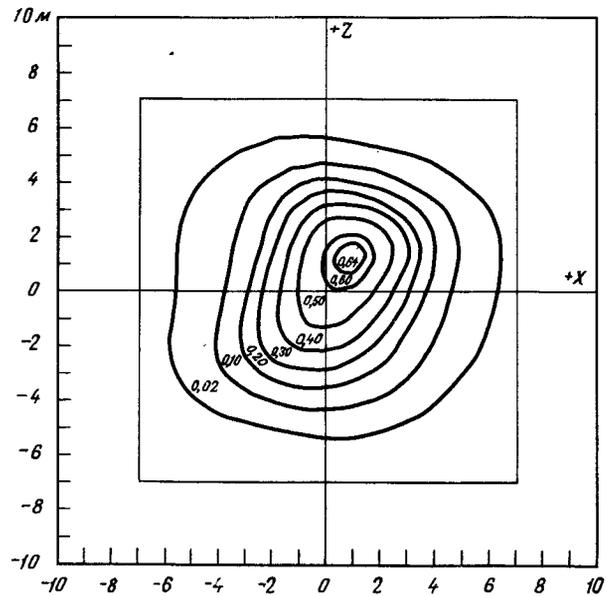
Заметим, в частности, что неравномерность распределения потока излучения для плоских полей значительно больше, чем для полей на конической поверхности. В последнем случае кривые более равномерны и в течение дня выражаются практически гомотетией.



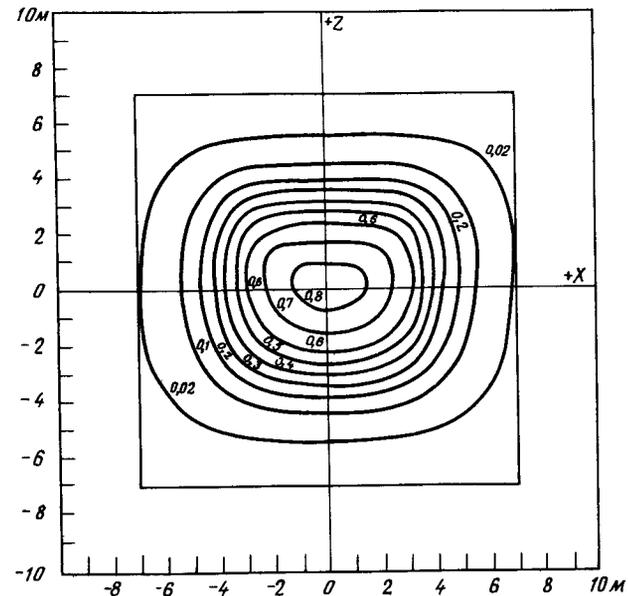
Фиг. 10. Распределение плотности потока отраженного излучения для поля отражателей, расположенных на конической поверхности (21 июня, 12 ч, летнее солнцестояние).

Угол наклона поля  $12^\circ$ ; башня 100 м; солнце ( $69^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $0,97 \text{ кВт/м}^2$ );  
 $P_{\text{сумм}} = 50,7 \text{ МВт}$ .

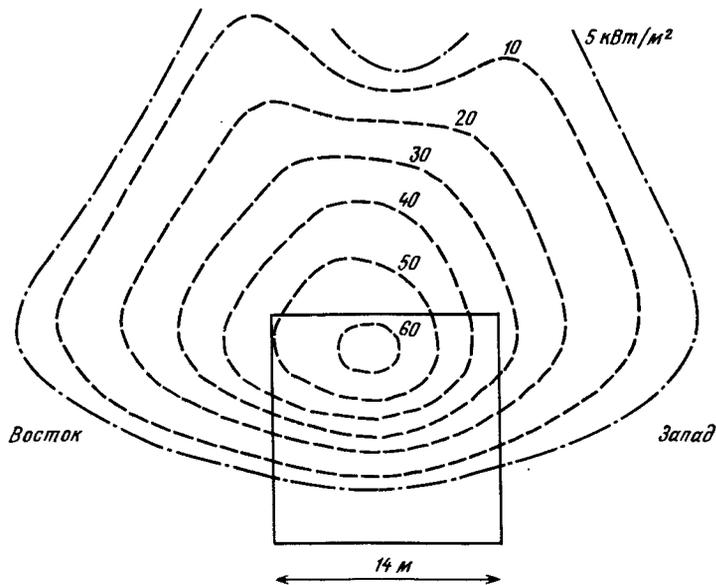
В заключение следует остановиться и на других факторах, выбор которых оказывает влияние на тип котла и общий к.п.д. станции. К ним относится, во-первых, коэффициент отражения зеркальной поверхности, который зависит также от угла падения (поглощение излучения стеклом), материала зеркальной поверхности (алюминий, нержавеющая сталь, серебро и т.п.) и защитного слоя, если таковой имеется. В табл. 1 показано влияние толщины стекла на коэффициент



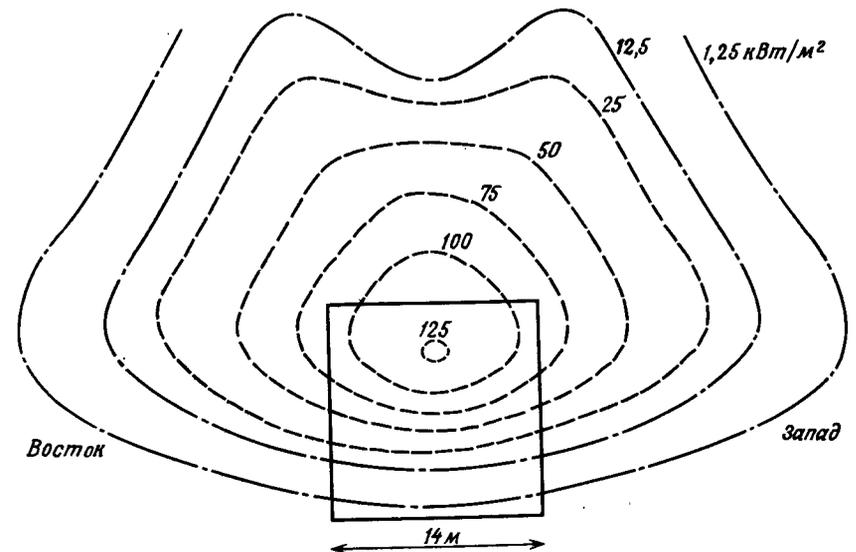
Фиг. 11. Распределение поверхностной плотности потока излучения в пределах солнечного изображения на котле (21 июня, 6 ч).  
Отражатели  $7 \times 7$  м; дефокусировка  $0,001$  рад; суммарная поступающая мощность  $31\,236,26$  кВт  $\times 0,72$ .



Фиг. 13. Распределение поверхностной плотности потока излучения в пределах солнечного изображения на котле (21 июня, 12 ч).  
Дефокусировка  $0,001$  рад; суммарная поступающая мощность  $52\,692$  кВт  $\times 0,97$ .



Фиг. 12. Распределение поверхностной плотности потока излучения в пределах плоского поля отражателей (21 июня, 6 ч).  
Размеры поля  $50 \times 500$  м; угол наклона поля  $12^\circ$ ; высота башни  $100$  м; вертикальное сечение на расстоянии  $14$  м к югу.



Фиг. 14. Распределение поверхностной плотности потока излучения в пределах плоского поля отражателей (21 июня, 12 ч).  
Размеры поля  $50 \times 500$  м; угол наклона поля  $12^\circ$ ; высота башни  $100$  м; вертикальное сечение на расстоянии  $14$  м к югу.

Таблица 1

Коэффициент отражения плоских стеклянных зеркал фирмы "Сен-Гобен", изготовленных с использованием флоат-процесса (качество стандартное)

$\delta$ , мм	$i$	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$
3		87,4	86,9	85,9
5		82,4	81,7	80,2
8		75,7	74,8	73

отражения посеребренного зеркала с отражением от тыльной поверхности.

Немаловажное значение имеют и размеры единичного отражателя, которые определяют минимальные размеры приемного отверстия. Это же относится и к случаю применения фокусирующих (неплоских) зеркал.

Влияние упомянутых факторов сказывается как на средней концентрации в плоскости приемного отверстия котла, так и на распределении потока излучения за фокальной плоскостью. Эти факторы влияют одновременно на величину тепловых потерь котла (пропорциональных площади поверхности и  $T^4$ ) и на его компоновку (в связи с необходимостью учета максимально допустимых для каждой точки котла значений плотности потока излучения).

Представленный краткий обзор показывает, каким образом тип поля отражателей и его составляющих взаимосвязан с другими элементами станции, которые будут подробно рассмотрены ниже.

## ВЫБОР ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В соответствии с принципами термодинамики устройство для преобразования энергии тем эффективнее, чем выше его рабочая температура, однако при этом возрастают энергетические потери приемника, а система концентрации становится дороже.

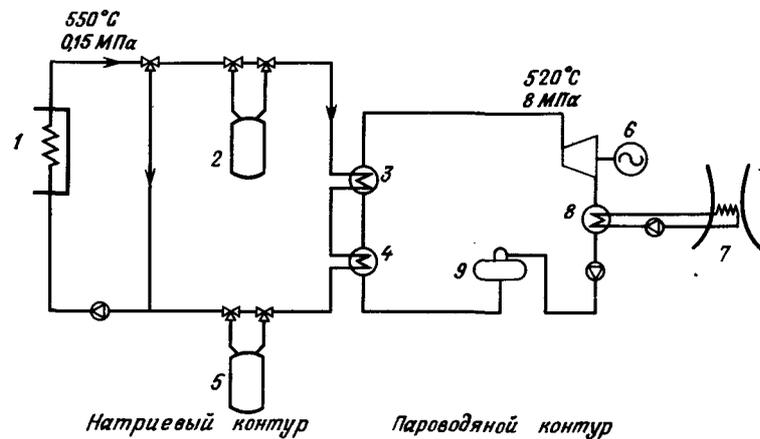
Рассмотрим критерии выбора компонентов системы преобразования и, учитывая связанные с этими критериями ограничения, покажем на трех примерах, как можно установить параметры различных частей станции.

В табл. 2 приведены основные критерии и ограничения для котла и термодинамического цикла и показаны параметры взаимодействия

Таблица 2

Критерии выбора компонентов и параметры взаимодействия для термодинамической системы

Котел	Аккумулятивное	Цикл
Повышенная температура $T$ зависит от плотности солнечной радиации и величины потерь	См. стр. 138 настоящего сборника	Максимальный к.п.д. зависит от температуры
Минимальные тепловые потери котла зависят от температуры, плотности потока солнечной радиации и геометрии котла		Допустимая технологическая сложность цикла зависит от температуры, рабочего тела, типа цикла
Эффективность передачи энергии рабочему телу зависит от свойств теплоносителя и типа стенок		Надежность и простота эксплуатации зависят от свойств теплоносителя, рабочего тела, типа цикла, способа аккумуляции
Надежность и простота эксплуатации зависят от плотности потока солнечной радиации, свойств теплоносителя и типа цикла		



Фиг. 15. Котел с натрием в системе аккумулирования при пароводяном рабочем цикле.

1 — котел; 2 — горячий натрий; 3 — перегреватель; 4 — испаритель; 5 — холодный натрий; 6 — турбогенератор; 7 — воздушное охлаждение; 8 — конденсатор; 9 — деаэратор.

этих элементов. Показаны также связи этих элементов с полем гелиостатов через поток солнечного излучения, концентрируемого на котле.

#### Пример 1. Котел с натрием; цикл пароводяной.

В этом случае натрий, нагреваемый в котле до  $\sim 550^\circ\text{C}$ , обеспечивает производство в парогенераторе  $\text{Na}-\text{H}_2\text{O}$  перегретого пара, используемого для совершения работы в термодинамическом цикле (фиг. 15). Рассмотрим приведенные в табл. 2 критерии.

*Котел.* Температура в натриевом контуре составляет  $350 - 550^\circ\text{C}$ .

Потери излучением значительны, так как средняя температура стенки котла высока. При  $T_{\text{средн}} = 480^\circ\text{C}$  потери излучением для поверхности  $100 \text{ м}^2$  достигают  $1,9 \text{ МВт}$ . В случае плоского котла к ним добавляются еще  $\sim 0,5 \text{ МВт}$  потерь за счет естественной конвекции.

Передача энергии потока излучения теплоносителю не вызывает затруднений даже при значительной неравномерности этого потока в фокальном изображении. Геометрическая компоновка котла может быть достаточно простой.

Надежность работы котла несколько понижена из-за возможности утечки натрия из экранных труб котла.

Простота эксплуатации котла во многом обеспечивается благодаря применению натрия, допускающего значительные колебания радиации.

Учитывая потери в видимой и инфракрасной частях спектра, а также потери за счет конвекции, к.п.д. плоского котла площадью  $100 \text{ м}^2$ , получающего в день  $30 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$  тепловой энергии, в установленном режиме можно считать равным  $0,83$ .

*Цикл.* К.п.д. традиционного цикла с перегретым паром при температуре  $520^\circ\text{C}$  и давлении  $8 \text{ МПа}$  составляет  $\sim 0,33$  при сухом охлаждении в отсутствие отбора

Сложность схемы связана с мерами предосторожности, которые надо принимать при работе с натрием, а также с необходимостью опорожнения системы и проведения повторного нагрева теплоносителя.

Применение данной схемы выдвигает сложные проблемы, связанные с повышением надежности, в первую очередь парогенератора типа  $\text{Na}-\text{H}_2\text{O}$ . В принципе можно использовать промежуточный виток с гелием, но при этом система еще более усложняется.

*Поле гелиостатов* должно обеспечивать среднюю концентрацию, уровень которой достаточен для достижения требуемой рабочей температуры. Согласно кривым, приведенным на фиг. 1, для этого необходима концентрация в пределах  $300 - 400$ . Качество солнечного излучения на котле (плотность потока излучения) и его изменения в течение дня мало влияют на эксплуатационные характеристики приемника, работающего на натрии.

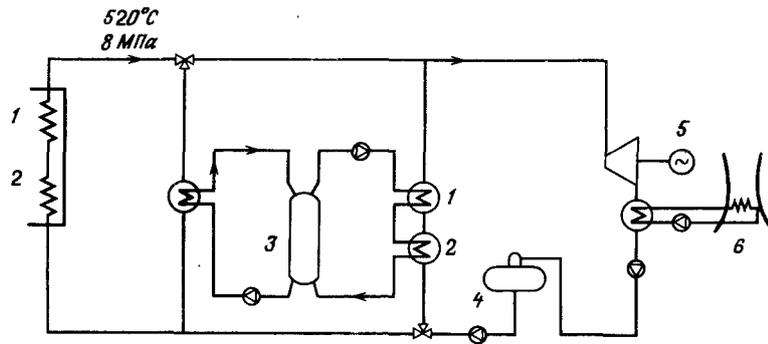
Если к.п.д. приема солнечной радиации полем отражателей в зависимости от его геометрии с учетом  $\cos i$ , взаимного затенения и коэффициента отражения зеркал составляет  $0,7 - 0,8$ , то к.п.д. преобразования солнечной энергии в целом будет равным  $19 - 22\%$ .

#### Пример 2. Солнечный паровой котел с пароперегревателем.

Это, по-видимому, наиболее простой способ использования рабочего тела в термодинамическом цикле. Котел, который имеет испарительные экраны и перегреватель, непосредственно включен в контур цикла (фиг. 16).

*Котел.* Температура перегретого пара цикла составляет  $520^\circ\text{C}$  при давлении  $8 \text{ МПа}$  и температуре насыщения  $295^\circ\text{C}$ . Пароперегреватель, имеющий наиболее высокую температуру, поглощает  $25\%$  мощности падающего излучения.

Суммарные тепловые потери испарительных экранов и пароперегревателя для котла, имеющего такие же размеры, что и в примере 1,



Фиг. 16. Пароводяной котел с перегревом.

1 — пароперегреватель; 2 — испаритель; 3 — аккумулятор; 4 — деаэра-  
тор; 5 — турбогенератор; 6 — воздушное охлаждение.

составляют 1,3 МВт, т.е. значительно ниже, чем для котла с на-  
гретом.

Передача энергии потока излучения теплоносителю ограничена  
величиной  $50 \text{ кВт/м}^2$ , которую может принять пароперегреватель,  
что определяет выбор схемы котла в зависимости от конфигурации  
солнечного изображения и изменения его характеристик в течение дня.

Надежность работы котла зависит от надежности эксплуатации  
пароперегревателя.

Изменение во времени поступающей солнечной радиации, а сле-  
довательно, и неизбежные периодические запуски станции осложняют  
управление, так как возникает необходимость обеспечения вращения  
гелиостатов и эпизодического экранирования пароперегревателя.

Учитывая меньший уровень тепловых потерь при той же концент-  
рации, что и в примере 1, к.п.д. приемника солнечной энергии может быть  
принят в данном случае равным  $\eta_R = 0,86$ .

Цикл. К.п.д. цикла в данном случае такой же, как и в примере 1,  
т.е.  $\eta_{TH} = 0,33$ .

По сложности и надежности цикл является традиционным и не  
создает каких-либо особых проблем.

Поле гелиостатов. В управлении полем гелиостатов должна быть  
предусмотрена возможность влияния на величину плотности потока  
излучения в солнечном изображении на поверхности котла, с тем что-  
бы можно было контролировать плотность потока радиации в зоне  
пароперегревателя.

В зависимости от геометрии поля отражателей общий к.п.д. стан-  
ции составляет 20 – 23%.

**Пример 3.** Пароводяной котел с двумя разделенными по давле-  
нию контурами.

Для упрощения схемы и исключения солнечного пароперегревателя  
перегрев пара среднего давления (6 МПа) можно осуществлять с  
помощью пара высокого давления (18 МПа) во время его конденса-  
ции (фиг. 17).

Котел. Температура котла в контурах среднего и высокого дав-  
ления ограничивается температурой насыщения соответственно  $275^\circ\text{C}$   
(89% расхода) и  $357^\circ\text{C}$  (11% расхода).

Тепловые потери котла снижаются до 0,9 МВт при тех же расчет-  
ных условиях, что и в других примерах.

Передача энергии рабочему телу достаточно надежно регулирует-  
ся с помощью испарительных экранов.

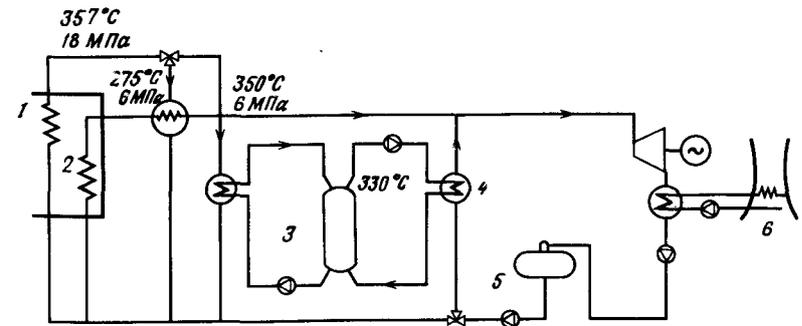
Особых проблем надежности не возникает.

Особенности эксплуатации состоят в том, что облучение экранов  
высокого давления должно быть достаточно интенсивным для обеспе-  
чения перегрева.

К.п.д. приема солнечной радиации близок к 0,87.

Цикл. К.п.д. обычного цикла с перегревом пара при давлении  
6 МПа и температуре  $350^\circ\text{C}$  для рассматриваемых условий не превы-  
шает 0,28.

Реализация цикла не вызывает особых трудностей.



Фиг. 17. Паровой котел с двумя разделенными по давлению контурами.

1 — испаритель высокого давления; 2 — испаритель среднего давления; 3 —  
аккумулятор; 4 — испаритель и пароперегреватель; 5 — деаэра-  
тор; 6 — воздушное охлаждение.

Таблица 3

## Сравнение трех термодинамических систем

Параметр сравнения	Приемник с натрием, пароводяной цикл	Паровой котел с двумя разделенными по давлению контурами	Паровой котел с перегревом пара
Температура, °С	520 (высокая)	350 (средняя)	520 (высокая)
Солнечное изображение	Любое	Относительно регулируемое	Хорошо регулируемое
Условия эксплуатации	Простые	Простые	Усложненные
Надежность	Зависит от парогенератора	Достаточная	Зависит от пароперегревателя
К.п.д. присма котла цикла общий	0,7 — 0,8 0,83 0,33 0,19 — 0,22	0,7 — 0,8 0,87 0,28 0,17 — 0,20	0,7 — 0,8 0,86 0,33 0,20 — 0,23

Поле гелиостатов должно создавать на котле солнечное изображение, в котором обе приемные поверхности котла обеспечиваются энергией. Поверхность, относящаяся к контуру высокого давления, должна облучаться достаточно мощным потоком радиации.

Общий к.п.д. преобразования энергии на станции в зависимости от значения к.п.д. приема солнечной радиации составляет 17 — 20%.

В табл. 3 приведены результаты сравнения всех трех примеров термодинамических систем.

## ВЫВОДЫ

В приведенных выше примерах представлен технический аспект взаимосвязей параметров поля гелиостатов и термодинамической системы.

При оптимизации солнечной станции в целом должны, кроме того, учитываться стоимости и в особенности связи между концентрацией, к.п.д. и общей стоимостью станции. Такая оптимизация возможна лишь после получения ряда достаточно надежных технических решений, обеспечивающих реальную основу для анализа стоимости различных вариантов станции. Взаимосвязь между элементами станции играет исключительно важную роль. Поэтому создание технической схемы станции в целом должно быть результатом коллективной теоретической и экспериментальной работы специалистов различных профилей.

## Исследование системы гелиостатов для солнечной теплосиловой станции мощностью 10 МВт

Грассен, Тувенин, Веро, Роше<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Проект ТНЕМ, осуществляемый CNRS<sup>2)</sup>, посвящен созданию солнечной энергетической станции мощностью 10 МВт с концентрацией солнечного излучения. В связи с этим фирма "Сен-Гобен" исследовала систему гелиостатов в отношении как общей компоновки, так и в выборе отражающей поверхности, конструкции каркаса, метода крепления зеркал, привода и способа управления.

Учитывая опыт, приобретенный при создании гелиостатов для солнечной печи в Одейо, фирма направила свои усилия на отыскание таких решений, которые были бы наиболее экономичными и в то же время не требовали регулировки отражателей после установки их на место.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЕДИНИЧНОГО ЗЕРКАЛА

#### КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ

Вначале рассматривались гелиостаты площадью  $\approx 50 \text{ м}^2$ , имеющие стеклянную посеребренную зеркальную поверхность с тыльным отражением. Гелиостат составлен из нескольких единичных зеркал с исследованными характеристиками.

Для нескольких тщательно выбранных образцов зеркал промышленного производства были проведены экспериментальные измерения суммарного коэффициента отражения. С помощью разработанного фирмой "Сен-Гобен" профилоскопа этот коэффициент был определен в пределах солнечного спектра при различных углах падения  $i$  и различных толщинах стекла  $e$  (табл. 1).

<sup>1)</sup> Grassin, Thouvenin, Verot, Saint-Gobain Techniques Nouvelles, Courbevoie; Rocher, Saint-Gobain Industries, Neuilly.

<sup>2)</sup> Национальный центр научных исследований. — Прим. перев.

Таблица 1

Коэффициент отражения зеркала из литого стекла промышленного производства

$e$ , мм	Коэффициент отражения (%) при угле падения $i$		
	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$
3	87,4	86,9	85,9
5	82,4	81,7	80,2
8	75,7	74,8	73,0

Энергия излучения, отраженного плоским зеркалом на приемный экран, расположенный на расстояниях 100, 200 и 500 м, измерялась с помощью фотоэлемента. Распределение энергии, полученное на экране, хорошо совпадает с теоретически вычисленным распределением. Кроме того, измерения дефектов литого стекла<sup>1)</sup> с помощью профилоскопа показали, что зеркала из промышленного литого стекла хорошего качества дают вполне правильное изображение.

### ПРОЧНОСТЬ

Из табл. 1 следует, что выгоднее всего применять зеркала малой толщины, однако их механические характеристики при этом слишком низкие.

В связи с этим были проведены испытания различных сложных зеркал, в которых стекло малой толщины было упрочнено либо ячеистой структурой из бакелита или алюминия, либо пеностеклом или пенополиуретаном.

Так, например, зеркало, образованное двумя листами стекла толщиной по 3 мм со слоем пеностекла толщиной 20 мм между ними, имеет такие же механические характеристики, как и простое зеркало толщиной 8 мм. При этом выигрыш в коэффициенте отражения весьма ощутимый: 87,4% вместо 75,7%. Однако при бесспорном выигрыше в коэффициенте отражения сложное зеркало в 3 раза дороже обычного зеркала с теми же механическими свойствами.

Применение просветленного стекла также приводит к улучшению отражения. В состав такого стекла входит меньше железа, и при его

<sup>1)</sup> Имеется в виду попированное стекло, полученное по технологии флоат-процесса. — Прим. ред.

использовании можно достичь значения коэффициента отражения порядка 93% при толщине стекла 3 мм и 90% при толщине стекла 6 мм.

Существуют различные технологические методы производства просветленного стекла с помощью установок для изготовления литого стекла, применяемых на заводах фирмы. В настоящее время изучается стоимость внедрения этой технологии. Однако если солнечные энергетические станции найдут широкое применение, то, по-видимому, станет целесообразным создание специализированных установок для производства просветленного стекла, тем более что его можно применять и для установок солнечного отопления.

В результате, применяя отражающую поверхность из посеребренного стекла, можно уже сейчас рассчитывать на высококачественные отражатели промышленного производства из литого стекла с коэффициентом отражения 0,8, а в перспективе за счет применения просветленного стекла можно увеличить этот коэффициент до 0,9.

В заключение следует рекомендовать использование лишь одностекольных зеркал, а не сложных, которые значительно дороже.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИОСТАТА

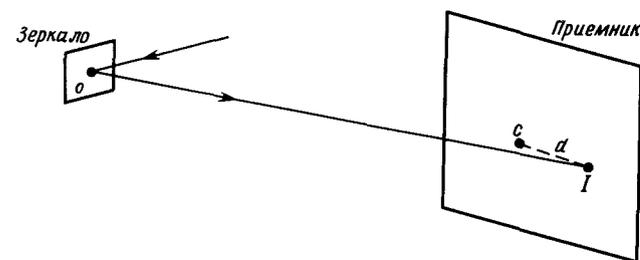
### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Котел устанавливается на башне высотой  $\sim 150$  м за входным отверстием размерами  $10 \times 10$  м. Поле гелиостатов представляет собой сектор с углом  $120^\circ$  и состоит из  $\sim 1250$  гелиостатов (каждый площадью  $50 \text{ м}^2$ ), оптимально распределенных в поле с учетом взаимного затенения. Расстояние от подножия башни до гелиостатов может составить от 100 до 500 м.

Был исследован гелиостат размером  $7,2 \times 7,2$  м. Его, конечно, невозможно изготовить цельным, и он составлен из элементарных плоских зеркал, которые для максимального облегчения каркаса опираются лишь по периметру и не имеют центральной точки опоры.

### ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ФОКУСИРОВКИ

Не производя точных расчетов распределения излучения, отраженного гелиостатами на приемник, можно получить представление о концентрации по величине расстояния  $d$  от центра приемника до точки пересечения с последним среднего солнечного луча, отраженного от центра элементарного зеркала (фиг. 1). Если  $d > 5$  м, то рассматриваемое зеркало посылает мимо приемника по крайней мере



Фиг. 1. К определению расстояния  $d$ .  
 $c$  — центр приемника;  $o$  — центр единичного зеркала.

половину получаемого излучения, поскольку размеры приемника  $10 \times 10$  м.

Определение расстояния  $d$  при различных положениях Солнца на небосводе и различных положениях отражателя в поле (при этом отражатель каждый раз приводится в такое положение, что средний луч, отраженный от центра, попадает точно в центр приемника) позволяет найти распределение излучения для каждого из элементарных зеркал, образующих гелиостат.

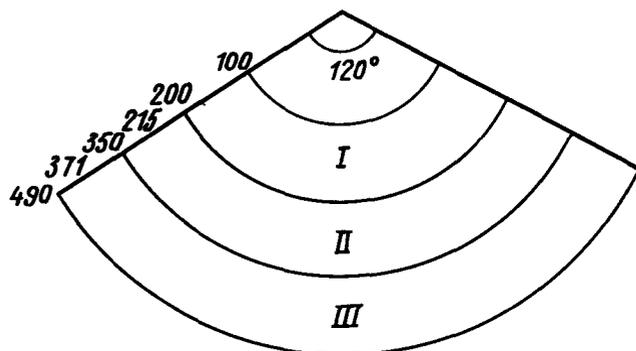
Анализируя это распределение, можно прийти к выводу, что

плоские гелиостаты непригодны;

следует использовать фокусирующие гелиостаты, оптимально ориентируя элементарные зеркала (фасеты).

Сохраняя плоскими элементарные фасеты, можно рассчитать идеальный профиль, общий для всех гелиостатов одной и той же части поля.

Для этого при заданных положениях Солнца на небосводе и гелиостата в поле и точной ориентации гелиостата можно считать, что каждая фасета идеально ориентирована по отношению к гелиостату, если  $d = 0$ . Идеальная ориентация каждой фасеты будет зависеть от положения Солнца и от положения гелиостата в поле. Таким образом, для каждой фасеты достаточно определить оптимальную ориентацию из всех этих идеальных ориентаций, чтобы получить профиль всех гелиостатов определенной зоны поля. Качество этого профиля можно оценить с помощью распределений значений  $d$ , вычисленных для каждой фасеты, при одновременном изменении положения Солнца и положения гелиостата внутри выбранной зоны. Заметим, что этот метод пригоден для полей любой формы и любых размеров.



Фиг. 2. Фокусирующее единичное зеркало.

Для описанного выше поля многочисленные расчеты, проведенные с помощью ЭВМ, показали целесообразность деления поля на три зоны, внутри которых все гелиостаты имеют одинаковую геометрию. На фиг. 2 показано именно такое распределение. В зоне I, размещено ~250 гелиостатов, а в зонах II и III по 500 гелиостатов. Такое распределение представляется удовлетворительным как с точки зрения концентрации энергии, так и с точки зрения серийного производства гелиостатов.

В идеальном случае каждый гелиостат мог бы иметь свой собственный профиль, но это противоречило бы цели, о которой говорилось во введении, — индивидуальная регулировка гелиостатов должна быть исключена.

Расчеты показывают, что, наклоня приемник на  $\sim 26^\circ$ , можно существенно увеличить количество воспринятой энергии. Этот угол наклона зависит, конечно, от высоты башни и общего наклона территории.

#### УСТАНОВКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗЕРКАЛ

Все элементарные зеркала должны быть установлены на место с минимальными допусками. Ошибка в установке равнозначна поворо-

там зеркала в азимутальном и зенитальном направлениях относительно идеального положения, вследствие чего происходит перемещение изображения на приемнике. Согласно расчетам, зеркало размером  $1,2 \times 1,2$  м может быть установлено между двумя параллельными плоскостями, отстоящими от теоретически точной плоскости на 2 мм. Такую точность вполне можно обеспечить обычными механическими способами.

Кроме того, расчеты показывают, что ошибка в установке, соответствующая повороту зеркала в азимутальном направлении, вызывает большее перемещение изображения по приемнику, чем ошибка такой же величины, соответствующая повороту в зенитальном направлении.

#### ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ПРИЕМНИКЕ

Изображение, создаваемое гелиостатом на приемнике, является результатом сложения изображений, создаваемых отдельными зеркалами. При рассмотрении формы этих изображений можно отметить, что все единичные зеркала дают хорошо совмещающиеся изображения независимо от положения Солнца и координат гелиостата в поле.

Вначале имелись опасения, что придется отказаться от зеркал, наиболее удаленных от центра гелиостата, но эти опасения оказались напрасными.

#### ВЛИЯНИЕ ВЕТРА

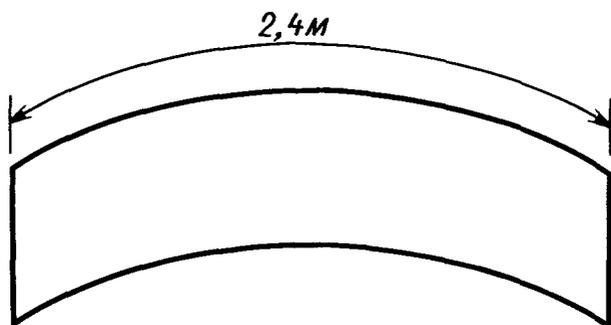
Станция должна нормально работать при скорости ветра, не превосходящей 50 км/ч. Опирающееся по периметру зеркало размером  $1,2 \times 1,2$  м под действием ветра и собственного веса будет иметь прогиб, величина которого в несколько раз превышает допустимый.

Чтобы уменьшить прогиб, возможны различные решения:

- увеличивают толщину стекла, что приводит к уменьшению коэффициента отражения, увеличению стоимости зеркал и к возрастанию веса каркаса гелиостатов;
- поддерживают зеркало в центре, что затрудняет крепление зеркал и их юстировку и тем самым неоправданно увеличивает стоимость монтажа;
- уменьшают размеры единичного зеркала, сохраняя его толщину, но при этом усложняется конструкция каркаса и возрастает стоимость монтажа.

### ФОКУСИРУЮЩЕЕ ЕДИНИЧНОЕ ЗЕРКАЛО

Использование зеркал размером  $1,2 \times 1,2$  м без дополнительной опоры, хотя бы в центре, представляется сомнительным. Кроме того, зеркало никогда не бывает идеально плоским. В таком случае целесообразно использовать возможный прогиб, который придает зеркалу надлежащую кривизну в направлении наибольшего размера. Второй размер должен быть незначительным, чтобы можно было работать с минимально возможной толщиной стекла при условии, что прогиб не выходит за допустимые пределы. Таким может быть, например, единичное зеркало длиной 2,4 м и шириной 0,4 – 0,6 м (фиг. 3).



Фиг. 3. Единичное зеркало.

Если бы не проблемы хранения, то можно бы изготавливать полосы длиной 7,2 м, изогнутые в соответствии с идеальным профилем. Применение таких зеркал уменьшает размеры изображения, образованного каждым зеркалом, что позволяет осуществлять управление гелиостатом с более широкими допусками.

В табл. 2 приведены результаты расчета оптимальной толщины зеркала в зависимости от его ширины с учетом максимального значения допустимого прогиба при любом положении гелиостата и при любой скорости ветра менее 50 км/ч.

Таблица 2

Ширина, мм	Толщина, мм
400	4
500	5
600	6

### ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА

Единичные зеркала в виде полос устанавливаются горизонтально или вертикально в зависимости от положения гелиостата в поле. Между двумя соседними полосами на одной горизонтали или вертикали могут быть оставлены щели с целью ослабления вихрей Кармана, образующихся под действием ветра. Эксперименты в аэродинамической трубе позволяют определить оптимальные размеры таких щелей. Конструкция крепления находится в стадии разработки и здесь не рассматривается.

### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ

Каркас гелиостата покоится на опорной конструкции с зенитально-азимутальной схемой вращения. Осуществление такой схемы проще, чем экваториальной. Два двигателя мощностью по 100 Вт обеспечивают азимутальное и зенитальное вращения. На первой стадии рассматривались два типа управления: по замкнутому контуру с помощью оптической системы и по незамкнутому контуру с использованием вычисленных координат.

#### УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Поскольку требуется точность фокусировки (минимум  $10^{-3}$  рад), одной оптической системы для группы гелиостатов недостаточно. Оптическая система должна быть смонтирована на опоре высотой 7 – 8 м и ориентирована с большей точностью. Стоимость этой опоры, которая должна иметь исключительно большую жесткость, будет, по-видимому, высокой.

Необходимо также вспомогательное устройство, обеспечивающее приблизительную фокусировку гелиостатов для приведения отраженных лучей в поле зрения оптической системы. При этом необходимо:

- приблизительно вычислить координаты гелиостатов;
- передать по кабельной сети информацию к каждому гелиостату;
- снабдить гелиостаты электронной системой, способной обеспечить управление двигателями.

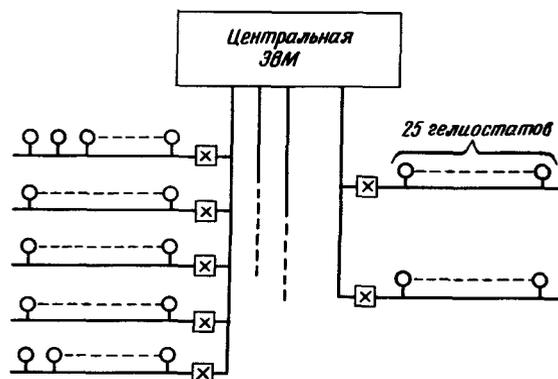
В свою очередь, для каждого двигателя необходимо упрощенное координирующее устройство. Все это приводит к дорогостоящему решению как в отношении материалов, так и в отношении монтажа и

юстировки на месте установки гелиостатов. Авторы предпочитают систему с незамкнутым контуром, управление которой осуществляется на основе вычисленных координат. Эта система проще в эксплуатации и дешевле.

#### УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛЕННЫХ КООРДИНАТ

Максимальная мгновенная скорость видимого движения Солнца равна  $\sim 20''/с$ . За 6 с оно перемещается более, чем на  $2'$ , и гелиостат должен повернуться на  $1'$ , чтобы сохранить постоянным направление отраженных лучей. Каждые 6 с требуется определять новое положение каждого гелиостата. Это можно эффективно осуществить лишь централизованным путем для всех гелиостатов с помощью малогабаритной ЭВМ на 16 бит.

Применение классических формул предполагает, что положение Солнца определяется по отношению к определенному реперу, принадлежащему гелиостату. Если этот репер является общим для всех гелиостатов, требуется тщательная, а следовательно, и дорогая юстировка при установке каждого гелиостата. Вместо этого на основе опыта наладки установки в Одейо был разработан метод, позволяющий работать с гелиостатами, установленными без юстировки. Оснащение каждого гелиостата двумя координирующими высокоточными



⊗ Передаточное реле

○ Электронная система гелиостата

Фиг. 4. Сеть управления.

устройствами для определения его положения недопустимо из-за высокой стоимости. Можно просто отсчитывать число оборотов двигателей от нулевого положения, причем электронная система, требуемая для выполнения этой работы, будет исключительно простой.

Положение гелиостата, которое должен обеспечить каждый двигатель, передается от центральной вычислительной машины к гелиостату через многоточечную сеть на двух уровнях. Пять передаточных реле, представляющих собой микропроцессоры, присоединены параллельно к кабелю, идущему от вычислительной машины. Каждое реле управляет 25 гелиостатами с помощью электронной системы, соединенной параллельно с кабелем, идущим от реле (фиг. 4). На каждом уровне передача происходит по параллельной схеме с помощью кабеля типа bus. Скорость передачи при этом выше, и разность стоимостей поверхностей раздела передачи по параллельной и последовательной схемам вполне компенсирует дополнительную стоимость кабеля и соединений.

Такой принцип управления позволяет, кроме того, осуществлять непрерывное слежение за Солнцем даже в случае продолжительной облачности и, следовательно, избегать резких изменений режима работы двигателей.

#### ВЫВОДЫ

Предполагается создание фокусирующих гелиостатов с помощью единичных фокусирующих зеркал из целого листа литого стекла промышленного производства.

При условии широкого распространения солнечных станций такого типа можно увеличить коэффициент отражения зеркал от 0,8 до 0,9, применяя просветленное стекло. На различных стадиях исследования мы стремились найти простые и экономичные решения, в особенности в части монтажа и наладки. Достижение этой цели позволит более эффективно использовать солнечную энергию.

## Оценка эффективной площади поля отражателей через относительное распределение установленных отражателей

Ф. Курреж<sup>1)</sup>

### 0. ВВЕДЕНИЕ

Эта работа относится к солнечной энергетической станции с точечной концентрацией солнечной радиации, которая осуществляется полем плоских или слабофокусирующих отражателей, ориентированных таким образом, что они направляют изображение Солнца в неподвижную точку (точку концентрации), в окрестности которой размещен котел станции. Подробное определение эффективной площади такого поля<sup>2)</sup> с учетом каждого отражателя трудно поддается систематическому оптимизационному исследованию из-за многочисленности входящих параметров. Поэтому полезно пользоваться аналитической формулой, дающей приближенную оценку при использовании лишь таких локальных и непрерывных характеристик поля, как распределение установленных отражателей<sup>3)</sup>. Целью настоящей работы является получение такой оценки (разд. 3) и ее обоснование (разд. 4) с использованием теоремы Гаусса для оценки влияния затенения<sup>4)</sup>.

Автор благодарит г-д Р. Шаббала, Ж. Дефландра, Ж.М. Ласри, П. Матерассо, П. Ренуара, М. Шютценбергера и Ж.П. Трэснала за полезные беседы по данной теме.

### 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Рассматривается момент времени, когда Солнце находится в определенном положении, характеризуемом направленным на него единичным вектором  $S$ .

<sup>1)</sup> Ph. Courrege, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.

<sup>2)</sup> См. следующий раздел или работу [1].

<sup>3)</sup> Более точно: плотность установленных отражателей на единице поверхности территории (см. разд. 3 и 6).

<sup>4)</sup> Особый случай такой оценки приведен в работе [2] (см. разд. 3).

Предполагается, что отражатели (иначе говоря, гелиостаты, на которых они установлены) распределены в плоскости  $P$  (не обязательно горизонтальной, но не параллельной  $S$ ) в центрах клеток правильной сетки<sup>1)</sup> и для каждого отражателя определены координаты относительно центра  $x$  клетки  $R_x$ , где он расположен<sup>2)</sup>. Обозначим через  $H$  совокупность таких точек (т.е. совокупность центров клеток, в которых расположены отражатели), через  $\sigma_x$  — полную площадь отражающей поверхности (поверхности зеркала), расположенной в поле отражения  $x \in H$  и через  $\mu_x$  — площадь клетки с центром  $x$ . Соответствующей интерполяцией продолжим функции  $x \rightarrow \sigma_x$  и  $x \rightarrow \mu_x$ , определенные для конечного подмножества  $H$  на плоскости  $P$ , до получения регулярных функций  $y \rightarrow \sigma_y$  и  $y \rightarrow \mu_y$ , определенных для всей плоскости  $P$ <sup>3)</sup>.

Обозначим, кроме того, через  $\theta_s$  ( $0 \leq \theta_s < \pi/2$ ) угол между направлением, перпендикулярным  $P$ , и вектором  $S$ , а для каждого  $y \in P$  через  $\theta_y$  ( $0 \leq \theta_y < \pi/2$ ) — угол между тем же направлением и единичным вектором  $T_y$ , соединяющим  $y$  с точкой концентрации  $C$  (которая, очевидно, находится за пределами  $P$  с той же стороны, что и  $S$ ). Обозначим, наконец, через  $N_y$  единичный вектор для каждого  $y \in P$ , определяющий направление, которое должна иметь нормаль к отражателю, расположенному в точке  $y$  (нормаль ориентирована в направлении отражения), с тем чтобы он отражал лучи в направлении  $T_y$ , т.е. по закону Декарта — Снеллиуса:

$$N_y = (S + T_y) / |S + T_y|. \quad (1)$$

### 2. ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ

Для отражателя  $x$ , размещенного в поле, *эффективная площадь* определяется величиной  $u_x \cos \alpha_x$ , где  $\alpha_x$  — угол падения (т.е.  $\cos \alpha_x = SN_x$ ), а  $u_x$  — *полезная площадь* отражателя  $x$  в поле с учетом затенения этого отражателя (как для падающих, так и для отраженных лучей) другими отражателями, иначе говоря, площадь, определяемая совокупностью точек отражателя, обладающих тем свойством, что полупрямые, исходящие из этих точек в направлениях  $S$  и  $T_y$ , не пересекаются с другими отражателями поля. Эта совокуп-

<sup>1)</sup> Размеры отражателей так же, как и размеры клеток сетки, могут изменяться в зависимости от координат отражателя в поле.

<sup>2)</sup> Точка  $x$  может быть центром отражателя или любой другой реперной точкой соответствующего гелиостата.

<sup>3)</sup> Эти функции могут в отдельных случаях допускать пинии разрыва.

ность будет называться в дальнейшем *полезной поверхностью* отражателя. Эффективная площадь поля определяется в виде

$$A = \sum_{x \in H} u_x \cos \alpha_x. \quad (2)$$

Эту сумму предполагается аппроксимировать соответствующим интегралом.

### 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ

Оценка эффективной площади  $A$  — это величина  $A^*$ , выраженная с помощью двойного интеграла<sup>1)</sup>:

$$A^* = \int_B \min [\cos \theta_s, \cos \theta_y, M(y) \cos \alpha_y] dy, \quad (3)$$

где, с одной стороны,  $\theta_s$ ,  $\theta_y$  и  $\alpha_y$  ( $y \in P$ ) определены, как в разд. 1, а с другой стороны,  $B$  обозначает подмножество на плоскости  $P$ , которое представляет собой участок площади, фактически занятый полем отражателей<sup>2)</sup>, и, наконец, для каждого  $y \in B$   $M(y)$  — положительное число, определяемое в виде

$$M(y) = \sigma_y / \mu_y, \quad (4)$$

причем  $\sigma_y$  и  $\mu_y$  определяются так же, как и в разд. 1. Эта оценка  $A^*$  является завышенной, хотя нельзя с полной уверенностью утверждать<sup>3)</sup>, что

$$A \leq A^*. \quad (5)$$

Величина  $M(y)$  — это *плотность установленных отражателей* (на единицу площади плоскости  $P$ ) в непосредственной близости от точки  $y$ . Тогда функция  $y \rightarrow M(y)$  представляет собой *распределение установленных отражателей*, в то время как величина  $a_y$ , определяемая как

$$a_y = \min [\cos \theta_s, \cos \theta_y, M(y) \cos \alpha_y], \quad (6)$$

является оценкой *плотности эффективной площади* поля (на единицу поверхности плоскости  $P$ ) в окрестности точки  $y$ .

Значение трех членов  $\cos \theta_s$ ,  $\cos \theta_y$ ,  $M(y) \cos \alpha_y$ , входящих в правую часть соотношений (3) и (6) можно разъяснить следующим

<sup>1)</sup>  $\min(a, b, c)$  обозначает наименьшее из чисел  $a, b, c$ .

<sup>2)</sup> Можно принять за  $B$  совокупность  $UR_x$ , объединяющую клетки с от-

ражателями, или любую другую совокупность, являющуюся производной от указанной со сглаживанием пределов.

<sup>3)</sup> По этому вопросу см. разд. 4 и 5.

образом: третий член представляет собой "чистый *фактор косинуса*" при отсутствии затенения, т.е., если плотность установленных отражателей  $M(y)$  повсюду невелика, этот член становится определяющим,  $a_y$  сокращается и выражение для  $A^*$  принимает вид

$$A^* = \int_B M(y) \cos \alpha_y dy. \quad (7)$$

Этот интеграл следует сравнить со значением  $A$ , которое в этом случае (в отсутствие затенения  $u_x = \sigma_x$ ) равно

$$A = \sum_{x \in H} \sigma_x \cos \alpha_x = \sum_{x \in H} \frac{\sigma_x \cos \alpha_x}{\mu_x} \mu_x. \quad (8)$$

Что касается двух первых членов, то они выражают ограничения, вызванные *затенением*; первый — для *падающих* лучей, а второй — для *отраженных*<sup>1)</sup>. В частности, максимальная эффективная площадь, которую можно получить на участке  $B$ , принимая плотность установленных отражателей равномерной и достаточно высокой, допускает завышенную оценку<sup>2)</sup>

$$A^{**} = \int_B \min (\cos \theta_s, \cos \theta_y) dy. \quad (9)$$

### 4. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО

Соотношение (2) может быть также записано в виде

$$A = \sum_{x \in H} \frac{u_x \cos \alpha_x}{\mu_x} \mu_x, \quad (10)$$

что дает возможность приближенно выразить  $A$  через интеграл вида

$$A_1 = \int_B \frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} dy, \quad (11)$$

где  $B$  имеет то же значение, что и в (3), и где  $y \rightarrow \bar{u}_y$  является подходящей функцией, определенной относительно  $B$ . Эта функция является регулярной и такова, что величина  $\bar{u}_x$  близка к  $u_x$  для любого  $x \in H$ . Такую функцию можно получить, приняв за  $\bar{u}_y$  значение, которое имела бы полезная площадь отражателя,  $\mathbb{M}_y$ , помещен-

<sup>1)</sup> См. соотношения (16), (17) и (19) в разд. 4.

<sup>2)</sup> Именно эта оценка получена и используется в отчете [1, № 3.7.4, стр. 74].

ного в  $y$ , но не в рассматриваемом поле отражателей, а в идеализированном поле, где все отражатели были бы идентичными с  $M_y$ , параллельными ему и расположенными в центрах клеток равномерной сетки, воспроизводящей путем переносов клетку первоначальной сетки с центром в  $y^1$ . С учетом сказанного можно установить, что

$$\frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} \leq \min [\cos \theta_S, \cos \theta_y, M(y) \cos \alpha_y]. \quad (12)$$

Отсюда вытекает неравенство (5) при переходе от  $A$  к  $A_1$ . Между тем, фиксируя точку  $y$  плоскости  $P$ , имеем, с одной стороны, по определению  $\bar{u}_y$  и  $\sigma_y$ , что

$$\bar{u}_y \leq \sigma_y. \quad (13)$$

С другой стороны, пусть  $D_R$  — диск большого радиуса  $R$  на плоскости  $P$ ,  $v(R)$  — число отражателей (идеализированного поля), реперная точка которых принадлежит  $D_R$ , а  $\Omega^\downarrow(R)$  [соответствует  $\Omega^\uparrow(R)$ ] — площадь поверхности пересечения с плоскостью  $P$  цилиндра, параллельного  $S$  (соответствует  $T_y$ ), основанием которого служит совокупность полезных поверхностей<sup>2)</sup> этих отражателей (эти поверхности попарно разъединены). Применяя теорему Гаусса к этим цилиндрам, получаем

$$v(R) \bar{u}_y \cos \alpha_y \leq \Omega^\downarrow(R) \cos \theta_S \quad (14)$$

и

$$v(R) \bar{u}_y \cos \alpha_y \leq \Omega^\uparrow(R) \cos \theta_y, \quad (15)$$

поскольку  $\cos \alpha_y = SN_y = T_y N_y$  или

$$\frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} \leq \frac{\Omega^\downarrow(R)}{\mu_y v(R)} \cos \theta_S \quad (16)$$

и

$$\frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} \leq \frac{\Omega^\uparrow(R)}{\mu_y v(R)} \cos \theta_y. \quad (17)$$

<sup>1)</sup> Это идеализированное поле представляется как однородное поле, "касательное" в точке  $y$  к рассматриваемому полю.

Моделирование полей отражателей осуществляется фактически заменой в выражении (2)  $u_x$  на  $\bar{u}_x$ ; см., например, работу [1, примечание 1, стр. 10].

<sup>2)</sup> См. разд.  $x_2$ .

Легко убедиться, что

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} (\text{верхн.}) \frac{\Omega^\downarrow(R)}{\mu_y v(R)} \leq 1, \quad (18)$$

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} (\text{верхн.}) \frac{\Omega^\uparrow(R)}{\mu_y v(R)} \leq 1.$$

Отсюда, бесконечно увеличивая  $R$  в (16) и (17), получим

$$\frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} \leq \cos \theta_S, \quad \frac{\bar{u}_y \cos \alpha_y}{\mu_y} \leq \cos \theta_y. \quad (19)$$

Сопоставляя эти неравенства с (13), получим (12).

## 5. ПРАВОМЕРНОСТЬ СДЕЛАННОЙ ОЦЕНКИ

В отношении разности между  $A^*$  и  $A$  ограничимся здесь некоторыми замечаниями. Отношение  $A^*/A$  зависит от *масштабного фактора*, определяемого *числом отражателей*; аппроксимация, соответствующая переходу от конечной суммы (10) к интегралу (11), является обоснованной лишь тогда, когда это число достаточно велико (т.е. если размеры отражателей и клеток невелики — порядка нескольких процентов — по сравнению с размерами территории). Это отношение зависит также от *геометрических факторов*, каковыми являются, с одной стороны, *направление солнечных лучей* и местонахождение точки концентрации  $C$  (или *высота башни*) и, с другой стороны, форма отражателей и *клеток*: если высота Солнца не слишком мала и если форма клеток не слишком вытянута, можно принять

$$1 \leq A^*/A \leq 1,1. \quad (20)$$

В противоположных условиях отношение  $A^*/A$  может быть значительно больше единицы, тогда оценка  $A^*$  должна проводиться с осторожностью.

В последующей публикации будет приведено численное исследование изменения  $A^*/A$  в функции указанных выше геометрических факторов (в частности, исследование разности двух членов уравнения (12) в функции  $y$  и упомянутых факторов), а также более точное определение  $A$  в виде

$$\underline{A} = \int_B \gamma(y) M(y) \cos \alpha_y dy, \quad (21)$$

где  $\gamma(y)$  [ $0 < \gamma(y) \leq 1$ ] также зависит только от  $\cos \theta_s$ ,  $\cos \theta_y$  и  $M(y)$ .

## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Заметим, что величина  $A^*$  может быть также определена в виде

$$A^* = \int_P \min [\cos \theta_s, \cos \theta_y, \bar{M}(y) \cos \alpha_y] dy, \quad (22)$$

где  $\bar{M}(y)$ , определяемая как  $(y) \rightarrow \bar{M}(y)$ , — численная функция на  $P$ , которая продолжает  $M$  через нулевое значение за пределы  $B$ . Таким образом, величина  $A^*$  зависит от формы и размеров различных отражателей, от их расположения и от поверхности участка  $B$ , который они занимают на плоскости  $P$ , только через простую численную функцию  $\bar{M}$ . Это позволяет разделить исследование оптимальной геометрии поля, когда задана точка концентрации  $S$ , на два отдельных этапа; сначала находят распределение установленных отражателей  $\bar{M}$ , исходя из условий оптимальности, накладываемых на эффективную площадь  $A^*$ , что представляет собой элементарную задачу двумерного расчета вариаций в функции  $\bar{M}$  (например, найти максимум энергии, воспринятой за типичный день, т.е. энергии, выраженной в функции  $\bar{M}$  через выражение (22) для  $A^*$ , при заданной поверхности зеркал  $\int_P \bar{M}(y) = v$ ). Затем делают выбор, применительно к местным условиям, размеров отражателей и правильно сбалансированного их расположения, соответствующего ранее найденному распределению установленных отражателей  $\bar{M}$ . Этот метод будет изложен в последующей публикации.

## Литература

1. Abatut J.L., Bourdeau F., Bouyssou G., Vialaret G., Simulation d'un champ d'héliostats, Note interne SEES I du L.A.A.S., 7/1975.
2. Sheldahl, Incorporated; Foster Wheeler Corporation; the University of Minnesota, Solar Power Array for the Concentration of Energy, Rapport NSF/RANN/SE/GI, 41019/PR/74/2, 7/1974.

## Оптимальное сочетание селективности и концентрации в солнечных установках

Ж. Пери, Ф. Папини, Р. Паскетти<sup>1)</sup>

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке любого аппарата, предназначенного для приема и термодинамического преобразования солнечной энергии, учитываются три основные переменные: температура теплоносителя; энергия падающего излучения и степень концентрации радиации; "селективность" тепловоспринимающей поверхности.

Поскольку полезная энергия должна быть по возможности максимальной, эти три переменные не являются независимыми. В частности, для заданной рабочей температуры можно определить предельные значения характеристических параметров "селективности" поглощающей поверхности в функции степени концентрации, при превышении которых полезная энергия практически не увеличивается.

В настоящей работе приведены результаты подобного исследования, позволившего установить оптимальное сочетание "селективности" и концентрации, когда последняя относительно мала. Эти результаты были получены путем составления уравнения радиационного баланса тепловоспринимающей поверхности с учетом всех упомянутых выше переменных или параметров.

Преобразование солнечной энергии в электроэнергию термодинамическим путем выдвигает среди прочих задачу повышения эффективности поглощения тепловой энергии солнечного излучения поверхностью первичного преобразователя.

Солнечное излучение при нормальной плотности потока или после его концентрации воспринимается поверхностью приемника и преобразуется в тепло. Изучение радиационного теплообмена с целью улучшения теплового баланса поглощающей поверхности привело к разра-

<sup>1)</sup> G. Peri, F. Papini, R. Pasquetti, Département d'Héliophysique, Université de Provence, Marseille.

ботке селективных устройств, способных повысить к.п.д. поверхности, действие которых зависит от рассматриваемого интервала длин волн излучения. Среди этих устройств определяющую роль играет селективно поглощающая поверхность. Для создания таких поверхностей требуются углубленные технологические проработки, особенно если нужно обеспечить высокую эффективность. В связи со сказанным было бы интересно выяснить влияние этих устройств на интегральные характеристики гелиотермической установки. В частности, в настоящей работе определяется влияние селективности на свойства поглощающей поверхности в зависимости от степени концентрации падающей солнечной радиации и, как следствие, рабочей температуры приемника.

Рассмотрим селективно поглощающую поверхность интегральный коэффициент поглощения которой  $\alpha$  имеет высокое значение в области длин волн, соответствующих солнечному спектру, а степень черноты  $\epsilon$  невелика в области длин волн, соответствующих рабочей температуре приемника.

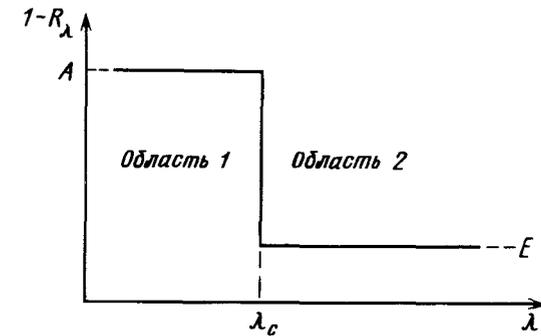
Некоторые авторы используют отношение  $\alpha/\epsilon$  для характеристики селективности поглощающей поверхности. Однако это отношение показательно лишь в строго определенных пределах. Поэтому пришлось ввести новую формулировку для более четкого описания радиационного баланса.

### СОСТАВЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА

Рассмотрим оптические характеристики идеальной селективно поглощающей поверхности. Параметр  $\alpha_\lambda = 1 - R_\lambda$  ( $R_\lambda$  — коэффициент отражения монохроматического излучения поверхности) должен изменяться в соответствии со схемой, показанной на фиг. 1. Кривая изменения  $\alpha$  в функции  $\lambda$  образует две области по обе стороны от пороговой длины волны  $\lambda_c$ . Обозначим через  $A$  значение  $\alpha$  для области 1 ( $\lambda < \lambda_c$ ) и  $E$  для области 2 ( $\lambda > \lambda_c$ ). Радиационный баланс поверхности при температуре  $T$  обычно определяется по формуле

$$\Delta\Phi = \alpha CH \left[ 1 - \frac{\epsilon}{\alpha} \frac{\sigma(T^4 - T_a^4)}{CH} \right],$$

где  $\Delta\Phi$  — полезная мощность;  $H$  — плотность потока падающего солнечного излучения;  $T_a$  — эквивалентная температура окружающей среды;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $C$  — степень концентрации.



Фиг. 1.

Если принять, что солнечное излучение на уровне земли соответствует излучению черного тела с температурой 5880 К, можно выразить  $\alpha$  и  $\alpha/\epsilon$  в функции  $A$ ,  $E$  и  $\lambda_c$ :

$$\alpha = (A - E)k_s + E,$$

$$\frac{\alpha}{\epsilon} = \frac{\left(\frac{A}{E} - 1\right)k_s + 1}{\left(\frac{A}{E} - 1\right)k + 1},$$

где

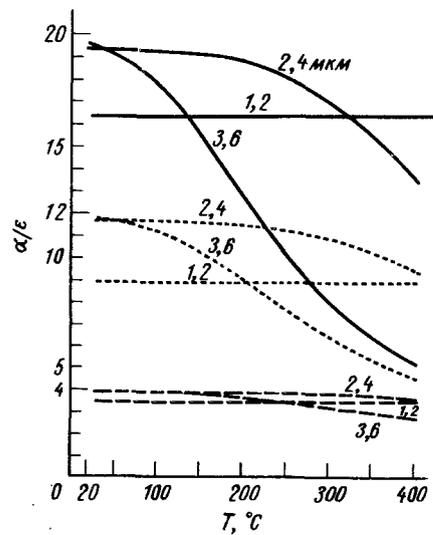
$$k_s = \frac{1}{\sigma T_s^4} \int_0^{\lambda_c} M_{\lambda, T_s}^0 d\lambda$$

и

$$k = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_c} M_{\lambda, T}^0 d\lambda,$$

а  $M_{\lambda, T_s}^0$  и  $M_{\lambda, T}^0$  — спектральная энергия излучения черного тела при температуре  $T_s$  и  $T$  соответственно.

На фиг. 2 представлено семейство кривых  $\alpha/\epsilon = f(T)$  для разных значений  $A/E$  и  $\lambda_c$ . Характеристики селективной поглощающей поверхности оптимальны при  $\alpha/\epsilon \approx A/E$ . Чтобы обеспечить это равенство или чтобы избежать слишком больших значений "селективности", необходимо разумно выбирать значение  $\lambda_c$ . Так, например, при  $T \approx 225^\circ\text{C}$  можно получить одно и то же значение  $\alpha/\epsilon$  при  $A/E = 12$  и  $\lambda_c = 2,4$  мкм и при  $A/E = 20$  и  $\lambda_c = 3,6$  мкм.



Фиг. 2.

"Радиационный к.п.д." можно выразить следующим образом:

$$\eta = \frac{\Delta\Phi}{CH} = \alpha \left[ 1 - \frac{\epsilon}{\alpha} \frac{\sigma(T^4 - T_a^4)}{CH} \right];$$

или

$$\eta = A \left[ \frac{E}{A} + \left( 1 - \frac{E}{A} \right) k_s \right] \left( 1 - \frac{Y}{CH} \right),$$

где

$$Y = (\epsilon/\alpha) \sigma (T^4 - T_a^4).$$

Отсюда следует, что если  $T$  мало или произведение  $CH$  велико, то отношение  $Y/CH$  стремится к нулю. В этом случае к.п.д. достигает максимального значения при  $A = E$ . В таких экстремальных условиях селективная поверхность становится практически бесполезной. В других случаях ее роль очевидна, однако при этом следует уточнить оптические характеристики, чтобы обеспечить максимальную эффективность при технологической разработке. Для этого необходимо исследовать изменения радиационного к.п.д. в функции температуры и плотности потока падающего излучения  $CH$ . Введем величину, связанную с к.п.д. и зависящую от отношения  $A/E$ , которая по-

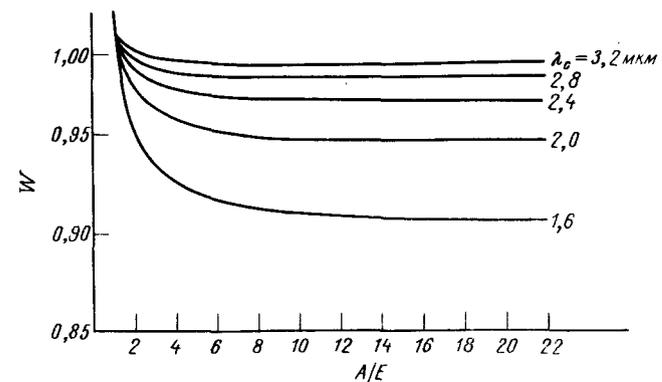
зволяет сравнивать селективные поверхности, определяемые значениями  $A/E$  и  $\lambda_c$ :

$$\eta_A = \frac{\eta}{A} = \left[ \frac{E}{A} + \left( 1 - \frac{E}{A} \right) k_s \right] \left( 1 - \frac{Y}{CH} \right) = W \left( 1 - \frac{Y}{CH} \right).$$

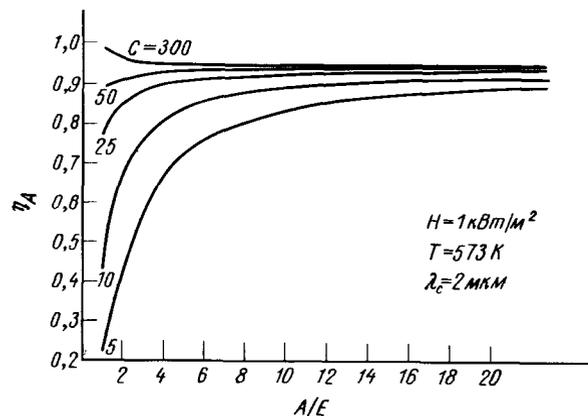
### ОПТИМАЛЬНОЕ СОЧЕТАНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ

В данном исследовании значение  $H$  было принято постоянным и равным  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Степень концентрации изменялась от 1 до 300. На фиг. 3 показано изменение  $W$  в зависимости от  $A/E$  при различных значениях  $\lambda_c$ . Когда  $A/E$  стремится к бесконечности,  $W$  стремится к  $k_s$ . На фиг. 4 представлены кривые зависимости  $\eta_A$  от  $A/E$  при пороговой длине волны  $\lambda_c = 2 \text{ мкм}$ , рабочей температуре  $T = 573 \text{ К}$  и различных значениях концентрации  $C$ . Заметим, что при  $C = 300$   $\eta_A$  уменьшается с увеличением  $A/E$ . Это указывает на неудачный выбор значения  $\lambda_c$ . При тех же условиях, но при  $\lambda_c = 3,2 \text{ мкм}$  уменьшение  $\eta_A$  уже незаметно (фиг. 5).

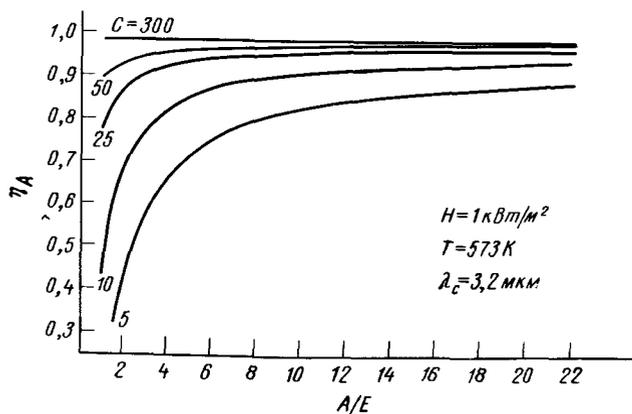
Все кривые  $\eta_A$  стремятся к предельным значениям. Другими словами, за пределами некоторого значения  $A/E$  увеличение к.п.д. очень незначительно и не окупает технологической сложности улучшения оптических характеристик поверхности. Например, при  $H = 1 \text{ кВт/м}^2$ ,  $T = 573 \text{ К}$  и  $C > 50$  предпочтительней использовать



Фиг. 3.



Фиг. 4



Фиг. 5

"черную" поверхность, коэффициент поглощения которой ближе к единице, чем у селективной поверхности. Если  $C = 25$ , следует использовать селективную поверхность, но при этом отношение  $A/E$  не должно превышать значения, равного 5.

### Выводы

Настоящее исследование позволяет уточнить основные параметры при выборе типа гелиотермического преобразователя. Однако приведенные семейства кривых представляют собой лишь первое прибли-

жение к определению оптимального сочетания концентрации и селективности. Необходимо также уточнить влияние некоторых других параметров, например режима поступления солнечной энергии. Изменение  $H$  в течение дня приводит к изменению производства  $CH$ , и легко показать, что при малом поступлении энергии можно получить рост к.п.д. даже при высокой степени концентрации. Так, если для рассмотренного примера ( $T = 573 \text{ К}$ ,  $C = 50$  и  $\lambda_c = 3,2 \text{ мкм}$ ) принять  $H = 200 \text{ Вт/м}^2$ , то целесообразнее выбрать  $A/E \leq 6$  вместо "черной" поглощающей поверхности.

Оптимальное сочетание селективности и концентрации должно быть найдено для различных возможных значений  $T$ . Кроме того, необходимо, чтобы выигрыш в энергии при использовании селективных поглощающих поверхностей достигался не за счет значительного уменьшения коэффициента поглощения  $A$ . Наконец, выбранное сочетание должно быть распространено на весь дневной цикл, так как влияние селективной поверхности на характеристики установки в условиях максимального режима и в течение всего дня неодинаково.

## Проблемы теплового аккумулирования

Этьеван, Пёб, Виаларон, Аллар, Боннин, Фарабо<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Поступление солнечной радиации на поверхность Земли носит периодический и случайный характер. Поэтому при разработке и оптимизации солнечной энергетической станции с термодинамическим циклом необходимо предусматривать аккумулирование энергии.

В связи с этим в данной работе рассмотрены следующие вопросы: различные режимы аккумулирования, которые могут быть реализованы при работе солнечной станции; влияние стоимости аккумулирования на общую стоимость вырабатываемой станцией электроэнергии; критерии выбора различных веществ для эффективного аккумулирования тепловой энергии как с технологической, так и с экономической точек зрения; материалы, применение которых представляет интерес в диапазоне температур, характерном для термодинамических циклов солнечных станций средней мощности.

Тепловое аккумулирование на участке между приемником концентрированной солнечной радиации и парогенератором обеспечивает тепловой энергией термодинамический цикл производства электроэнергии и характеризуется следующими показателями:

рабочей областью температур в интервале  $t_1 - t_2$ ; суммарной теплоаккумулирующей способностью или необходимой продолжительностью аккумулирования; скоростью накопления тепловой энергии в фазе аккумулирования и скоростью ее возврата в фазе использования.

<sup>1)</sup> Etievant, Peube, Vialaron, Programme Interdisciplinaire de Recherche sur le Développement de l'Energie Solaire, Paris, France; Allard, Bonnin, Pharabod, Electricité de France, Clamart, France.

При оптимизации станции, помимо теплового аккумулирования, могут рассматриваться также и другие виды аккумулирования энергии в той или иной физической форме (например, подъем воды, инерционные маховики и т.п.) или в химической форме (например, за счет обратимых реакций и т.п.). По своему характеру эти виды аккумулирования, не входящие непосредственно в термодинамический цикл, не относятся к разделу теплового аккумулирования. Ниже будет рассмотрено с экономической точки зрения влияние стоимости аккумулирования энергии на стоимость произведенной электроэнергии.

### ТРЕБОВАНИЯ К АККУМУЛИРОВАНИЮ

В зависимости от режима потребления энергии и технических особенностей станции можно различать следующие виды аккумулирования.

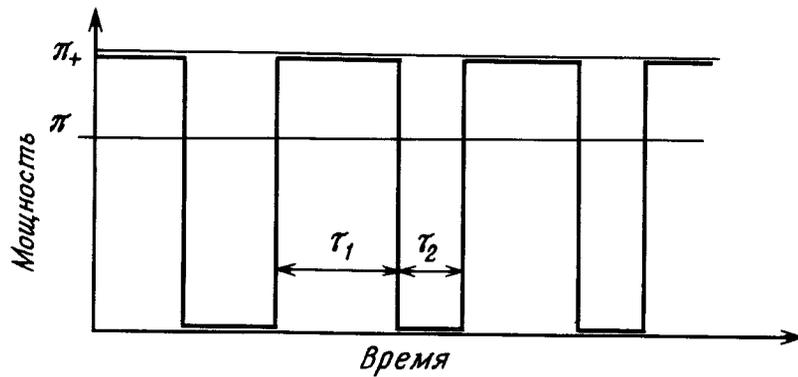
#### АККУМУЛИРОВАНИЕ В ПЕРИОД ОБЛАЧНОСТИ

Это кратковременное аккумулирование (1 - 2ч) необходимо в основном для предотвращения резких колебаний тепловой нагрузки теплосилового оборудования станции в период появления облачности. Оно позволяет также в какой-то мере сгладить резкие изменения выходной мощности.

Обозначим через  $\alpha$  показатель использования аккумулированной энергии, т.е. отношение между потоками энергии на выходе и входе в аккумулятор, через  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - типичные продолжительности периодов соответственно безоблачной и облачной погоды (фиг. 1), через  $\tau$  - отношение  $\tau_1/\tau_2$ , а через  $\pi_+$  - среднюю тепловую мощность до поступления тепловой энергии в систему термодинамического преобразования. Тогда средняя мощность  $\pi$  в соответствии с энергетическим балансом системы аккумулирования может быть определена из выражения

$$\pi = \frac{\alpha \tau}{1 + \alpha \tau} \pi_+ \quad (1)$$

За время  $\tau_1 + \tau_2$  приемник солнечной радиации воспринимает тепловую энергию в количестве  $\pi_+ \tau_1$ , а на вход в систему термодинамического преобразования энергия поступает в количестве  $\pi(\tau_1 + \tau_2)$ . В этом случае средний к.п.д. системы аккумулирования



Фиг. 1. Аккумуляция в период облачности.

составляет

$$\eta_s = \frac{\alpha(1 + \tau)}{1 + \alpha\tau} \quad (2)$$

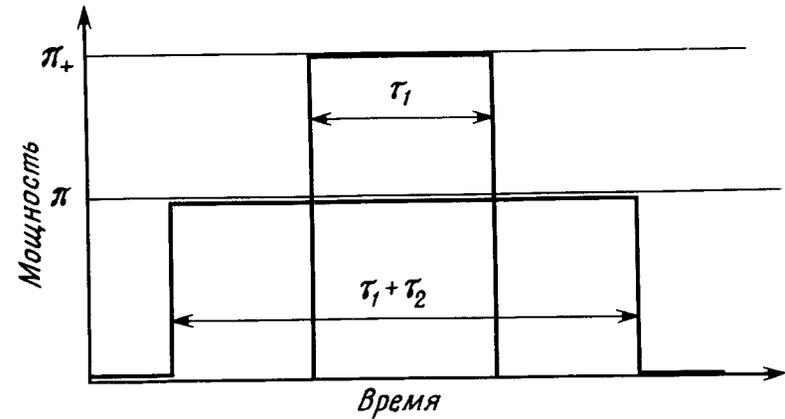
Для солнечной станции с системой аккумуляции только на период облачности приемник концентрированного солнечного излучения должен рассчитываться на пиковую тепловую мощность  $\pi_+$ , а система термодинамического преобразования, включающая парогенератор, турбогенератор и т.п., должна быть рассчитана на мощность  $\pi$ <sup>1)</sup>.

Различают два типа дневного аккумуляции.

#### АККУМУЛИРОВАНИЕ В ТЕЧЕНИЕ ДНЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аккумулятор, показанный на фиг. 2, отличается от предыдущего лишь продолжительностью действия в пределах суток. Часть энергии, выработанной во время солнечного сияния  $\tau_1$ , аккумуляруется и возвращается затем в течение периода  $\tau_2$ , с тем чтобы за период  $\tau_1 + \tau_2$  продолжительностью 10 – 24 ч производительность парогенератора была постоянной. При этом установленная мощность турбоге-

<sup>1)</sup> В данном рассмотрении в схеме станции приемник тепловой энергии концентрированного солнечного излучения и парогенератор являются самостоятельными элементами, между которыми размещен тепловой аккумулятор с энергетической емкостью, соответствующей конкретным климатическим условиям. — Прим. ред.



Фиг. 2. Аккумуляция в течение дня для выравнивания выработки электроэнергии.

нератора будет меньше максимальной в  $\alpha\tau/(1 + \alpha\tau)$  раз. Полученная в этом случае экономия капиталовложений на систему термодинамического преобразования позволяет частично (или полностью) окупить затраты на создание системы аккумуляции.

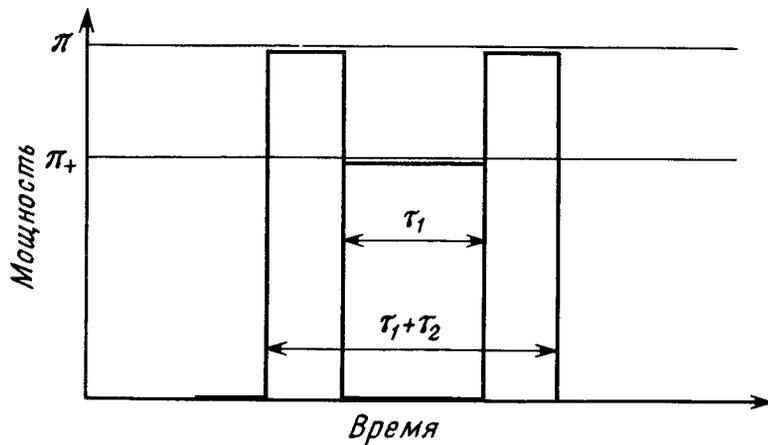
#### АККУМУЛИРОВАНИЕ В ТЕЧЕНИЕ ДНЯ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЧАСЫ ПИК

Как и в предыдущем случае, энергия аккумуляруется в течение периода солнечного сияния  $\tau_1$ , но на этот раз возврат энергии происходит в часы пик длительностью  $\tau_2$ , причем  $\tau_2$  может быть существенно меньше  $\tau_1$  (фиг. 3).

Солнечный приемник станции, работающей по такому принципу, должен иметь мощность  $\pi_+$ , а аккумулятор должен быть в состоянии запаса энергии в количестве  $\pi_+\tau_1$ . Установленная мощность термодинамической системы определяется в виде

$$P = \eta_c \pi = \eta_c \alpha \tau \pi_+ \quad (3)$$

Если  $\tau = \tau_1/\tau_2$  велико, т.е.  $\tau > 1$ , то установленная мощность станции превышает пиковую тепловую мощность  $\pi_+$  на входе в аккумулятор. В этом случае в отличие от предыдущего затраты на сооружение аккумулятора не компенсируются снижением уровня установленной мощности. Однако увеличение стоимости энергии в часы пик до некоторой степени может оправдать увеличение капиталовло-



Фиг. 3. Аккумуляция в течение дня для выработки электроэнергии в часы пик.

жений на станцию за счет системы аккумуляции такого типа.

#### СЕЗОННОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ

Этот вид аккумуляции предусматривается для обеспечения энергией потребителя в периоды длительной неблагоприятной погоды за счет энергии, запасенной во время поступления солнечной радиации. Эту проблему можно решить с помощью теплового, химического или пневмоаккумуляции.

#### ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ ТЕПЛОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ

Ниже приводится определение стоимости электроэнергии, выработанной солнечной станцией, и уточняется влияние стоимости аккумуляции в каждом из приведенных выше случаев.

В отсутствие аккумуляции стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, выработанной солнечной станцией башенного типа, может быть представлена в виде

$$x_0 = \frac{P + lh^2 + (m + g)t^{-1} + CER + KE\rho\eta_c + Ae + AT\rho\eta_c f}{AT\rho\eta_c}, \quad (4)$$

где  $P$  — стоимость 1 м<sup>2</sup> гелиостата с системой слежения;  $l$  — удель-

ная стоимость башни;  $h^2$  — квадрат высоты башни, отнесенный к площади поверхности зеркал;  $m$  — стоимость 1 м<sup>2</sup> территории земли;  $g$  — удельная стоимость земляных работ в расчете на 1 м<sup>2</sup> территории;  $t$  — коэффициент использования территории, равный отношению площади отражающей поверхности к площади занимаемой станцией территории;  $C$  — удельная стоимость котла, франц. фр./кВт тепловой мощности котла;  $E$  — пиковая плотность потока солнечной радиации, кВт/м<sup>2</sup>;  $\rho$  — оптический к.п.д. станции, равный отношению энергии, поглощенной котлом, к энергии радиации, падающей на поле гелиостатов;  $K$  — стоимость теплосилового части станции, включая турбогенератор и вспомогательное оборудование, франц. фр./кВт пиковой мощности;  $\eta_c$  — к.п.д. цикла преобразования тепловой энергии, равный отношению выработанной энергии к поглощенной тепловой энергии;  $A$  — коэффициент использования основного оборудования;  $e$  — стоимость эксплуатации зеркал в течение года, франц. фр./м<sup>2</sup>;  $f$  — стоимость эксплуатации станции в течение года, франц. фр./(кВт·ч);  $T$  — энергия солнечной радиации, поступающей в течение года на 1 м<sup>2</sup>.

В числитель выражения (4) входят значения различного вида капиталовложений, в том числе на поле гелиостатов, башню, котел, турбогенератор и т.п., а также значения эксплуатационных затрат. Все эти значения приведены по отношению к 1 м<sup>2</sup> отражающей поверхности. Знаменатель представляет собой произведение коэффициента использования основного оборудования  $A$  и показателя годовой выработки электроэнергии станцией, также отнесенного к 1 м<sup>2</sup> отражающей поверхности.

Добавление в схему станции системы аккумуляции сказывается на стоимости вырабатываемой энергии. Чтобы определить эту стоимость, необходимо к капитальным затратам [выражение (4)] прибавить стоимость аккумулятора и учесть изменение установленной мощности, стоимость эксплуатации и к.п.д. станции в целом. Именно таким путем определено изменение  $\Delta x$  стоимости 1 кВт·ч для всех рассмотренных выше режимов аккумуляции.

Например, для случая аккумуляции на период облачности или для аккумуляции в течение дня с целью выравнивания выработки электроэнергии расчетная формула для определения затрат имеет вид

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{1}{AT\rho\eta_c \eta_s x} \left( \sigma E \rho \tau_1 \frac{\alpha}{1 + \alpha \tau} - \frac{kE\rho\eta_c}{1 + \alpha \tau} - AT\rho\eta_c f \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha \tau} \right) + \frac{1 - \alpha}{\alpha(1 + \tau)}, \quad (5)$$

где  $\eta_s$  определяется по формуле (2).

Первый член в скобках представляет собой затраты на аккумулятор, отнесенные к  $1 \text{ м}^2$  отражающей поверхности. Удельная стоимость аккумуляирования  $\sigma$  имеет размерность франц. фр./кВт тепловой мощности в режиме отбора энергии системой преобразования. Второй член в скобках характеризует уменьшение затрат на турбогенератор. Третий член определяет изменение эксплуатационных затрат при условии, что эти затраты пропорциональны вырабатываемой станцией энергии (этот член невелик по сравнению с двумя предыдущими). Последний член за скобками определяет увеличение стоимости энергии за счет снижения к.п.д. станции, обусловленного введением системы аккумуляирования.

Аналогичным образом получаем формулу для случая аккумуляирования в течение дня для выработки электроэнергии в часы пик:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{1}{AT\rho\eta_c \alpha x} [\sigma E\rho\alpha\tau_1 + KE\rho\eta_c (\alpha\tau - 1) + AT\rho\eta_c f(\alpha - 1)] + \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (6)$$

В этом случае в отличие от предыдущего установленная мощность, как правило, не уменьшается (второй член в квадратных скобках), поскольку величина  $\alpha\tau$  обычно больше единицы. Поэтому капиталовложения на аккумулятор не компенсируются уменьшением стоимости турбогенератора. Тем не менее такая система иногда может быть оправдана за счет более высокой стоимости электроэнергии в часы пик.

Выражения (5) и (6) могут быть использованы для определения удельной стоимости  $\sigma$ , допустимой для каждой схемы аккумуляирования. Получаемые при этом результаты в значительной мере зависят от режима прихода солнечной радиации, стоимости зеркал, к.п.д. аккумуляирования, коэффициента использования основного оборудования и т.п. Подробное обсуждение этих вопросов выходит за рамки данной работы. Однако в качестве примера рассмотрим сначала случай применения аккумуляирования на период облачности в течение 1ч ( $\tau_1 = \tau_2 = 1$  ч). Примем типичные для юга Франции значения исходных величин:  $A = 8,54$ ,  $T = 1550$  кВт·ч (тепл.)/ $\text{м}^2$ ,  $\rho = 0,6$ ,  $\eta_c = 0,35$ ,  $\alpha = 0,8$ ,  $E = 0,8$  кВт/ $\text{м}^2$ . При стоимости гелиостатов 600 франц. фр./ $\text{м}^2$  стоимость вырабатываемой электроэнергии в этом случае будет равна

$x = 0,3$  франц. фр./кВт·ч). Член  $\Delta x/x$  представляет собой сумму следующих четырех слагаемых:

$$\frac{\Delta x}{x} = 2,87 \cdot 10^{-4} \sigma - 1,13 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 10^{-1}.$$

Только первый член этого выражения зависит от  $\sigma$ , и нетрудно видеть, что при  $\sigma \leq 350$  франц. фр./кВт·ч (тепл.) изменение  $\Delta x/x$  не превышает 10%. К тому же это увеличение в значительной степени компенсируется уменьшением затрат на турбогенератор (второй член). Эта составляющая играет существенную роль лишь в случае, если циклы облачности в течение года достаточно регулярны. Четвертый член, отражающий снижение эффективности работы станции вследствие введения системы аккумуляирования, показывает, насколько важно осуществлять аккумуляирование с возможно более высоким к.п.д.

В случае аккумуляирования с целью выравнивания выработки электроэнергии при использовании значений приведенных выше исходных величин и  $\tau_1 = \tau_2 = 8$  ч получим

$$\frac{\Delta x}{x} = 2,3 \cdot 10^{-3} \sigma - 1,13 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 10^{-1}.$$

В этом примере доля капиталовложений на аккумулятор, которая представлена в полученном выражении первым членом, не превышает 10% общей стоимости, если  $\sigma \leq 43$  франц. фр./кВт·ч (тепл.).

Применение аккумуляирования с целью выравнивания выработки электроэнергии окунается, несмотря на дополнительные расходы на аккумулятор, за счет меньшей стоимости турбогенератора (второй член). Как и в предыдущем примере, последний член рассматриваемого выражения учитывает влияние термодинамической эффективности аккумуляирования на стоимость системы в целом.

В случае аккумуляирования в течение дня для выработки энергии в часы пик выводы почти аналогичны, однако член, характеризующий изменение стоимости турбогенератора [второй член уравнения (6)], почти всегда положителен.

#### КРИТЕРИИ ВЫБОРА ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ТЕПЛОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ

В табл. 1 приведены критерии выбора веществ, которые могут быть использованы для переноса и (или) аккумуляирования тепловой энергии. Если вещество применяется в качестве теплоносителя, то

Таблица 1

Критерии выбора веществ для переноса  
и (или) аккумуляирования тепловой энергии

Аспект	Требуемые свойства	Назначение	
		перенос энергии	аккумуляирование энергии
Тепловой	Высокая удельная теплоемкость	×	⊗
	Высокая скрытая теплота плавления		⊗
	Высокая теплопроводность: в жидкой фазе	⊗	×
	в твердой фазе		⊗
Механический	Низкая вязкость в жидкой фазе	⊗	×
	Малая упругость пара	×	⊗
Химический	Стабильность при рабочей температуре	⊗	⊗
	Коррозионная стойкость	⊗	⊗
	Отсутствие загрязнений	⊗	⊗
Экономический	Минимальная стоимость (доступность)	×	⊗

оно должно обладать следующими свойствами:

способностью работать при возможно более высоких температурах (это позволяет реализовать термодинамический цикл с высоким к.п.д. цикла Карно при условии, конечно, что этот цикл технологически осуществим и что система приема и концентрации солнечной энергии не потребует слишком больших капиталовложений и способна обеспечить такую температуру);  
высокой теплопроводностью;  
низкой вязкостью в расплавленном состоянии;  
малой упругостью пара для уменьшения затрат на создание крупногабаритного оборудования, но не настолько, чтобы ухудшить теплообмен на стенках.

Если же вещество применяется в качестве теплоаккумулирующего материала, то оно должно иметь следующие свойства, приведенные в порядке их значимости:

высокую скрытую теплоту фазового перехода (что обеспечивает значительный выигрыш в аккумуляирующей способности) при температуре плавления, соответствующей рабочей температуре термодинамического цикла, а также достаточно высокую теплопроводность в твердом состоянии;  
минимальную стоимость, что весьма важно, учитывая значительное количество требуемого материала;  
высокую удельную теплоемкость в жидком состоянии;  
высокую химическую стабильность при рабочей температуре;  
высокую плотность.

Все эти свойства в той или иной мере взаимосвязаны, тем не менее некоторые из них совместимы в одном материале, а другие нет.

Веществ, пригодных для переноса или аккумуляирования тепловой энергии, довольно много. В связи с этим полезно обратиться к периодической системе химических элементов Менделеева, а также рассмотреть зависимости между теплофизическими свойствами различных элементов (фиг. 4).

Согласно закону Дюлонга и Пти ( $C_p = 25$  Дж/г-атом), являющемуся весьма приближенным, по крайней мере при умеренных температурах, материалы с высокой массовой удельной теплоемкостью следует искать среди легких элементов. По этой и некоторым другим причинам (например, в связи с распространенностью легких элементов, за исключением Li, Be и B) данная таблица ограничена элементами с порядковым номером (атомным номером) до 20 (Ca). Для большинства элементов скрытая теплота плавления связана с температурой их плавления соотношением  $\lambda_{\text{плавл}}/T_{\text{плавл}}, \text{ К} \approx 8,3 \div 12,5$  Дж/г-моль, а для сложных неорганических молекул эта величина заключена в интервале 21 – 29 Дж/г-моль. Аналогично этому теплота испарения веществ связана с температурой кипения правилом Трутона  $\lambda_{\text{кип}}/T_{\text{кип}}, \text{ К} \approx 88$  Дж/г-моль (для неполярных жидкостей с увеличением температуры кипения эта величина возрастает незначительно, а для полярных жидкостей составляет величину, существенно большую 88 Дж/г-моль). Из этих данных следует, что при выборе подходящего вещества приходится принимать компромиссное решение

${}^1_1\text{H}$ 1,4					${}^2_2\text{He}$ 5,23
${}^3_3\text{Li}$ 180,5° 3,51	${}^5_5\text{B}$ 1,3	${}^6_6\text{C}$ 9,69	${}^7_7\text{N}$ 210° 1,05	${}^8_8\text{O}$ -218,6° 0,92	${}^9_9\text{F}$ -219,6° 0,75
${}^{11}_{11}\text{Na}$ 97,8° 1,23	${}^{12}_{12}\text{Mg}$ 650° 1,05	${}^{13}_{13}\text{Al}$ 660° 0,90	${}^{14}_{14}\text{Si}$ 0,7	${}^{15}_{15}\text{P}$ 44,2° 0,75	${}^{16}_{16}\text{S}$ 119° 0,73
${}^{17}_{17}\text{Cl}$ -101° 0,50	${}^{19}_{19}\text{K}$ 63,7° 0,75	${}^{20}_{20}\text{Ca}$ 838° 0,63			

Фиг. 4. Часть периодической системы химических элементов Менделеева.

${}^a_b\text{H}^c_d$ :  $a$  — порядковый номер (атомный номер) элемента;  $b$  — атомный вес;  $c$  — удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $d$  — температура плавления, °С.

между как можно меньшим порядковым номером элемента и возможно более высокой температурой плавления.

Относительно температуры плавления на основании фиг. 4 можно сделать следующие выводы:

для щелочных металлов температура плавления с увеличением порядкового номера элемента уменьшается (литий в этом отношении лучше, чем натрий, а натрий лучше, чем калий);

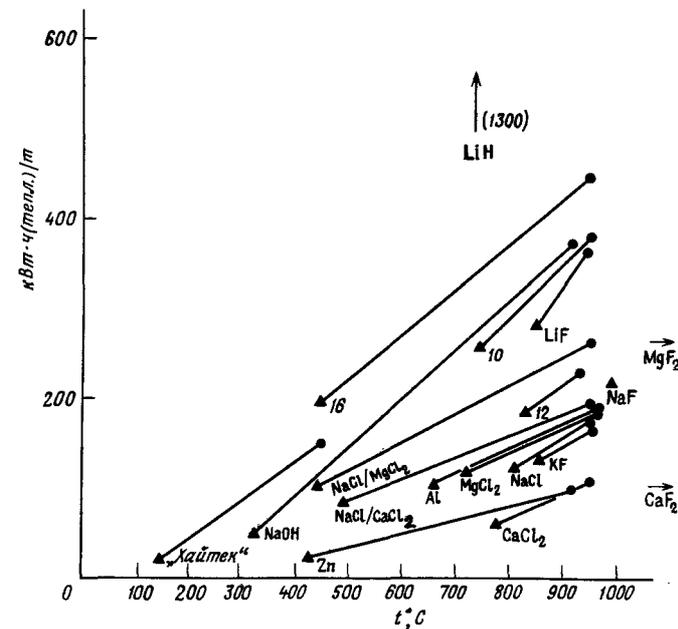
для щелочноземельных металлов имеет место обратное явление, но предпочтение здесь следует отдать магнию; для элементов подгруппы Va, VIa и VIIa температура плавления в каждой группе с увеличением порядкового номера элемента возрастает.

Теперь, когда высказаны все общие соображения, рассмотрим свойства некоторых веществ, которые могут быть использованы в системе теплового аккумулирования.

## СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ

В лаборатории фирмы "Филипс" предложено использовать для теплового аккумулирования фториды щелочных и щелочноземельных металлов. Как можно предположить из рассмотрения фиг. 4, наилучшими аккумулирующими свойствами обладает LiF, в то время как такие соединения, как  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgF}_2$ , имеют наибольшую температуру плавления.

На фиг. 5 представлены теплоаккумулирующие способности некоторых веществ (на единицу веса), скрытая теплота плавления которых используется в аккумулирующих устройствах. При этом перегрев аккумулирующего материала для использования теплоемкостного эффекта расплава ограничивался температурой  $\sim 950^\circ\text{C}$ , что обусловлено как технологическими причинами, связанными с особенностями компоновки гелиостатов, концентрирующих солнечную радиацию, так и условием, что рассматриваемый материал должен выдерживать



Фиг. 5. Теплоаккумулирующая способность некоторых веществ на единицу веса.

такую температуру без разложения. Следует отметить, что фториды, когда они полностью обезвожены, термически стабильны до температур, превышающих  $1000^{\circ}\text{C}$  (иначе вода гидролизует фторид до  $\text{HF}$ , который оказывает на фторид сильное разлагающее действие). В той же лаборатории предложено использовать эвтектические смеси этих солей. Эвтектика – это смесь двух или нескольких веществ в определенных пропорциях, температура плавления которой постоянна и ниже температур плавления смесей этих же веществ и других пропорциях. Этот способ позволяет снизить температуру плавления смеси, сохраняя при этом скрытую теплоту плавления составляющих эвтектику компонентов, связанную, как было отмечено выше, с температурой плавления этих компонентов. Тепловая характеристика эвтектики из-за влияния теплоты смешения исходных составляющих смеси в итоге несколько меняется. Из девяти упомянутых выше эвтектических смесей отметим следующие три:

наиболее эффективную в отношении теплоты плавления смесь 10; наиболее дешевую, не содержащую лития смесь 12; наиболее легкоплавкую, содержащую  $\text{KF}$  смесь 16.

Составы этих трех эвтектических смесей представлены в табл. 2.

На фиг. 5 приведены другие, более дешевые, но менее эффективные эвтектические смеси, имеющие следующий состав, вес. %:

$\text{NaCl}$	33	
$\text{CaCl}_2$	67	
$\text{NaCl}$	40	
$\text{MgCl}_2$	60	
$\text{NaNO}_3$	7	
$\text{NaNO}_2$	40	"Хайтек"
$\text{KNO}_3$	53	

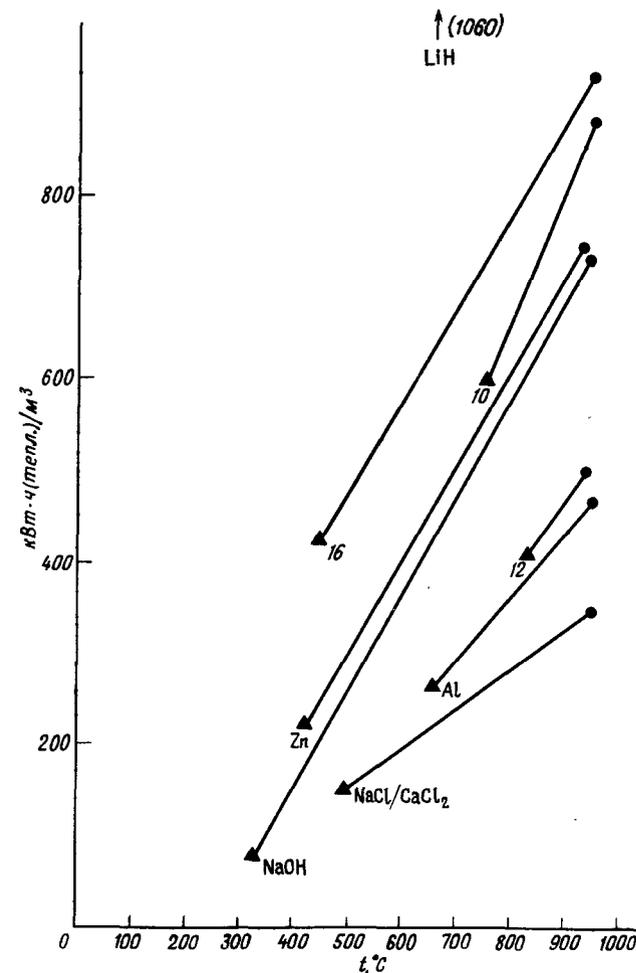
На этой же фигуре указаны чистые соли, использованные для составления упомянутых смесей, а также металлы, среди которых представляет интерес  $\text{Al}$ , и такие вещества, как каустическая сода и состав "Хайтек"

Очевидно, наиболее эффективным теплоаккумулирующим веществом является гидрид лития  $\text{LiH}$ , который целесообразно применять в интервале температур  $680^{\circ}\text{C}$  (температура плавления  $\text{LiH}$ ) —  $800^{\circ}\text{C}$ . При температуре выше  $800^{\circ}\text{C}$  диссоциация гидрида лития на водород и металл становится ощутимой (критические условия диссоциации:

Таблица 2

Составы эвтектических смесей

Номер смеси	Состав, вес. %			
	$\text{LiF}$	$\text{NaF}$	$\text{KF}$	$\text{MgF}_2$
10	67	—	—	33
12	—	75	—	25
16	44	12	40	4



Фиг. 6. Теплоаккумулирующая способность некоторых веществ на единицу объема.

Таблица 3

Затраты на материалы для аккумулярования в расчете на 1 кВт·ч

Материал	Стоимость франц. фр./т	Рабочий интервал, °С		Теплоаккумулирующая способность, кВт·ч/т	Стоимость аккумулярования, франц. фр./ (кВт·ч)
		T <sub>1</sub> (плавл.)	T <sub>2</sub>		
Эвтектика, состав 10	13 700 <sup>1)</sup>	750	950	380	36
NaCl	500	800	900	160	3
Al	4 000	660	960	200	20
Эвтектика NaCl/CaCl <sub>2</sub>	500 (?)	500	950	200	2,5
NaOH	750	320	906	375	2
"Хайтек"	2 500 <sup>2)</sup>	140	450 <sup>3)</sup>	160	16
LiH	15 000 <sup>1)</sup>	680	780 <sup>3)</sup>	1350	11

<sup>1)</sup> Стоимость LiF 20 000 франц. фр./т.

<sup>2)</sup> Стоимость по курсу цен 1974 г. 5 000 франц. фр./т.

<sup>3)</sup> Температура разложения.

716 мм рт. ст. при 825 °С). Однако высокая стоимость (при промышленном производстве ~ 15 000 франц. фр./т), а также необходимость применения герметичных резервуаров для водорода при температуре 800 °С серьезно ограничивают возможность применения этого вещества в системах теплового аккумулярования.

На фиг. 6 представлены теплоаккумулирующие способности некоторых веществ (на единицу объема). Эти данные представляют определенный интерес для разработки различного типа небольших аккумуляторных установок или для крупных дорогостоящих резервуаров-аккумуляторов. Следует отметить, что такие вещества, как NaOH и Zn, по суммарной теплоаккумулирующей способности (плавление + перегрев) вполне конкурентоспособны с фтористыми эвтектическими смесями.

В качестве примера в табл. 3 указаны порядки величин затрат на материалы без учета затрат на резервуары и оборудование, входящее в систему аккумулярования. Эти данные могут быть использованы при рассмотрении экономики теплового аккумулярования, приведенном выше. Показано, что при разработке аккумулярующих систем на период облачности, для выравнивания выработки электроэнергии и для выработки электро-

энергии в часы пик могут быть найдены вполне приемлемые решения. Что касается сезонного аккумулярования, то при разработке таких систем, по всей вероятности, удовлетворительные технологические и экономические решения придется искать в области химии. В качестве примера укажем, что для производства тонны метанола на основе органических соединений необходима тепловая энергия в количестве ~ 3000 кВт·ч.

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

## Оптимизация размеров основных элементов солнечной энергетической станции для обеспечения минимальной стоимости энергии

Ж.-Л. Бой-Маркотт, А.Потирон<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Преобразование солнечной энергии осуществляется с помощью освоенных средств, но при этом возникает экономическая проблема, обусловленная высокой стоимостью энергии. Целью данной работы является определение минимальной стоимости энергии путем оптимизации размеров различных элементов станции.

Выбор взаимосвязанных вариантов для элементов станции был осуществлен, исходя из технических и экономических соображений. Затем для окончательной компоновки станции была проведена оптимизация комплекса различных параметров по условию достижения минимума стоимости 1 кВт·ч.

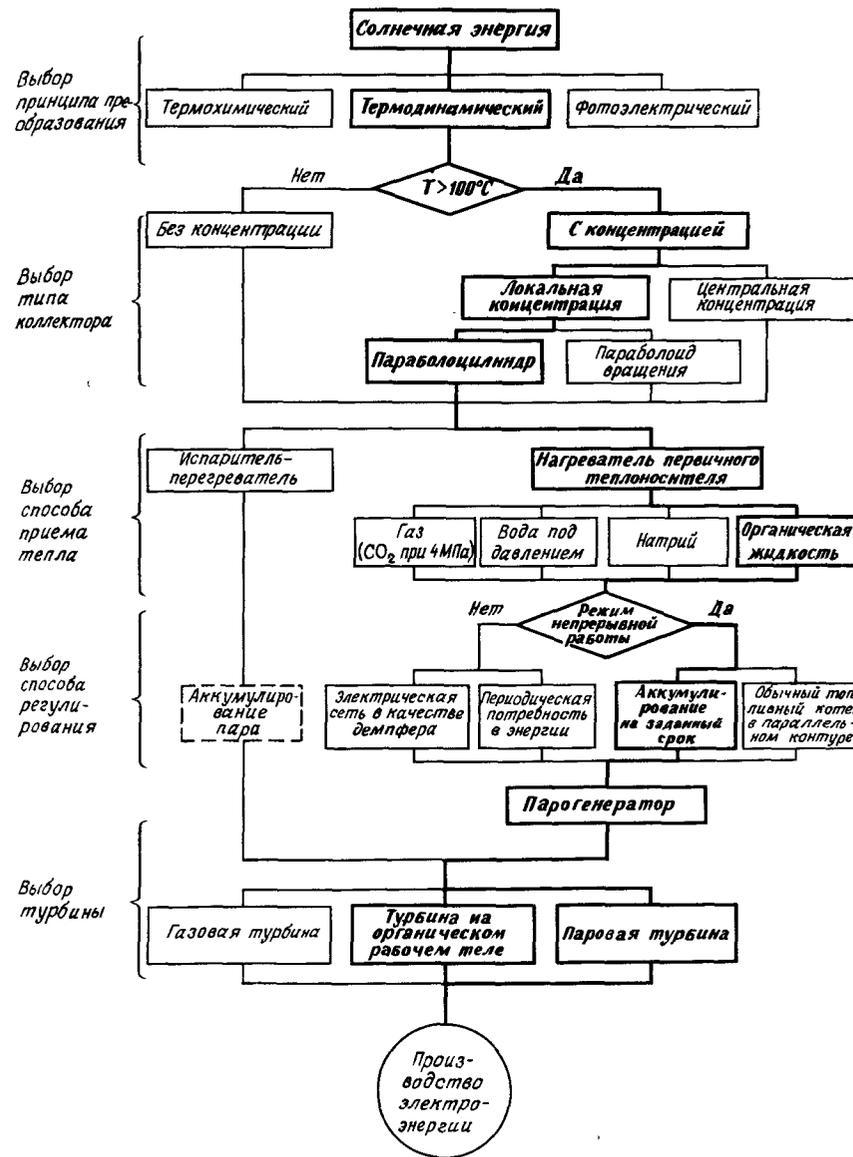
### ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ КОМПОНОВКИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

На фиг. 1 приведена блок-схема, иллюстрирующая последовательность выбора основных элементов станции. Рассмотрим некоторые из них.

#### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИЛИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

На современном этапе развития технологии фотоэлектрических преобразователей стоимость 1 кВт·ч энергии, полученного с помощью кремниевых фотоэлементов, составляет  $\approx 3$  фр., а в случае тер-

<sup>1)</sup> J.-L. Boy-Marcotte, A. Potiron, Département Transferts de Chaleur et de Masse de la Société BERTIN et Cie.



Фиг. 1. Блок-схема солнечной энергетической станции.

модинамического преобразования 0,2 – 0,7 фр. (стоимость 1 кВт·ч на атомной станции составляет 0,06 фр.).

В связи с этим был выбран термодинамический метод.

### КОЛЛЕКТОРЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Плоские коллекторы без концентрации рассматриваться не будут, поскольку даже при наличии селективных теплоприемных и прозрачных поверхностей трудно надеяться на среднегодовое значение к.п.д. коллектора при 120 °С выше 30%. Кроме того, при такой температуре реальный к.п.д. термодинамической машины не может быть выше 10%. В этих условиях низкий термодинамический к.п.д. компенсируется большой площадью коллекторов, что приводит к недопустимо высокой стоимости 1 кВт·ч.

Концентрацию потока солнечного излучения можно существенно повысить, если применить схему, в которой поле отражателей, снабженных системой слежения за солнцем с двумя степенями свободы, фокусирует излучение на котел, установленный на башне в центре этого поля. В нашу задачу не входит рассмотрение такой схемы, поскольку оптимизационные исследования станций подобного типа уже проводились.

Рассмотрим установку с "локальной" концентрацией, представляющую собой группу параболоцилиндрических отражателей, вращающихся при слежении за Солнцем вокруг одной оси и имеющих трубчатые приемники, совмещенные с фокальной линией. Выбор такой схемы сделан, исходя из следующих соображений:

вращение вокруг одной оси позволяет уменьшить стоимость коллектора при уменьшении количества получаемой энергии всего на 5% по сравнению с системой слежения путем вращения вокруг двух осей;

концентрация в данном случае названа "локальной", поскольку трубчатый приемник расположен вблизи отражателя; это позволяет осуществлять регулировку зеркал и фокусировку установки на солнце с меньшей точностью, что приводит к снижению стоимости коллектора, в состав которого входят отражатель, опорные конструкции и система слежения за солнцем;

уменьшение точности регулировки зеркал ограничивает концентрацию величиной  $\sim 30$ ; такая концентрация обеспечивает повышение рабочей температуры до 250 °С при среднегодовом значении к.п.д. 45 – 55%.

### СИСТЕМА ПРИЕМА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В установке, работающей по принципу "локальной" концентрации, тепловоспринимающим элементом является труба.

Для снижения расхода электроэнергии на циркуляцию теплоносителя и максимального уменьшения диаметра применяемых труб в качестве первичного теплоносителя целесообразно применять не газ, а жидкость. Реализация схемы, в которой трубчатый теплоприемник коллектора работает как испаритель-перегреватель, требует решения сложных задач регулирования.

Выбор теплоносителя связан с уровнем рабочей температуры. Натрий исключается, так как его использование при температуре  $\sim 300^\circ\text{C}$  связано с применением дорогой технологии. Вместо воды под давлением лучше применять органический теплоноситель. В этом случае уменьшается масса трубопроводов по сравнению с требуемой при работе с давлением порядка нескольких сотен килопаскалей.

### РЕЖИМЫ РАБОТЫ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Случайные и резкие изменения режима поступления солнечной радиации в течение одного дня, нескольких дней или года выдвигают, с одной стороны, проблему работы машин в нестационарном режиме и, с другой стороны, проблему аккумуляции энергии. В связи со сказанным можно рассмотреть два режима работы станции.

*Режим прерывистой работы.* Станция в этом случае может работать с перерывом либо в соответствии с графиком потребления, либо за счет включения в крупную энергосеть, играющую роль демпфера.

*Режим непрерывной работы.* Станция должна быть оснащена для этого устройством для теплового аккумуляции, которое может быть осуществлено с помощью теплоносителя на срок от нескольких часов до 1 сут. Для этой цели подходит органический теплоноситель, так как его можно держать в резервуаре при атмосферном давлении.

Другой способ обеспечения непрерывной работы заключается в сочетании поля солнечных коллекторов со станцией классического типа. Это дает экономию топлива. Преимуществом такого решения является увеличение срока амортизации капиталовложений на турбогенератор до 7000 ч в год вместо 2000 ч.

### ВЫБОР ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Поскольку выработка электроэнергии на станции пропорциональна к.п.д. турбогенератора, следует ориентироваться на турбину с повышенной эффективностью.

Достижение этой цели возможно при использовании двух циклов: на водяном паре с перегревом и на органической жидкости.

Повышение к.п.д. пароводяного цикла требует применения перегрева. Действительно, в интервале температур 35 – 300 °С к.п.д. цикла Карно составляет 46%, а к.п.д. реального цикла в этих условиях без перегрева снижается до 20%, с введением трех перегревов повышается до 25%, с десятью перегревами – до 32%.

При использовании традиционных органических жидкостей повышение к.п.д. достигается иным путем. В интервале температур 125 – 300 °С можно получить без перегрева к.п.д., равный 27%. При этом целесообразно снизить температуру холодного источника до значения, близкого к температуре окружающей среды, либо с помощью второй термодинамической жидкости с рабочим интервалом температур 30 – 110°С, либо с помощью термодинамической жидкости с рабочим интервалом температур 30 – 250°С.

Механический к.п.д. турбогенератора изменяется от 65% при электрических мощностях  $\sim 100$  кВт до 80% при электрической мощности 1 МВт. Учитывая, что к.п.д. турбогенератора определенным образом связан с величиной требуемой площади зеркал гелиостатов, а следовательно, и со стоимостью 1 кВт · ч, целесообразно выбирать турбогенератор с высоким к.п.д.

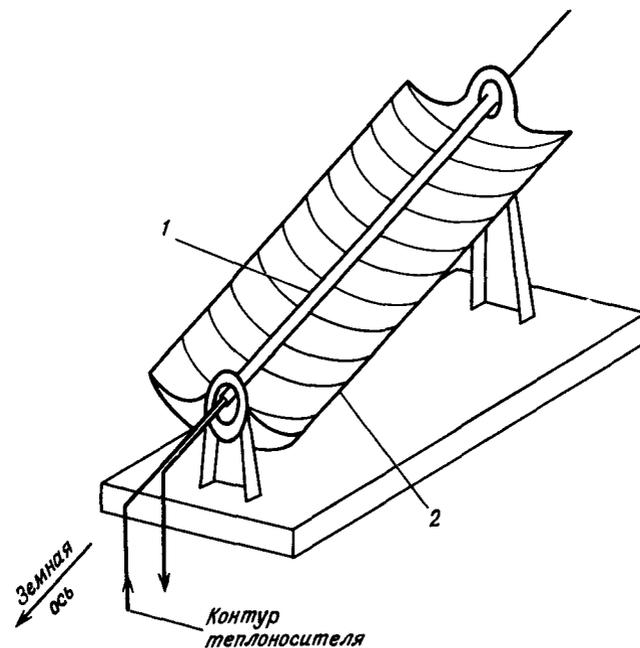
### ОПТИМИЗАЦИЯ СТАНЦИИ

После выбора принципиальных решений была построена расчетная модель станции для оптимизации размеров различных ее элементов.

#### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СТАНЦИИ

Расчет производится по следующим этапам:

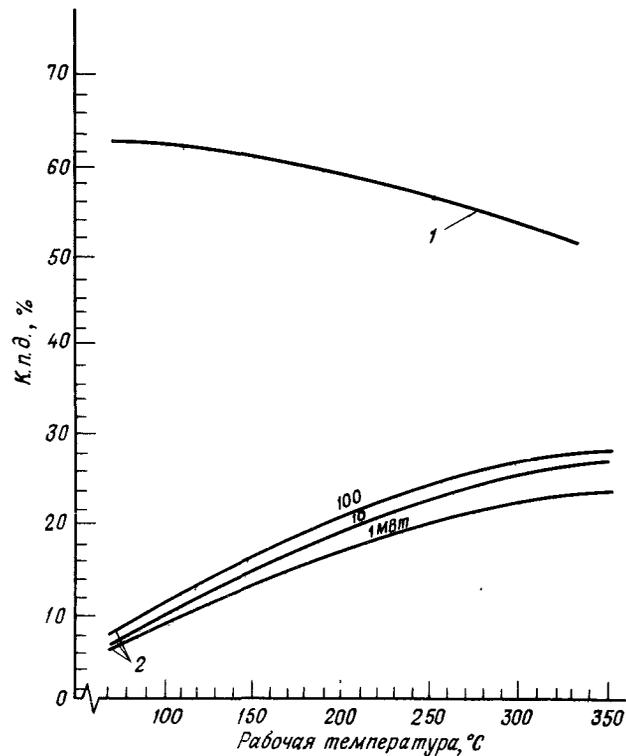
- расчет прихода солнечного излучения в функции географических координат места постройки станции, времени года, часа суток и местных метеоусловий (влажность, мутность атмосферы, продолжительность солнечного сияния, приход солнечной энергии по данным измерений).



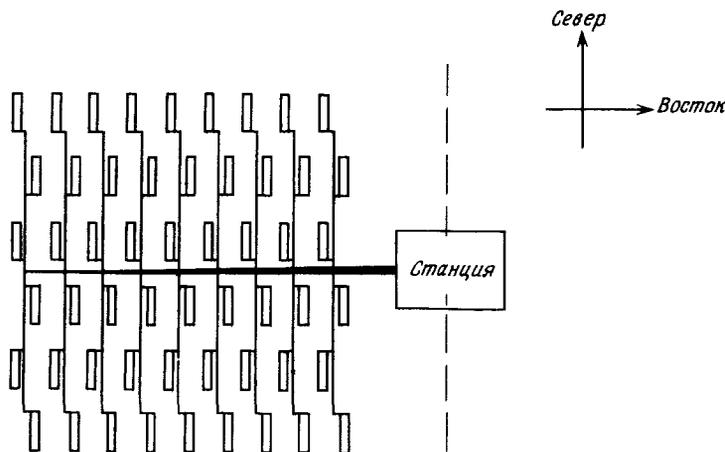
Фиг. 2. Принципиальная схема коллектора.  
1 – цилиндрическая теплопоглощающая поверхность; 2 – параболический отражатель, вращающийся вокруг одной оси.

В расчете учитывается взаимное затенение коллекторов.

- Определение среднегодового значения к.п.д. коллектора в функции рабочей температуры. По заданному уровню температур 200 – 300 °С выбирается система концентрирования, состоящая из параболических отражателей, вращающихся при слежении за видимым движением Солнца вокруг одной оси. Единичный отражатель (фиг. 2) имеет поверхность 20 м<sup>2</sup>. Его среднегодовой к.п.д. в функции рабочей температуры, определяемый по специальной подпрограмме, представлен на фиг. 3.
- Определение размеров поля коллекторов, исходя из требуемой электрической мощности и размеров единичного коллектора. Размещение коллекторов показано на фиг. 4. Трубопроводы выбраны по стандартам труб для конкретных рабочих характеристик (максимальный расход в трубах, максимальное давление, разность температур на входе и выходе из котла).



Фиг. 3. К.п.д. коллектора и турбогенератора.  
1 — среднегодовой к.п.д. коллектора; 2 — к.п.д. турбогенератора.



Фиг. 4. Схема расположения коллекторов.

- Расчет тепловых потерь системы коллектор — парогенератор для дневного и ночного времени в зависимости от толщины тепловой изоляции. В расчете учитывались потери температурного напора между теплоприемной поверхностью котла и теплоносителем, а также снижение температуры в парогенераторе.
- Расчет гидравлических потерь при максимально допустимой скорости теплоносителя для часового и суточного промежутков времени. Результаты расчетов были затем осреднены за год.
- Расчет к.п.д. турбогенератора в функции рабочей температуры и мощности (фиг. 3).

Стоимости назначались, исходя из обычных цен на промышленные изделия:

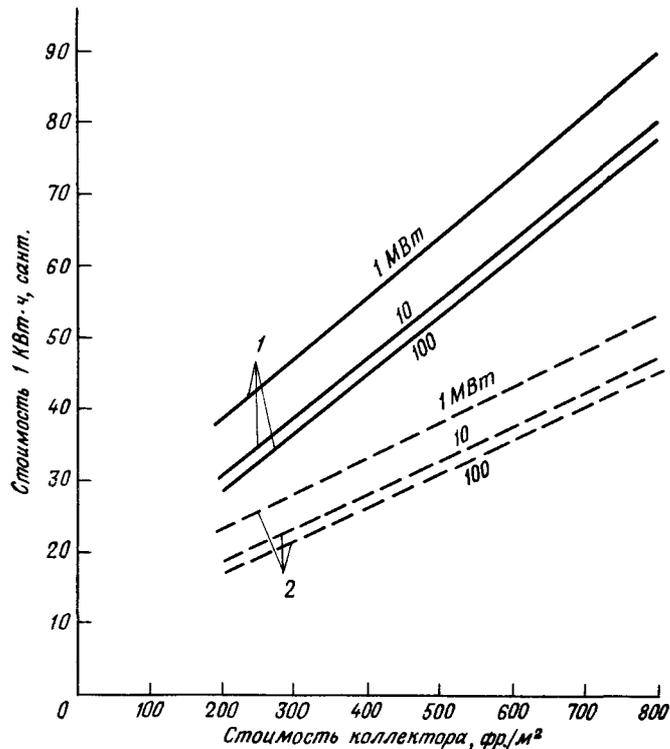
Коллектор	200 – 600 фр./м <sup>2</sup> (с учетом стоимости отражателя, опорных конструкций и системы слежения за видимым движением Солнца)
Трубопроводы	14,5 фр./кг
Изоляция	2000 фр./м <sup>3</sup>
Территория	1,5 фр./м <sup>2</sup>
Теплоноситель	6 фр./кг
Турбогенератор	600 фр./кВт при мощности 100 МВт, 1070 фр./кВт при 10 МВт, 1900 фр./кВт при 1 МВт
Годовая амортизация	0,10

Параметрами оптимизации являются:

- соотношение между отражающей поверхностью и территорией;
- максимальный расход теплоносителя;
- толщина теплоизоляции;
- максимальная температура цикла (ниже 350 °C);
- повышение температуры теплоносителя на участке между входом и выходом котла.

#### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ

Зависимость стоимости 1 кВт·ч от стоимости коллектора. Стоимость коллектора в настоящее время является наименее известной величиной по сравнению со стоимостью других элементов станции.



Фиг. 5. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от стоимости коллектора. 1 — солнечный климат в районе станции Карпентр (Франция); 2 — солнечный климат в сухой тропической зоне.

Она может составлять до 70% общей стоимости станции. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от стоимости коллектора определялась для средиземноморского климата (юг Франции) и для сухого тропического климата (фиг. 5).

Эти стоимости рассматривались для пиковых мощностей 1, 10 и 100 МВт, что соответствует годовому производству электроэнергии 1, 10 и 100 млн. кВт·ч для климата юга Франции и 1,7, 17 и 170 млн. кВт·ч для сухого тропического климата.

Из фиг. 5 видно, что для пиковой электрической мощности 10 МВт при стоимости коллектора 200 – 300 фр./м<sup>2</sup> цена электроэнергии, получаемой в условиях сухой тропической зоны, будет составлять 0,2 фр./кВт·ч).

Распределение стоимости между различными элементами станции. Минимальной стоимости 1 кВт·ч соответствуют следующие значения параметров оптимизации:

Пиковая электрическая мощность	10 МВт
Климат	Сухой тропический
Удельная стоимость коллектора	200 фр./м <sup>2</sup>
Отражающая поверхность/площадь территории	0,4
Максимальная скорость теплоносителя	8 м/с
Рабочая температура	250 °С
Толщина изоляции труб (стекловата)	5 см
Повышение температуры теплоносителя в коллекторе	60 °С
Годовое производство электроэнергии	17 · 10 <sup>6</sup> кВт·ч

В табл. 1 приведены данные по распределению стоимости между различными элементами станции при следующих значениях параметров:

Пиковая мощность	10 МВт
Климат	Сухой тропический
Удельная стоимость коллектора	200 фр./м <sup>2</sup>

Эти расчетные значения были получены при условии, что в схеме станции используется высокоэффективный турбогенератор с к.п.д., равным 20%.

Данные по распределению стоимости для обычного турбогенератора с к.п.д., равным 12%, приведены в табл. 2.

Таким образом, применяя менее эффективный турбогенератор, можно несколько снизить его стоимость, но это не компенсирует соответствующего увеличения стоимости коллектора. Тем самым подтверждается целесообразность выбора турбогенератора с возможно более высоким к.п.д.

Стоимость теплового аккумулирования на суточный срок, осуществляемого с помощью теплоносителя, заключенного в теплоизолированной емкости, зависит от графика потребления энергии в течение суток. При условии, что в рабочие часы аккумулируется половина произведенной энергии, аккумулирование увеличивает стоимость 1 кВт·ч на ~10 сант. Эту стоимость в дальнейшем следует сравнивать со стоимостью других видов аккумулирования. Заметим, что объем аккумулятора, отнесенный в выработку полезной электроэнергии, обратно пропорционален производительности турбогенератора.

Таблица 1

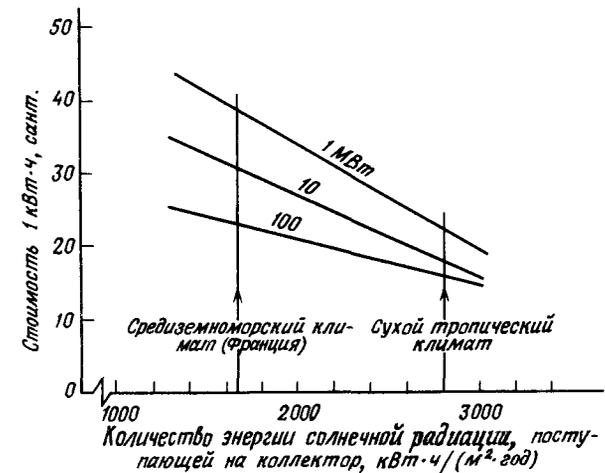
Элемент системы	Стоимость 1 кВт·ч	
	франц. сант.	цент США
Коллектор	9,6	2,2
Трубопроводы		
трубы	1,9	0,43
изоляция	1,1	0,25
теплоноситель	0,3	0,07
территория	0,2	0,04
Турбогенератор	5,3	1,2
Всего	18,4	4,2

Таблица 2

Элемент системы	Стоимость 1 кВт·ч	
	франц. сант.	цент США
Коллектор	16,0	3,7
Трубопроводы	5,8	1,3
Турбогенератор	3,0	0,7
Всего	24,6	5,7

#### ИЗМЕНЕНИЕ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

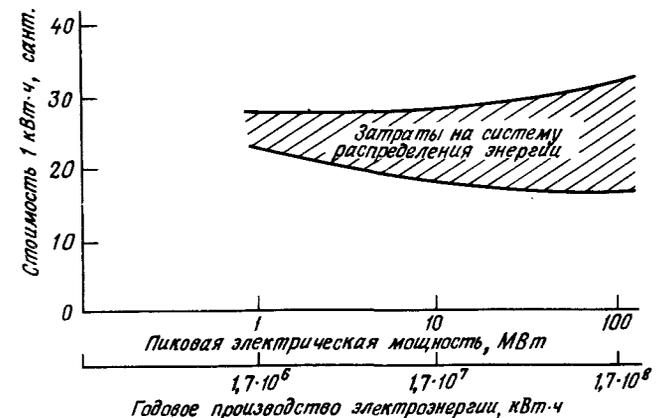
На фиг. 6 показано изменение стоимости 1 кВт·ч электрической энергии при различных мощностях станции в зависимости от прихода прямой солнечной радиации, падающей по нормали к тепловоспринимающей поверхности. Этот приход в средиземноморских районах юга Франции составляет  $\sim 1660$  кВт·ч ( $\text{м}^2 \cdot \text{год}$ ) и достигает  $3000$  кВт·ч ( $\text{м}^2 \cdot \text{год}$ ) в зонах сухого тропического климата. Очевидно, что для рассматриваемых мест стоимость 1 кВт·ч обратно пропорциональна количеству поступающей солнечной радиации.



Фиг. 6. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от количества энергии поступающей солнечной радиации.  
Стоимость коллектора  $200$  фр./ $\text{м}^2$ .

#### ИЗМЕНЕНИЕ СТОИМОСТИ ЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ СТАНЦИИ

Из фиг. 7 видно, что стоимость вырабатываемого станцией 1 кВт·ч уменьшается с увеличением пиковой электрической мощности



Фиг. 7. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от мощности станции.  
Стоимость коллектора  $200$  фр./ $\text{м}^2$ ; солнечный климат в сухой тропической зоне.

от 1 до 100 МВт. Изменение же стоимости распределения энергии имеет в этом случае обратный характер.

Поскольку стоимость распределения энергии для станции мощностью 100 МВт равна 15 сант./кВт·ч, для станции мощностью 10 МВт — 10 сант./кВт·ч и для станции мощностью 1 МВт — 5 сант./кВт·ч, стоимость 1 кВт·ч энергии, поступающей к потребителю, с увеличением мощности станции несколько возрастает. Это увеличение мало, и можно считать, что стоимость 1 кВт·ч станции мощностью 1 — 10 МВт практически постоянна.

Все сказанное выше подтверждает интуитивное мнение, что солнечная радиация является рассеянной, и нет смысла стремиться к высокой степени ее концентрации. Отметим, однако, что приведенные здесь цифры могут изменяться в зависимости от стоимости распределения энергии в тех или иных условиях.

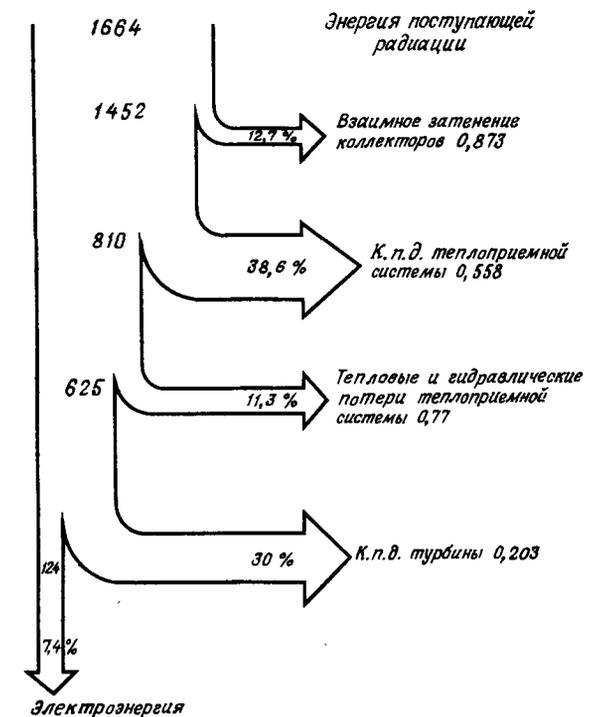
#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС СТАНЦИИ НА ЕДИНИЦУ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА

На фиг. 8 указаны основные потери энергии по отношению к энергии падающей радиации для станции с оптимальной электрической мощностью 10 МВт (средиземноморский климат юга Франции). Показано, что основные потери связаны с работой коллектора и турбины. Соотношение режимных параметров этих двух элементов системы определяет уровень рабочей температуры. При мощности 10 МВт эффективность переноса тепловой энергии теплоносителем от коллектора к парогенератору (т.е. мощность парогенератора, относящаяся к тепловой мощности на выходе из коллектора) составляет 0,77.

#### ВЫВОДЫ

Результаты данной работы позволяют сделать вывод, что расчет солнечной теплоэлектрической станции должен производиться с учетом всех элементов системы, состоящей из коллектора, трубчатого теплоприемника, аккумулятора и турбогенератора.

Оптимизация с целью достижения минимальной стоимости 1 кВт·ч производится на основе следующих исходных положений: применяются коллекторы с "локальной" концентрацией (параболицилиндрические отражатели); слежение за солнцем производится путем вращения вокруг одной оси;



Фиг. 8. Энергетический баланс станции в киловатт-часах на 1 м<sup>2</sup> коллектора. Солнечный средиземноморский климат; пиковая электрическая мощность 10 МВт.

перенос тепловой энергии осуществляется с помощью органического теплоносителя; аккумулярование осуществляется с помощью применяемого в цикле теплоносителя; турбогенератор имеет высокий к.п.д.; в качестве рабочего тела используется либо органическое вещество, либо водяной пар с применением многократного перегрева.

Оптимальная рабочая температура составляет 250 °С.

В табл. 3 приведена стоимость 1 кВт·ч для пиковой электрической мощности 10 МВт.

Согласно полученным результатам, для достижения стоимости 1 кВт·ч, сравнимой со стоимостью электроэнергии, производимой

Таблица 3

Стоимость 1 м <sup>2</sup> коллектора		Стоимость 1 кВт·ч			
		климат юга Франции		сухой тропический климат	
франц. фр.	долл. США	франц. сант.	цент США	франц. сант.	цент США
		200	50	31	7,8
400	100	47	11,8	28	7
600	150	63	15,8	38	9,5

и распределяемой традиционными методами, необходимо, чтобы стоимость коллектора составляла 200 – 400 фр./м<sup>2</sup>.

Аналогичным методом с подобными предпосылками в отношении стоимости основных элементов следует проводить систематические исследования и других схем солнечных станций. Это позволит выявить области применения каждой из таких схем.

### Библиография

Powell J.C. et al., Dynamic Conversion of Solar Generated Heat to Electricity, Honeywell Inc., Minneapolis, Minnesota, August 1974.

## Влияние геометрии размещения коллекторов на технико-экономические показатели системы преобразования солнечной энергии постоянной мощности

Б. Девен, Р. Плуаяр, Ж. Колом<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

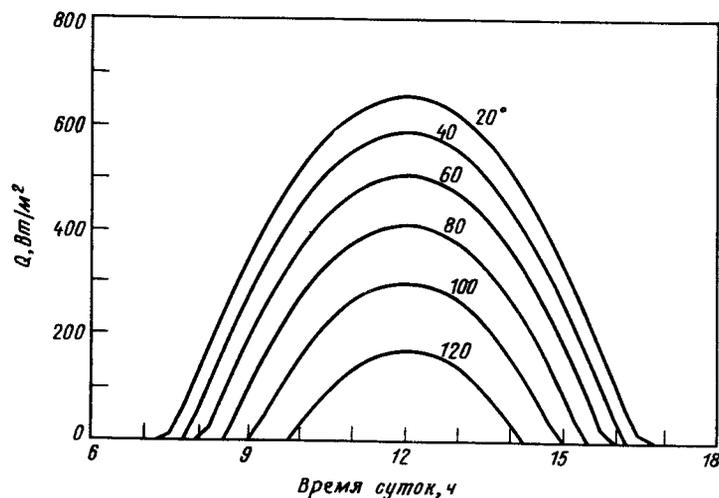
Если требуется создать солнечную установку с неподвижными коллекторами, которая должна работать в течение суток с постоянной мощностью, то необходимо решить задачи, связанные с непостоянством прихода солнечной радиации в течение дня из-за изменения высоты солнца над горизонтом. Временные колебания поступления солнечной радиации из-за небольшой облачности могут компенсироваться тепловой инерцией первичных контуров, однако в условиях циклического изменения поступления радиации с периодом 24 ч может потребоваться аккумулярование в таких масштабах, которые на практике трудно реализовать. В этом случае можно попытаться улучшить работу солнечной термодинамической системы путем применения дополнительных неподвижных коллекторов, специально сориентированных для наиболее эффективного приема солнечной радиации в утренние и вечерние часы.

Это преимущество, связанное с более регулярной и более длительной работой установки, частично утрачивается из-за повышения стоимости системы коллекторов. Целью настоящей работы является попытка численно оценить эти потери.

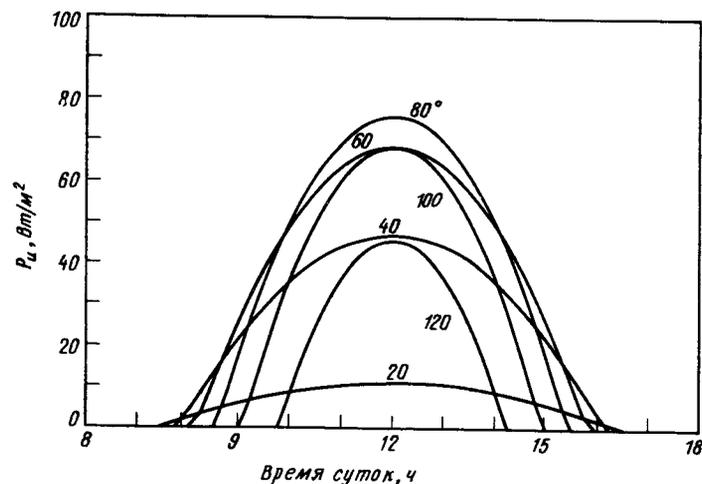
### ОПТИМАЛЬНАЯ ПЛОЩАДЬ СИСТЕМЫ ПЛОСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ

На фиг. 1 показано изменение удельной тепловой мощности системы плоских коллекторов, ориентированных на юг и наклоненных к горизонтальной плоскости под углом, равным географической широте места (с точностью до нескольких градусов, если необходимо учесть

<sup>1)</sup> B. Devin, R. Ployart, J. Colomes, Commissariat à l'énergie atomique, Cen-Saclay B.P. No 2, Gif-sur-Yvette, France.



Фиг. 1. Изменение удельной тепловой мощности плоских коллекторов типа N2N, ориентированных на юг и наклоненных под углом, равным географической широте места.



Фиг. 2. Полезная удельная тепловая мощность коллектора типа N2N,  $T_f = 15^\circ\text{C}$ .

влияние солнцестояния). Расчеты проводились для коллектора типа N2N (неселективный, с двойным остеклением) при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$  и максимальной плотности потока прямой сол-

нечной радиации в полдень (в равноденствие), равной  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , для высокогорных районов. Приход солнечной радиации под углом к коллектору влияет на эффективность ее прохождения через стекла. Это было учтено в расчетах с использованием уравнений, приведенных в журнале французской Ассоциации по исследованию и использованию солнечной энергии<sup>1)</sup>

Параметром для кривых, приведенных на фиг. 1, является температура на выходе из коллектора. Это основная температура термодинамического цикла для простых низкотемпературных систем.

Каждому значению выходной температуры соответствует некоторая оптимальная полезная тепловая мощность, которая с учетом температуры холодного источника термодинамического цикла рассчитывается по выражению

$$P_u = Q \frac{T_0 - T_f}{T_0}$$

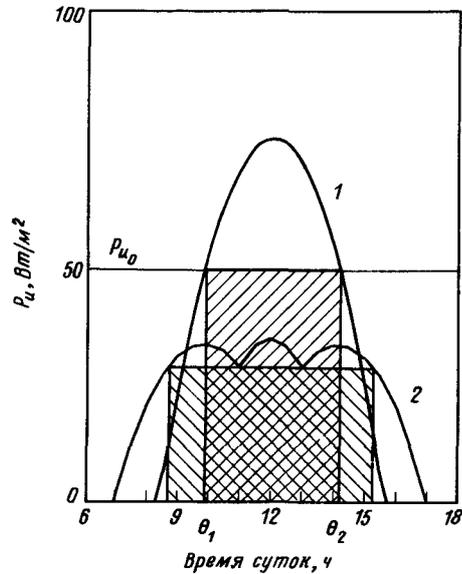
и представлена на фиг. 2.

Более детального расчета в данном случае не требуется. При условии, что система работает с постоянной мощностью  $W_s$  при постоянной температуре  $T_0$ , энергия, получаемая в течение дня на выходе из коллектора, может быть представлена заштрихованным вертикальным прямоугольником (фиг. 3). В отсутствие аккумулирующего устройства полуденный пик не используется, так как система преобразования энергии (например, турбина) на практике не допускает значительных перегрузок.

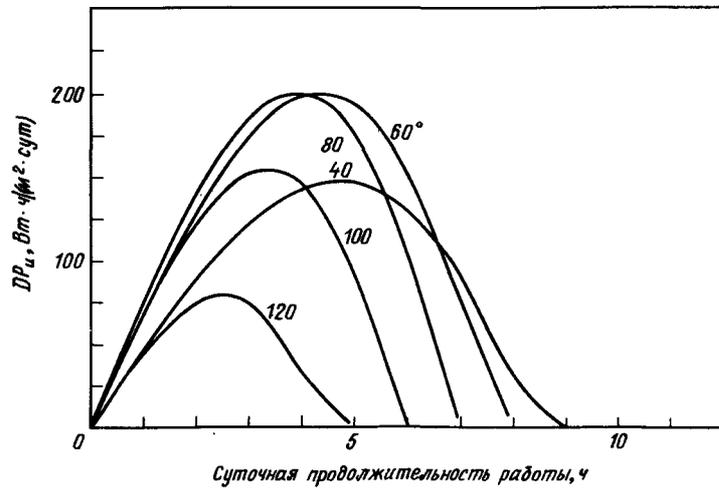
На фиг. 4 показано изменение величины площади заштрихованного прямоугольника (фиг. 3) в зависимости от продолжительности работы  $\Theta_2 - \Theta_1$  при разных температурах на выходе из системы плоских коллекторов. Оптимальная температура в рассматриваемом случае равна  $70^\circ\text{C}$ , а оптимальная продолжительность работы обычно составляет  $\sim 4$  ч.

На практике стремятся к 6-часовой продолжительности работы, что приводит при заданной номинальной мощности к излишнему увеличению площади коллекторов, а следовательно, к ухудшению экономических показателей.

<sup>1)</sup> Cahier No. 4 de l'AFEDES.



Фиг. 3. Полезная тепловая мощность плоской системы (1) и двугранной системы с углом  $\beta = \pm 45^\circ$  (2) при температуре на выходе  $70^\circ\text{C}$  ( $T_f = 20^\circ\text{C}$ ).



Фиг. 4. Удельная выработка тепловой энергии при данной температуре в функции времени работы. Система плоских коллекторов,  $T_f = 20^\circ\text{C}$ .

ОПТИМИЗАЦИЯ

Оба семейства кривых (фиг. 3 и 4) позволяют определить площадь плоских коллекторов для данной термодинамической системы. Действительно, зная выходную мощность системы  $W_s$  и ее к.п.д.  $\eta_g$ , который составляет определенную долю к.п.д. цикла Карно, входящего в выражение для  $P_u$ , найдем полную площадь коллекторов

$$S_{T_0} = \frac{W_s}{\eta_g} \frac{1}{P_u T_0} .$$

Вводя переменную

$$\xi \equiv \frac{S \eta_g}{W_s} \equiv \frac{1}{P_u} \text{ м}^2/\text{кВт},$$

можно построить кривую продолжительности работы системы в зависимости от удельной (по тепловой мощности) площади плоских коллекторов при заданной температуре (фиг. 5).

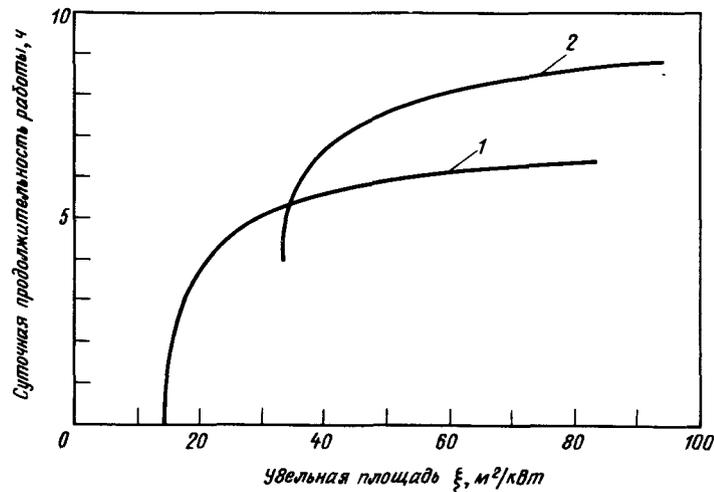
Можно отметить пологий характер полученной кривой, который был бы еще более резко выражен для коллекторов с более узкой угловой характеристикой, чем у простого коллектора с двойным остеклением (например, коллектора Франсия).

Зависимость удельной полезной энергии  $DP_u$  от удельной площади поверхности системы коллекторов показана на фиг. 6. По абсциссе отложена переменная  $\xi$ , а по ординате – величина

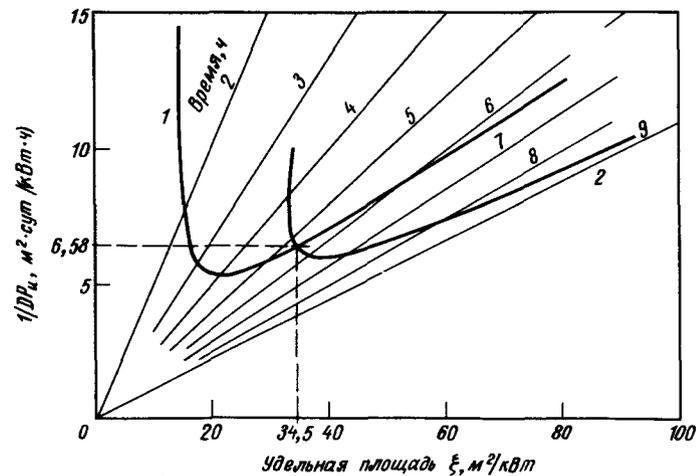
$$\frac{1}{DP_u} \equiv \frac{\xi}{D} \equiv \frac{S \eta_g}{W_s} \frac{1}{D} \text{ м}^2 \cdot \text{сут}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Параметрическими на фиг. 6 являются изочасовые прямые с наклоном  $1/D$ .

Выбор площади поверхности системы плоских коллекторов определяется условием оптимальной амортизации капиталовложений в коллекторы, иначе говоря, минимальным значением  $\xi/D$  (фиг. 6). Следует отметить, что эти условия соответствуют малым площадям поверхности коллектора и малой продолжительности работы. Отсюда следует, что бесполезно увеличивать поверхность коллекторов в стремлении обеспечить приемлемую продолжительность их работы в течение дня.



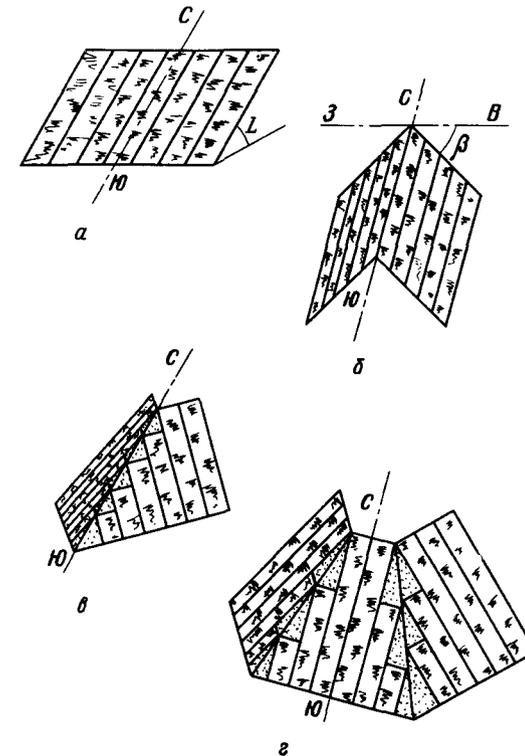
Фиг. 5. Зависимость продолжительности работы системы плоских коллекторов от удельной площади при температуре  $70^\circ\text{C}$ .  
1 — плоская система; 2 — дельта-система,  $\beta = 45^\circ$ .



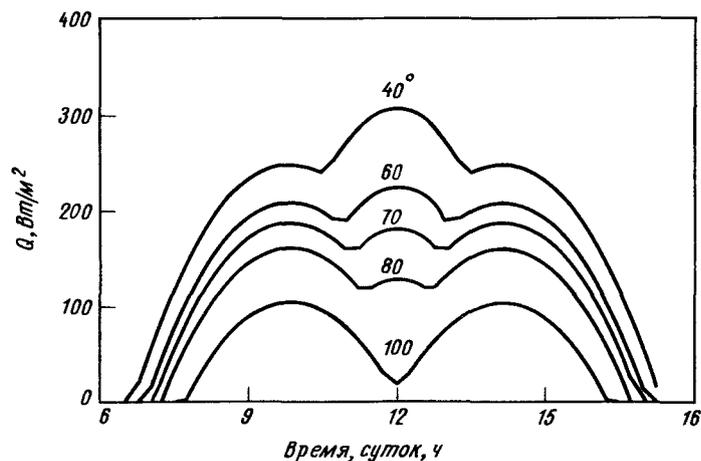
Фиг. 6. Зависимость удельной полезной энергии от удельной площади поверхности системы коллекторов,  $T_0 = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 15^\circ\text{C}$ .  
1 — плоская система; 2 — дельта-система,  $\beta = 45^\circ$ .

## ДЕЛЬТА-СИСТЕМА

Из фиг. 3 видно, что утренние и вечерние часы являются для коллектора неэффективными, поскольку при пологом падении солнечных лучей отражение их стеклом значительно и, кроме того, существенно уменьшается облучаемая поверхность коллектора. Это привело к мысли создать систему коллекторов, разделенную на две или более групп, образующих с начальной плоскостью "юг" угол  $\beta$ . Воображаемая ось поворота этих плоскостей параллельна полярной оси (фиг. 7). Возможны различные варианты подобной "выпуклой" системы в зависимости от желаемого графика снабжения тепловой энергией в течение дня. В качестве примера были рассчитаны характеристики системы, состоящей из двух одинаковых секций, в зависимости от времени дня при разных рабочих температурах. Результаты показаны на фиг. 8.



Фиг. 7. Системы коллекторов.  
а — плоская система; дельта-системы: б — двугранная, в — двугранная с опорой основания на землю, г — многогранная с центральной частью; L — широта.



Фиг. 8. Удельная тепловая мощность двугранной системы коллекторов типа N2N ( $\beta = 45^\circ$ ) в течение дня при различных рабочих температурах.

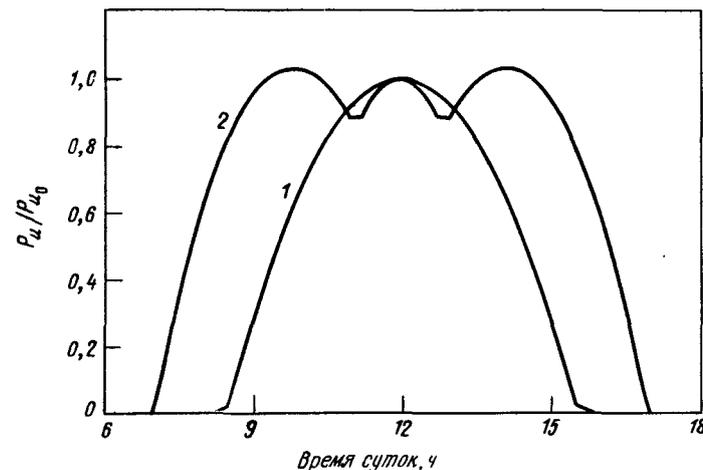
Удельная тепловая мощность  $Q$  является суммой вкладов всех элементов системы при температуре  $T_0$ . При этом термостатический клапан изолирует секцию, которая в данный момент не может поставлять энергию при заданной температуре (т.е.  $T_i < T_0$ ). Таким же путем, как это делалось ранее, получены кривые полезной мощности  $P_u$ . На фиг. 3 на характеристику системы плоских коллекторов наложена характеристика двугранной системы с той же площадью поверхности и с углом  $\beta$ , равным  $45^\circ$ , обеспечивающим наилучшие результаты по выработке тепловой энергии.

Наиболее показательным является сравнение относительных полезных удельных тепловых мощностей  $P_u/P_{u, \max}$  для плоской и двугранной систем (фиг. 9).

При более высоких значениях угла наклона  $\beta$  характеристика двугранной системы к середине дня заметно ухудшается, что можно компенсировать установкой в системе центрального элемента соответствующих размеров (фиг. 7).

#### СРАВНЕНИЕ С ПЛОСКОЙ СИСТЕМОЙ

Для двугранной системы были проведены такие же расчеты, как и для плоской. На фиг. 5 и 6 приведены соответствующие кривые, относящиеся к плоской и двугранной системам с углом наклона  $45^\circ$ .



Фиг. 9. Относительная полезная удельная тепловая мощность для плоской (1) и двугранной (2) систем,  $T_0 = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 15^\circ\text{C}$ .

По виду кривых можно отметить следующее:

1. Наличие нейтральной точки, где обе системы равноценны. Координаты этой точки:  $\xi = 34,5 \text{ м}^2/\text{кВт}$ ,  $\xi/D = 6,58 \text{ м}^2 \cdot \text{сут}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ ,  $D \approx 5 \text{ ч } 24 \text{ мин}$ .
2. Эквивалентность минимальных удельных энергетических поверхностей систем.
3. Отношение удельных площадей поверхностей коллекторов при заданной мощности, равное 2:1.
4. Отношение оптимальных периодов работы систем, равное 2:1. Эти результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Минимальные значения параметров сравнения

Система	$\xi$ , м <sup>2</sup> /кВт	$\xi/D$ , м <sup>2</sup> · сут/(кВт · ч)	$D$ , ч
Плоская	21,40	5,27	4,06
Дельта	38,8	6,00	6,47

#### ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Любая солнечная энергетическая установка, состоящая из системы коллекторов и термодинамического преобразователя, может быть охарактеризована некоторым коэффициентом, представляющим собой

отношение капиталовложений на сооружение необходимого количества коллекторов требуемой производительности к энергии, произведенной в течение дня. Этот коэффициент мало отличается по величине от более полного коэффициента, учитывающего также эксплуатационные расходы и амортизацию капиталовложений, поскольку для солнечной установки отсутствует обычно существенная "топливная" составляющая затрат, пропорциональная *суточной энергетической производительности*.

Действительно, площади *поверхности коллекторов* пропорциональны:

амортизация капиталовложений на сооружение коллекторов и опор, освоение территории и на приобретение соответствующего оборудования;  
зарплата обслуживающего персонала;  
расходы на запасные части и материалы (стекло, дюрит, антифриз и т.д.);

а *установленной мощности (кВт)* пропорциональны:

амортизация капиталовложений на теплообменники, тепловую машину, насос или генератор, скважину или распределительную сеть;  
зарплата обслуживающего персонала;  
расходы на запасные части.

Обозначим через  $k$  стоимость  $1 \text{ м}^2$  коллекторов с учетом расходов на их эксплуатацию в течение суток, а через  $h$  приведенную к  $1 \text{ м}^2$  стоимость машин с учетом расходов на их суточную эксплуатацию. Тогда рассмотренный выше коэффициент может быть представлен в виде

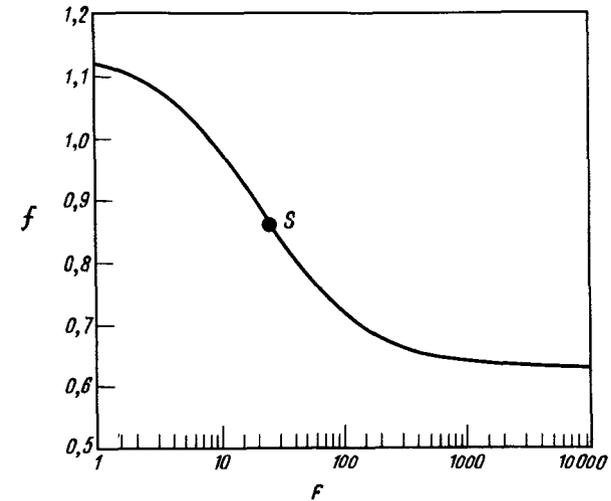
$$I = \frac{(W_s / \eta_g) \xi k + W_s h}{W_s D},$$

или

$$I = \frac{\xi k / \eta_g + h}{D}.$$

Полагая, что две сравниваемые системы коллекторов выполнены по оптимальной схеме, преимущество дельта-системы по сравнению с плоской системой можно представить в виде

$$f = \frac{I_\Delta}{I_p} = \frac{\xi_\Delta (k / \eta_g) + h}{\xi_p (k / \eta_g) + h} \frac{D_p}{D_\Delta},$$



Фиг. 10. Изменение коэффициента  $f$  при переходе на дельта-систему в зависимости от коэффициента экономической добротности  $F$ .

$$F = \frac{\text{Стоимость 1 кВт установленной мощности}}{\text{Стоимость 1 м}^2 \text{ коллектора}} \times \text{К.п.д. установки в целом.}$$

или

$$f = \frac{(h \eta_g / k) + \xi_\Delta}{(h \eta_g / k) + \xi_p} \frac{D_p}{D_\Delta}.$$

Член  $h \eta_g / k$  служит характеристикой рассматриваемой солнечной установки, которую можно назвать коэффициентом экономической добротности

$$F = \frac{h \eta_g}{k}.$$

Подставляя в выражение для  $f$  значения, приведенные в табл. 1, получим

$$f = 0,63 \frac{F + 38,8}{F + 21,4}.$$

На фиг. 10 приведена зависимость  $f$  от  $F$ . Следует отметить, что замена плоской системы коллекторов дельта-системой может привести к существенному улучшению экономических показателей системы настолько, что стоимость коллекторов может стать ниже стоимости машинного преобразователя.

В качестве примера на фиг. 10 нанесена точка, соответствующая реальному солнечному насосу.

### ВЫВОДЫ

Изложенные выше результаты иллюстрируют преимущество двугранной системы коллекторов для солнечных термодинамических установок. Правда, эти результаты получены без учета тепловой инерционности, которая существенно искажает расчетную картину, если только ее влияние не регулируется соответствующими устройствами. Роль инерционности проявляется в значительном запаздывании установления рабочей температуры в системе. В дальнейшем необходимо продолжить исследования режимов работы различных плоскостей дельта-системы с тем, чтобы найти возможность ускорить рост температуры в утренние часы. В ходе такого исследования потребуются динамическое моделирование теплопередачи системы в целом.

Приведенный в настоящей работе метод сравнения относительных затрат весьма удобен и для других случаев, например при изучении вопросов аккумуляции [1], и его применение, по-видимому, возможно также и при рассмотрении фотоэлектрических устройств, а также систем солнечного теплоснабжения в жилищном строительстве.

### Литература

1. Devin B., Etievant C., Congrès de Biarritz organisé par la S.E.E., Conversion thermique de l'énergie solaire, 30 sept. — 4 oct. 1975.

## Влияние режимов потребления электроэнергии на выбор схемы солнечных энергетических станций

Ж. Фурнье, Ж. Мейлан<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Если подходить с позиций сегодняшнего дня к недалекому будущему, то потенциальный интерес к солнечным станциям будет связан в основном с тем, что они позволят уменьшить зависимость страны от некоторых дорогих и дефицитных первичных источников энергии, в частности от топлива. Кроме того, они могут оказать благоприятное влияние на состояние окружающей среды в данном районе. Однако, чтобы солнечные станции были эффективно вписаны в сеть электропередач, они должны быть разработаны с учетом трех типов ограничений, а именно: характера поступления солнечной радиации, необходимости согласования с графиком потребления электроэнергии и экономическими требованиями.

Ниже будет приведен анализ этих ограничений применительно к промышленно развитым и развивающимся странам. Рассмотрение будет основано на схеме станции с котлом на башне и полем гелиостатов.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИХОДА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Промышленно развитые страны размещаются в основном между 35 и 60° с.ш., в то время как большинство развивающихся стран — между 30° с.ш. и 30° ю.ш. Области, расположенные ближе к экватору, получают значительно больше солнечной энергии, чем области в более высоких широтах. В частности, тропики Рака и Козерога, соответствующие основным пустынным районам мира, характеризуются исключительно высокой интенсивностью солнечной радиации и длительностью солнечного сияния. В некоторых районах число безоблачных дней достигает 80% в год (юг США, Индия и т.п.) [1]. Иногда оно возрастает даже до 95% (пустыня Атакама в Чили [2], Мексика), что вдвое больше по сравнению с Парижем, Лондоном, Женевой и др.

<sup>1)</sup> J. Fournier, J.L. Meylan, Battelle, Centre de Recherche de Genève.

В среднем в течение года плотность потока солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность в таких городах, как Торонто, Париж, Женева, Ташкент, Стокгольм и др., составляет  $\sim 120$  Вт/м<sup>2</sup> в среднем за сутки. Она возрастает до 160 Вт/м<sup>2</sup> для областей, расположенных ближе к тропикам (Буэнос-Айрес, Сантьяго, Вашингтон), или для горных районов (Давос в Швейцарии). В наиболее солнечных тропических зонах плотность потока радиации достигает 250 Вт/м<sup>2</sup> [Эль-Пасо, Пасадена, Нью-Дели, Мессина (ЮАР)], а на большой высоте — 340 Вт/м<sup>2</sup> (Моктесума, Чили).

Важной характеристикой является отношение приходов радиации за летний и зимний периоды. По данным Эспинозы [3], это отношение меняется от 5 до 20 для первых упомянутых городов, в то время как для районов с более благоприятным солнечным климатом оно близко к 2 и даже ниже, что позволяет лучше использовать солнечные электростанции.

Между прочим, не следует смешивать астрономические изменения прихода солнечной радиации, которые можно предусмотреть заранее и случайные (метеорологические) колебания. Если в пустынных зонах последние, как правило, происходят замедленно, то в районах с умеренным или морским климатом, где облака перемещаются с большой скоростью, они могут быть очень резкими.

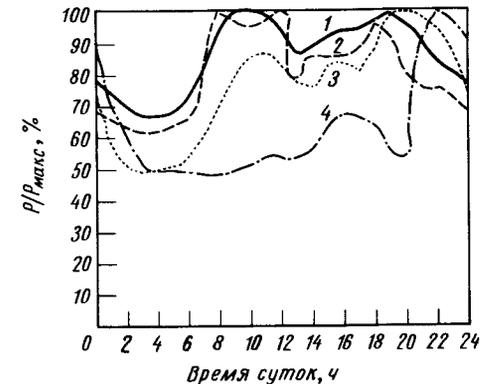
### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТРЕБНОСТЕЙ

Характер работы солнечной энергетической станции зависит от социальной, промышленной и экономической структуры района. Схематически можно выделить следующие типы районов:

- район или страна с объединенной энергосистемой; последняя будет иметь разный характер в зависимости от того, идет ли речь о промышленно развитой стране или нет;
- города со слабо развитой промышленностью в пустынной или полупустынной местности;
- изолированные промышленные центры (например, связанные с горной, металлургической, нефтехимической промышленностью и др.);
- небольшие изолированные поселки.

### ОБЪЕДИНЕННЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В промышленно развитых странах при создании сетей электропередач стремятся получить высокую надежность, иначе говоря, стремятся поддерживать возможно более стабильными напряжение и



Фиг. 1. Мгновенная мощность, отнесенная к максимальной мощности, в течение суток.

1 — Франция; 2 — Швейцария; 3 — Чили; 4 — изолированные городские поселки, ваннные городские поселки.

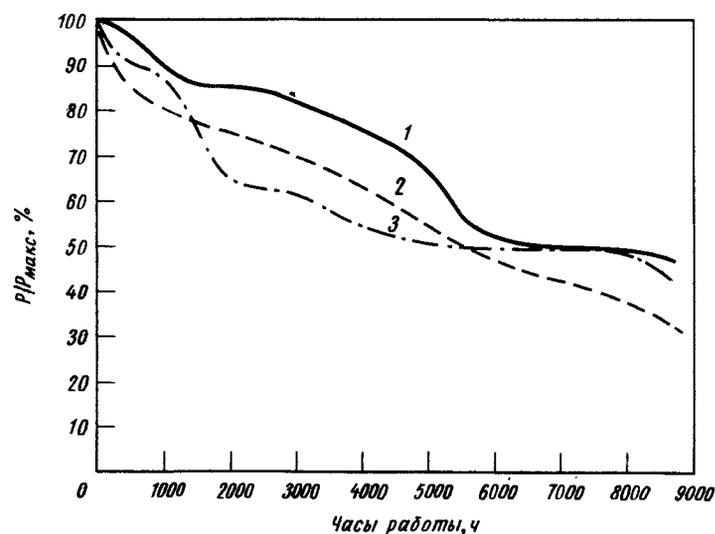
частоту. Это достигается весьма быстрой адаптацией средств генерирования и распределения энергии к изменениям режима потребления энергии. Эти изменения могут быть весьма значительными. Действительно, в течение суток потребная мощность может изменяться в 2 раза; для годового промежутка соотношение между максимальной и минимальной мощностями может достигать в некоторых сетях значения, равного 3. Как видно из фиг. 1 (кривые 1 и 2 относятся к промышленно развитым странам), скорость изменения нагрузки может быть высокой.

Максимальная потребность возникает в светлое время суток, что создает благоприятные условия для применения солнечных станций с ограниченной по емкости аккумулярующей системой.

Для обеспечения желаемой надежности необходимо, чтобы общая установленная мощность всех станций сети намного превосходила максимально потребную мощность (или чтобы сеть была объединена с сетью соседней страны, располагающей избыточной мощностью).

Действительно, в работе станции всегда возможен перерыв, который должен быть компенсирован в кратчайший срок увеличением мощности других работающих станций или запуском резервных.

Вообще национальная сеть включает большое число станций с совершенно различными единичными мощностями. Так, в Швейцарии насчитывается более 150 станций мощностью, превышающей 10 МВт, во Франции имеется  $\sim 3000$  электростанций, из которых  $\sim 100$  имеют мощность более 100 МВт.



Фиг. 2. Классификация характера изменения мощностей.  
1 — Чили; 2 — Швейцария; 3 — изолированные городские поселки.

В промышленно неразвитых странах располагаемая мощность, как правило, не ниже 500 МВт. Характер потребности примерно тот же, что и в промышленно развитых странах, как это следует из кривой 3 на фиг. 1, характеризующей изменение потребности в течение суток для южноамериканской страны (Чили). Виден явно выраженный пик, соответствующий вечерним часам после захода солнца. (18–24 ч). Потребность растет, так же как и в Европе, начиная с 7 ч утра и стабилизируется в течение дня, за исключением периода между 13 и 15 ч.

Летом общий характер кривой такой же, но пик смещается в сторону интервала между 20 ч вечера и 2 ч ночи. Изменения в рамках данной классификации этих мощностей описываются кривой 1 на фиг. 2.

Отношение минимальной и максимальной мощностей изменяется в течение года в пределах 0,5–0,8. Среднее значение потребной мощности составляет ~70% максимальной.

Такая сеть должна быть оснащена базовыми станциями, работающими в течение 5000–8000 ч в год, промежуточными станциями, работающими 2000–5000 ч в год, и пиковыми станциями, действующими менее 2000 ч в год.

### ГОРОДА СО СЛАБОРАЗВИТОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

В приведенном примере потребность в энергии в течение года изменяется слабо (город на берегу моря со сравнительно ровным климатом). Отмечается (фиг. 1, кривая 2) резко выраженный пик в период от 20 ч вечера до 2 ч ночи, обусловленный расходами на бытовые нужды. Коэффициент нагрузки изменяется в течение года в пределах 0,3–0,5. Располагаемая мощность составляет несколько десятков мегаватт (например, 5–50 МВт).

Классификация характера изменения мощностей дана на фиг. 2. Базовая и промежуточная нагрузки могут быть обеспечены одной и той же станцией. Действительно, станция, работающая в среднем с нагрузкой 80%, может быть форсирована до 90–100% в течение ~1500 ч в год, с тем чтобы покрыть промежуточную нагрузку, и будет работать на уровне 60% своей максимальной мощности в течение 500 ч в год. Пиковые нагрузки возможны в течение ~2000 ч в год.

### ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЦЕНТРЫ

Потребная мощность для таких центров может достигать нескольких сот мегаватт. Чаще всего они работают круглые сутки. В этих условиях потребность в электроэнергии практически постоянна и обеспечивается базовыми станциями.

### НЕБОЛЬШИЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПОСЕЛКИ

Поселки с населением менее 5000 жителей не имеют промышленных предприятий. Потребность в электроэнергии обычно обеспечивается дизельными установками, работающими по несколько часов в сутки, как правило, между 20 и 24 ч вечера. Потребная мощность колеблется в основном от нескольких десятков до нескольких сот киловатт (максимум 2 МВт). Днем установка чаще всего используется для подъема воды.

### СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ СТАНЦИЙ

Большое разнообразие современных средств производства электроэнергии объясняется многими местными особенностями (например, гидрологическими условиями, топливными ресурсами и т.п.), но главным образом оно определяется сложной задачей удовлетворения колебаний потребления энергии.

Существуют следующие типы станций:

а) Станции, предназначенные для обеспечения базовой нагрузки (5000 ч или более в год):

*Гидростанции на стоке.* Их выработка зависит от мгновенного дебита реки и в связи с этим испытывает значительные сезонные (и случайные) колебания. Так, например, в июле можно получить в 3 раза больше энергии, чем в январе.

*Тепловые станции на ископаемом топливе.* Речь идет о мощных станциях (несколько сот мегаватт), на которых используются термодинамические циклы с высоким к.п.д. Вследствие большой тепловой инерции такие станции не могут быть пригодны в случаях, когда требуются частые пуски и остановки.

*Атомные станции.* Современная тенденция заключается в строительстве мощных станций (600 – 1300 МВт), которые, как следует ожидать, включаются без технических трудностей в мощные энергосистемы промышленно развитых стран [4].

б) Станции для покрытия промежуточных нагрузок (2000 – 5000 ч в год) и пиковых нагрузок (от нескольких сот до 2000 ч в год):

*Гидроэлектростанции с аккумулярованием* (водохранилище питается естественным путем) и *станции с перекачкой воды с помощью турбин.*

*Теплоэлектростанции с упрощенным паровым циклом, станции с двумя суточными режимами пуск – останов* (станции дневного действия), *теплоэлектростанции старой постройки.*

*Газотурбинные станции, станции с комбинированными газопаровыми циклами.*

*Дизельные электростанции.*

В табл. 1 приведены некоторые характеристики этих станций, относящиеся к скорости их запуска и способности реагировать на колебания нагрузки.

Как видно из этой таблицы, мощная сеть может за короткое время приспособиться к значительным колебаниям нагрузки. Считается, что выход из строя станции мощностью, достигающей 10% суммарной мощности сети, не оказывает существенного влияния на работоспособность системы.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ

Решение о строительстве солнечных энергетических станций должно приниматься, исходя главным образом из стоимости произво-

Таблица 1

Типичные значения некоторых характеристик существующих станций

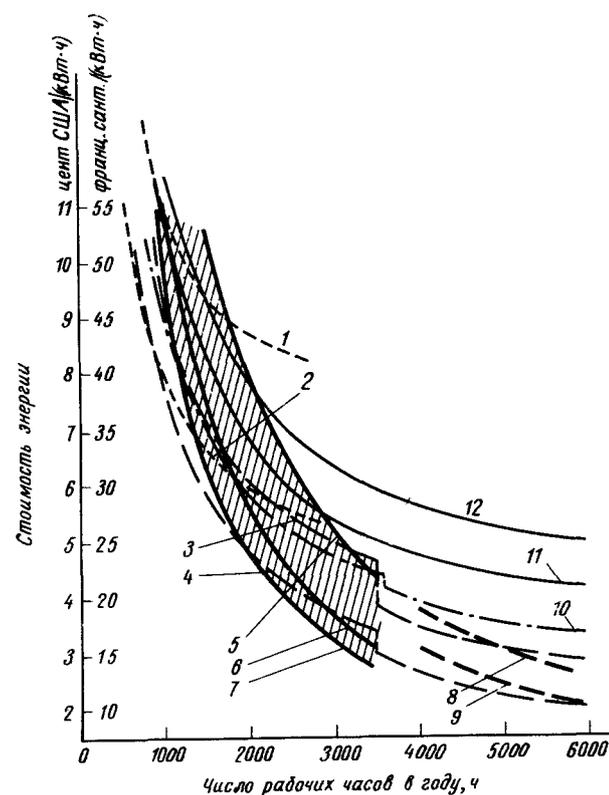
Тип станции	Продолжительность запуска от холодного состояния до полной нагрузки	Колебания мощности
Атомные	Несколько часов	40 – 100% нагрузки. Скачки 10% (меньше чем за 10 с). Нарастание 0,5% в 1 мин
Водо-водяной реактор и кипящий реактор, 1000 МВт	" "	75% нагрузки. Скачки 8 – 12% (меньше чем за 10 с). Нарастание 1 – 2% в 1 мин
Тепловые с паровым циклом на ископаемом топливе	4,5 ч (для запуска горячей турбины 1 ч, после останова 8 ч)	
Базовые станции с повышенным к.п.д., 500 – 1000 МВт	" "	
Станции с двумя суточными режимами пуск – останов (для покрытия промежуточной нагрузки) с промежуточным перегревом, 500 МВт	17 мин (для запуска горячей турбины 13 мин)	
Станции для покрытия пиковых нагрузок без перегрева, 150 МВт	10 с (только турбина)	
Малые турбины с противодавлением, ≤ 5 МВт	Несколько минут	
Газовые турбины	" "	
Гидротурбины		Возможны скачки на 20%

димой ими энергии. Эта стоимость будет зависеть от характера нагрузки (пиковая, промежуточная или базовая), для покрытия которой требуется энергия. При этом следует учитывать и другие факторы, такие, как надежность, простота, энергетическая автономность, воздействие на окружающую среду и т.п.

Солнечная станция, так же как и гидро- или атомная станция, требует крупных капиталовложений. После постройки в связи с отсутствием затрат на топливо следует использовать каждую минуту солнечного сияния подобно тому, как в случае гидроэлектростанций, работающих на стоке, стремятся непрерывно подавать на турбины наличный дебит воды.

В качестве примера была подсчитана стоимость производства энергии для электростанций различного типа в зависимости от числа часов работы в год, стоимости постройки, цены на топливо, удельного потребления электроэнергии, размера годового процента. При этом были использованы следующие исходные данные:

Стоимость постройки, долл./кВт		
Газовая турбина		220
Дизель (10 МВт)		500
Теплоэлектростанция на угле (100 МВт)		
для покрытия базовой нагрузки		500
для покрытия пиковой нагрузки		400
Гидроэлектростанция	800;	1000
Солнечная станция (100 МВт)	600 – 700;	1000
при стоимости гелиостатов, долл./м <sup>2</sup>	60 – 80;	140
Станция на тяжелом топливе		400
Стоимость топлива, долл./т		
Газовые турбины	110;	200
Дизель	110;	150
Уголь (26,8 МДж/кг)		37
Уголь (США)		15
Эксплуатационные расходы, цент/(кВт·ч)		
Солнечная станция		0,15 – 2
Другие системы		0,1
Процент на вложенный капитал		8 и 15
Срок службы, год		25

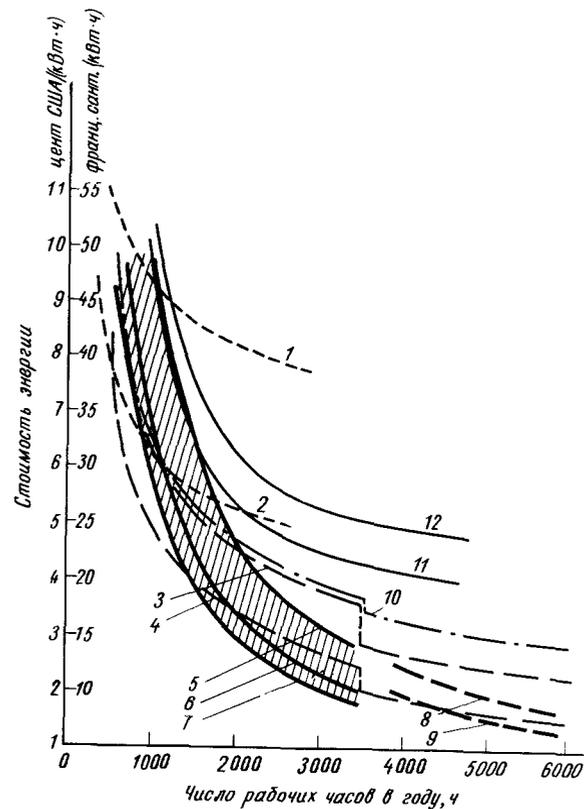


Фиг. 3. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от продолжительности работы в течение года (процент на вложенный капитал  $i = 15\%$ ).

Газовая турбина: 1 — 200 долл./т; 2 — 110 долл./т. Уголь: 3 — 37 долл./т; 4 — 15 долл./т. Солнечная станция: 5 — 1000 долл./кВт; 6 — 700 долл./кВт; 7 — 600 долл./кВт. Гидроэлектростанция: 8 — 1000 долл./кВт; 9 — 800 долл./кВт. Тяжелое топливо: 10 — 90 долл./т. Дизель: 11 — 110 долл./т; 12 — 150 долл./т.

Результаты расчетов приведены на фиг. 3 и 4; на их основании можно сделать следующие замечания:

Стоимость сложных станций для покрытия базовых нагрузок велика, и, чтобы произвести дешевую энергию, они должны работать значительную часть года. Станции для покрытия пиковых нагрузок, работающие в году 500 – 1000 ч, должны быть сравнительно недорогими, чтобы вырабатывать энергию приемлемой стоимости.



Фиг. 4. Стоимость 1 кВт·ч в зависимости от продолжительности работы в течение года (процент на вложенный капитал  $i = 8\%$ ).

1 - 12 - то же, что и на фиг. 3.

Солнечная станция (при стоимости гелиостатов 60 - 80 долл./м<sup>2</sup> и величине годового процента 15%) становится экономически выгодной при 1500 - 3500 ч работы в год (последняя цифра - это максимум возможных рабочих часов). При годовом проценте, равном 8%, минимальное, экономически выгодное число часов работы снижается до 1000 ч в год.

Указанные цены относятся к концу 1975 г. Чтобы получить более показательное сравнение, нужно знать, конечно, изменение цен на топливо на протяжении срока службы станции.

## ВОЗМОЖНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ И СОЛНЕЧНОГО КЛИМАТА

Включение солнечной станции в энергосистему может осуществляться по следующим схемам:

1. Простая солнечная станция, т.е. станция без аккумулирования и без вспомогательных источников энергии, которая строится в районе существующей сети. Максимальная мощность этой станции выбирается таким образом, чтобы она могла быть заменена в любой момент либо путем быстрого увеличения мощности других действующих станций, либо путем быстрого запуска резервной станции. Подобная схема может рассматриваться как исходная для использования солнечных станций в мощных энергосистемах. Эта схема позволяет увеличить суммарное годовое производство электроэнергии (а также электроэнергии для покрытия промежуточных и пиковых нагрузок) в системе или же сэкономить некоторое количество топлива.

Когда доля энергии, производимой простыми солнечными станциями в энергосистеме, становится значительной (например, ~5% установленной мощности), при постройке каждой новой солнечной станции должна создаваться дублирующая станция другого типа той же мощности.

2. Солнечная станция со вспомогательной установкой на ископаемом топливе. Кроме экономии топлива, такая "гибридная" станция выгодна тем, что стоимость ее ниже стоимости двух станций, так как часть оборудования (турбина со вспомогательными устройствами, система отвода тепла и т.д.) является общей для двух котлов. В этом случае можно рассматривать даже комбинированный котел, работающий одновременно на ископаемом топливе и от солнечной энергии. В этом случае нужно найти метод борьбы с отложением сажи на гелиостатах.

На практике в зависимости от режима потребления в такой гибридной станции определяющую роль будет играть либо традиционная электростанция, к которой подключена солнечная станция, обеспечивающая экономию топлива, когда нагрузка является базовой, либо, наоборот, солнечная станция, когда нагрузка носит пиковый или промежуточный характер.

В соответствии с климатическими условиями гибридная станция может быть разработана таким образом, чтобы был возможен быст-

рый переход от солнечного режима к режиму потребления топлива для компенсации влияния переменной облачности, которая в зависимости от размеров поля гелиостатов и скорости ветра вызывает снижение мощности солнечного котла в течение некоторого периода времени (от нескольких минут до нескольких часов).

3. Солнечная станция с тепловым аккумулятором, который облегчает приспособление станции к режиму потребления энергии, по крайней мере в отношении дневных и недельных колебаний (конец недели, если позволяет погода, может быть использован для подзарядки аккумулятора). Учитывая величину требуемого объема и удельную стоимость, вряд ли можно представить себе аккумулятор, рассчитанный на работу более нескольких часов.

Аккумулятирование может преследовать две цели:

Продление рабочих часов за пределы периода солнечного сияния, что позволяет придать станции с промежуточной нагрузкой характер базовой станции;

Сдвиг рабочих часов в область часов пик, что особенно важно для развивающихся стран, где часы пик приходятся на вечернее время; в этом случае требуемая емкость аккумулятора ниже, чем при работе в режиме базовой станции.

Кривые на фиг. 3 и 4 показывают, что именно вторая цель представляет наибольший экономический интерес, поскольку стоимость пиковой энергии намного выше стоимости базовой. Действительно, для того чтобы солнечная станция с базовой нагрузкой с учетом стоимости аккумулятора была конкурентоспособной, нужно, чтобы стоимость солнечной энергии, произведенной без аккумулятирования, была существенно ниже стоимости базовой энергии, производимой в настоящее время традиционными способами.

Так же как и в случае схемы 1, когда доля энергии в системе, производимая солнечными станциями, станет существенной, необходимо будет дополнять солнечную станцию резервным источником энергии (например, тепловым парогенератором). В зависимости от климатических условий это может привести к увеличению стоимости 1 кВт·ч на ~10% по сравнению со стоимостями, указанными на фиг. 3 и 4.

4. Важным понятием, связанным с максимальным использованием солнечных станций, является "используемая продолжительность солнечного сияния". Еще до того, как станция сможет вырабатывать электроэнергию, температура и расход пара должны достичь опреде-

ленных значений (например, 300°C при расходе, соответствующем 20% нормального), начиная с которых турбина работает в нормальном режиме.

Таким образом, чтобы довести массу металла и рабочего тела до рабочей температуры, необходимо определенное количество тепла, которое не будет возвращено при охлаждении системы.

Эти соображения приводят к двум различным техническим решениям:

1. Вся установка, т.е. котел, турбина и вспомогательное оборудование, непрерывно поддерживается при температуре, близкой к рабочей. Такое решение предполагает, например, что тепловые потери котла (в частности, вследствие инфракрасного излучения) должны быть небольшими — примерно 1% номинальной мощности. На практике это означает, что котел должен быть помещен внутри полости, вход в которую снабжен заслонкой, закрываемой в отсутствие солнца. На периоды остановок может потребоваться резервный источник энергии, который включается, когда температура падает ниже некоторого заданного значения.

2. Солнечный котел обладает очень малой тепловой инерцией, а его конструкция позволяет свести к минимуму тепловые потери. При этом плотность потока радиации, падающей на экранные трубы, достаточно велика, что позволяет уменьшить поверхности теплообмена, а следовательно, и вес. В этом случае котел может быть размещен на открытом воздухе, а его относительно небольшой вес позволяет построить сравнительно недорогую башню. Турбина и ее оборудование, учитывая их массу и особенности тепловых режимов, должны поддерживаться при соответствующей температуре.

В заключение следует отметить, что первый вариант конструкции котла, основанный на традиционных технических решениях, может быть реализован быстрее, чем второй.

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показывает, что стоимость 1 кВт·ч произведенной солнечной станцией энергии относится, по-видимому, к стоимостям, характерным для промежуточных нагрузок. В первое время, пока доля электроэнергии, производимой солнечными станциями, будет невелика, можно будет строить такие станции без дублеров с тепловыми аккумуляторами весьма малой емкости. Позднее,

чтобы повысить надежность энергосистемы, солнечную станцию придется снабжать вспомогательной установкой, работающей на ископаемом топливе.

Если дополнить солнечную станцию тепловым аккумулятором или вспомогательной установкой, то такую систему можно будет использовать в базовом режиме, а также в пиковом режиме в условиях эксплуатации в развивающихся странах. Экономический анализ показывает, что наиболее выгодной будет работа станции в пиковом режиме. Работа в базовом режиме будет представлять интерес в ближайшем будущем лишь для изолированных промышленных центров с целью замены ископаемого топлива, а в более отдаленном будущем — лишь в случае, когда стоимость солнечной энергии станет ниже стоимости базовой энергии, полученной традиционным способом, например с помощью гидроэлектростанции, а также в развивающихся странах, размещенных на пустынных территориях, страдающих от недостатка воды и не имеющих достаточных средств для сооружения атомной станции.

### Литература

1. Low temperature engineering application of solar energy, ASHRAE, 1967.
2. Barrios P., Espinosa C., Datos meteorologicos del solar de Atacama, Corfo Norte Antofagasta, 1974.
3. Espinosa C., Alcayaga O., Singularidades helioenergeticas de la costa del Norte de Chile, Universidad del Norte Antofagasta, 1974.
4. Preuss E.J., Netzeinbindung grosser Kraftwerke, *Elektrotechn. Zeitschrift*, 96 (10), 439 — 443 (1975).
5. Buchwald K., Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der zulässigen Anfahr- und Laständerungsgeschwindigkeiten von Dampfturbinen, *VGB Kraftwerks-technik*, 52 (5), 416 — 424 (1975).
6. Geissler Th., Dampferzeuger für den Mittel- und Spitzenlastbereich, Teil III, *Energie*, 25 (1), 11 — 19 (1973).
7. Gregory J.F. et al., Considérations sur la coopération de grosses chaudières et turbines en marche à deux postes dans les centrales thermiques, *Revue Brown-Boveri*, 62 (Juillet — Août 1975).
8. Bulletin ASE 64 (25), Décembre 1973.
9. Weber O., La centrale à turbines à gaz avec réservoir d'air, *Revue Brown-Boveri*, 62 (Juillet — Août 1975).

## Фотоэлектрические системы

### КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

#### Кремниевые солнечные элементы

М. Вольф<sup>1)</sup>

Основная цель настоящей работы — дать оценку существующим кремниевым солнечным элементам с учетом требований, которые предъявляются к ним в настоящее время, и рассмотреть возможность усовершенствования таких элементов

Определяющим фактором при выборе направления, по которому должно осуществляться усовершенствование кремниевых солнечных элементов, является их использование для получения существенной части требуемой на Земле энергии. Для практического осуществления этой задачи прежде всего необходимо значительно понизить стоимость элементов при сохранении высокого уровня к.п.д. солнечных батарей. Низкая стоимость элементов связана с объемом производства, который должен возрасти на несколько порядков по сравнению с существующим объемом производства элементов в полупроводниковой промышленности. В то время как в этой отрасли промышленности снижение стоимости приборов достигнуто главным образом за счет миниатюризации конструкций и за счет размещения большего количества элементов схемы на одной пластине, отрасль промышленности, выпускающая наземные солнечные батареи, должна освоить производство приборов большей площади при значительном снижении их стоимости. Это потребует полного пересмотра технологии получения материалов и методов изготовления приборов.

Кремниевые солнечные элементы, очевидно, будут иметь толщину не менее 25 мкм; вероятнее всего, она будет составлять 100 мкм. Следует отметить, что кремний является вторым из химических элементов, наиболее распространенных в земной коре. В настоящее время добыча кремния и его переработка ведутся в больших масштабах

<sup>1)</sup> M. Wolf, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pa.

(годовой объем производства в США составляет  $\sim 100$  тыс. т, стоимость  $\sim 1$  долл./кг). Дальнейшие усилия должны быть направлены на усовершенствование процессов очистки, получения пластин и изготовления приборов.

Кремний — наиболее изученный полупроводниковый материал, и он широко используется для производства преобразователей солнечной энергии, обладающих наибольшей надежностью и имеющих наиболее высокий к.п.д. среди существующих фотоэлектрических преобразователей.

Хотя по отношению к проблеме снижения стоимости повышение к.п.д. представляется второстепенной задачей, тем не менее она является важной как для космического, так и для наземного применения солнечных элементов. При их наземном использовании к.п.д. является одним из основных факторов, определяющих экономическую эффективность элементов. В то время как эффективность собирания носителей заряда удалось повысить до предполагаемого уровня, возможного повышения напряжения не получено, поэтому основной проблемой становится изучение потенциальных возможностей увеличения напряжения.

### ПОВЫШЕНИЕ К.П.Д.

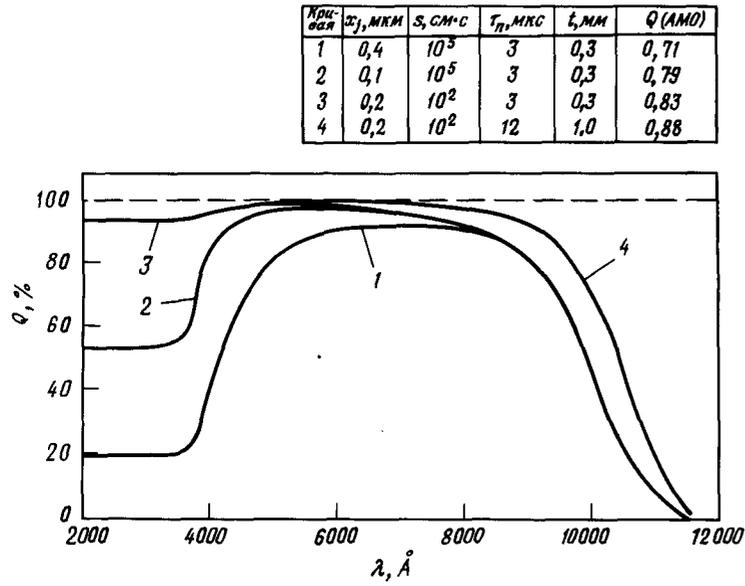
В работе [1] был проведен анализ характеристик солнечных элементов с учетом возможностей их усовершенствования. Было установлено, что можно значительно повысить эффективность собирания носителей заряда, улучшить форму вольт-амперной характеристики, в частности повысить напряжение холостого хода (табл. 1).

Повышение эффективности собирания носителей заряда было достигнуто главным образом благодаря значительному увеличению спектральной чувствительности элементов в коротковолновой области путем уменьшения толщины диффузионной области и уменьшения влияния рекомбинации на поверхности этой области (фиг. 1). Это было учтено при разработке "фиолетовых" элементов [2], что в свою очередь привело к созданию нового просветляющего покрытия и более тонкой структуры контактной сетки для уменьшения последовательного сопротивления, возросшего из-за увеличения слоевого сопротивления диффузионной области. При дальнейшем усовершенствовании "черных", или "неотражающих", элементов [3] на их поверхности травлением создавался пирамидальный рельеф, снижающий

Таблица 1

Типичные и возможные значения параметров современных кремниевых солнечных элементов

Параметры	Вклад в к.п.д. (1,0 — потери), отн. ед.				Выходные параметры	
	возможные значения	обычные элементы (1970 г.)	"фиолетовые" элементы	"черные" элементы	возможные значения	"черные" элементы
Основные потери	0,45	0,45	0,45	0,45	63,0	63,0
Эффективность собирания	0,88	0,71	0,79	0,88	49,0	49,0
Отражение	0,97	0,905	0,951	0,97	47,5	47,7
Контактная сетка	0,96	0,96	0,95	0,95	45,5	45,4
фактор напряжения	0,61 (?)	0,522	0,535	0,531	Напряжение, В	
фактор кривизны характеристики	0,86	0,82	0,825	0,822	Удельная мощность, МВт/см <sup>2</sup>	
Дополнительный фактор кривизны характеристики	1,0	0,91	1,0	0,99	26,3	22,1
Последовательное сопротивление	0,97	0,96	0,985	0,984	26,3	21,8
К.п.д. в условиях АМО	0,19	0,104	0,14	0,153	25,6	21,4



Фиг. 1. Расчетные кривые зависимости эффективности собирания носителей от длины волны для кремниевых солнечных элементов  $n-p$ -типа.

коэффициент отражения света до 3% (приблизительно с 7% для "фиолетовых" элементов). Наряду с этим наблюдается увеличение поглощения длинноволнового излучения и коэффициента собирания носителей, которое объясняется тем, что фотоны вследствие преломления света на поверхности входят в пластину под большим углом. Принимая во внимание эти эффекты, можно достигнуть первоначально намеченного уровня эффективности собирания носителей заряда и потерь на отражение (табл. 1).

Возможность повышения напряжения холостого хода путем использования низкоомного базового материала вызвала большой интерес, однако ее реализация не дала значительных результатов. До сих пор не установлено, что является причиной, препятствующей получению напряжения холостого хода, превышающего 0,6 В при температуре 28°C: ограничения, связанные с параметрами материала или эффекты, возникновение которых связано с процессом производства. Наблюдаемое ограничение напряжения холостого хода может быть результатом действия различных механизмов (табл. 2). В течение последних

Таблица 2

Область	Параметры	Номер $n/p$	Механизмы	Возможность реализации механизма
База	Время жизни неосновных носителей	1	Случайные примеси	Маловероятен
		2	Рекомбинационные центры, образованные неимонизированными легирующими примесями	Предполагаемый механизм
		3	Оже-рекомбинация	Возможен
		4	Рекомбинация на дефектах, введенных в процессе диффузии	"
		5	Пространственные неоднородности	"
Ширина запрещенной зоны	Сужение запрещенной зоны	6	Сужение запрещенной зоны	Небольшой вклад при очень низком удельном сопротивлении
		7	Незначительный или отрицательный эффект тыльного $p^+$ - или $n^+$ -слоя вследствие уменьшения отношения $p^+/p$ или влияния механизмов 1-5 в $p^+$ -области	Возможен в "гонках" элементов
Область пространственного заряда	Время жизни неосновных носителей	8	Рекомбинационный ток	Малый вклад

Область	Параметры	Номер п/п	Механизмы	Возможность реализации механизма
Диффузионный слой (влияние возрастает при уменьшении удельного сопротивления базовой области)	Время жизни неосновных носителей	9	Механизмы 1—5	1, 2, 3, — аналогично; 5 — вероятны
	Ширина запрещенной зоны	10	Сужение запрещенной зоны	Возможен в сильнолегированной поверхностной области
Скорость поверхностной рекомбинации	Нарушения кристаллической структуры вследствие механической обработки, введения неконтролируемых примесей, очень высокой концентрации легирующей примеси. Поверхность расположена близко к переходу	11	Вероятен	
		12	Изучены, за исключением "фиолетовых" и "неотражающих" элементов	
Структура	Очень сильно легирована поверхностная область, удаленная от перехода на расстояние порядка диффузионной длины. Механизм 7. Вырождение материала			

2—3 лет ведутся работы, целью которых является выяснение роли предполагаемых механизмов. Установлено, что некоторые эффекты столь малы, что не могут препятствовать повышению напряжения холостого хода.

Основные эффекты могут возникать либо в базе, либо в области пространственного заряда, либо в диффузионной области элемента. Они могут быть вызваны объемной рекомбинацией неосновных носителей, уменьшением ширины запрещенной зоны, поверхностной рекомбинацией или даже особенностями геометрии отдельных приборов.

Ниже перечислены эффекты, в результате которых при уменьшении удельного сопротивления базы время жизни неосновных носителей может сократиться до значений, более низких, чем время жизни носителей в равновесном состоянии, определяемое из теории Шокли—Рида—Холла:

1. Введение при легировании нежелательных примесей, уменьшающих время жизни неосновных носителей [1]. Однако подобное явление представляется маловероятным, если принять во внимание те меры предосторожности, которые соблюдаются в процессе приготовления легирующих материалов.

2. Неионизированная часть примесных атомов может служить рекомбинационными центрами. Такая возможность может рассматриваться только как гипотеза [4].

3. Установлено, что Оже-рекомбинация играет существенную роль при очень высоких уровнях легирования, однако значительность этого эффекта при рассматриваемых удельных сопротивлениях не определена, поэтому его следует отнести к "вероятным" [5].

4. Хорошо известно, что во многих приборах при введении примесей в процессе диффузии образуется большое количество дефектов. Предполагалось, что именно такие дефекты существуют и в кремниевых солнечных элементах. Дефекты такого типа могут быть введены раньше, чем диффундирующая примесь, и поэтому их действие может проявиться также и в базовой области.

5. Линдхольм [6], анализируя причины, приводящие к ограничению напряжения холостого хода, основное внимание уделил известному представлению о пространственном распределении неоднородностей, рассматривая его как возможную причину уменьшения времени жизни носителей и даже локального уменьшения ширины запрещенной зоны.

Существуют также и другие эффекты, которые могут привести к ограничению напряжения холостого хода:

1. Сужение запрещенной зоны, которое хорошо известно в некоторых полупроводниковых приборах. Как показал Линдхольм [6], этот эффект незначительно влияет на работу солнечного элемента и поэтому не может существенно ограничить напряжение.

2. Большинство современных солнечных элементов – это приборы  $n-p-p^+$ -типа, особенно в том случае, когда они имеют большую диффузионную длину и относительно тонкую базу. Влияние  $p^+$ -слоя связано с действием электрического поля в области  $p-p^+$ -перехода. Так как удельное сопротивление базы уменьшено, то электрическое поле в области перехода изменяется пропорционально логарифму отношения  $p^+/p$ . Если отношение  $p^+/p$  поддерживается на значительном уровне при относительно низком удельном сопротивлении базы, то свойства  $p^+$ -области могут ухудшиться настолько, что они будут оказывать отрицательное влияние на эффективный "ток насыщения" базовой области. Это может быть связано как с уменьшением времени жизни неосновных носителей, так и с уменьшением ширины запрещенной зоны в  $p^+$ -области.

3. Увеличение обратного тока, определяемое вкладом пространственного заряда в рекомбинационный ток, незначительно по величине при режиме, близком к холостому ходу [6].

Аналогичное рассмотрение может быть проведено и для диффузионной области. Обычно в диффузионной области создается очень высокая концентрация легирующей примеси. Поэтому вклад этой области в ток насыщения пренебрежимо мал по сравнению с вкладом базовой области, имеющей относительно высокое удельное сопротивление. Когда удельное сопротивление базы уменьшается и соответственно падает ее вклад в ток насыщения, относительный вклад диффузионной области в ток насыщения увеличивается. Если не принимать во внимание различные механизмы, которые могут привести к увеличению вклада диффузионной области в ток насыщения, то вклад одной этой области в ток насыщения может определить предельное значение напряжения холостого хода. Наряду с механизмами, действующими в базе, другой возможной причиной, приводящей к ограничению напряжения холостого хода, является влияние поверхности, удаленной на расстояние  $0,1 - 0,4$  мкм (что приблизительно равно диффузионной длине) от области пространственного заряда перехода. Если не принять специальных мер предосторожности в процессе изготовле-

ния прибора, то могут возникнуть большие токи насыщения. Причиной генерации этих токов может быть высокая степень разориентации кристаллов, вызванная механической обработкой (резкой и шлифовкой) в процессе подготовки пластин. Кроме того, при обработке могут быть внесены неконтролируемые примеси. Наконец, слишком высокая поверхностная концентрация примесей также может привести к отрицательным эффектам. Можно предположить, что влияние этих механизмов на предельное значение напряжения холостого хода будет детально исследовано в ближайшие годы. В то время как некоторые из перечисленных механизмов будут исключены из рассмотрения как механизмы, приводящие к положительному эффекту, может оказаться, что другие механизмы либо создают принципиальные ограничения, либо сами обусловлены особенностями конструкции прибора или технологией изготовления. В последнем случае могут быть найдены пути уменьшения их влияния.

Итак, в настоящее время трудно предсказать, каким образом будет достигнуто увеличение к.п.д. кремниевых солнечных элементов. Многие исследователи считают, что до тех пор, пока полностью не будут устранены основные ограничивающие факторы, напряжение холостого хода можно увеличить только на  $10 - 15\%$  при соответствующем увеличении максимальной выходной мощности.

## НЕОБХОДИМЫЙ ОБЪЕМ ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время в США годовой объем выпуска кремниевых солнечных элементов для космических программ составляет  $\sim 500$  м<sup>2</sup>, а для наземных применений в начале этого года  $\sim 1000$  м<sup>2</sup>. По-видимому, годовой объем выпуска кремниевых солнечных элементов во всех остальных странах не превышает  $1000$  м<sup>2</sup>, однако точных данных нет. Большинство стран использует солнечные элементы для космических целей, за исключением Японии, которая использует их главным образом для специальных наземных целей. В настоящее время средняя стоимость космических батарей в США составляет  $\sim 20\,000$  долл./м<sup>2</sup>. Стоимость наземных систем, включая в некоторых случаях стоимость химических батарей, составляет  $\sim 2000$  долл./м<sup>2</sup>. В Западной Европе стоимость солнечных элементов приблизительно в 2 раза выше стоимости солнечных элементов космического назначения, изготавливаемых в США, в то время как элементы японского производства по стоимости незначительно отличаются от элементов американского производства.

Таблица 3

Оценка объема производства солнечных батарей с учетом требуемого количества энергии

Требуемая годовая выработка энергии, кВт · ч	$10^{12}$
К.п.д., %	10
Средняя дневная плотность солнечной энергии, кВт · ч/м <sup>2</sup>	4
Годовой объем вырабатываемой энергии, кВт · ч/м <sup>2</sup>	146
Требуемая площадь (0,1% площади США), м <sup>2</sup>	$0,7 \cdot 10^{10}$
Годовой объем производства, необходимый для создания в течение 20 лет батарей требуемой площади, м <sup>2</sup>	$3,5 \cdot 10^8$

Оценить предполагаемый объем выпуска кремниевых солнечных батарей наземного применения в широких масштабах возможно при условии, что они обеспечат значительную часть общего количества электроэнергии, генерируемой в течение определенного периода времени (табл. 3). Основная цель — получить 50% вырабатываемого в настоящее время количества электроэнергии, что составляет небольшую часть от предполагаемого уровня производства энергии в будущем [7]. Полагают, что при постоянной скорости ввода в действие солнечных батарей планируемая мощность обеспечится через 20 лет. Этот двадцатилетний период ввода в действие равен сроку службы фотоэлектрических систем преобразования энергии, при этом годовой объем продукции, предназначенной для замены вышедших из строя элементов, останется прежним и будет составлять  $\sim 5 \cdot 10^8$  м<sup>2</sup>/год. Таким образом, предполагаемый объем выпуска кремниевых солнечных батарей для наземного применения будет превышать объем производства батарей в настоящее время более чем на пять порядков.

Оценочные расчеты объема выпуска батарей полезны для получения информации, необходимой при разработке новой технологии (табл. 4). Объем вырабатываемого кремния должен превзойти 120 000 т/год, что необходимо для организации производства солнечных батарей. Эта величина на два порядка выше современного мирового уровня производства полупроводникового кремния и приблизительно равна объему производства металлургического кремния (97 000 т) в США [8]. Скорость изготовления кремниевого листа шириной 1 м, например, должна составлять 17 м/с, а годовой объем выпуска солнечных батарей в денежном выражении (вопрос о приемлемой стоимости рассматривается в следующем разделе) более чем

Таблица 4

Суммарный годовой выход готовой продукции

Площадь	$500 \text{ км}^2 = 5 \cdot 10^8 \text{ м}^2$
Общая длина солнечных батарей при ширине 1 м	500 000 км
Объем материала при толщине листа 0,01 см	$5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$
Масса (плотность кремния равна $2,34 \text{ г/см}^3$ )	117 000 т
Общая стоимость продукции при стоимости 1 м <sup>2</sup> в пределах 20 — 40 долл.	10 — 20 млрд. долл.

в 7 раз должен превышать объем продукции промышленности полупроводниковых приборов, изготовленной в США в 1972 г. Хотя организация такого производства потребует создания новых крупных предприятий, тем не менее масштабы этой отрасли промышленности будут значительно меньше современных масштабов автомобильной промышленности.

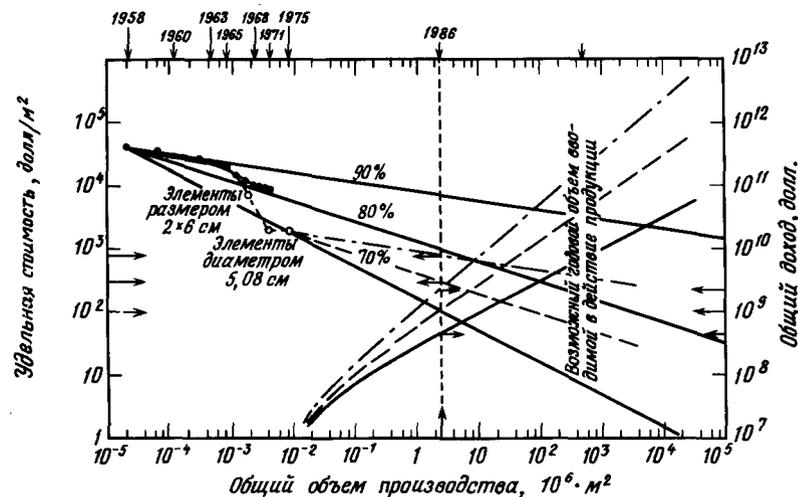
#### ПРИЕМЛЕМАЯ СТОИМОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

На основе расчетов предполагаемой выходной мощности фотоэлектрических систем, учитывающих локальную интенсивность солнечного излучения, метеорологические условия и соответствующие нагрузочные характеристики, можно определить экономически оправданную стоимость системы. Расчет включает стоимость электроэнергии для определенной местности, стоимость капиталовложений и текущие расходы. Так как фотоэлектрические системы будут использоваться определенным спросом только в том случае, если при сравнении с конкурирующими источниками энергии их стоимость не будет значительно превышать экономически оправданную стоимость, то последней величиной можно считать "приемлемой стоимостью" системы. Если вычесть из этой величины другие составляющие стоимости системы, такие, как стоимость аккумулялирования, распределения энергии и монтажа, то можно определить приемлемую стоимость самой фотоэлектрической батареи. Для наиболее благоприятных условий, которые выполняются при автономном режиме работы энергетических систем, полученное значение приемлемой стоимости 1 м<sup>2</sup> поверхности батареи при современном валютном курсе доллара составляет 15 — 60 долл. [9]. При менее благоприятных условиях, предусматривающих работу системы в комплексе с центральной станцией, приемлемая стоимость снижается на порядок.

Следует заметить, что "приемлемая стоимость единицы площади" определяется на основе конкретных рабочих характеристик различных компонентов системы и нагрузочной кривой. Поэтому приемлемая стоимость единицы площади зависит от к.п.д. данной солнечной батареи и от особенностей ее использования. Приведенные выше значения приемлемой стоимости, которые были получены расчетным путем, основаны на номинальном к.п.д. кремниевых солнечных элементов, равном 18%. Часто используется понятие "приемлемая стоимость единицы выходной мощности" (долл./Вт). Значение этой величины также определяется номинальным к.п.д. батареи и максимальным значением интенсивности солнечного излучения, приблизительно равным  $1 \text{ кВт/м}^2$  (на уровне моря, при прохождении Солнца через зенит, при абсолютно безоблачном небе и низком уровне содержания в атмосфере частиц воды и пыли). В реальных условиях интенсивность излучения обычно составляет часть этой величины, хотя к.п.д. батареи при этом может немного превышать номинальное значение, что связано с зависимостью к.п.д. от рабочей температуры батареи.

Приведенные значения приемлемой стоимости относятся к соединенным в батарею солнечным элементам, которые расположены на подложке, и не учитывают стоимости самой подложки и герметизации. Получение этих значений приемлемой стоимости является целью большей части проводимых в настоящее время исследований и разработок фотоэлектрических приборов. Для предварительной оценки реальности осуществления этой цели может быть проведен ряд испытаний. При использовании одного из методов испытаний изучается стоимость основного материала. Стоимость кремниевых пластин толщиной  $100 \text{ мкм}$ , определенная на основе современного уровня цен на металлургический кремний, составляет  $0,25 \text{ долл./м}^2$ . Другой метод, хорошо известный в электронной промышленности, основан на статистической обработке данных путем построения "прогнозирующей кривой". Эта кривая определяет зависимость стоимости единицы площади от общей площади изготовленных элементов. Прогнозирующие кривые, которым соответствует темп изменения стоимости в пределах  $70 - 90\%$ <sup>1)</sup>, изучены в электронной промышленности для диодов и транзисторов. Для кремниевых солнечных элементов определен толь-

<sup>1)</sup> Это означает, что при двукратном увеличении объема производства уменьшение стоимости продукции составляет  $70 - 90\%$  исходного значения. — Прим. ред.

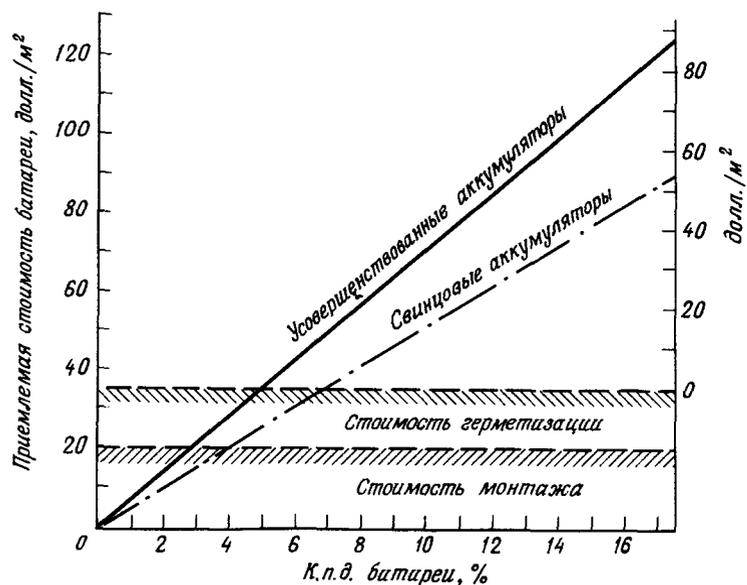


Фиг. 2. Кремниевые солнечные элементы.

ко начальный участок прогнозирующих кривых (фиг. 2), который аналогичен таким же участкам кривых для приборов, изученных ранее.

Из рассмотрения кривой, соответствующей  $80\%$ -ному изменению стоимости, следует, что только в результате изготовления в течение года  $5 \cdot 10^8 \text{ м}^2$  продукции, ее стоимость достигнет уровня  $200 \text{ долл./м}^2$ , а через 12 лет при такой же годовой норме производства стоимость уменьшится приблизительно до  $80 \text{ долл./м}^2$ . Если темп изменения стоимости равен  $70\%$ , то при аналогичном годовом объеме выпуска уже через год стоимость продукции будет составлять  $\sim 10 \text{ долл./м}^2$ . Следует, однако, заметить, что прогнозирующая кривая является статистической характеристикой, которая отражает влияние рыночной конкуренции, внедрения изобретений, технических усовершенствований и т.д. Поэтому нет гарантии, что прогнозирующей кривой будет соответствовать темп изменения стоимости  $\sim 70 - 80\%$ . Однако можно утверждать, что возможность достижения приемлемой стоимости при ожидаемом объеме производства не противоречит ранее полученным данным.

Из рассмотрения вопроса стоимости может быть сделан другой важный вывод. При анализе приемлемой стоимости солнечной батареи необходимо учитывать связь этой величины с к.п.д. преобразования энергии. Как показано на фиг. 3, эта зависимость может быть



Фиг. 3. Зависимость приемлемой стоимости солнечной батареи от ее к.п.д. при использовании свинцовых и усовершенствованных аккумуляторных батарей. (Данные, за исключением стоимости герметизации и монтажа, взяты из работы [1].)

представлена графически для определенного набора параметров. В первом приближении эта зависимость является линейной, причем наклон прямой определяется стоимостью и параметрами других подсистем, таких, как аккумуляторы и устройства распределения энергии. Стоимость герметизации, подложки, подготовки площадки и проведения монтажа в основном не зависит от к.п.д. и является причиной сдвига нулевой точки на оси ординат. Наличие этого сдвига свидетельствует о том, что производство солнечных батарей с низким к.п.д. экономически неоправданно. К тому же при оценке стоимости батареи высокоэффективные приборы обладают явным преимуществом. Например, при использовании свинцовых аккумуляторных батарей (фиг. 3) применение солнечных элементов с к.п.д., равным 16%, приводит к повышению приемлемой стоимости на 75% по сравнению со стоимостью солнечной батареи, использующей элементы с к.п.д. 12% (различие между значениями к.п.д. составляет 33%).

Таким образом, в результате проведенного рассмотрения можно сделать вывод, что первоочередная задача состоит в разработке технологических методов получения большого объема продукции очень низкой стоимости с максимально достижимым к.п.д. солнечных батарей.

### ПЕРЕХОД К МАССОВОМУ ПРОИЗВОДСТВУ ПРОДУКЦИИ НИЗКОЙ СТОИМОСТИ

При изучении планов, принятых правительством в прошлом году с целью стимулирования работ по созданию дешевых фотоэлектрических систем для широкого применения в наземных условиях [10], создается впечатление, что эти разработки, по существу, будут проводиться в три этапа (табл. 5). В течение первого этапа, который будет завершен в 1985 г., основное значение придается демонстрации ранее созданных систем. Согласно проекту Управления энергетических исследований и разработок США (ERDA), в этот период будут установлены солнечные батареи общей пиковой мощностью 300 МВт, причем батареи мощностью 10 МВт будут закуплены ERDA для демонстрационных целей, а батареи общей мощностью 215 МВт для конкретных применений приобретут другие правительственные организации США [10]. Большой объем правительственных закупок свидетельствует о том, что в результате выполнения программы предполагается получить субсидии, которые позволят обеспечить производство элементов около 4 км<sup>2</sup>/год и расширить рынок сбыта наземных энергетических установок. Данные, полученные на установках, предназначенных для демонстрации и конкретных применений, которые предполагается установить в течение этого периода, свидетельствуют о возможности улучшения рабочих характеристик систем. Эти данные окажутся необходимыми при дальнейшей разработке систем, оптимизированных с учетом их характеристик и срока службы. Поскольку на первом этапе особое значение придается объему выпускаемой продукции, в ближайшее время необходимо осуществить переход к опытным производственным линиям и вскоре после этого — к массовому производству. Таким образом, для первого этапа будет характерно применение тех процессов и технологических методов, которые хорошо изучены в настоящее время и которые представлены в табл. 6. Здесь также указаны возможные пределы снижения стоимости для различных групп технологических операций, выполняемых при изготовлении

Таблица 5

Возможности усовершенствования технологии изготовления солнечных элементов, увеличения объема производства и снижения стоимости (первая стадия проекта ERDA)

Этап	Первый	Второй	Третий
Продолжительность этапа	1976 — 1985 гг.	1985 — 1995 гг. Подготовительная работа вводится с 1974 г.	С 1995 г.
Цели этапа	Демонстрация систем	Переход к широкому масштабу производству	Совершенное производство
Технология производства	Первоначальное усовершенствование технологии 1975 г., частичная автоматизация, преобладание серийного производства, разделение процессов	Введение новой технологии, полная автоматизация, точное производство, объединение процессов	Усовершенствование технологических методов
К.п.д. солнечных батарей в условиях AM1, %	12	14	16
Объем производства в начале и конце этапа, км <sup>2</sup> /год	1,5 · 10 <sup>-3</sup> — 1,5 (ежегодное удвоение объема)	1,5 — 200	Медленный рост до ~ 500
Стоимость батарей:			
начало этапа {	2000	100 — 600	21 — 100
} долл./м <sup>2</sup>			
} долл./Вт пиковой мощности	20	0,80 — 5	0,15 — 0,70
конец этапа {	100 — 600	21 — 100	16 — 50
} долл./м <sup>2</sup>			
} долл./Вт пиковой мощности	0,80 — 5	0,15 — 0,70	0,10 — 0,30

Продолжение табл. 5

Этап	Первый	Второй	Третий
Общие характеристики производства на каждом этапе:			
площадь, км <sup>2</sup>	3	460	500
пиковая мощность, МВт	300	50 000	Ежегодно 80 000
стоимость, млрд. долл.	0,5 — 1,5	15 — 100	8 — 25
Объем новых капиталовложений, требующихся на каждом этапе, млрд. долл.	~ 0,2 — 0,8	~ 5 — 25	~ 5 — 15

## Основные технологические процессы

Процесс	Первый этап		Второй этап	
	Разработка	Общая стоимость продукции	Разработка	Общая стоимость продукции
Восстановление кремния	Усовершенствование дуговой печи	2 допп./кг	Усовершенствование дуговой печи	2 допп./кг
Очистка кремния	Направленная кристаллизация $SiH_4$	10 — 40 допп./кг	Фтористое соединение кремния	4 — 10 допп./кг
Получение пластин, пент, листов	Пластины и пенты толщиной 0,2 мм: Метод Чохральского (10, 16 — 20, 32 см в диаметре), повторное использование тигля, питье Снижение потерь при резке до 30 — 50% Профилированные пенты Междридные пенты	25 — 100 допп./м <sup>2</sup>	Листы толщиной 0,1 — 1 мм: химическое осаждение из паровой фазы, прокатка, питье, рекристаллизация	4 — 40 допп./м <sup>2</sup>
Изготовление солнечных элементов	Усовершенствование технологии диффузии Создание барьера Шоттки Ионное внедрение Печатный контакт	50 — 300 допп./м <sup>2</sup>	Создание интегральной батареи	21 — 100 допп./м <sup>2</sup>
Соединение элементов в батареи	Получение просветляющих покрытий методом пульверизации Частичная автоматизация (к.п.д. равен 12 — 18% (AM1))	100 — 600 допп./м <sup>2</sup>		

кремниевых солнечных батарей. Следует отметить, что на первом этапе значительный эффект можно получить благодаря применению концентрированного излучения при средних значениях коэффициента концентрации  $< 20$ . Использование концентраторов может оказаться необходимым для получения намеченной проектом ERDA на конец первого этапа стоимости пиковой мощности (50 цент/Вт), несмотря на то что стоимость самих солнечных батарей может не достигнуть предполагаемого уровня. Однако на втором этапе применение оптических концентраторов станет менее необходимым, поскольку ожидается дальнейшее снижение стоимости кремниевых батарей.

Второй этап, который продлится приблизительно до 1995 г., будет характеризоваться переходом от процессов, основанных, по существу, на современной технологии, к высокоскоростным и дешевым процессам с применением новых технологических методов (табл. 6). В настоящее время уже начинают разрабатываться основы новой технологии. Таким образом, начало второго этапа не может быть совмещено с концом первого этапа, поскольку значительное количество исследований и разработок, которые будут положены в основу второго этапа, должно осуществляться совместно с работами по выполнению первого этапа.

На заключительном третьем этапе будет создано совершенное промышленное производство, для которого будут характерны более медленный рост объема продукции и постоянное совершенствование технологических методов и процессов.

По мере завершения первого этапа ожидается, что в наземных условиях при единичной воздушной массе (условия AM1) будут получены средние значения к.п.д.  $\sim 12\%$ . Следует отметить, что к.п.д. солнечной батареи будет значительно ниже к.п.д. отдельных элементов, что вызвано потерями, связанными с несоответствием нагрузки, недостаточно высокой степенью заполнения батареи, отражением света от покрытий и т.п. Предполагается, что к концу второго этапа благодаря созданию более эффективных солнечных элементов и усовершенствованию методов сборки батарей их к.п.д. увеличится до  $14\%$ . Эти исследования, продолженные на третьем этапе, позволят получить батареи с к.п.д.  $\sim 15\%$  (табл. 5).

Прогнозирующая кривая является практическим инструментом для оценки возможности достижения целей, намеченных программой. Создание к 1985 г. солнечных батарей общей мощностью 300 МВт требует увеличения годового объема продукции более чем в 2 раза.

Прогнозирующие кривые для кремниевых солнечных элементов (фиг. 2) свидетельствуют о том, что в наиболее благоприятном случае конечная стоимость будет составлять приблизительно 100 долл./м<sup>2</sup>, или 80 цент/Вт пиковой мощности. Прогнозирующая кривая 70%-ного изменения стоимости продолжена до точки, соответствующей требуемому общему объему продукции, равному 2,5 км<sup>2</sup>. При использовании прогнозирующей кривой 85%-ного изменения стоимости для определения верхнего предела стоимости, обеспечивающего успешное выполнение программы, будет получено значение 600 долл./м<sup>2</sup>, соответствующее 5 долл./Вт пиковой мощности. На втором этапе этот уровень цен должен быть снижен до 21 – 100 долл./м<sup>2</sup>, что соответствует 15 – 70 цент/Вт пиковой мощности (табл. 5). Третий этап, срок завершения которого не установлен, предусматривает дальнейшее постепенное снижение стоимости, возможно, до уровня 16 – 50 долл./м<sup>2</sup>, или 10 – 30 цент/Вт пиковой мощности.

В то время как для получения в конце первого этапа 300 МВт пиковой мощности требуется создание солнечных батарей площадью 3 км<sup>2</sup>, общий объем производства в конце второго этапа должен составить 460 км<sup>2</sup>, что соответствует приблизительно 50 ГВт пиковой мощности. На третьем этапе объем производства должен постепенно возрасти, начиная с 200 км<sup>2</sup>/год в конце второго этапа до постоянного уровня  $\sim 500$  км<sup>2</sup>/год, соответствующего ежегодному приросту пиковой мощности, равному 75 ГВт.

Большой интерес представляет вопрос, связанный с размером доходов от реализации изготовленных на первом этапе солнечных батарей суммарной пиковой мощностью до 300 МВт. Эти данные могут быть получены путем интегрирования прогнозирующей кривой от точки, соответствующей началу реализации продукции, до точки, в которой достигается требуемый уровень объема реализуемой продукции. Приведенные на фиг. 2 зависимости (возрастающие по направлению к оси ординат, расположенной справа) представляют собой общий доход производства или доход от реализации всей продукции. Эти зависимости, построенные с использованием данных, начиная с 1975 г., соответствуют прогнозирующим кривым 70%-ного (сплошная линия), 80%-ного (штриховая линия) и 90%-ного (штрих-пунктирная линия) изменения стоимости. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что доход от реализации солнечных батарей на первом этапе может составить 500 – 1500 млн. долл., причем доход государства составляет  $\frac{1}{4}$  этой величины. На втором этапе общий доход промышленности

будет колебаться в пределах 15 – 100 млрд. долл. После этого на третьем этапе годовой доход промышленности будет составлять 8 – 25 млрд. долл. (табл. 5).

Эти данные позволяют предварительно оценить объем капиталовложений, необходимых для создания и оснащения предприятий и обеспечивающих рост объема продукции. На протяжении первого этапа требуемый объем капиталовложений будет достигать 200 – 800 млн. долл. На втором этапе необходимый объем капиталовложений может составить 5 – 25 млрд. долл. Наконец, на третьем этапе новые капиталовложения, требуемые для создания и оснащения предприятий, будут медленно сокращаться и заменяться средствами на возмещение стоимости вышедшего из строя оборудования, которые будут поставляться амортизационным фондом. Исследования, проводимые на первом этапе, наряду с усовершенствованием производственных процессов и вводом в действие энергетических установок, а также состояние разработок по созданию новых технологических методов будут определять на втором этапе дальнейший прогресс в области значительного расширения производства и снижения стоимости. Несмотря на то что с помощью прогнозирующих кривых уровень цен можно предсказать с определенной вероятностью, из-за недостаточной информации в настоящее время практически невозможно получить абсолютно достоверные данные о возможности успешного выполнения программы. Это положение существенно изменится до начала второго этапа после того, как в течение ближайших 9 лет будет получена новая информация. При этом предполагается, что исследования и разработки, направленные на создание новых технологических методов, будут соответствующим образом субсидированы. Однако, если принять во внимание существующие бюджетные планы, выполнение такого условия представляется сомнительным.

### ВОЗМОЖНЫЕ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕШЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Значительное сокращение стоимости продукции позволит широко использовать фотоэлектрические системы преобразования солнечной энергии в наземных условиях. Для этого необходимы новые методы их изготовления. Усовершенствование или автоматизация существующих производственных процессов, по-видимому, не позволят достигнуть приемлемой стоимости. Необходима организация полностью авто-

матизированного, непрерывного (несерийного) производства. Ранее проведенные работы показали, что механическое и электрическое соединение отдельных солнечных элементов в модули, а затем в батареи приводит к дополнительному увеличению стоимости по отношению к стоимости изготовления элементов. В будущем все отдельные этапы технологического процесса должны быть совместимы друг с другом, что позволит сократить общее число технологических операций, а также упростить и удешевить весь процесс. Для выполнения каждой операции необходимо применение высокоскоростных методов, что позволит уменьшить количество оборудования для непрерывного процесса и тем самым снизить объем капиталовложений. В том случае, когда продолжительные операции исключить нельзя, могут быть оставлены наиболее простые процессы, допускающие применение небольшого количества простого оборудования. Например, 30-часовая термообработка может проводиться в печи при последовательной загрузке листов в камеру. Необходимость разработки других технологических методов (табл. 7) не требует пояснения.

Процесс изготовления солнечных батарей может быть разделен на четыре основные стадии (табл. 8). Дальнейшее обсуждение будет связано с рассмотрением новых технологических методов, применяемых на этих четырех стадиях.

Таблица 7

#### Пути снижения стоимости

---

Сокращение числа технологических операций  
 Сокращение числа ручных операций  
 Создание приборов с более простой структурой  
 Разработка непрерывного поточного процесса (несерийного)  
 Использование высокоскоростных процессов  
 Упрощение продолжительных процессов (таких, как термообработка)  
 Использование меньшего числа промежуточных материалов  
 Упрощение технологического процесса:  
     исключение операции маскирования  
     исключение мокрых процессов  
     сокращение допусков  
     применение совместимых процессов  
 Применение легкоконтролируемых высокопроизводительных процессов  
 Создание интегральных батарей  
 Сокращение объема потребляемой энергии

---

Таблица 8

Четыре основные стадии процесса изготовления солнечных батарей

1. Восстановление кремния из минерала, очистка
2. Кристаллизация и получение листового материала
3. Изготовление прибора
4. Соединение элементов в батарею

### ДЕШЕВЫЙ КРЕМНИЙ ТРЕБУЕМОЙ ЧИСТОТЫ

Применяемый в настоящее время метод получения высокочистого поликристаллического кремния состоит из нескольких этапов, перечисленных в табл. 9. Здесь показано также увеличение стоимости на различных этапах. Целью проведенных исследований является разработка наиболее простого процесса, начиная с обработки исходного материала (кремнезема) до получения кремния требуемой чистоты.

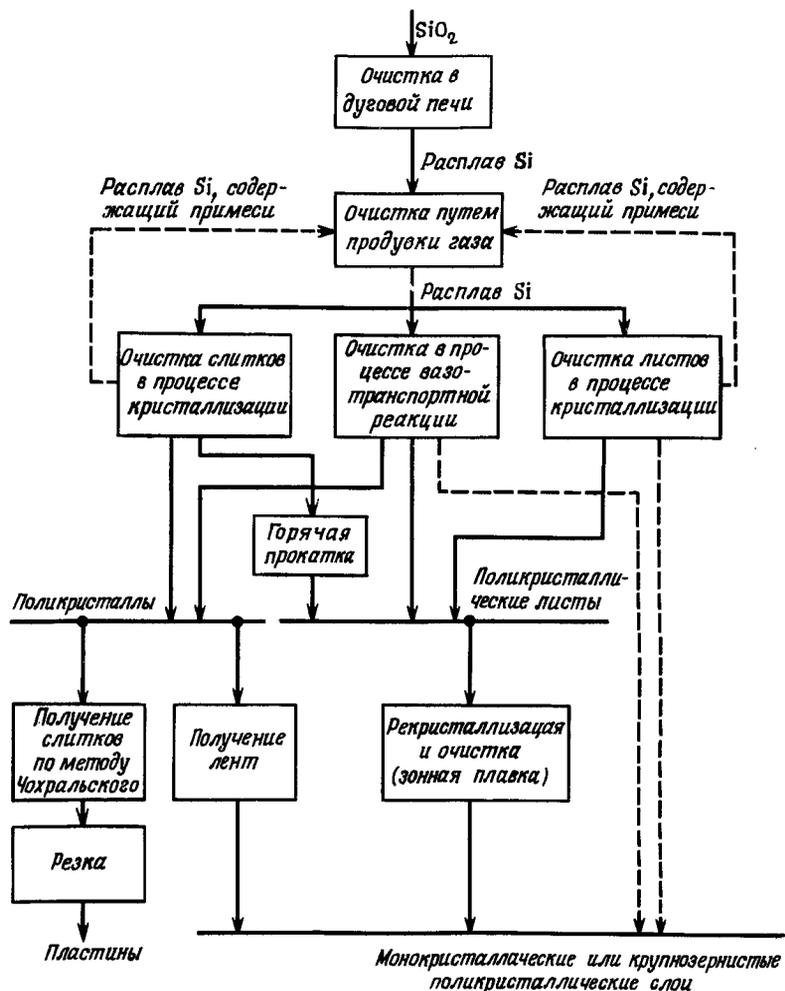
Проводимая работа включает экспериментальные и теоретические исследования, связанные с определением и расчетом параметров процесса и определением возможной последовательности операций. Часть исследований направлена на установление требуемой степени чистоты материала, предназначенного для создания высокоэффективных солнечных элементов. Ранее проводившиеся в этом направлении работы не дали определенных результатов.

На фиг. 4 изображены возможные способы превращения исходного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в монокристаллические или крупнозернистые поликристаллические листы кремния (для изготовления солнечных элементов), объединенные в предполагаемом технологическом процессе очистки, который, по-видимому, позволит получать поликристаллический кремний требуемой чистоты стоимостью, согласно проведенным оценочным расчетам, в пределах 4 – 10 долл./кг. В начальной стадии процесса очистки будет применяться используемый в настоящее время дешевый и энергетически эффективный метод восстановления кремния из  $\text{SiO}_2$  в дуговой печи, однако теперь он будет применяться для получения кремния более высокой степени чистоты. Из образующегося расплавленного кремния в результате направленной кристаллизации могут быть получены большие поликристаллические слитки, которые очищаются вследствие сегрегации примесей. Однако для достижения требуемой степени чистоты процесс кристаллизации должен проводиться медленно, что может снизить его

Таблица 9

Современный технологический процесс получения поликристаллического кремния

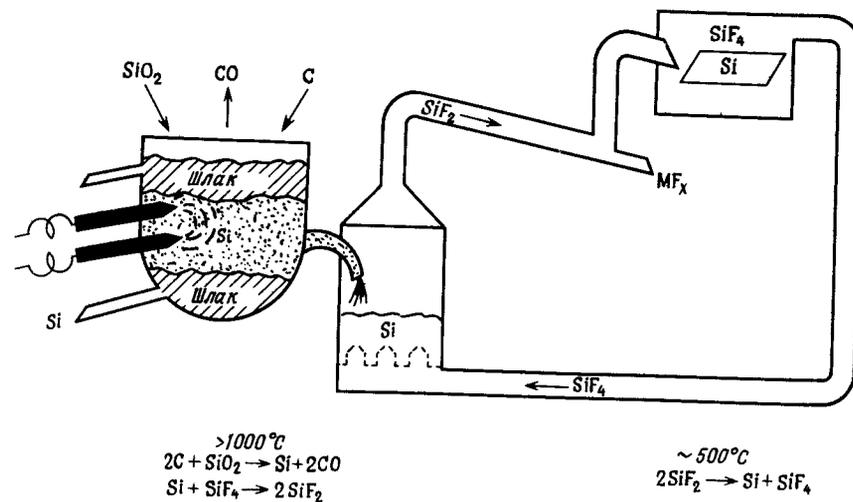
Исходный материал	Процесс	Полученный материал	Стоимость, долл./м <sup>2</sup> (долл./234 г)
$\text{SiO}_2$	Восстановление кремния в дуговой печи путем коксования	Металлургический кремний (ферросилициум) со степенью чистоты $\approx 98\%$	
Ферросилициум	Пулверизация, взаимодействие с соляной кислотой	Хлорсилан	
Хлорсилан	Частичная перегонка	$\text{SiHCl}_3$	
$\text{SiHCl}_3$	Частичная перегонка	Высокоочищенный $\text{SiHCl}_3$	1,54
Высокоочищенный $\text{SiHCl}_3$	Восстановление кремния в процессе пиролитического разложения в присутствии $\text{H}_2$	Кремний, предназначенный для изготовления солнечных элементов (содержание примесей $< 10^{-6}$ )	14



Фиг. 4. Возможная последовательность технологических операций очистки кремния, предназначенного для изготовления солнечных элементов.

экономическую эффективность [11, 12]. Ранее изучавшийся процесс очистки, при котором применяется продувка расплава газом, в настоящее время благодаря тщательно проведенным экспериментам [11, 12] считается недостаточно эффективным.

Наряду с методом направленной кристаллизации возможно применение химической реакции кремния с четырехфтористым кремнием,



Фиг. 5. Возможный способ очистки кремния в процессе газотранспортной реакции и получение поликристаллических листов кремния методом химического осаждения из паровой фазы.

изучавшейся Макдайамидом и др. [12], которая позволяет провести извлечение кремния из расплава, его очистку и химическое осаждение из паровой фазы в течение одной стадии процесса, при этом обеспечивается полное циклическое восстановление  $\text{SiF}_4$  с использованием только одного промежуточного вещества (фиг. 5). После выполнения предварительных экспериментальных исследований этот процесс с хорошей воспроизводимостью осуществлялся в специально разработанном реакторе. Опытным путем установлено, что реакцией, ограничивающей скорость процесса, является взаимодействие  $\text{Si}$  с  $\text{SiF}_4$ , которое происходит при температуре, превышающей  $1100^\circ\text{C}$ . При  $1150^\circ\text{C}$  выход реакции составлял  $\sim 0,1$  г  $\text{Si}$  на 1 л газообразных веществ, содержащихся в системе при атмосферном давлении. При проведении процесса в производственных условиях температура реакции должна быть выше точки плавления  $\text{Si}$  ( $1420^\circ\text{C}$ ), что может привести к существенному повышению скорости реакции. В среднем 85% кремния, расплавленного в высокотемпературной зоне, осаждается в температурной зоне, ограниченной  $1000 - 400^\circ\text{C}$ . Несмотря на то что необходимо дальнейшее изучение этого процесса, в том

числе кинетики реакций, имеющиеся в настоящее время данные позволяют отнести этот метод (или его разновидности) к числу перспективных дешевых технологических методов.

Для осуществления третьего метода, предлагаемого фирмой Union Carbide, разрабатываются дешевые способы получения силана ( $\text{SiH}_4$ ).

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН И ЛИСТОВ

Разрабатываемые методы получения пластин и листов кремния достаточно разнообразны. В этой области основные усилия направлены на выбор пути создания приборов на основе поликристаллического и монокристаллического (а также крупнозернистого) кремния. Монокристаллические солнечные элементы имеют высокий к.п.д. При использовании мелкозернистого поликристаллического или аморфного материала получены низкие значения к.п.д., не превышающие нескольких процентов. С другой стороны, кремниевые солнечные элементы, изготовленные из материалов с промежуточными размерами кристаллов порядка нескольких миллиметров, имеют к.п.д.  $\sim 10\%$ .

Наличие отдельных кристаллов в пластине кремния оказывает двойное влияние на характеристики элементов: кристаллы с низкой степенью ориентации препятствуют движению генерированных светом носителей заряда и воздействуют на свойства обедненной области, в которой образуется потенциальный барьер. Недавно возобновленные попытки нанесения поликристаллических пленок с помощью усовершенствованного оборудования с использованием методов испарения в вакууме электронным лучом и химического осаждения из паровой фазы привели к получению пленок с разориентированными или неоднородными зернами, но не позволили изготовить солнечные элементы с высокими характеристиками. С другой стороны, известно, что при контролируемом охлаждении литье обеспечивает получение кристаллов больших размеров.

Применяемый в настоящее время стандартный технологический процесс, позволяющий получать монокристаллические элементы диаметром до 7,6 см или элементы прямоугольной формы размером до  $2 \times 8$  см, основан на выращивании кристаллов по методу Чохральского с последующей резкой при помощи алмазных лент и шлифовкой абразивным порошком. Окончательная толщина пластин обычно равна 0,20 – 0,35 мм, а потери материала при резке и травлении составляют  $\sim 50 - 70\%$ . Недавно обсуждались возможности дальней-

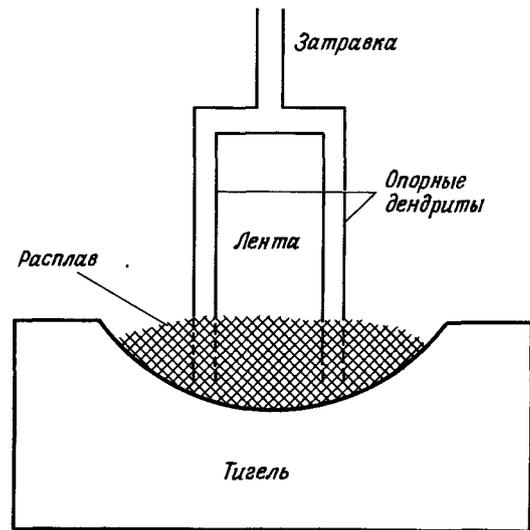
Таблица 10

Стоимость кремния, получаемого по методу Чохральского

Параметры	Современные данные	Планируемые данные			
Диаметр кристалла, см	7,62	10,16	15,24	20,32	
Толщина пластин, мм	0,4	0,24	0,20	0,20	
Толщина слоя материала, теряемого при резке, мкм	0,28	0,16	0,12	0,12	
Стоимость кварцевого тигля, долл./кг	19,19	12,00	12,00	12,00	
Стоимость оборудования, подлежащего замене, долл./кг	11,96	5,60	3,60	3,45	
Капиталовложения, долл./кг	9,81	4,68	3,00	2,87	
Другие непосредственные расходы, долл./кг	6,68	3,78	1,96	1,43	
Кремний по цене 4 долл./кг	5,50	5,50	5,50	5,50	
Стоимость цилиндрических слитков кремния	62,79	36,77	30,17	29,20	
Стоимость пластин, долл./м <sup>2</sup>	113,65	42,44	25,64	24,82	

шего технологического усовершенствования процесса выращивания кристаллов по методу Чохральского [13]. Экономический анализ будущих разработок показал, что при вытягивании кристаллов их стоимость определяется главным образом стоимостью оборудования с учетом необходимости его частичной замены, стоимостью тиглей и кремния. Поэтому наиболее важные направления будущих разработок связаны с повторным использованием тиглей и пополнением их грузочным материалом.

Даже при условии, что потери материала при резке будут значительно сокращены, стоимость исходных кремниевых пластин для массового производства кремниевых солнечных батарей, по-видимому, останется предельно допустимой по отношению к приемлемой стоимости [14] (табл. 10). Существующие дешевые способы проведения процесса, основанные на методе Чохральского, позволяют получать большие круглые пластины. Однако с точки зрения величины последовательного сопротивления элементы с большой площадью (10 – 20 см в диаметре) менее предпочтительны по сравнению с элементами удлиненной прямоугольной формы. Использование больших



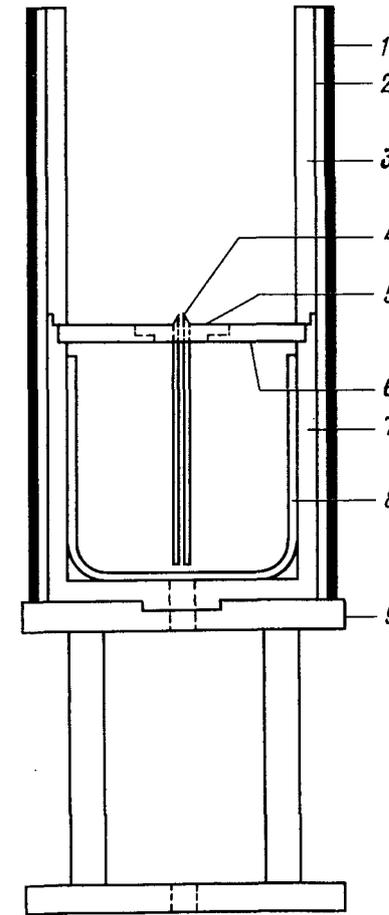
Фиг. 6. Схематическое изображение процесса выращивания междендритных лент.

листов материала для размещения на них интегральной батареи позволит сократить стоимость сборки элементов в батарею. И наконец, желательно исключить или ограничить применение операции резки, приводящей к потерям материала. Поэтому разрабатываются методы получения листового материала.

В работе [15] широко исследовался метод выращивания междендритных лент (фиг. 6). Установлено, что этот процесс является трудно контролируемым и недостаточно дешевым. Согласно этому методу, два параллельных иглообразных кристалла вертикально опускаются в тигель, содержащий переохлажденный расплав кремния. Когда дендриты извлекаются из расплава, между ними образуется пленка расплавленного кремния, которая, затвердевая, превращается в так называемый ленточный кристалл. Эти кристаллы содержат продольные плоскости двойникования, параллельные основной поверхности ленты. Однако к.п.д. элементов, изготовленных из такого материала, равны к.п.д. солнечных элементов других типов. Возобновленные исследования этого метода направлены на создание легко контролируемого и дешевого процесса.

Другая группа проводимых в настоящее время исследований связана с получением кремниевых лент методом вытягивания профили-

рованной пленки (фиг. 7). Этот процесс основан на действии сил сцепления между жидким кремнием и материалом фильеры, благодаря которым поверхность расплавленного кремния, поступающего к отверстию фильеры, имеет форму мениска, из которого кристалл вытягивается таким же образом, как и при использовании метода



Фиг. 7. Схематическое изображение тигля и фильеры, применяемых при получении профилированных лент.

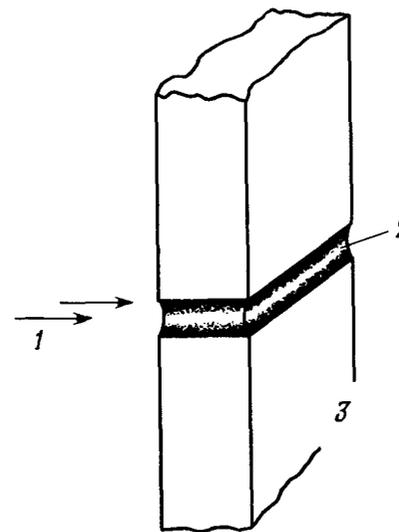
1 — кварцевая труба; 2 — изолирующая углеродная вата; 3 — графитовый нагреватель; 4 — фильера; 5 — держатель фильеры; 6 — кольцо держателя фильеры; 7 — графитовая оболочка; 8 — кварцевый тигель; 9 — основание. Рост лент происходит из верхнего отверстия фильеры. Расплав подается по капилляру, поэтому его уровень в тигле несущественен.

Чохральского. Трудности осуществления этого процесса связаны с выбором материала фильеры, который не должен быть смачиваемым, как, например,  $\text{SiO}_2$ , и не должен быстро растворяться в кремнии. Лучшим материалом для фильер, даже несмотря на то что он не полностью удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, является высокочистый углерод. Недостатками метода являются эрозия фильер, наличие в ленточном кремнии включений карбида и утолщение ленты у краев. Профилированные ленты кремния, как и междендритные ленты, длиной более 2 м и шириной более 2 см получены при скорости роста несколько сантиметров в минуту. Солнечные элементы, изготовленные из профилированных кремниевых лент, имеют к.п.д.  $\sim 8\%$  [16].

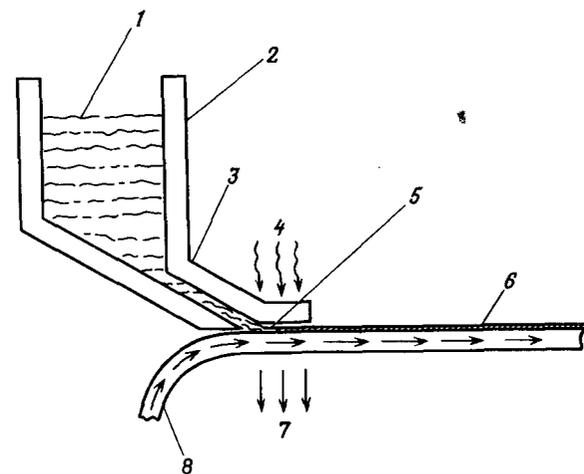
Известно, что благодаря пластической деформации материалов возможно осуществление таких высокопроизводительных и дешевых процессов, как прокатка и штамповка. Однако оценка возможности их применения для обработки кремния затруднена ввиду полного отсутствия количественных данных о механических свойствах поликристаллического кремния при высокой температуре. Эти данные необходимы для ответа на ряд вопросов. Какие допустимы скорости прокатки и штамповки? Какое уменьшение толщины может быть достигнуто при прохождении через валки? Каково качество получаемой кристаллической структуры? В процессе тщательного выполнения экспериментальной программы в прошлом году были получены первые данные, которые позволяют ответить на часть вопросов [17, 12]. Согласно этим данным, дешевый листовый кремний можно получить путем прокатки при температуре  $1350 - 1400^\circ\text{C}$ . Помимо завершения экспериментов по получению необходимых данных, основной задачей является выбор материала, пригодного для изготовления валков.

В число других предполагаемых методов получения листового материала входит метод литья, который благодаря высокому поверхностному натяжению расплавленного кремния может применяться для получения тонких листов в процессе непрерывного поступления материала через выпускное отверстие (фиг. 8). Считается, что метод выращивания кремния из раствора является недостаточно дешевым для получения листового материала.

Поскольку большая часть методов получения листового материала, начиная с химического осаждения из паровой фазы и кончая прокаткой, обеспечивает поликристаллическую структуру, требуется последующее проведение процесса рекристаллизации. Недавно разработанный метод увеличения размеров зерен в процессе отжига при



Фиг. 8. Схематическое изображение непрерывного процесса литья пистов. 1 — электронный пучок; 2 — расплавленная зона; 3 — поликристаллический или рекристаллизованный лист.



Фиг. 9. Схематическое изображение процесса рекристаллизации методом зонной плавки.

1 — жидкий Si; 2 —  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiN?}$ ); 3 — выпускное отверстие; 4 — нагрев; 5 — граница раздела жидкой и твердой фаз; 6 — лист кремния; 7 — охлаждение; 8 — транспортер с покрытием из Mo или SiN.

Тигель и выпускное устройство поддерживаются при температуре, превышающей точку плавления кремния, температура транспортера ниже точки плавления кремния.

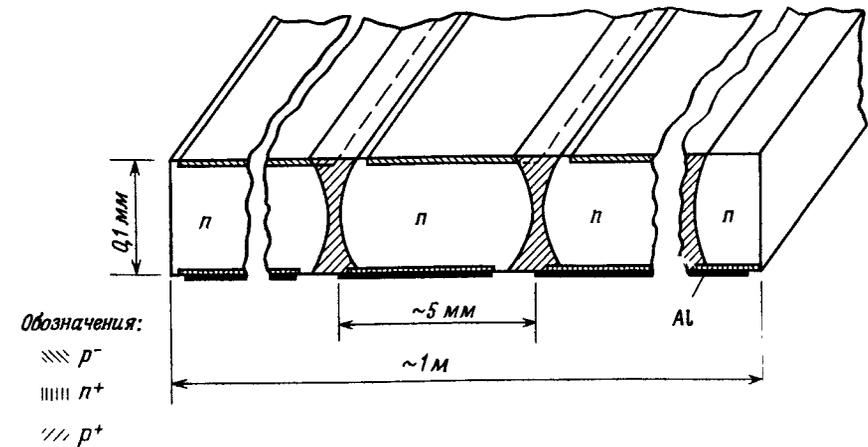
периодическом изменении температуры, по-видимому, является недостаточно эффективным для обработки кремния. Напротив, экспериментальные исследования высокотемпературных деформаций показали, что в результате отжига размер зерен существенно увеличивается.

Для проведения процесса рекристаллизации мелкозернистой поликристаллической структуры кремниевых листов, необходимого для получения крупнозернистой или монокристаллической структуры (фиг. 9), представляется возможным применение метода зонной плавки. Основы метода зонной плавки хорошо изучены, и он широко применяется для очистки кремния и выращивания кристаллов. Основными проблемами, которые необходимо решить при разработке дешевого метода рекристаллизации, являются необходимость получения высоты расплавленной зоны, сравнимой с толщиной листа, соответствие между скоростью перемещения зоны и предполагаемой скоростью изготовления листов и создание процесса, совместимого с непрерывным поточным производством [18].

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРИБОРОВ И БАТАРЕЙ

После получения пластин или листов для изготовления приборов необходимо проведение нескольких технологических операций. Некоторыми из них являются диффузия или эпитаксиальное осаждение материала для получения гомо- или гетероперехода или создание барьера Шоттки, нанесение контакта на выбранные участки поверхности, создание просветляющего покрытия, последовательное или параллельное соединение элементов и размещение элементов на подложке. В настоящее время предпринимаются попытки упростить эти технологические операции, например, путем использования печатного метода получения контактов, с помощью введения методов пульверизации или погружения вместо испарения в вакууме, применяемого при создании просветляющих покрытий, посредством механизации операций и т.д.

Предполагается, что создание "интегральной батареи" (фиг. 10) позволит существенно упростить процесс изготовления. Интегральные батареи такого типа могут состоять из большого числа (возможно, более 200) электрически последовательно соединенных элементов, созданных на одном листе кремния. Таким образом, обычный метод коммутации элементов с помощью внешних металлических



Фиг. 10. Возможная конструкция интегральной батареи.

соединений заменяется методом, аналогичным применяемому в технологии изготовления современных интегральных схем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предполагаемое существенное увеличение объема производства солнечных батарей требует полного пересмотра технологических методов их изготовления с целью значительного сокращения стоимости продукции.

В течение двух последних десятилетий в полупроводниковой промышленности разрабатывались методы получения кремния максимально высокой чистоты, необходимого для изготовления сложных интегральных схем или высоковольтных электрических приборов. Потребность в кремнии с низким удельным сопротивлением приводит к необходимости разработки новых методов очистки кремния, которые могут использоваться в сочетании с применяемым в настоящее время процессом восстановления кремния из двуоксида кремния. Исследуются многочисленные методы получения большого количества кремния в виде монокристаллов или крупных кристаллитов; разрабатываются методы производства солнечных батарей (возможно, интегральных батарей) с применением автоматизированных процессов. Есть основания предполагать, что в ближайшие 10 – 20 лет будет достигнут по крайней мере верхний предел приемлемой стоимости, составляющий 15 – 60 долл./м<sup>2</sup> при к.п.д. солнечных батарей, равном 12 – 15%.

## Литература

1. Wolf M., A New Look at Silicon Solar Cell Performance, *Energy Conversion*, **11**, 63 – 73 (1971).
2. Lindmayer J., Allison J. F., The Violet Cell: An Improved Silicon Solar Cell, *COMSAT Tech. Rev.*, **3**, Spring, 1973, p. 1 – 22.
3. Haynos J. et al., The COMSAT Non-reflective Silicon Solar Cell: A Second Generation Improved Cell, *Proceedings of the Intern'l. Conf. on Photovoltaic Power Conversion*, Sept. 25 – 27, 1974, Hamburg, опубликовано DGLR, Köln, 1974, p. 487 – 500.  
Allison J.F. et al., A Comparison of the COMSAT Violet and Non-reflective Solar Cells, *COMSAT Tech. Rev.*, **5**, Fall, 1975, p. 211 – 223.
4. Iles P.A., Soclof S.I., Effect of Impurity Doping Concentration on Solar Cell Output, *Proc. 11th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, IEEE Cat. No. 75CHO948-OED, 1975, p. 19 – 24.
5. Queisser H.J., Theoretical Efficiency Considerations for Photovoltaic Energy Converters, p. 50 – 55 in *Solar Cells, an Outlook for Improved Efficiency*, Nat'l Academy of Sciences, Wash., D.C., 1972; Fischer H., Pschunder W., Impact of Material and Junction Properties on Silicon Solar Cell Efficiency, *Proc. 11th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, IEEE Cat. No. 75CH0948-OED, 1975, p. 25 – 31.
6. Lindholm F.A., Studies of Silicon *pn*-Junction Solar Cells, Final Technical Report, July 1975, NASA Grant NSG-3018, NASA Lewis Res. Center.
7. Data for Use in the Assessment of Energy Technologies, AET-8, April 1972. A report submitted to the Office of Science and Technology, Executive Office of the President, under Contract OST-30, Associated Universities, Inc., Upton, New York.
8. Bureau of Mines, Minerals Yearbook 1969, U.S. Dept. of the Interior, U.S. Gov't. Printing Office, Washington, D.C., 1970.
9. Wolf M., Cost Goals for Silicon Solar Arrays for Large Scale Terrestrial Applications – Update 1974, *Energy Conv.*, **14**, Feb. 1975, p. 49 – 60.
10. Definition Report, National Solar Energy Research, Development, and Demonstration Program, report ERDA-49, ERDA, Washington, D.C., June 1975; Magid L.M., The National Photovoltaic Conversion Program, ERDA-report, ERDA, Wash., D.C.
11. Hunt L.P., частное сообщение.
12. Research and Development of Low Cost Processes for Integrated Solar Arrays, Univ. of Pennsylvania Final Report on ERDA Grant EC(11-1)-2721, готовится к печати.
13. Kran A., Single Crystal Si Growth by Czochralski and Ribbon Techniques – a Comparison of Capabilities, *Proceedings of the Symposium on the Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion*, May 20–22, 1974, Tucson, Ariz., NSF-RANN Grant GI-43795, p. 422 – 430.
14. Wolf M., Progress in New Low Cost Processing Methods, *Processing of the 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, May 6 – 7, 1975, Phoenix, Ariz., p. 306 – 314.

15. Poliquin P.P., Winter W.E., Current Achievements in the Growth and Use of Silicon Dendritic Web, *Proceedings of the Nat'l. Aerospace Electronics Conf.*, May 11 – 13, 1964, Dayton, Ohio.
16. Mlavsky A.I., Ribbon Growth of Silicon, *Proceedings of the Symposium on the Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion*, May 20 – 22, 1974, Tucson, Ariz., NSF-RANN Grant GI-43795, p. 71 – 83.
17. Graham C.D., Kulkurni S., Pope D.P., частное сообщение.
18. Wolf M., Methods for Low Cost Manufacture of Silicon Solar Arrays, 74 WA/ /Ener-4 of the ASME Winter Meeting, New York, November 17 – 22, 1974.

## Характеристики высокоэффективных кремниевых солнечных элементов

Дж. Лори, К. Богус<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе проводится сравнение характеристик различных высокоэффективных кремниевых солнечных элементов. Ранее были опубликованы результаты испытаний элементов такого типа в лабораторных и естественных условиях. Однако сравнение полученных данных оказалось невозможным по ряду причин, включая такие, как различие в технологии производства элементов, неадекватность естественных условий, в которых проводились испытания, а также использование различных эталонов и имитаторов солнечного излучения.

В связи с этим была предпринята попытка сравнить характеристики различных высокоэффективных солнечных элементов, полученные при испытании этих элементов в одинаковых условиях. С этой целью Европейским центром космических исследований были отобраны высокоэффективные элементы 12 серий, изготовленные американскими и европейскими фирмами. Основное требование, которое предъявлялось к выбранным элементам, заключалось в том, что все они должны быть изготовлены примерно в одно и то же время (зима 1974/75 г.).

Солнечные элементы подвергались испытаниям, которые предусматриваются программой испытаний солнечных батарей для космических аппаратов, разработанной Европейским центром космических исследований. Ниже дается подробное описание проводимых испытаний, производится оценка полученных результатов и обсуждается возможность использования солнечных элементов в космических и наземных условиях.

Выполнение всех требований стандартной программы испытаний не является обязательным при рассмотрении конкретного случая

<sup>1)</sup> J.C. Larue, K. Bogus, European Space Agency European Space Research and Technology Centre.

применения солнечных элементов для космических целей. Для выбора оптимального варианта солнечного элемента необходимо детальное сопоставление основных параметров, определенных в результате испытаний, с заданными параметрами. Этот вопрос является предметом дальнейшего изучения и в данной работе не обсуждается.

Испытания солнечных элементов, предназначенных для использования в наземных условиях, также можно проводить в соответствии с принятой программой испытаний элементов, предназначенных для космических целей, при условии, что в эту программу внесены соответствующие изменения. Однако независимо от того, выполнялось это условие или нет, большинство результатов испытаний представляет интерес с точки зрения возможности использования солнечных элементов в наземных условиях.

### ОБРАЗЦЫ

В табл. 1 приведены условные обозначения серий и характеристики солнечных элементов, для изготовления которых использовался кремний, выращенный в тигле (Т), кремний, полученный методом

Таблица 1

Характеристики солнечных элементов

Обозначение серии элементов <sup>1)</sup>	Тип исходного кремния	Удельное сопротивление Ом · см	Толщина, мкм	Состав просветляющего покрытия	BSF <sup>2)</sup>
A1	Т	2	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Нет
A2	Т	2	300	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"
A3	Т	10	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Есть
E1	ЗП	10	125	TiO <sub>2</sub>	Нет
E2	ЗП	10	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"
E3	"Waso"	2	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"
E4	ЗП	10	200	TiO <sub>2</sub>	"
E5	Т	10	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"
E6	Т	10	200	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"
E7	Т	10	200	TiO <sub>2</sub>	"
E8	ЗП	1	200	TiO <sub>2</sub>	"
E9	ЗП	1	200	TiO <sub>2</sub>	"

<sup>1)</sup> А — американская фирма-изготовитель, Е — европейская фирма-изготовитель.

<sup>2)</sup> BSF — изотипный переход вблизи теневой поверхности.

зонной плавки (ЗП), и кремний марки "Waso", изготавливаемый фирмой Wacker Chemie GmbH.

Удельное сопротивление исходного материала составляло 1, 2 и 10 Ом · см. Для изготовления покрытий солнечных элементов использовалась двуокись титана или пятиокись тантала.

Толщина элементов серий А2 и Е1 составляла 300 и 125 мкм соответственно, остальные элементы имели толщину 200 мкм. Все элементы имели размеры 2 × 2 см.

Солнечные элементы серии А3 имели изотонный переход вблизи теневой поверхности элемента и благодаря этому обладали повышенной чувствительностью к длинноволновому излучению.

Для защиты солнечных элементов использовались покровные стекла толщиной 100 мкм, причем европейские фирмы применяли стекло, содержащее церий, а американские фирмы — плавленный кварц.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### ВИЗУАЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНТРОЛЬ ИХ РАЗМЕРОВ

Солнечные элементы были тщательно обследованы для выявления механических нарушений и внешних дефектов, таких, как краевые и угловые сколы, трещины, дефекты просветляющего покрытия, дефекты покровных стекол и их сдвиг, образование пузырьков в слое клеящего состава, разрыв контактных полос и коррозия. Обследование проводилось как невооруженным глазом, так и с помощью стереомикроскопа с 5 — 10-кратным увеличением.

Размеры образцов контролировались с помощью обычного рабочего шаблона. Толщина элементов определялась по их массе (метод взвешивания).

### ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , напряжение холостого хода  $V_{хх}$  и максимальная мощность  $P_{макс}$  солнечных элементов измерялись при облучении элементов излучением, спектр которого соответствовал спектру внеатмосферного солнечного излучения (условия АМ0). Источником излучения служил имитатор внеатмосферного солнечного излучения на ксеноновых лампах, изготовленный фирмой АЕГ. Путем выбора соответствующих фильтров для ксеноновых ламп удалось добиться довольно точного соответствия спектрального состава имитатора условиям АМ0, так что ошибка измерений выходных

характеристик, обусловленная различием спектров излучения, не превышала 1% [1].

Суммарная интенсивность светового излучения контролировалась с помощью эталонных солнечных элементов, калибровка которых была произведена летом 1974 г. на о. Мальта с использованием оборудования английской авиационной компании. Эти эталоны использовались при измерениях характеристик элементов, облученных электронами [2]. Ошибка измерений, возникающая вследствие различия спектральной чувствительности элемента каждой серии и эталонного элемента, не превышала 1%.

В процессе измерений солнечные элементы находились при температуре  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Для определения температурных коэффициентов  $I_{кз}$ ,  $V_{хх}$  и  $P_{макс}$  выходные характеристики одного из элементов каждой серии измерялись в интервале температур 10 — 75 °С. На основе полученных данных можно рассчитать выходные характеристики солнечного элемента, работающего при любой температуре в пределах данного интервала.

### СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Спектральная чувствительность всех элементов определялась относительно спектральной чувствительности калиброванного эталонного солнечного элемента, абсолютная точность калибровки которого составляла 2%. Проводилось сравнение величины тока короткого замыкания эталона и исследуемого элемента при освещении монохроматическим излучением, создаваемым с помощью 16 узкополосных интерференционных фильтров с шириной полосы пропускания 50 нм в интервале длин волн 300 — 1100 нм. Такое сравнение осуществлялось до и после облучения элементов электронами. Спектральные зависимости необлученных солнечных элементов использовались для расчета их теоретических выходных характеристик при освещении солнечным излучением в наземных условиях.

### ОБЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАМИ

Облучение солнечных элементов электронами осуществлялось на ускорителе Ван де Граафа (фирмы British Insulated Cables Cables Ltd., Лондон). Энергия электронов у поверхности элементов была равна 1 МэВ. Значения интегрального потока электронов со-

ставляли  $2 \cdot 10^{14}$ ,  $5 \cdot 10^{14}$ ,  $1 \cdot 10^{15}$  и  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> при плотности однородного потока  $2,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>.

Облучение электронами проводилось в вакууме (0,133 Па) при температуре  $15 \pm 5$  °С. За каждым сеансом облучения элементов электронами следовало световое облучение, продолжительность которого была не менее 48 ч, интенсивность светового излучения соответствовала плотности потока в  $1,39 \cdot 10^9$  эрг/(см<sup>2</sup> · с).

С целью изучить влияние последовательного электронного облучения на свойства элементов облучение проводилось в два этапа: сначала элементы подвергались воздействию интегрального потока электронов  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, затем измерялись характеристики элементов, после чего они вновь облучались электронами, интегральный поток которых составлял  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, так что суммарный интегральный поток равнялся  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Аналогично после двукратного воздействия на элементы интегрального потока электронов, равного  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, суммарный поток составлял  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

Следует отметить, что испытания чувствительности элементов к воздействию светового излучения после их облучения электронами стали проводиться после того, как было обнаружено ухудшение характеристик элементов при фотонном облучении [3]. Оказалось, что степень ухудшения характеристик зависит от свойств материала базы солнечных элементов и от дозы предварительного облучения. По-видимому, эксперименты, в ходе которых осуществлялось последовательное облучение элементов электронами и светом, недостаточно точно воспроизводят условия, существующие в космическом пространстве, где воздействие частиц и светового излучения происходит одновременно. Для правильной оценки влияния фотонного облучения желательно, чтобы дальнейшие исследования проводились в условиях, более близких к реальным.

#### УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЛАГИ И КИПАЩЕЙ ВОДЫ

Проведение таких испытаний было вызвано необходимостью проверить стабильность контактов и свойств просветляющих покрытий при хранении элементов во влажной атмосфере. Испытания проводились в камере, давление в которой соответствовало атмосферному, а температура равнялась 60 °С. Три образца каждой серии помещались в камеру и выдерживались в ней в течение 4 сут в атмосфере с относительной влажностью 90 – 95%.

При испытаниях устойчивости элементов к воздействию кипящей воды они погружались на 15 мин в кипящую дистиллированную воду, а затем высушивались в атмосфере сухого воздуха при температуре 60 °С.

После указанных испытаний проверялась прочность сцепления контактов и просветляющего покрытия с поверхностью элемента. Для этого на поверхность наносили полоску клеящего состава, которую затем отделяли.

#### УСТОЙЧИВОСТЬ К ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ

После испытаний устойчивости элементов к воздействию влаги и кипящей воды изучалось влияние периодического изменения температуры на характеристики элементов. Испытания проводились в специальной установке, через которую пропускался поток газа. Проведены пять термоциклов в атмосфере сухого азота в температурном интервале от +100 до –180 °С со скоростью охлаждения и нагрева более 100 °С/мин.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

##### ВИЗУАЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНТРОЛЬ ИХ РАЗМЕРОВ

Большая часть образцов не имела наружных повреждений. Исключение составляли элементы серии А1, у которых наблюдались дефекты просветляющего покрытия (небольшие пустоты диаметром до 1 мм) и пузыри на теневом контакте, элементы серий А2 и А3, которые имели разрывы контактных полос на лицевой поверхности, и элементы серии Е4, лицевой контакт которых был окислен. Поперечное сечение элементов составляло  $20 \times 20 \pm 1$  мм. Минимальные, максимальные и средние значения массы солнечных элементов представлены в табл. 2.

Средние толщины солнечных элементов, рассчитанные по их массам, являются довольно неточными величинами, поскольку толщина серебряных контактов, а следовательно, и их масса не могут быть измерены с достаточной степенью точности. По этой же причине неточными являются величины, полученные в результате непосредственных измерений толщин. Кроме того, в большинстве случаев лицевая и теневая поверхности элементов не плоскопараллельны и толщина

Таблица 2

Обозначение серии элементов	Масса солнечных элементов		
	Масса, мг		
	максимальная	средняя	минимальная
A1	215	192	169
A2	285	276	266
A3	214	186	157
E1	139	129	119
E2	205	203	200
E3	201	199	197
E4	206	205	203
E5	193	184	175
E6	199	194	188
E7	190	184	177
E8	190	189	187
E9	190	186	182

элементов уменьшается по направлению к краям, что также затрудняет точное измерение средней толщины элемента.

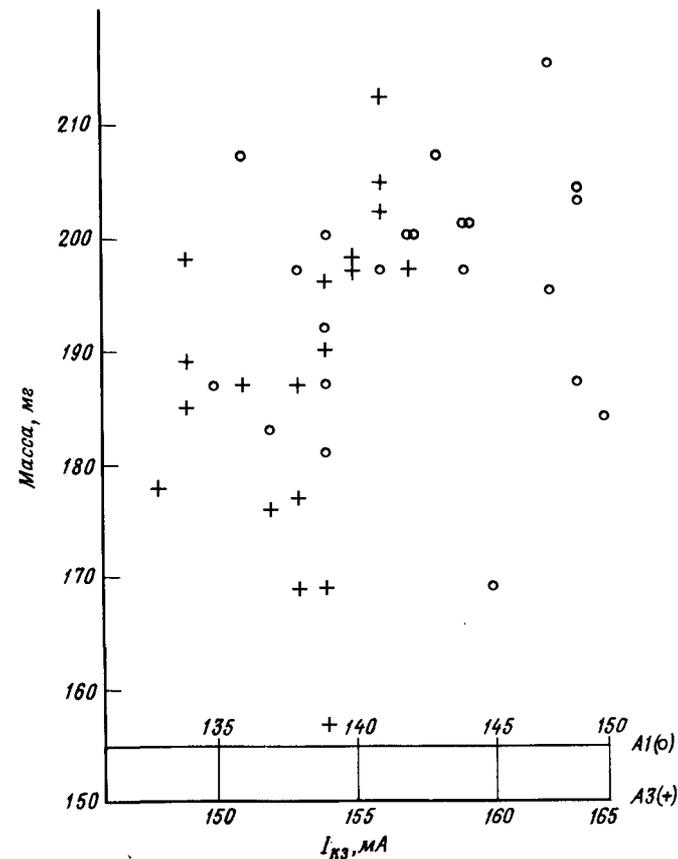
Солнечные элементы серий A1 и A3 имели большой разброс по массе, что, согласно результатам непосредственных измерений толщины, связано главным образом с различной толщиной кремниевой подложки. На фиг. 1 приведены экспериментальные значения тока короткого замыкания элементов различной массы. Можно видеть, что в данном случае не наблюдается связи между значениями тока и толщиной элемента.

На фиг. 2 представлены фотографии лицевой контактной сетки типичной формы и даны значения относительной площади, занимаемой контактной системой на поверхности элемента. Наименьшую относительную площадь занимает контакт, имеющий полоски шириной 10 мкм.

#### ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

В табл. 3 даны усредненные результаты измерений в условиях AM0 характеристик необлученных солнечных элементов и их температурные коэффициенты.

В табл. 4 представлены аналогичные характеристики элементов, облученных электронами при различных уровнях интегрального потока

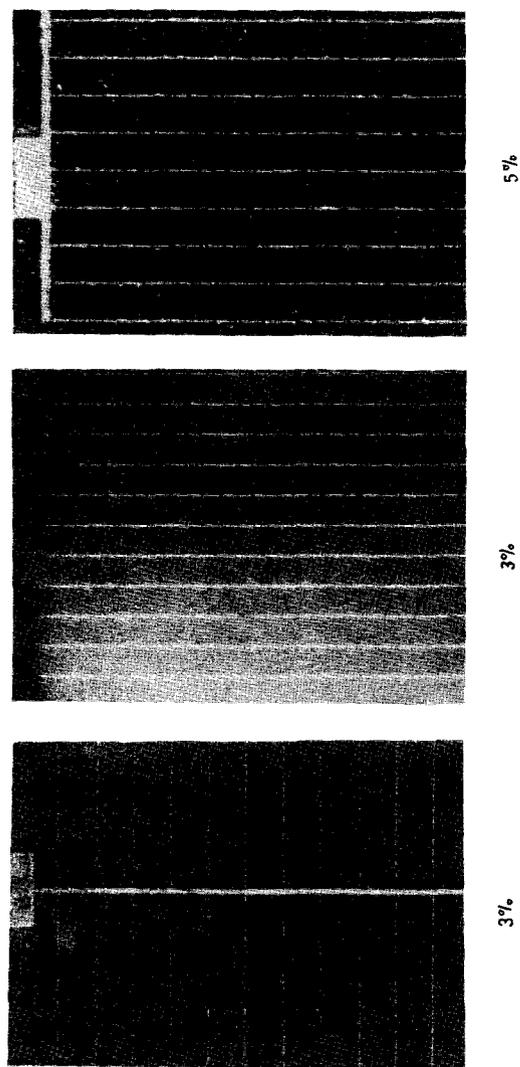


Фиг. 1. Связь между массой и током короткого замыкания солнечных элементов серий A1 и A3.

электронов. В тех случаях, когда соответствующих элементов с защитными покрытиями не было в наличии, значения характеристик (заключенные в скобках) получали путем экстраполяции данных для незащищенных образцов. (Данные табл. 4 представлены в виде диаграммы на фиг. 3).

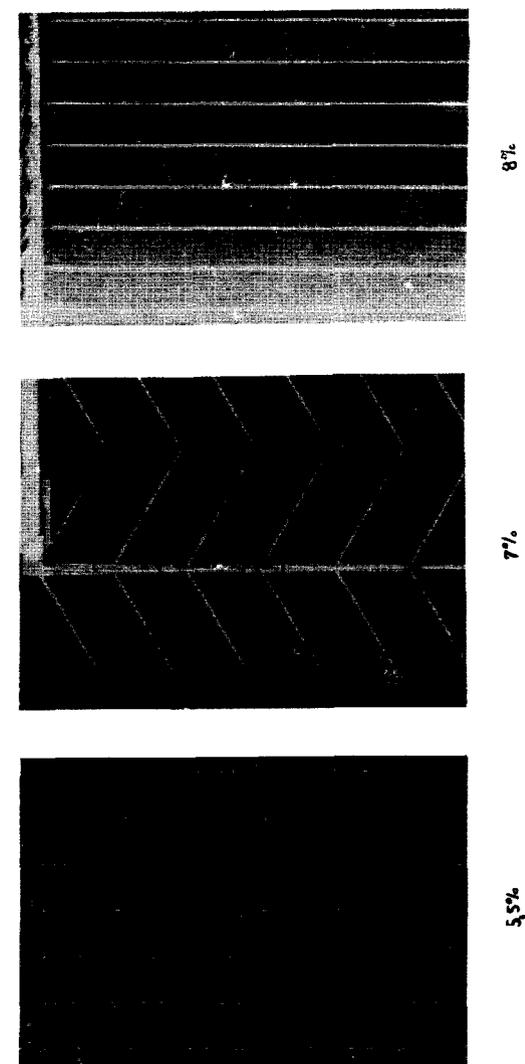
#### СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

На фиг. 4 в обобщенном виде представлены результаты измерений спектральной чувствительности солнечных элементов всех серий. Крупными буквами на рисунке обозначены элементы серий с наиболее



Фиг. 2. Геометрия контактной сетки высокоэффективных солнечных элементов

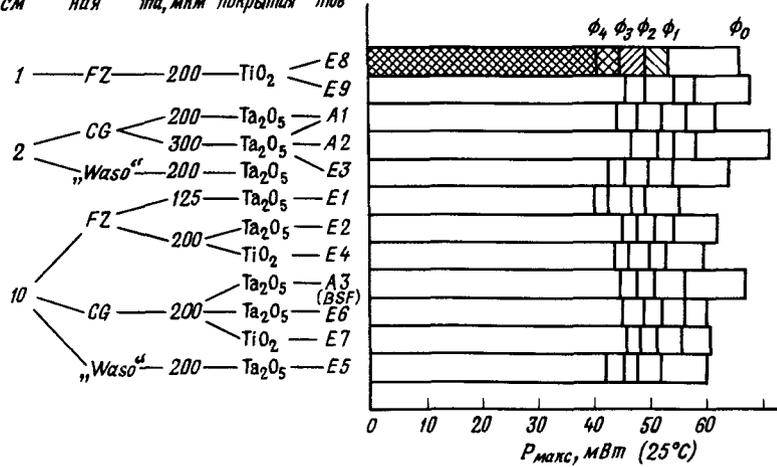
высокой, а мелкими — с наиболее низкой спектральной чувствительностью для каждого диапазона длин волн шириной 100 нм.



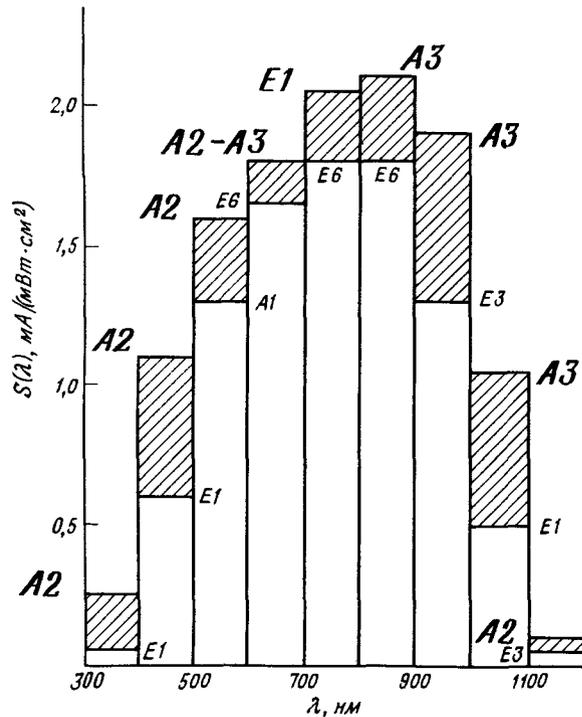
и относительная площадь, занимаемая контактной системой.

Из анализа данных следует, что максимальную чувствительность в диапазоне длин волн, меньших 700 нм, имеют элементы серии А2,

Удельное сопротивление, Ом·см  
 Тип кремния  
 Толщина элемента, мкм  
 Состав просветляющего покрытия  
 Серия элементов



Фиг. 3. Максимальная мощность солнечных элементов а зависимости от степени облучения электронами с последующим световым облучением.  $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  — интегральные потоки электронов, равные соответственно  $0,2 \cdot 10^{14}$ ,  $5 \cdot 10^{14}$ ,  $1 \cdot 10^{15}$  и  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .



Фиг. 4. Обобщенные данные о спектральной чувствительности солнечных элементов.

Таблица 3

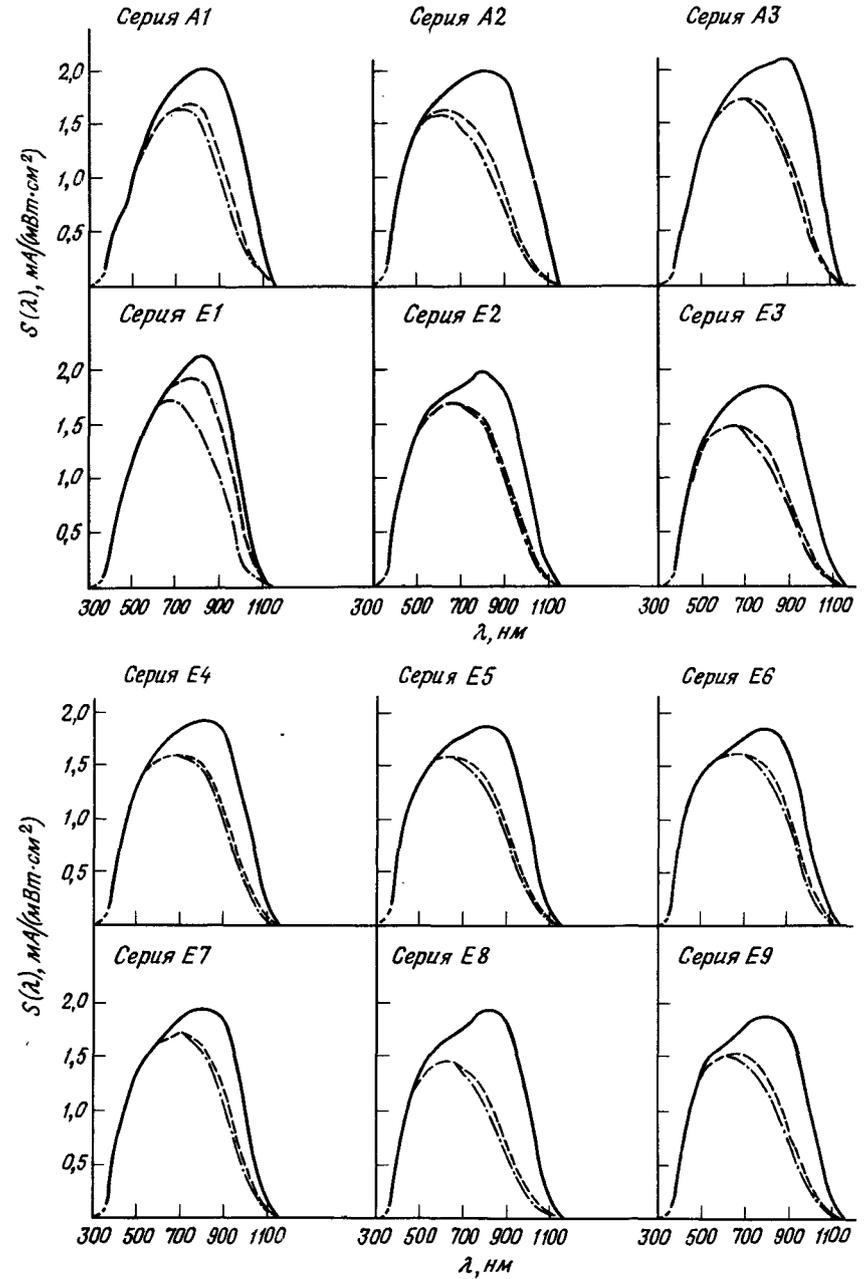
Характеристики необлученных солнечных элементов, полученные в условиях АМО при температуре  $25^\circ\text{C}$

Обозначение элементов	Элементы без защитного покрытия		Элементы с защитным покрытием		Температурные коэффициенты			Количество образцов	
	$I_{кз}$ , мА	$V_{хх}$ , мВ	$P_{\text{макс}}$ , мВт	$I_{кз}$ , мА	$V_{хх}$ , мВ	для $P_{\text{макс}}$ , мВт/ $^\circ\text{C}$	для $V_{хх}$ , мВ/ $^\circ\text{C}$	без защитного покрытия	с защитным покрытием
A1	139	585	62,5			+0,07	-2,3	10	0
A2	159	600	71,5			+0,10	-2,0	6	0
A3	153	590	67	156	590	+0,12	-2,0	10	10
E1	135	540	55,5	142	545	+0,05	-2,3	10	10
E2	149	545	62	151	545	+0,06	-2,0	5	5
E3	140	575	64	144	580	+0,07	-2,0	5	5
E4	144	545	59,5	151	545	+0,06	-2,2	5	5
E5	144	545	60	146	545	+0,07	-2,3	5	5
E6	145	545	60	149	540	+0,06	-2,3	5	5
E7	146	545	60,5	149	545	+0,08	-2,0	10	6
E8	146	595	66	146	595	+0,07	-2,1	10	6
E9	145	600	68	147	600	+0,05	-2,0	5	5

Характеристики облученных электронами солнечных элементов,  
полученные в условиях АМО при температуре 25 °С

Обозначение элементов, тип исходного материала, удельное сопротивление, состав просветляющего покрытия, BSF, толщина элементов	Интегральный поток электронов $10^{14} \text{ см}^{-2}$	Элементы без защитного покрытия		Элементы с защитным покрытием		Температурные коэффициенты			Количество образцов			
		$I_{\text{кз}}$ , МА	$V_{\text{хх}}$ , МВ	$P_{\text{макс}}$ , МВт	$I_{\text{кз}}$ , МА	$V_{\text{хх}}$ , МВ	$P_{\text{макс}}$ , МВт	для $I_{\text{кз}}$ , МА/°С	для $V_{\text{хх}}$ , МВ/°С	для $P_{\text{макс}}$ , МВт/°С	без защитного покрытия	с защитным покрытием
A1 20М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 200 мкм	0	139	585	62,5			+0,07	-2,3	-0,26		10	0
	2	130	555	56,5			+0,13	-2,2	-0,22		3	0
	5	121	545	52			+0,17	-2,0	-0,20		3	0
	10	115	535	47,5			+0,16	-2,0	-0,20		3	0
	20	109	520	44			+0,21	-2,0	-0,16		3	0
A2 20М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 300 мкм	0	159	600	71,5			+0,10	-2,0	-0,32		6	0
	2	137	565	56			+0,17	-2,0	-0,25		2	0
	5	130	555	54			+0,20	-2,0	-0,21		2	0
	10	123	545	51,5			+0,21	-2,0	-0,20		3	0
	20	116	530	46,5			+0,24	-2,0	-0,19		2	0
A3 100М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> BSF 200 мкм	0	153	590	67	156	590	+0,12	-2,0	-0,29		10	10
	2	137	530	56	(140)	530	+0,15	-2,0	-0,24		3	0
	5	129	520	50,5	132	515	+0,20	-2,0	-0,21		3	3
	10	126	510	47,5	129	510	+0,22	-2,0	-0,19		3	5
	20	122	500	44,5	126	505	+0,24	-2,0	-0,18		2	1
E1 (ЗП) 100М·см TiO <sub>2</sub> 125 мкм	0	135	540	55,5	142	545	+0,05	-2,3	-0,31		10	10
	2	127	520	49	131	525	+0,13	-2,1	-0,25		3	3
	5	124	510	46,5	126	510	+0,20	-2,1	-0,22		3	3
	10	114	500	42,5	116	500	+0,22	-2,1	-0,20		3	3
	20	110	490	40	114	490	+0,24	-2,1	-0,16		3	3
E2 (ЗП) 100М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	149	545	62	151	545	+0,06	-2,0	-0,33		5	5
	2	138	525	54	(142)	(525)	+0,15	-2,0	-0,26		2	0
	5	131	515	50,5	135	515	+0,16	-2,1	-0,25		2	2
	10	127	505	47,5	126	505	+0,25	-2,1	-0,22		3	4
	20	122	495	45	122	495	+0,26	-2,1	-0,20		2	1
E3 (Waso) 200М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	140	575	64	144	560	+0,07	-2,0	-0,27		5	5
	2	124	550	54	(126)	(550)	+0,16	-2,0	-0,23		2	0
	5	117	535	49,5	119	535	+0,16	-2,0	-0,20		2	2
	10	111	530	45,5	112	525	+0,20	-2,0	-0,16		3	4
	20	105	520	42,5	106	520	+0,23	-2,1	-0,16		2	1
E4 (ЗП) 100М·см TiO <sub>2</sub>	0	144	545	59,5	151	545	+0,06	-2,2	-0,32		5	5
	2	135	525	52,5	(141)	(525)	+0,13	-2,2	-0,26		2	0
	5	130	515	49,5	136	515	+0,15	-2,2	-0,24		2	2
	10	123	505	46	129	505	+0,20	-2,2	-0,21		3	4
	20	116	495	43,5	126	495	+0,22	-2,2	-0,20		2	1
E5 (Waso) 100М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	144	545	60	146	545	+0,07	-2,3	-0,34		5	5
	2	130	520	51,5	(132)	(520)	+0,15	-2,2	-0,24		2	0
	5	124	510	47,5	126	510	+0,21	-2,1	-0,21		2	2
	10	120	500	45	121	500	+0,22	-2,1	-0,20		3	4
	20	116	465	42	117	490	+0,25	-2,1	-0,19		2	1
E6 (Т) 100М·см Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	145	545	60	149	540	+0,06	-2,3	-0,30		5	5
	2	139	530	56	(143)	(530)	+0,11	-2,2	-0,26		2	0
	5	132	512	52	137	515	+0,16	-2,2	-0,26		1	2

E7	200 мкм	10	128	510	48,5	132	505	50	+0,21	-2,2	-0,20	3	4
	(Т)	20	123	500	45	128	500	46	+0,23	-2,1	-0,21	2	1
	10 Ом·см	2	146	545	60,5	149	545	61,5	+0,08	-2,0	-0,27	10	6
E8	TiO <sub>2</sub>	5	139	530	55,5	(143)	(530)	(57)	+0,12	-2,0	-0,24	3	0
	TiO <sub>2</sub>	10	130	520	51	138	520	54,5	+0,19	-2,0	-0,21	3	2
	200 мкм	20	125	510	48	132	510	50,5	+0,21	-2,0	-0,20	3	4
E9	(ЗП)	0	142	595	66	146	595	67	+0,23	-2,0	-0,19	2	1
	1 Ом·см	2	121	560	53,5	(125)	(560)	(55)	+0,13	-2,1	-0,22	3	0
	TiO <sub>2</sub>	5	114	550	49	120	550	51,5	+0,14	-2,1	-0,20	3	2
E9	200 мкм	10	107	535	44,5	110	540	47	+0,16	-2,1	-0,17	3	4
	(ЗП)	20	100	525	40,5	105	525	42,5	+0,18	-2,1	-0,17	2	1
	1 Ом·см	2	145	600	68	147	600	69	+0,05	-2,0	-0,30	5	5
E9	TiO <sub>2</sub>	5	128	575	58	(131)	(575)	(60)	+0,12	-2,0	-0,23	2	0
	TiO <sub>2</sub>	10	122	565	54	126	565	56	+0,15	-2,0	-0,22	2	2
	200 мкм	20	114	550	49	119	555	51,5	+0,15	-2,0	-0,20	3	4
E9	200 мкм	20	108	540	45,5	113	545	48,5	+0,16	-2,0	-0,17	2	1



Фиг. 5. Кривые спектральной чувствительности высокоэффективных солнечных элементов.

— до облучения; --- после облучения потоком электронов  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  
 - · - · - после облучения потоком электронов  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

в то время как в длинноволновом диапазоне — элементы серии А3. Повышенная чувствительность элементов серии А3 в длинноволновом диапазоне характерна для элементов с изотипным переходом вблизи теневой поверхности, а высокая чувствительность элементов серии А2 в коротковолновом диапазоне — для высокоэффективных "фиолетовых" солнечных элементов. Ни один из исследуемых элементов не имеет высокой спектральной чувствительности во всем диапазоне длин волн. Данные, приведенные на фиг. 4, представляют особый интерес с точки зрения возможности использования солнечных элементов в наземных условиях.

На фиг. 5 даны кривые спектральной чувствительности для элементов каждой серии до и после облучения электронами.

#### УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВЛАГИ И КИПАЩЕЙ ВОДЫ

После кипячения в воде и проверки прочности сцепления контактов и просветляющего покрытия с поверхностью элемента, число разрывов контактных полос на лицевой поверхности увеличилось у двух элементов серий А2 и А3. В процессе испытаний наблюдалось ухудшение характеристик элементов серии А1: лицевой контакт почти полностью отслоился у всех трех элементов, а теневой контакт остался неповрежденным только у одного элемента.

#### УСТОЙЧИВОСТЬ К ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ

Такой вид испытания позволяет выявить только крупные дефекты, возникающие в процессе изготовления элементов. Солнечные элементы с защитными покрытиями и без покрытий, а также элементы с коммутирующими соединениями оказались устойчивыми к периодическому изменению температуры.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

Выходные характеристики элементов различных серий при работе в наземных условиях рассчитывались на основе данных о спектральной чувствительности элементов и данных о распределении интенсивности в спектре солнечной радиации, достигшей земной поверхности.

#### СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АТМОСФЕРНОЙ МАССЕ, РАВНОЙ 1 И 2 (УСЛОВИЯ АМ1 И АМ2)

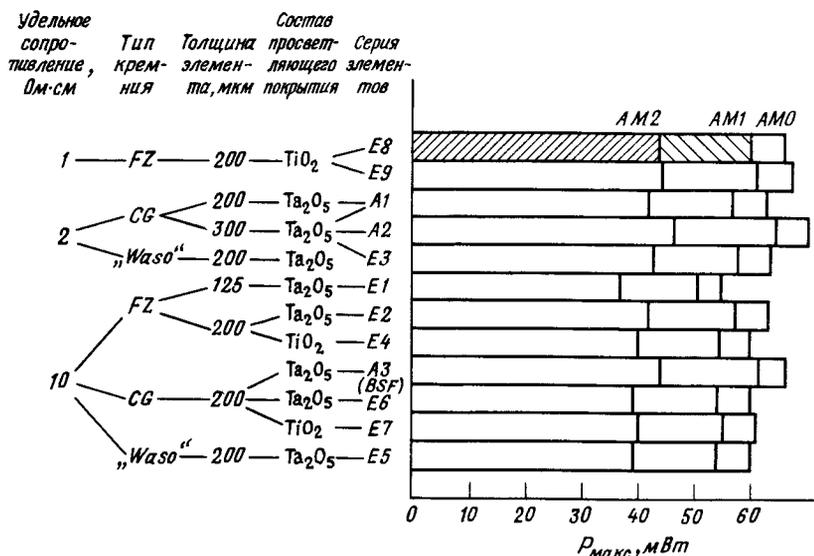
Средняя интенсивность регистрируемой солнечной радиации в значительной степени зависит от географического положения места регистрации. Поэтому характеристики элементов определяются для конкретных географических условий. Для этого используются результаты расчетов, проведенных на основе данных о распределении интенсивности в спектре солнечного излучения в условиях АМ1 и АМ2.

Спектральный состав солнечного излучения в условиях АМ1 определялся на основе результатов работы [4], полученных в предположении, что внеатмосферное излучение (спектр Тэкажара) ослабляется вследствие рэлеевского рассеяния и поглощения в атмосфере. При оценке влияния рассеяния  $T$ -фактор принимался равным 2,75; при определении поглощающей способности атмосферы предполагалось наличие в ней воды и озона, суммарный слой которых составляет 1 см и 2 мм соответственно. Кривая спектральной интенсивности солнечного излучения использовалась в несколько измененном виде; спектр Тэкажара (условия АМ0) был заменен спектром внеатмосферного солнечного излучения Макаровой [5]. Полученное интегральное значение интенсивности солнечного излучения в спектральном интервале 0,3 — 1,1 мкм составляет 890 Вт/м<sup>2</sup>.

Аналогично определялся состав излучения, соответствующего условиям АМ2 (использовались данные NASA, опубликованные в 1975 г. [6]). В этом случае предполагалось, что толщина слоев воды и озона в атмосфере — соответственно 2 см и 3,4 мм и что аэрозоли, рассеивающие излучение, имеют параметры  $\alpha = 1,3$  и  $\beta = 0,04$ . Интегральное значение интенсивности солнечного излучения в спектральном интервале 0,3 — 1,1 мкм равно 596 Вт/м<sup>2</sup>.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

На фиг. 6 приведены расчетные значения выходной максимальной мощности элементов, соответствующие условиям АМ1 и АМ2, и экспериментальные данные, полученные в условиях АМ0. Как и предполагалось, отношение мощностей элементов разных серий не зависит от характера солнечного излучения, поскольку они имеют близкие по значению интегральные чувствительности. Во всех случаях наибольшей эффективностью обладают элементы с низким последовательным сопротивлением и элементы с изотипным переходом вблизи теневой поверхности.



Фиг. 6. Максимальная мощность солнечных элементов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний, проведенных в соответствии с намеченной программой, позволяют сделать вывод о существовании различных высокоэффективных солнечных элементов, которые могут быть использованы для космических целей. Все элементы европейских фирм и почти все элементы, изготовленные американскими фирмами, оказались устойчивыми к воздействию окружающей среды.

Окончательный выбор оптимального варианта солнечного элемента для работы в космических условиях будет определяться специфическими требованиями полета. По-видимому, при работе в условиях с высоким уровнем корпускулярной радиации наиболее эффективными окажутся солнечные элементы из кремния, выращенного в тигле, с удельным сопротивлением 10 Ом·см, тогда как в условиях с низким уровнем корпускулярной радиации — элементы из кремния с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Установлено, что при более жестких условиях работы (повышении температуры до 60 °С и наличии фотонного эффекта) уровень эквивалентного интегрального потока электронов с энергией 1 МэВ, определяющий границу применимости определенного типа кремния, находится несколько ниже  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Это соответствует приблизительно двухлетнему пребыванию солнеч-

ных элементов с защитным стеклянным покрытием толщиной 300 мкм на геостационарной орбите. При любых условиях высокой эффективностью обладают солнечные элементы с изотипным переходом вблизи теневой поверхности.

Из полученных результатов следует, что в случае наземного применения элементов пригодны не все способы создания контактов для высокоэффективных солнечных элементов, предназначенных для работы в условиях повышенной влажности, а также что наиболее эффективны тонкие солнечные элементы, изготовленные из кремния с удельным сопротивлением 1 Ом·см, и тонкие элементы с изотипным переходом вблизи теневой поверхности.

### Литература

1. Bogus K., Spectral match of sun simulator required for measuring today solar cells, In proceedings of Intern. Conf. on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, Sept. 1974.
2. Dollery A.A., Walkden M.W., Davies M.A.H., Calibration of Silicon Solar Cells in Sunlight for ESTEC (Malta, June — July 1974).
3. Crabb R.L., Photon degradation in Silicon Solar Cells, Status Report 1974, а также [1].
4. International Commission on Illumination (CIE) Recommendations for the Integrated Irradiance and the Spectral Distribution of Simulated Solar Radiation, C.I.E. No. 20, T.C. 2.2 (1972).
5. Solar Constant, AMO Spectral Irradiance and Solar Cell Calibration, Technical memorandum ESA TM-160 (1975).
6. Magid L.M., Brandhorst H.W., Interim Solar Cell Testing Procedures for Terrestrial Applications, NASA TMX-71771 (1975).

## Поликристаллические кремниевые солнечные элементы с печатным контактом в виде сетки с гексагональными ячейками

А. Д. Хейг<sup>1)</sup>

РАЗДЕЛ I

ВВЕДЕНИЕ

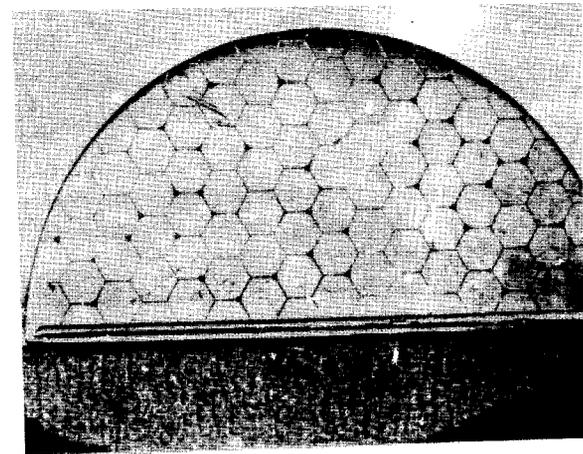
В разд. I настоящей статьи описываются экспериментальные методы, которые использовались для измерения характеристик поликристаллических кремниевых солнечных элементов при опробовании лицевого печатного контакта новой формы. На основе полученных данных о чувствительности можно дать количественную оценку влияния особенностей структуры на интегральный фотоотклик элементов при освещении их излучением широкого спектрального состава и сделать вывод о структурной зависимости относительной спектральной чувствительности.

### ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КРЕМНИЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

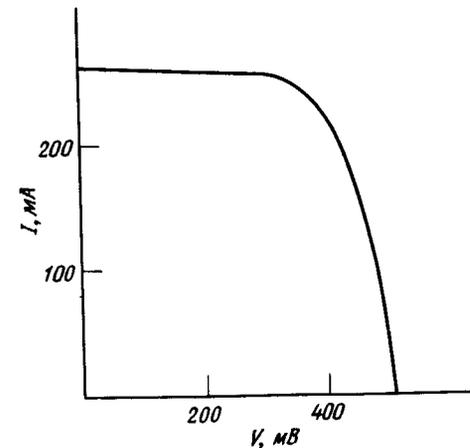
Из-за отсутствия поликристаллических кремниевых пластин промышленного производства использовались пластины, вырезанные из бракованного конца монокристаллического слитка. Такие пластины имели зерна разной величины: большие зерна (размером  $1 \text{ см}^2$ ) по краям, мелкие зерна (размером менее  $1 \text{ мм}^2$ ) в центре. Соединение зерен, за исключением самых мелких, осуществлялось с помощью лицевого контакта в виде сетки с гексагональными ячейками (фиг. 1). По-видимому, более мелкие ячейки (имеются в виду сторона шестиугольника и ширина контактной полоски) можно получить фотолитографическим методом. Поскольку, однако, предполагалось, что такая контактная система будет создаваться печатным методом, то размеры ячейки (сторона шестиугольника  $2 \text{ мм}$ , ширина контактной полоски  $100 \text{ мкм}$ ) определялись в соответствии с возможностями этого метода.

Существующая технология изготовления поликристаллических элементов обеспечивает однородность диффузионного слоя в монокристаллических пластинах. Это наглядно подтверждается результатами

<sup>1)</sup> A.D. Haigh, Ferranti Ltd, Manchester, England.



Фиг. 1. Поликристаллический кремниевый элемент с контактной сеткой, ячейки которого представляют собой правильные шестиугольники.



Фиг. 2. Вольт-амперная характеристика поликристаллического солнечного элемента, измеренная в условиях атмосферной массы, равной единице, при интенсивности излучения  $100 \text{ мВт/см}^2$  и температуре  $25^\circ \text{C}$ . Максимальная мощность соответствует току  $227 \text{ мА}$  и напряжению  $390 \text{ мВ}$ , к.п.д. равен  $8,7\%$ .

измерений спектральной чувствительности солнечного элемента, используемого в системе ориентации искусственного спутника. О правильности показаний элемента, который, по существу, является аналогом цифрового датчика, фиксирующего положение Солнца, можно

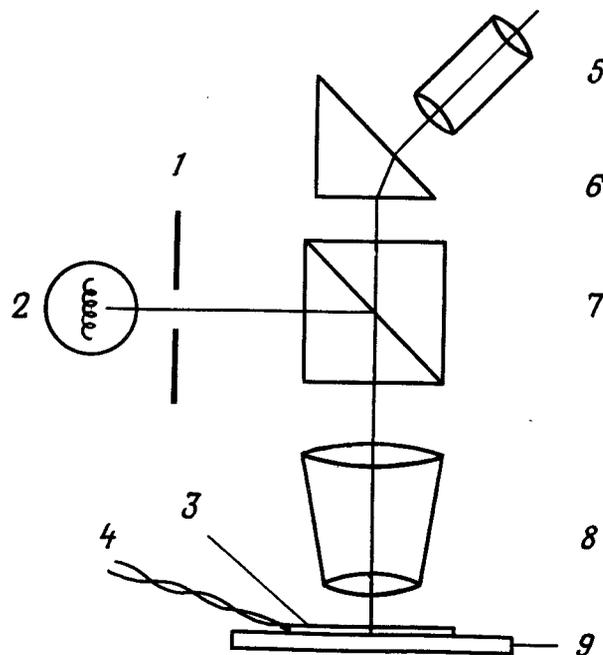
судить по разбросу значений тока короткого замыкания, генерируемого сканирующим световым пятном, который не превышал  $\pm 2\%$ .

На фиг. 2 показана вольт-амперная характеристика поликристаллического кремниевого элемента.

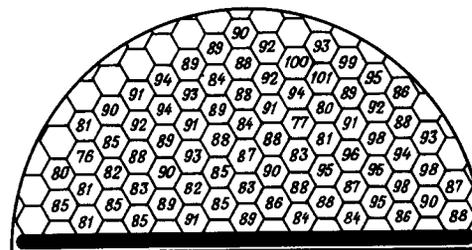
Максимальное значение к.п.д., равное 8,7%, получено при относительной активной площади элемента 93% и при наличии термического окисного слоя, толщина которого равна приблизительно  $1/4$  длины волны и который служит для повышения степени оптического соответствия между воздухом и кремнием.

Чтобы определить вклад каждого участка, ограниченного контактной ячейкой, в полный ток короткого замыкания, применялась установка, схематически изображенная на фиг. 3.

Путем подбора линзы объектива и регулировки положения заслонки освещаемая площадь изменялась таким образом, чтобы ее размер соответствовал световому пятну диаметром 2 мм. Относительная интегральная чувствительность, величина которой может быть связана с особенностями структуры, представлена на фиг. 4.



Фиг. 3. Схема установки для измерения интегральной чувствительности. 1 — перемещающаяся заслонка; 2 — источник освещения; 3 — солнечный элемент; 4 — измерительное устройство; 5 — окуляр; 6 — призма; 7 — призма, рассеивающая луч; 8 — объектив; 9 — предметный столик с осями координат.



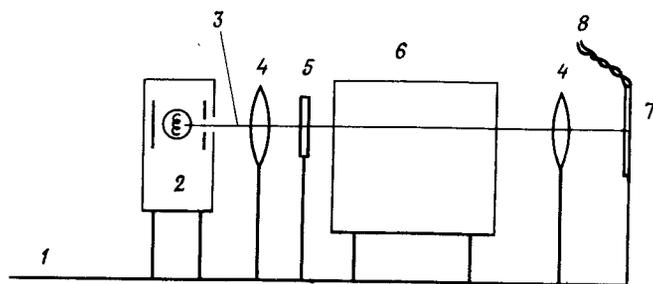
Фиг. 4. Схема распределения относительной интегральной чувствительности по поверхности элемента.

Из приведенной схемы были выбраны три участка, для которых определялась зависимость интегрального фотоотклика от изменения спектральной чувствительности. Эти измерения проводились на установке, схема которой изображена на фиг. 5.

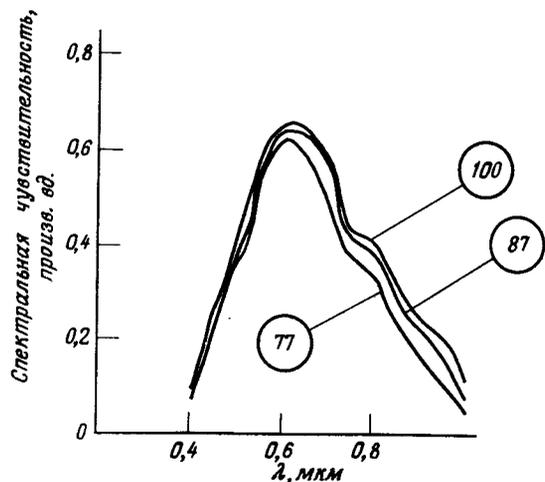
Свет от лампы фокусируется линзой на входное отверстие монохроматора. Вторая линза фокусирует монохроматический свет таким образом, что диаметр светового пятна на поверхности испытываемых элементов составляет 2 мм. Использование на входном и выходном отверстиях монохроматора марки Spex Minimate круглых экранов диаметром 1 мм дает возможность получить спектральные линии полушириной, равной 4 нм. Для настройки монохроматора в диапазоне 500 нм применялась решетка, а для подавления вторичной дифракции в диапазоне длин волн, превышающих 700 нм, использовался дополнительный фильтр.

На фиг. 6 приведены кривые относительной спектральной чувствительности выбранных участков поверхности элемента. Кривые, которым соответствуют относительные значения интегральной чувствительности, свидетельствуют о том, что наибольшее различие чувствительности наблюдается при значениях длин волн, больших 600 нм. Если учесть характер изменения коэффициента поглощения от длины волны, то этот результат показывает, что внутри каждой гексагональной ячейки, чувствительность диффузионного слоя проводимости  $n^+$ -типа слабо зависит от кристаллической структуры, в то время как чувствительность базовой области проводимости  $p$ -типа определяется характером структуры.

Поскольку внутри рассматриваемых гексагональных ячеек структура имела сложный характер, для исследования была выбрана ячейка, содержащая простой дефект, с которым можно было определенным образом связать изменения спектральной чувствительности.

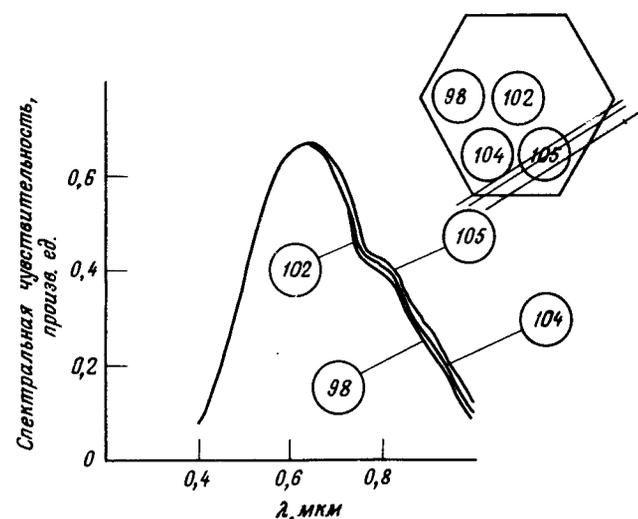


Фиг. 5. Схема установки для измерения спектральной чувствительности. 1 - оптическая скамья; 2 - осветитель; 3 - оптическая ось; 4 - линза; 5 - фильтр; 6 - монохроматор; 7 - исследуемый элемент; 8 - к измерительному устройству.



Фиг. 6. Относительная спектральная чувствительность центральных участков трех гексагональных ячеек.

На фиг. 7 схематически изображены такая гексагональная ячейка и соответствующие кривые спектральной чувствительности. Внутри этой ячейки двумя параллельными линиями обозначены края длинного узкого зерна, внедренного в монокристаллический участок. Границы зерна проходят вертикально через всю пластину толщиной 300 мкм, так что зерно видно и на обратной стороне. Третьей линией обозначена плоскость скольжения внутри узкого кристаллического зерна.



Фиг. 7. Относительная спектральная чувствительность четырех различных участков внутри ячейки.

С использованием тех же самых установок для измерения интегральной и спектральной чувствительности, изображенных на фиг. 3 и 5 соответственно, при освещении световым пучком с диаметром пятна 1 мм были проведены измерения, результаты которых представлены на фиг. 7. Приведены значения интегральной чувствительности для четырех положений светового пятна (в двух случаях пятно расположено на монокристаллическом участке поверхности, в третьем случае пересекает одну из границ зерен, а в четвертом пересекает обе границы), которые соответствуют кривым спектральной чувствительности. Как видно из фиг. 7, внутри выбранной ячейки структурные несовершенства могут иногда влиять на чувствительность при значениях длин волн, больших 600 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью простого метода изучалась зависимость между свойствами структуры и электрическими параметрами солнечных элементов на основе поликристаллического кремния с крупной зернистой структурой. Измерения спектральной чувствительности при освещении монохроматическим светом показали, что для рассматриваемого материала особенности структуры не существенно влияют на чувствительность в коротковолновой области, в то время как чувствитель-

ность в длинноволновой области зависит от характера структуры. Измерения чувствительности в области коротких длин волн показали, что на тех участках, где контактные ячейки не обеспечивают соединение всех зерен, эффективность собирания носителей не зависит от наличия границ зерен. Предполагается, что повышение чувствительности в длинноволновой области спектра на участках, содержащих структурные несовершенства, связано с тем, что границы зерен геттерируют примеси, уменьшающие время жизни носителей.

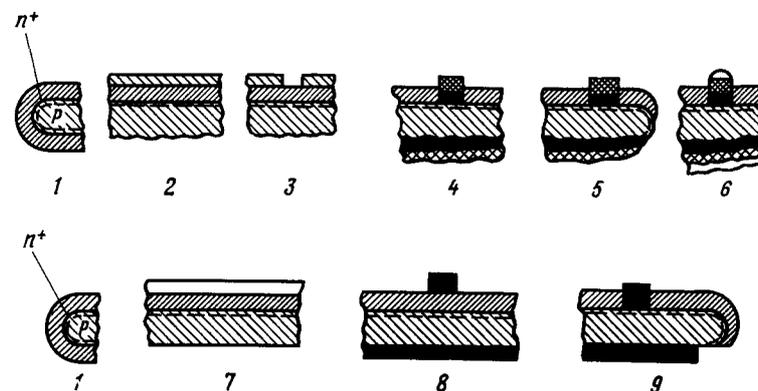
## РАЗДЕЛ II ВВЕДЕНИЕ

В разд. II данной статьи описывается последовательность операций технологического процесса изготовления наземных солнечных элементов, при котором число этапов существенно сокращено по сравнению с обычной технологической схемой. Усовершенствование технологии достигнуто за счет введения печатного метода, который позволяет наносить материал лицевого контакта непосредственно на поверхность слоя термического окисла и осуществлять диффузию материала через этот слой. Применение этого метода исключает необходимость совмещения печатной контактной маски с предварительно намеченным рисунком окон в окисном слое.

### ПЕЧАТНЫЙ КОНТАКТ

На фиг. 8 для сравнения схематически представлены последовательность технологических операций при обычном способе изготовления солнечных элементов, у которых контакт создается путем металлизации поверхности элемента, и технологическая схема создания печатного контакта, включающая меньшее число операций. Следует заметить, что на фиг. 8 опущены три дополнительных этапа обработки теневой поверхности элемента при создании обычного контакта, поэтому изображенная схема не полностью отражает сокращение числа операций.

В технологической схеме создания печатного контакта операции, которые предшествуют нанесению контакта, такие, как травление, диффузия, удаление перехода на теневой поверхности, проводятся с использованием обычного оборудования. Для того чтобы материал, наносимый на слой термического окисла, мог образовать контакт с лежащим под ним диффузионным слоем  $n^+$ -типа проводимости, используют специальную металлизированную пасту. Такая паста создается на основе промышленной серебряной пасты, имеющей сложный



Фиг. 8. Технологические схемы изготовления солнечных элементов. 1 — травление и диффузия; 2 — нанесение фоторезиста и шлифовка; 3 — обработка фоторезиста; 4 — металлизация кремниевой поверхности; 5 — обработка торцов; 6 — погружение в расплав олова; 7 — травление перехода на теневой поверхности; 8 — нанесение проводящей пасты на лицевую и теневую поверхности; 9 — впекание контактов на воздухе.

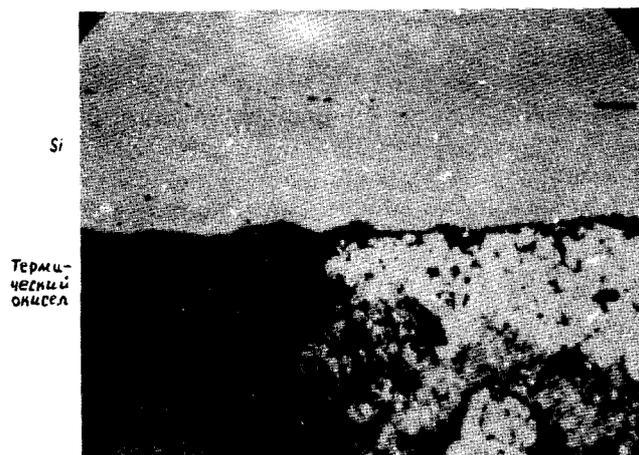
состав. Помимо тонко измельченного серебра, она содержит стеклянную фритту, органическое связующее вещество и органическую суспензию. Содержание серебра обычно составляет 70 мас. %.

Дополнительное введение 3 — 7 мас. % гидрида титана изменяет свойства пасты таким образом, что в процессе впекания она взаимодействует с термическим окислом и проходит через его слой. Поскольку процесс впекания состоит из нескольких зависящих от температуры этапов, то его проводят в многозонной печи. При проведении впекания на воздухе суспензия испаряется, происходит разложение связующего вещества, присадка взаимодействует с термическим окислом и стеклянной фриттой, в которых частицы серебра перераспределяются и достигают поверхности кремниевой пластины.

На фиг. 9 представлена микрофотография среза пластины, включающего область впекаемого контакта. Увеличение равно 440; в плоскости среза толщина пленки возросла в 50 раз.

Слева на микрофотографии виден слой термического окисла, который примыкает к поверхности кремниевой пластины, справа — стеклообразная фаза (в слое окисла произошла реакция).

Частицы серебра, которые в верхней части контакта находятся в начальной стадии плавления, соединяются, образуя сплошную ячеистую структуру. Отверстия в этих ячейках из серебра заполнены



Фиг. 9. Микрофотография лицевого контакта.

стеклообразной фазой, и только небольшое ее количество на границе раздела между серебром и кремнием остается нераспределенным между ячейками.

Теневой контакт также наносится печатным способом, при этом на поверхности, с которой теневой переход был предварительно удален, контактный рисунок создается таким образом, чтобы  $p-n$ -переход не закорачивался.

### ВЫВОДЫ

Описана технология изготовления печатного контакта, включающая меньшее количество операций. При такой технологии сохраняется слой термического окисла и не требуется применения масок. Следует отметить, что слой термического окисла, толщина которого равна  $1/4$  длины волны, не обеспечивает достаточной степени оптического соответствия между кремнием и внешней средой, и при наличии защитного покрытия у таких элементов будут потери, связанные с отражением света. Возможно, что дальнейшее усовершенствование технологии впаек печатного контакта в слой окисла позволит использовать химический метод нанесения просветляющих покрытий с улучшенными оптическими свойствами.

## Солнечные элементы с гетеропереходом $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$

Е. Фабр, Р. Тижбург<sup>1)</sup>

Существующий оптимальный вариант солнечного элемента на основе монокристаллического кремния представляет собой элемент с диффузионным  $p-n^+$ -гомопереходом. Однако процесс диффузии является нежелательным при изготовлении солнечных элементов на основе пленок поликристаллического кремния, так как по границам зерен происходит аномально быстрая диффузия [1, 2], время жизни неосновных носителей зависит от термической обработки [3, 4] и т.д. В настоящей работе изложены результаты, полученные при исследовании гетероперехода  $\text{Si}(p) - \text{окисел индия}$ , легированный оловом ( $n^+$ ), представляющего особенный интерес с точки зрения возможности создания коллекторного перехода на пленках поликристаллического кремния. Для лучшего понимания физической сущности этого гетероперехода первые исследования проводились на монокристаллическом кремнии.

Перечислим основные преимущества элементов с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ . При такой структуре окисный слой выполняет одновременно три функции: просветляющего слоя, прозрачного электрода, коллекторного барьера — и "мертвый" слой вблизи поверхности раздела отсутствует. Кроме того, сама структура такова, что можно исключить из рассмотрения рекомбинацию носителей на поверхности раздела и, таким образом, ожидать получения лучших характеристик элемента в коротковолновой области солнечного спектра по сравнению с характеристиками элементов с диффузионным  $p-n$ -переходом.

Существенным фактом является и то, что нанесение окисной пленки производится при низкой температуре.

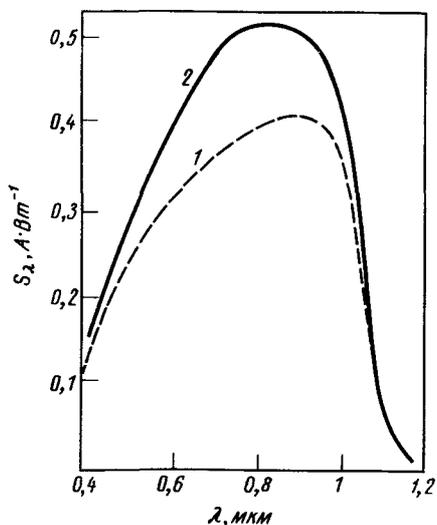
<sup>1)</sup> E. Fabre, Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée (France); R. Tjiburg, Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven (Pays-Bas).

### СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКИСЛА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ

Пленки получали методом реактивного испарения индия и олова в атмосфере кислорода. Толщина пленок составляла от нескольких сотен ангстрем до 1 мкм. В зависимости от условий нанесения поверхностное сопротивление пленки толщиной 1500 Å колебалось от 10 до 20 Ом, что вполне соответствует требованию малого поверхностного сопротивления для солнечных элементов. При фотоэлектрическом преобразовании с помощью солнечных элементов на основе кремния пропускание для полезной части солнечного спектра близко к 90%.

### ОКИСНЫЙ СЛОЙ ИНДИЯ КАК ПРОСВЕТЛЯЮЩИЙ СЛОЙ

Исследование этой функции окисного слоя индия представляет интерес, так как потери на поглощение в слое не превышали 10%. В то же время известно, что суммарные потери за счет отражения от полированной поверхности кремния без просветляющего покрытия достигают порядка 35%.



Фиг. 1. Спектральная характеристика солнечного элемента с  $n^+$ - $p$ -гомопереходом.

1 — чистая поверхность; 2 — поверхность с просветляющим покрытием.

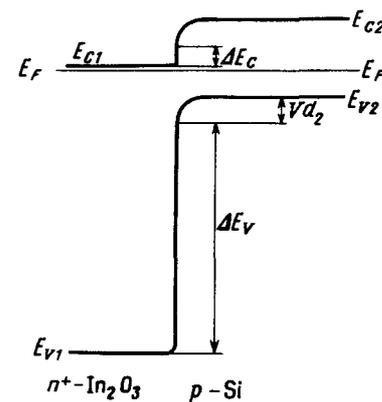
На фиг. 1 показана спектральная характеристика обычного кремниевого солнечного элемента с чистой полированной поверхностью (кривая 1) и спектральная характеристика того же элемента, на поверхность которого нанесен слой окисла индия (кривая 2). Хотя толщина этого слоя не была оптимальной для выполнения роли просветляющего покрытия, можно заметить, что характеристика элемента в отсутствие слоя окисла индия в среднем на 20 – 25% хуже (в зависимости от длины волны).

### СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$

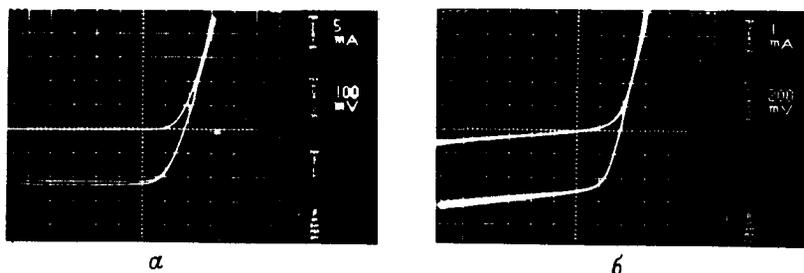
Первые солнечные элементы с гетеропереходом такого типа описаны в работе [5]. В результате нанесения окисного слоя индия на пластинку кремния возникает гетеропереход, который для фотоэлектрического преобразователя выполняет роль коллекторного барьера.

На фиг. 2 показана зонная структура такого устройства. Эту структуру можно уподобить структуре типа Шоттки, особенно если окисел индия значительно вырожден. Диффузионный потенциал в значительной степени зависит от свойств исходного кремния и от уровней состояния у поверхности раздела между двумя полупроводниками, и, следовательно, условия получения гетеропереходов существенно влияют на получение максимального напряжения холостого хода  $V_{xx}$  при облучении элемента.

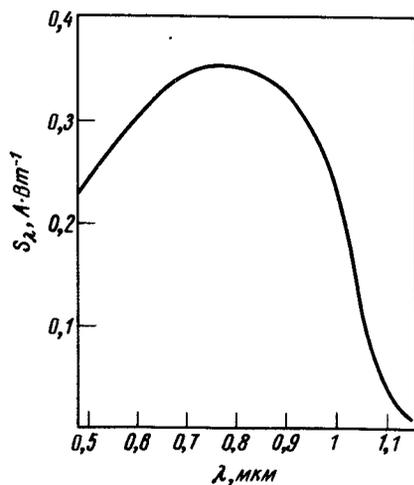
На фиг. 3 приведены темновые и световые вольт-амперные характеристики двух солнечных элементов с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ . В случае *a* площадь поверхности элемента равна 40 мм<sup>2</sup> и



Фиг. 2. Зонная структура гетероперехода  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ .



Фиг. 3. Световые (а) и темновые (б) вольт-амперная характеристики солнечных элементов с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ .



Фиг. 4. Спектральная характеристика солнечного элемента с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ .

напряжение холостого хода 180 мВ. В случае б площадь светочувствительной поверхности равна 8 мм<sup>2</sup> и напряжение холостого хода достигает 390 мВ. Исходя из приведенных характеристик, можно определить коэффициент заполнения: он равен 0,49 в случае а и 0,52 в случае б.

На фиг. 4 представлена спектральная характеристика солнечного элемента с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ . Хотя максимальное значение спектральной чувствительности не очень высоко (диффузионная длина неосновных носителей в базе равна лишь 25 мкм),

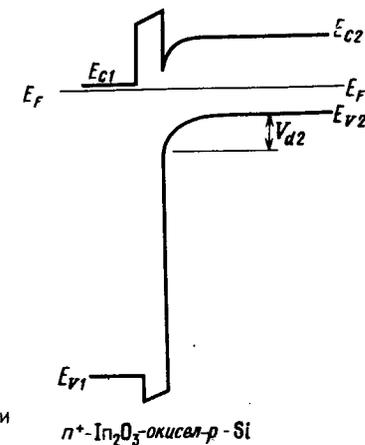
тем не менее в области коротких волн ее значения намного превышают те, которые обычно получают для солнечного элемента с диффузионным  $p - n$ -переходом, изготовленным на базе того же материала.

Оптимальный вариант солнечного элемента с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ , который удалось создать авторам, имел в условиях АМ 1 следующие характеристики:  $V_{\text{хх}} = 400$  мВ,  $I_{\text{кз}} = 35$  мА/см<sup>2</sup>,  $\eta = 7\%$  (к.п.д. преобразования).

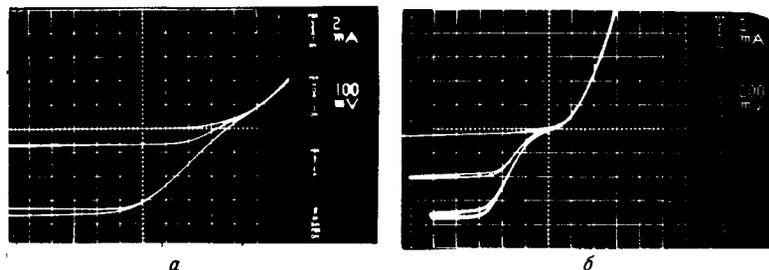
Эти значения существенно отличаются от данных, опубликованных в работах [5, 6].

Необходимо подчеркнуть, что результаты, представленные в настоящей работе, были получены на структурах, в которых у поверхности раздела отсутствовала окисная пленка. Образование тонкой пленки окисла у поверхности раздела влечет за собой появление потенциальной ямы, захватывающей фотоэлектроны [7] (фиг. 5). Вследствие этого фототок ослабевает и появляется перегиб на вольт-амперной характеристике. Фиг. 6 иллюстрирует это явление для солнечных элементов с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ , имеющих тонкий окисный слой у поверхности раздела (на фиг. 6, а перегиб еле заметен; в случае, представленном на фиг. 6, б, эффект становится очень значительным и фототок наблюдается лишь для сильноотрицательных значений смещения).

Таким образом, в работе изучалась гетероструктура  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$ . Исследовались свойства окисного слоя, выполняющего функции просветляющего слоя и коллекторного барьера. Показано влияние тонкого слоя окисла у поверхности раздела на характеристики



Фиг. 5. Зонные структуры гетероперехода  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+) - \text{Si}(p)$  — слой окисла у поверхности раздела —  $\text{Si}(p)$ .



Фиг. 6. Световые (а) и темновые (б) вольт-амперные характеристики солнечных элементов с гетеропереходом  $\text{In}_2\text{O}_3(n^+)$  — слой оксида у поверхности раздела —  $\text{Si}(p)$ .

элементов. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на увеличение диффузионного потенциала гетероперехода и на применение поликристаллических пленок.

### Литература

1. Cuomo J., Di Stephano T.D., Rosenberg R., *IBM Technical Disclosure Bulletin*, **17**, 2455 (1975).
2. Horiuchi S., Blanchard R., *Solid State Electronics*, **18**, 529 (1975).
3. Graff K., Pieper H., *J. Electron. Mat.*, **4**, 281 (1975).
4. Sah C.T., Wang C.T., *J. Appl. Phys.*, **46**, 1767 (1975).
5. Lai S.W. et al., IEEE 1975 Photovoltaic Specialists Conference, Phoenix.
6. Dubow J.B., Burk D.E., Sites J.R., International Electron Devices Meeting, Washington, 1975.
7. Anderson R.L., *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 691 (1975).

## Рифленое защитное покрытие для солнечных элементов <sup>1)</sup>

А. Мейленберг <sup>2)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Технология изготовления просветляющих покрытий для солнечных элементов и защитных стекол играет важную роль в повышении эффективности элементов. За последние годы удалось существенно улучшить характеристики просветляющих покрытий главным образом благодаря использованию новых материалов ( $\text{TiO}_x$  [1],  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  [2],  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  [3]). По сравнению с  $\text{SiO}$  эти материалы имеют более высокие значения показателя преломления, и поэтому для элементов с покрытиями, изготовленными на основе таких материалов, наблюдается лучшее соответствие оптических свойств состава для приклейки защитных покрытий и кремния. Дальнейшее улучшение оптического соответствия возможно путем применения метода химического травления, который используется для получения неотражающей кремниевой поверхности.

При создании просветляющих покрытий для защитных стекол вследствие наличия ограниченного количества материалов с низким показателем преломления единственной, экономически оправданной возможностью является нанесение однослойного покрытия из  $\text{MgF}_2$ . Так как поверхность стекла с таким покрытием отражает лишь  $\sim 3\%$  используемого света, то считалось, что все усилия получить более совершенные покрытия приведут к незначительному улучшению их характеристик. Тем не менее представляется возможным дальнейшее улучшение оптических свойств защитных покрытий, и, по-видимому, для этого должен быть использован метод, аналогичный методу, который применяется для получения неотражающей поверхности солнечных элементов.

<sup>1)</sup> Предлагаемая работа основана на результатах исследований лабораторий КОМСАТ, субсидируемых фирмой "Комюникэйшнз сэтвлайт".

<sup>2)</sup> A. Meulenberg, Jr., Communications Satellite Corporation Clarksbnrg, Maryland, USA.

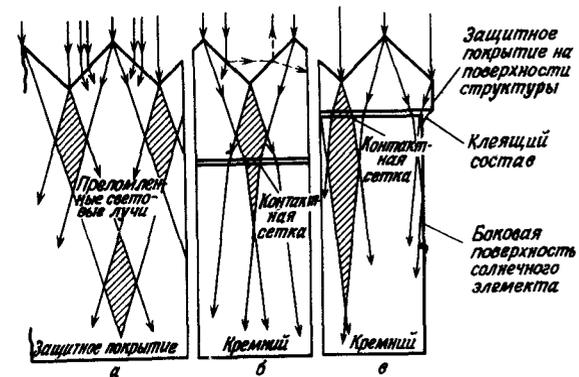
Помимо потерь, вызванных отражением света от поверхности солнечных элементов, возникают дополнительные потери, связанные с наличием металлической контактной сетки и токосъемной площадки, уменьшающих активную площадь солнечных элементов. Попытки заменить контактную сетку прозрачным проводящим покрытием не дали ожидаемых результатов, так как до настоящего времени не удалось получить покрытия с требуемыми значениями коэффициента пропускания в широком спектральном интервале, с высокой электропроводностью и необходимыми значениями показателя преломления. Обволакивающий контакт, использование которого также рассматривалось как возможность увеличения активной площади элемента, не нашел широкого применения.

В настоящей работе предлагается новое защитное покрытие, которое обладает неотражающими свойствами и, кроме того, сокращает значительные потери, вызываемые затенением поверхности контактной сеткой. В зависимости от степени усовершенствования контактной системы применение нового защитного покрытия позволит повысить к.п.д. обычных солнечных элементов на 6 – 10%.

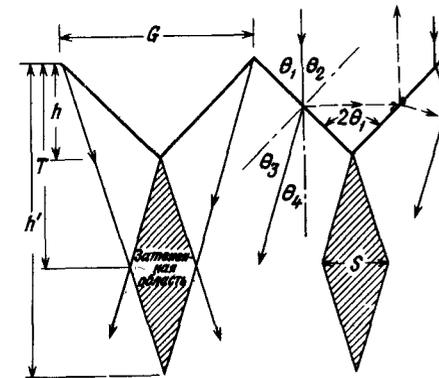
### ОПИСАНИЕ РИФЛЕННОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Рифленое защитное покрытие имеет зубчатый профиль с шагом, равным расстоянию между контактными полосками солнечного элемента. Зубчатая поверхность действует как световая ловушка, в которой отраженный свет вторично взаимодействует с поверхностью защитного покрытия. Если при однократном падении луча на поверхность стекла, не имеющую покрытия, коэффициент отражения  $R \leq 0,04$ , то коэффициент отражения от рифленой поверхности без просветляющего покрытия равен  $R^2 = 0,0016$ , что существенно ниже минимального значения коэффициента отражения ( $R \sim 0,02$ ) плоской поверхности плавленого кварца, имеющей просветляющее покрытие из  $MgF_2$ . Следовательно, рифленая поверхность возвращает почти все излучение ( $\sim 3\%$ ), которое обычно теряется вследствие отражения от поверхности защитного покрытия.

Наиболее значительный эффект достигается при совмещении углубления поверхностного рельефа защитного покрытия с контактными полосками элемента. В этом случае лучи преломляются таким образом, что весь свет направляется на поверхность полупроводника, заключенную между контактными полосками; при этом затененными оказываются сами полоски (фиг. 1). Обычные контактные системы и системы с тонким рисунком контактной сетки затеняют 7 – 10%



Фиг. 1. Структура и принцип действия рифленого защитного покрытия.



Фиг. 2. Направление распространения световых пучков в рифленом защитном покрытии.

активной площади элемента; только при использовании защитных покрытий с рифленой поверхностью потери, вызываемые затенением контактной сеткой, могут быть уменьшены более чем в 2 раза.

При детальном рассмотрении направлений распространения света внутри защитного покрытия (фиг. 1) обнаруживаются группы затененных участков, расположенных на различной глубине под каждым углублением и вершиной зубца. Размеры, форма и положение этих областей могут быть рассчитаны, исходя из расстояния между зубцами  $G$  (равного шагу контактной сетки), показателя преломления защитного покрытия  $n_c$  и значения половинного угла  $\theta_1$  между гранями зубцов (фиг. 2):

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_1, \theta_3 = \arcsin\left(\frac{n_a}{n_c} \cos \theta_1\right), \theta_4 = \theta_2 - \theta_3,$$

$$h = \frac{G}{2} \operatorname{ctg} \theta_1, \quad h' = \frac{G}{2} \operatorname{ctg} \theta_4, \quad S = (h' - h) \operatorname{tg} \theta_4, \quad T = (h' + h)/2,$$

где  $h$  – высота зубца,  $h'$  – расстояние между вершиной зубца и нижней границей первого ряда затененных участков,  $S$  – максимальная ширина затененной области,  $T$  – расстояние между вершиной зубца и плоскостью, проходящей через наиболее широкую часть затененных участков. В частности, при  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $n_c = 1,5$  и  $G = 760$  мкм максимальная ширина затененной области  $S$  равна 265 мкм при глубине  $T = 810$  мкм по отношению к уровню вершин зубцов.

В табл. 1 даны параметры различных защитных покрытий с рифленой поверхностью для двух значений  $\theta_1$ , определяющих вероятную область изменения этого параметра  $30^\circ < \theta_1 < 45^\circ$ . Величина  $T_{\text{эфф}}$ , которая представляет собой эффективную толщину покрытия и используется при определении массы и защитных свойств рифленого покрытия, соответствует толщине плоской пластины с теми же свойствами. Величина  $\Delta T$  определяет допустимое изменение толщины защитного покрытия, в пределах которого ширина затененной области превышает возможную ширину контактной полоски, равную 50 мкм.

Как видно из табл. 1 и фиг. 1, толщина защитного покрытия может меняться в широких пределах. На фиг. 1, б и в показан ход лучей при изменении толщины покрытия. Очевидно, что на фиг. 1, в представлен случай, соответствующий наибольшей степени концентрации света в кремнии. Для того чтобы покрытие обладало теми же защитными свойствами и такой же удельной массой, что и применяемые в настоящее время плоские покрытия,  $T_{\text{эфф}}$  должна составлять 300 мкм. Соответствующая плотность контактных полос равна  $26 \text{ см}^{-1}$ , что хорошо сочетается с требованием уменьшения последовательного сопротивления слоя  $n$ -типа проводимости в солнечных элементах с мелким переходом. Так как при соответствующей толщине рифленого защитного покрытия затеняется почти 30% площади элемента, применение более широких контактных полос (50 – 100 мкм) не приведет к дополнительным потерям, и становится возможным создание густой контактной сетки. При использовании широких контактных полос, расположенных под рифленным покрытием, желательно увеличить размеры солнечных элементов (до  $4 \times 2$  или  $6 \times 2$  см).

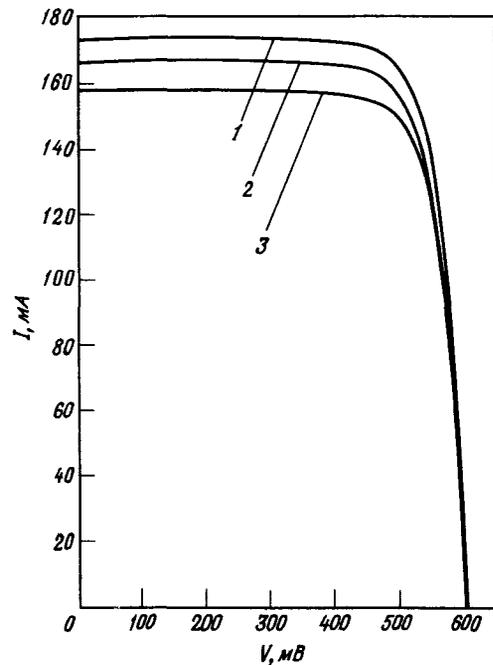
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки возможности использования защитного покрытия новой формы была изготовлена специальная литейная форма и в качестве материала для покрытия был выбран каучук RTV, который обычно

Таблица 1

Значения основных параметров рифленых защитных покрытий

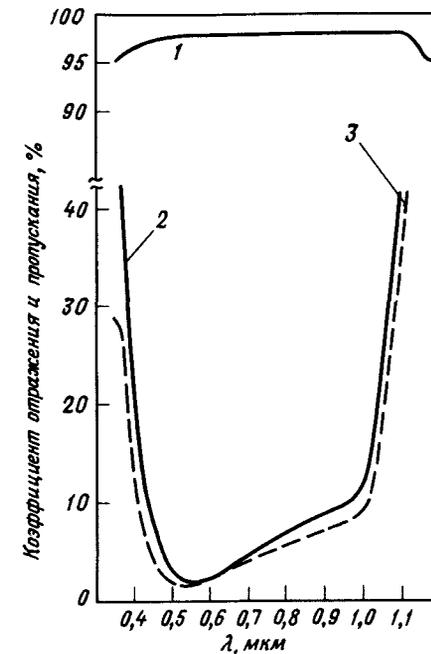
$G$ , мкм	Плотность контактных полос на 1 см	$\theta_1$ , град	$S$ , мкм	$T$ , мкм	$T_{\text{эфф}}$ , мкм	$T \pm \Delta T$ , мкм	$T_{\text{эфф}} + \Delta T$ , мкм
760	12,5	45	265	810	670	460 – 1160	320 – 1020
380	25	45	132	405	335	270 – 540	200 – 470
254	37,5	45	88	270	223	240 – 300	193 – 253
760	12,5	30	75	625	495	765 – 885	435 – 555
510	19	30	50	550	330		



Фиг. 3. Вольт-амперные характеристики фиолетового элемента до и после нанесения покрытия.

1 — фиолетовый элемент с рифленым покрытием; 2 — фиолетовый элемент с покрытием из плавленного кварца; 3 — фиолетовый элемент без покрытия.

используется для приклейки защитных пластин из плавленного кварца к солнечным элементам. Полученные рифленые покрытия даже при неполированной поверхности литейной формы обладают значительным преимуществом перед обычными защитными покрытиями. На фиг. 3 представлены вольт-амперные характеристики фиолетового элемента, изготовленного фирмой КОМСАТ, до и после нанесения рифленого покрытия. Увеличение тока на 15 мА, наблюдаемое у элемента с рифленым покрытием, приблизительно в 2 раза превосходит прирост тока, получаемый после приклейки обычного защитного покрытия из плавленного кварца с просветляющим слоем, но не снабженного фильтром, отражающим ультрафиолетовое излучение. Однако это увеличение тока составляет всего  $\frac{2}{3}$  ожидаемого прироста. Причину расхождения результатов удалось установить с помощью измерения оптических характеристик рифленого покрытия из каучука RTV. Как показано на фиг. 4, слой этого вещества поглощает  $\sim 2\%$  падающего света,

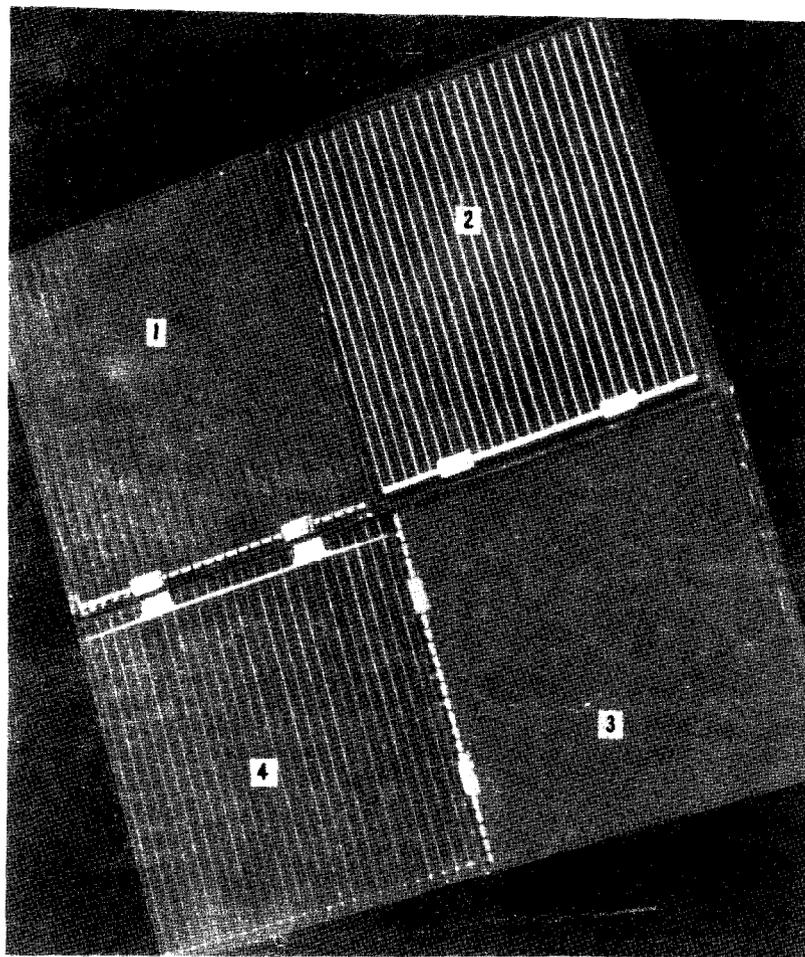


Фиг. 4. Спектральные зависимости коэффициентов пропускания (1) и отражения (2 и 3) защитных покрытий.

1 — покрытие из каучука RTV; 2 — покрытие из плавленного кварца на поверхности фиолетового элемента; 3 — покрытие из каучука RTV на поверхности фиолетового элемента.

в то время как плавленный кварц обладает почти нулевым поглощением. Кроме того, минимальный коэффициент отражения (фиг. 4) кремниевой пластины, имеющей ту же поверхность, что и фиолетовый элемент, и снабжен рифленым покрытием, составляет  $\sim 2\%$  вместо ожидаемого значения в пределах  $1\%$ . Это непредвиденное увеличение отражения частично связано с рассеянием света на неровностях поверхности зубцов.

На фиг. 5 представлена фотография фиолетового и неотражающего элементов с обычными защитными покрытиями и двух неотражающих элементов с рифлеными покрытиями, показанными под разными углами. Несмотря на то что у элементов с рифлеными покрытиями ясно различаются контактные площадки и токосъемные шины, их контактные полоски не видны. Очевидно, что поверхность одного из элементов с рифленым покрытием отражает излучение, что приводит к потере энергии.



Фиг. 5. Внешний вид установленных под разными углами неотражающих солнечных элементов с рифлеными покрытиями (1 и 3), а также неотражающего (4) и фиолетового (2) элементов с обычными защитными покрытиями.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что в результате использования рифленого защитного покрытия значительно повышаются выходные параметры солнечного элемента. Следует подчеркнуть, что это улучшение является следствием исключения тех видов потерь, которые считались неизбеж-

ными. С помощью рифленого защитного покрытия существенно снижены потери, вызываемые отражением и затенением поверхности контактной сеткой. Применение обволакивающих контактов, с помощью которых возможно усовершенствование солнечных батарей, в сочетании с рифленым защитным покрытием позволило бы затенить все участки поверхности, занимаемые лицевой контактной сеткой, и тем самым увеличить к.п.д. элементов на 10% по сравнению с к.п.д. солнечных элементов с обычным покрытием.

Рифленое защитное покрытие действительно обладает значительным преимуществом, однако проблемы оптимизации, производства и экономической эффективности остаются открытыми. При оптимизации должны одновременно рассматриваться свойства защитного покрытия и форма контактной сетки элемента. Целью исследования является создание такого элемента, у которого поверхность защитного покрытия является неотражающей и все контактные полосы расположены в затененных областях, возникающих при прохождении света через защитное покрытие. Желательно также рассмотреть возможность затенения пересекающихся контактных полосок с помощью создания V-образных канавок, расположенных непосредственно над каждой полоской. Число канавок должно совпадать с количеством зубцов, и поэтому в предельном случае поверхность будет иметь пирамидальный рельеф.

Для того чтобы увеличить количество света, концентрируемого внутри элемента, и уменьшить зависимость этой величины от угла падения света, вершины зубцов можно несколько скруглить. Как показано на фиг. 1, б, лучи, ограничивающие площадь затененного участка, проходят через вершины зубцов. Если вершины зубцов скруглены, эти лучи будут проходить между изображенными теньевыми участками, размеры которых, следовательно, увеличатся. В предельном случае поверхность будет состоять из полужилиндрических выступов или скругленных пирамид, которые будут концентрировать свет, однако в то же время вызовут значительный рост отражения от поверхности покрытия.

Для того чтобы уменьшить небольшие потери света на краевых участках элемента и контактов, необходимо оптимизировать величину угла между гранями зубцов, форму и размер защитного покрытия. Однако выигрыш, полученный в этом случае, может быть определен только после оценки экономической эффективности.

Способы изготовления рифленых защитных покрытий в значительной мере будут зависеть от предполагаемых условий применения сол-

нечных элементов. Для наземных элементов, возможно, будут применяться различные пластмассовые покрытия, полученные протягиванием через фильеры или отлитые в формах. При создании защитных покрытий для солнечных элементов космического назначения необходимо использовать плавленный кварц, тонкие стеклопенки с примесью церия или сапфир. Для обработки первых двух материалов могут применяться штамповка или высокотемпературная формовка; покрытия из сапфира могут быть получены методом, применяемым фирмой ТИКО [5].

Предполагается, что покрытия для солнечных элементов наземного применения, как правило, не будут устанавливаться на каждый элемент в отдельности. Вполне осуществимо использование больших формованных листов пластмассы, имеющих на одной стороне канавки зубчатой формы, а на другой — направляющие выступы. В процессе приклейки эти выступы будут автоматически совмещаться с краями солнечных элементов. Аналогичный процесс может быть применен при создании солнечных элементов, предназначенных для космических аппаратов.

Рифленые защитные покрытия не нуждаются в просветляющем покрытии и удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям при использовании их для защиты существующих в настоящее время солнечных элементов космического назначения (если ширина контактных полос не очень велика). Предполагается, что стоимость 1 кВт мощности, вырабатываемой солнечными элементами, снабженными рифлеными защитными покрытиями, будет сравнима со стоимостью такой же мощности, генерируемой обычными элементами, однако наиболее важным результатом с точки зрения космического применения является возможность получения более высоких значений отношения мощности к массе и выходной мощности, соответствующей единице площади.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается новая форма защитных покрытий для солнечных элементов, которая позволит снизить отражение от лицевой поверхности и увеличить эффективнополезную площадь солнечного элемента до величины, равной реальной площади элемента. Предварительные результаты свидетельствуют о возможности практического получения рифленых защитных покрытий и показывают, что с помощью таких покрытий характеристики элементов могут быть улучшены. При использовании рифленых защитных покрытий наряду с предполагае-

мым относительным увеличением к.п.д. солнечных элементов на 6—10% по сравнению с элементами, снабженными обычными покрытиями, возможность увеличения ширины контактной полосы без дополнительных потерь позволит создавать элементы большой площади с плотностью контактных полос 10—40 см<sup>-1</sup>.

### Литература

1. Atzei A. et al., Improved Anti-Reflection Coatings on Silicon Solar Cells, Proceedings of the International Colloquium on Solar Cells, Toulouse, France, July 1970.
2. Lindmayer J., Allison J.F., The Violet Cell: An Improved Silicon Solar Cell, *COMSAT Technical Review*, 3, No. 1, 1—23 (1973).
3. Revesz A.G., Vitreous Oxide Anti-Reflection Films in High-Efficiency Solar Cells, *COMSAT Technical Review*, 3, No. 2, 449—452 (1973).
4. Haynos J.G., et al., The COMSAT Non-Reflective Silicon Solar Cell: A Second Generation Improved Cell., Proceedings of the International Conference on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, ФРГ, September 1974, p. 487.
5. La Belle H.E., пат. США 5591348, July 6, 1971.

# ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

## Теоретические возможности улучшения характеристик солнечных элементов на основе CdS — Cu<sub>2</sub>S

А. Ротворф<sup>1)</sup>

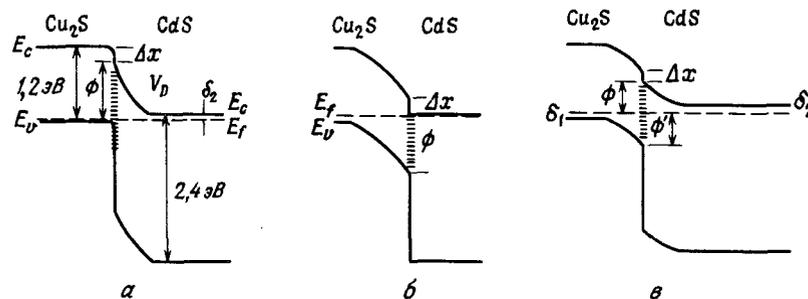
### ВВЕДЕНИЕ

После того как в 1954 г. был обнаружен фотоэффект в структуре CdS — Cu<sub>2</sub>S [1], начались интенсивные исследования возможности создания солнечных элементов на основе этой системы и изыскание путей улучшения характеристик таких элементов. Подробный обзор работ, которые проводились в этой области до 1973 г., представлен в статье [2], обзор более поздних исследований дан в работах [3, 4]. У солнечных элементов, которые могут быть изготовлены различными методами, обнаруживается множество интересных свойств, причем большая часть из них определяется конкретным способом изготовления. Наибольший интерес представляют характеристики элемента как устройства для преобразования энергии, т.е. характеристики, которые показывают эффективность работы преобразователя энергии. В данной работе проводится теоретический анализ характеристик элементов с целью установить причину низкого к.п.д. солнечных элементов (не превышающего 8%) и определить пути его повышения до 15%.

### ДИАГРАММЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗОН И ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Солнечный элемент со структурой CdS — Cu<sub>2</sub>S, по существу, является диодом с гетеропереходом. Зависимость тока от напряжения ( $I - V$ ) в таком приборе теоретически определяется формой энергетических зон CdS и Cu<sub>2</sub>S. На фиг. 1 показаны возможные диаграммы энергетических зон с различным относительным положением примесных уровней в CdS и Cu<sub>2</sub>S, причем на диаграммах не существует пика энергии в области перехода. На фиг. 1, *a* представлен случай, когда Cu<sub>2</sub>S находится в вырожденном состоянии, а CdS — в невырожден-

<sup>1)</sup> А. Rothwarf, Institute of Energy Conversion University of Delaware, Newark, Delaware, USA.



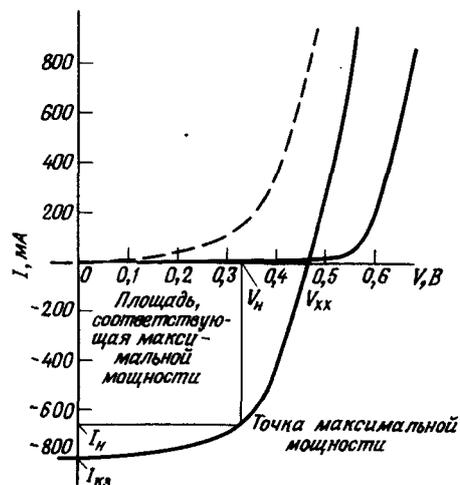
Фиг. 1. Возможные диаграммы энергетических зон для солнечного элемента на основе структуры CdS — Cu<sub>2</sub>S.

ном. Именно эта модель будет рассмотрена подробно, так как большая часть экспериментальных данных подтверждает ее справедливость. Диаграмма на фиг. 1, *b* соответствует обратному случаю, т.е. когда в вырожденном состоянии находится CdS, а в невырожденном — Cu<sub>2</sub>S. Предполагаемое различие вольт-амперных характеристик в этих двух случаях (*a* и *b*) заключается в следующем: для модели *b* должны быть характерны более высокие значения тока короткого замыкания вследствие сильного изгиба зон в Cu<sub>2</sub>S, который способствует собиранию носителей заряда, и в то же время в случае *b* должны наблюдаться более низкие значения напряжения в режиме холостого хода, так как предполагается, что эффективная плотность состояний в валентной зоне Cu<sub>2</sub>S намного выше плотности состояний в зоне проводимости CdS. В случае *c*, когда оба слоя CdS и Cu<sub>2</sub>S находятся в невырожденном состоянии, ток короткого замыкания и напряжение в режиме холостого хода будут ниже, чем в случае *a*. Приведенный в работе подробный теоретический анализ подтверждает эти предположения.

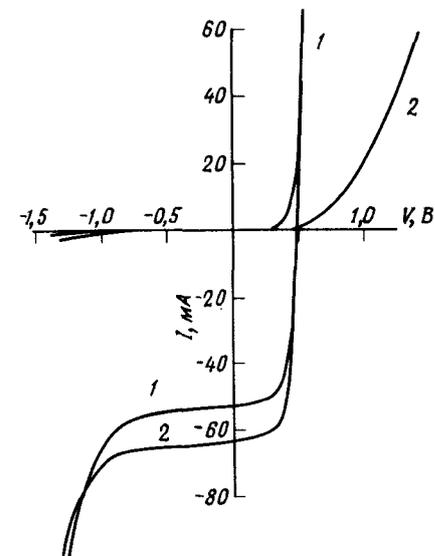
Типичные экспериментальные световые и темновые вольт-амперные характеристики элементов для случая, представленного на фиг. 1, *a*, схематически изображены на фиг. 2, *a*. Зависимости, показанные сплошными линиями, получаются путем измерения тока сразу после установления определенного значения напряжения. Наличие пересечения темновой и световой характеристик типично для солнечных элементов фирмы "Клевайт" [2, 5]. Оно связано с формой характеристики и в значительной степени зависит от режима термообработки элемента. Темновая характеристика, представленная штриховой линией, получается в том случае, когда измерения тока проводятся после продолжительной выдержки элемента при прямом напряжении сме-

щения. Вообще говоря, характеристики элемента не обязательно должны пересекаться, так как пересечение связано с шириной компенсированной области в CdS вблизи границы раздела. В некоторых фотоэлементах влияние компенсированной области может быть существенным, так как на спектральную чувствительность элемента (как это будет показано ниже) могут оказывать сильное воздействие ионизированные уровни в CdS у поверхности раздела. На фиг. 2б представлены вольт-амперные характеристики реального элемента до и после термообработки при  $170^\circ\text{C}$  и давлении  $\sim 40$  Па в течение 16 ч. При более низких давлениях ток короткого замыкания увеличивается, однако пересечения характеристик не наблюдается. На фиг. 2в представлена вольт-амперная характеристика элемента со слоем CdS толщиной 8 мкм. Плотность тока короткого замыкания составляла  $18,5 \text{ mA/cm}^2$  при к.п.д., равном  $6,02\%$ .

При наличии пересечения кривых вид зависимостей, представляемых темновыми вольт-амперными характеристиками, может быть объяснен влиянием токов, вызванных наличием пространственного заряда [6]. Так как эта особенность не является определяющей для границы раздела CdS –  $\text{Cu}_2\text{S}$  при преобразовании солнечной энергии, то ниже в основном будут рассматриваться свойства освещенного элемента.

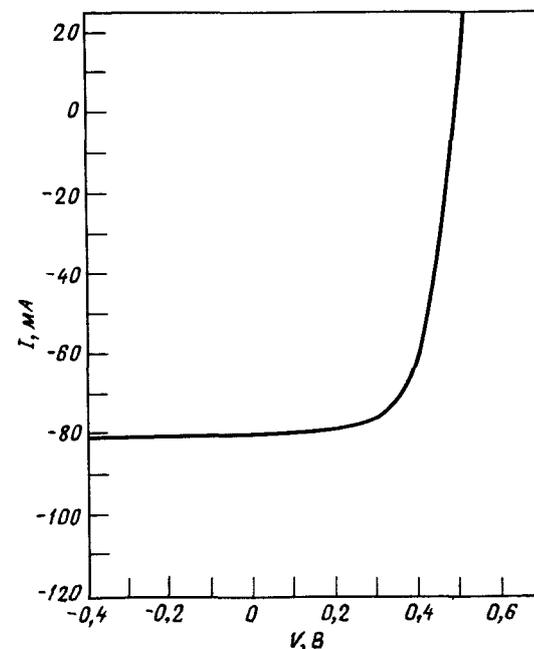


Фиг. 2а. Схематическое изображение вольт-амперных характеристик.



Фиг. 2б. Вольт-амперные характеристики реального элемента, показывающие влияние термообработки.

1 – до термообработки; 2 – после термообработки.



Фиг. 2в. Вольт-амперная характеристика реального элемента со слоем CdS толщиной 8 мкм.

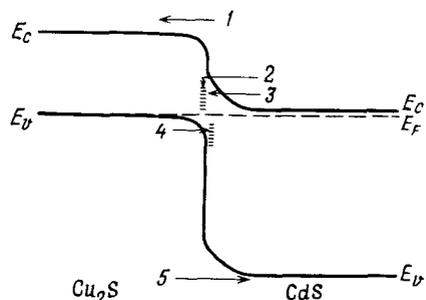
Напряжение холостого хода  $V_{xx} = 0,492 \text{ В}$ ; коэффициент заполнения  $0,66$ ; плотность тока короткого замыкания  $I_{кз} = 18,5 \text{ mA/cm}^2$ ; к.п.д.  $\eta = 6,02\%$ ; термообработка в вакууме при температуре  $170^\circ\text{C}$  в течение 52 ч.

## ТЕОРИЯ

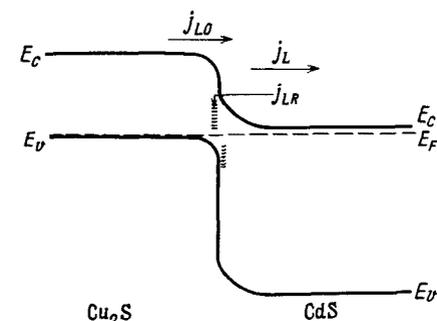
На фиг. 3 приведена диаграмма энергетических зон для случая фиг. 1, а в отсутствие освещения, на которой показаны возможные токи через поверхность раздела. Токи, протекающие в направлениях 1 и 5, представляют собой электронный и дырочный диффузионные токи соответственно. Ток в направлении 2 соответствует движению электронов в CdS к краю валентной зоны на поверхности раздела и их рекомбинации с дырками в Cu<sub>2</sub>S через уровни поверхностных состояний. Этот ток определяет форму вольт-амперной характеристики [7]. Токи в направлениях 3 и 4, соответствующие туннелированию электронов и дырок, появляются при некоторых определенных условиях. В случаях фиг. 1, б и в важную роль может играть дополнительный рекомбинационный механизм протекания темнового тока [8]. Как упоминалось выше, почти все экспериментальные данные можно объяснить с помощью диаграммы энергетических зон, показанной на фиг. 1, а, однако некоторые результаты исследований влияния термообработки на свойства элементов, изготовленных с применением монокристаллических материалов [9], проще объяснить с помощью диаграммы, представленной на фиг. 1, в. Когда Cu<sub>2</sub>S находится в вырожденном состоянии, уравнение для плотности темнового тока при наличии рекомбинации на границе раздела имеет вид

$$j_D = qN_{C2}S_I \exp \left[ \frac{-(qV_D + \delta_2)}{kT} \right] \exp \left[ \frac{(V - jR_S A_1)}{kT} - 1 \right], \quad (1)$$

где  $N_{C2}$  — эффективная плотность состояний в CdS,  $S_I$  — эффективная скорость рекомбинации на границе раздела,  $V_D$  — диффузионный потенциал CdS,  $\delta_2$  — расстояние между уровнем Ферми и краем зоны проводимости в CdS,  $R_S$  — последовательное сопротивление,  $A_1$  — нормальная к направлению тока площадь диода. Значение  $S_I$  связано с плотностью и энергетическим распределением состояний на поверхности



Фиг. 3. Диаграмма энергетических зон и направления токов при отсутствии освещения.



Фиг. 4. Диаграмма энергетических зон элемента, работающего в режиме короткого замыкания.

раздела, которые в свою очередь зависят от степени различия параметров кристаллических решеток CdS и Cu<sub>2</sub>S. Значение  $S_I$  можно оценить, используя соотношение  $S_I = v_{th} \sigma N_I$ , где  $v_{th}$  — тепловая скорость,  $\sigma$  — сечение захвата уровней, связанных с краевыми дислокациями,  $N_I$  — общее число поверхностных состояний. Для  $N_I$  можно написать соотношение  $N_I \approx 2\Delta a/a^3$  [11], где  $a$  — среднее значение постоянной решетки,  $\Delta a$  — разность значений постоянных решетки CdS и Cu<sub>2</sub>S. В предположении, что  $\Delta a/a \approx 0,04$  и  $\sigma \approx 10^{-14} - 10^{-15}$  см<sup>2</sup>, для  $S_I$  получено значение порядка  $10^5 - 10^6$  см/с.

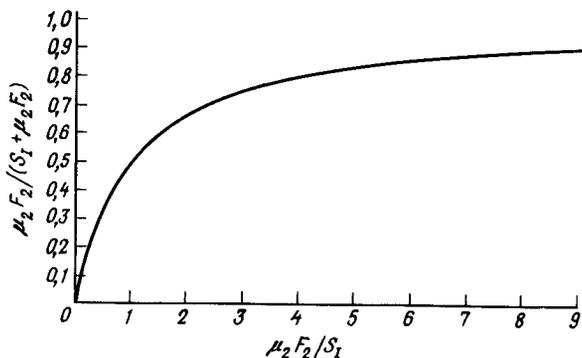
На фиг. 4 изображена диаграмма энергетических зон при освещении гетероперехода. Основная часть носителей генерируется почти исключительно в слое Cu<sub>2</sub>S и диффундирует к границе раздела. Ток  $j_{Lo}$ , протекающий через границу раздела, в слое CdS разделяется на две составляющие, одна из которых ( $j_{LR}$ ) возвращается в Cu<sub>2</sub>S через центры поверхностной рекомбинации, а другая ( $j_L$ ) переносится электрическим полем в области границы раздела. Величина  $j_L$  представляет собой наблюдаемый ток короткого замыкания. Значение  $j_L$  можно определить следующим образом:

$$j_{Lo} = j_{LR} + j_L, \quad (2)$$

$$j_{Lo} = qn_I S_I, \quad (3)$$

$$j_L = qn_I v_D = qn_I \mu_2 F_2, \quad (4)$$

где  $n_I$  — плотность электронов на границе раздела в CdS,  $S_I$  — эффективная скорость рекомбинации на границе раздела,  $v_D$  — дрейфовая скорость носителей в области перехода в CdS. Величина  $v_D$  равна произведению подвижности  $\mu_2$  на напряженность электрического поля в области границы раздела  $F_2$ , если  $v_D$  значительно меньше скорости



Фиг. 5. Зависимость коэффициента собирания от параметра  $\mu_2 F_2 / S_1$ .

теплового движения [12]. Окончательно уравнение для  $j_L$  имеет вид

$$j_L = j_{L0} \mu_2 F_2 / (S_1 + \mu_2 F_2). \quad (5)$$

Коэффициент при  $j_{L0}$  меньше единицы и является коэффициентом собирания, определяющим, какая часть генерируемого тока  $j_{L0}$  вносит вклад в фототок. На фиг. 5 приведена кривая зависимости коэффициента собирания от параметра  $\mu_2 F_2 / S_1$ . В общем случае  $F_2$  зависит от плотности и зарядового состояния донорных и акцепторных уровней в области перехода. В свою очередь зарядовое состояние, так же как и падение напряжения  $V_D - V$ , определяется длиной волны и интенсивностью падающего излучения в области пространственного заряда в CdS. Наличие эффектов гашения и усиления фотопроводимости [13] и фотоемкостные явления [14], которые зависят от длины волны и интенсивности излучения, свидетельствуют о наличии процессов перезарядки ловушек захвата. Наблюдаемые в этих экспериментах изменения  $j_L$  можно количественно объяснить с помощью уравнения (5). Так как элементы фирмы "Клевайт" имеют  $i$ -слой, содержащий ионизирующиеся под действием света центры, это приводит к увеличению  $F_2$  и, следовательно, тока короткого замыкания элемента.

С помощью уравнений (1) и (5) определяется световая вольт-амперная характеристика. Приравнявая суммарный ток нулю, можно определить напряжение в режиме холостого хода  $V_{xx}$ . Уравнение относительно  $V_{xx}$  имеет вид

$$qV_{xx} = E_{g1} - \Delta\chi + kT \ln (j_L A_1 / qN_C S_1 A_j). \quad (6)$$

Здесь использовано соотношение  $V_D + \delta_2 = E_{g1} - \Delta\chi$  (фиг. 1, а), где  $E_{g1}$  — ширина запрещенной зоны  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\Delta\chi$  — разность значений

энергий электронного средства  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{CdS}$ . Величина  $A_j$  является общей площадью поверхности раздела и может значительно превосходить нормальную к направлению тока площадь плоской поверхности элемента вследствие образования  $\text{Cu}_2\text{S}$  по границам зерен и нарушения плоской геометрической формы поликристаллического  $\text{CdS}$ .

Величины  $\Delta\chi$  и  $S_1$  в уравнении (6) существенно влияют на величину  $V_{xx}$ . Уменьшая  $\Delta\chi$  и  $S_1$  путем замены слоя  $\text{CdS}$  на  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ , можно значительно повысить  $V_{xx}$ . Предполагается, что это соединение имеет лучшее соответствие параметров кристаллической решетки и энергии электронного средства с  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Ожидаемое изменение  $V_{xx}$  равно

$$q\Delta V_{xx} (\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}) = x(\chi_{\text{CdS}} - \chi_{\text{ZnS}}) + kT \ln \{ \Delta a_0 / [\Delta a_0 - x(a_{\text{CdS}} - a_{\text{ZnS}})] \}, \quad (7)$$

где  $\Delta a_0$  — разность значений параметров решетки  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{CdS}$ . Согласно работе [15], были получены наиболее высокие значения  $V_{xx}$  при  $x = 0,1$ . Аналогичные результаты были получены в Университете шт. Делавэр. Однако для таких элементов характерны довольно низкие токи короткого замыкания.

Другой возможный способ увеличения  $V_{xx}$ , который успешно применяется для солнечных элементов с барьером Шоттки [16], связан с образованием изолирующего слоя между  $\text{CdS}$  и  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Если  $\Delta\chi$  уменьшить до нуля и существенно понизить значение  $S_1$ , то основными механизмами, определяющими процесс протекания тока, будут диффузия и объемная рекомбинация. При таких условиях возможно увеличение  $V_{xx}$  от значения  $\sim 0,5$  В, получаемого в настоящее время, до значения  $\sim 0,8$  В (табл. 1). Только за счет увеличения  $V_{xx}$

Таблица 1

Оценка параметров солнечных элементов на основе структуры  $\text{CdS} - \text{Cu}_2\text{S}$  в условиях АМ1

Ток короткого замыкания	
Механизмы потерь	Ожидаемый уровень потерь, %
Защитный материал на поверхности (отражение и поглощение)	5 – 20
Затенение поверхности контактной сеткой	10 – 15
Поверхностная рекомбинация	0 – 5
Объемная рекомбинация	15 – 25

Продолжение табл. 1

Рекомбинация на поверхности раздела	0 – 10
Поглощение на тыльной поверхности	0 – 5
Рекомбинация на границах зерен	0 – 10
Суммарные потери	30 – 90
Суммарные потери элементов с лучшими характеристиками	~45

Напряжение в режиме холостого хода

Рекомбинация на поверхности раздела

$$S_I = 10^6 \text{ см/с}, j_L = 0,02 \text{ А/см}^2, A_j/A_{\perp} = 10, N_{C2} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

$$qV_{\text{хх}} = E_{g1} - \Delta\chi + kT [\ln j_L - \ln(qN_{C2}S_I) - \ln(A_j/A_{\perp})] = 1,2 - 0,2 - 0,1 - 0,33 - 0,06 = 0,51 \text{ эВ}$$

Объемная рекомбинация

$$L = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}, \tau = 10^{-9} \text{ с}, \mu_n \approx 35 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}),$$

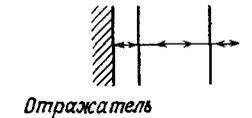
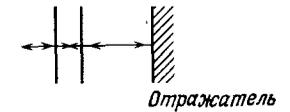
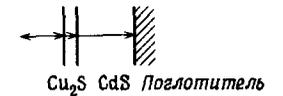
$$qV_{\text{хх}} = E_{g1} + kT [\ln j_L - \ln(qN_{C2}L/\tau) - \ln(A_j/A_{\perp})] = 1,2 - 0,1 - 0,24 - 0,06 = 0,8 \text{ эВ}$$

к.п.д. существующих солнечных элементов можно повысить от 6–7% до значений, больших 10%. В сочетании с более высокими значениями тока короткого замыкания  $j_L$ , возможности получения которых будут рассмотрены ниже, становится реальным создание элементов с к.п.д. около 15%.

Ранее было показано влияние границы раздела и слоя CdS на величину тока  $j_L$ , описываемое через коэффициент сбора. Другой множитель ( $j_{L0}$ ), влияющий на величину тока  $j_L$ , зависит от ряда параметров:

$$j_{L0}(\lambda) = j_{L0} [d, L, R, F_1, S, \alpha(\lambda), \varphi_0(\lambda)], \quad (8)$$

где  $d$  – толщина слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $L$  – диффузионная длина для электронов в  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $R$  – размер зерен или кристаллитов в  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $F_1$  – напряженность дрейфового поля в  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $S$  – скорость поверхностной рекомбинации,  $\alpha(\lambda)$  – коэффициент поглощения света в  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\varphi_0(\lambda)$  – падающий поток фотонов. Кроме того,  $j_{L0}$  зависит от ре-



Фиг. 6. Режимы работы солнечного элемента на основе структуры CdS –  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

жима работы элемента. На фиг. 6 показаны четыре режима: фронтальный, когда свет падает на поверхность слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$  со стороны контактной сетки и прозрачного покрытия на этом слое; тыльный, когда свет проходит через прозрачную подложку, электрод и слой CdS и только затем поглощается в  $\text{Cu}_2\text{S}$ ; при двух остальных режимах работы элемента свет, не поглощенный в слое  $\text{Cu}_2\text{S}$ , отражается и вторично проходит через этот слой.

Чтобы определить возможные пути усовершенствования элементов, были проведены расчеты  $j_{L0}$  в зависимости от различных параметров. Результаты таких расчетов подробно представлены в работе [17]. Некоторые из них приведены на фиг. 7 – 10. Важным параметром в этих расчетах является коэффициент поглощения, который может меняться в зависимости от способа получения материала, вследствие чего наблюдается разброс измеренных значений коэффициента поглощения в широких пределах. Значения, использованные в данных расчетах, приведены в табл. 2.

На фиг. 7 представлены кривые спектральной чувствительности элемента для четырех режимов работы. При расчете кривых использовались значения  $\alpha$ , приведенные в работе [18], и учитыва-

Таблица 2

Значения коэффициента поглощения света в монокристаллическом Cu<sub>2</sub>S, полученном методом погружения (а) и (б), и в Cu<sub>2</sub>S, нанесенном на стекло марки "пирекс" методом испарения в вакууме (в)

λ, мкм	α, 10 <sup>5</sup> см <sup>-1</sup>		
	метод а [5]	метод б [18]	метод в [5]
0,40	4,2		2,35
0,50	1,8	2,0	1,1
0,55	1,25	1,1	0,75
0,60	0,88	0,7	0,62
0,65	0,66	0,5	0,426
0,70	0,55	0,41	0,336
0,75	0,485	0,35	0,286
0,80	0,44	0,32	0,253
0,85	0,41	0,28	0,224
0,90	0,35	0,21	0,191
0,95	0,245	0,08	0,12
1,00	0,14	0,02	0,04

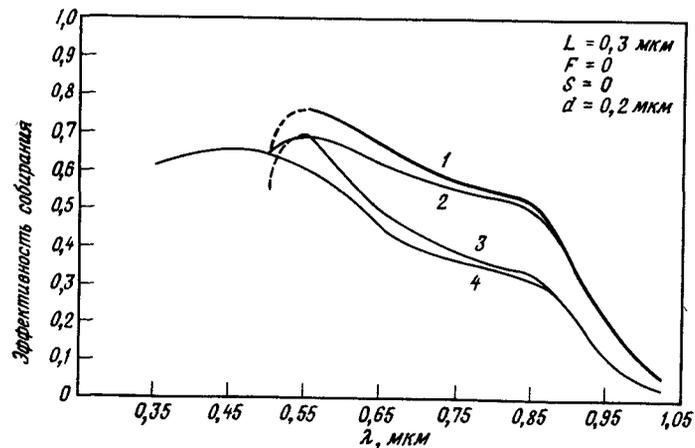


Рис. 7. Теоретические зависимости спектральной чувствительности солнечного элемента на основе структуры CdS — Cu<sub>2</sub>S при различных режимах работы.

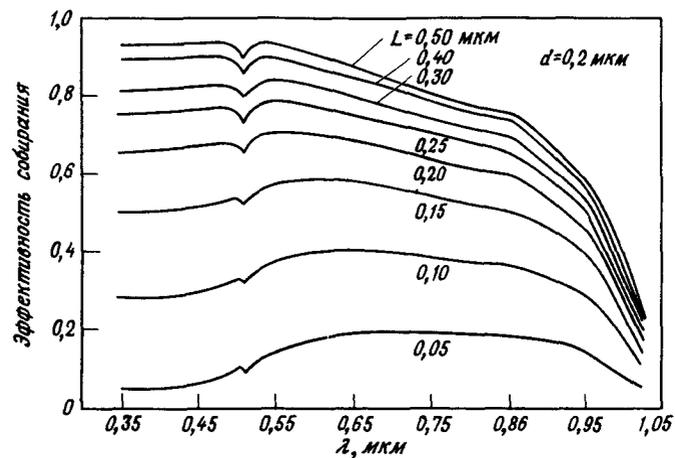
1 — элемент с отражающей поверхностью, работающий в тыльном режиме; 2 — элемент с отражающей поверхностью, работающий во фронтальном режиме; 3 — элемент без отражающей поверхности, работающий в тыльном режиме; 4 — элемент без отражающей поверхности, работающий во фронтальном режиме.

лись потери на отражение. Видно, что при работе в тыльном режиме элемент имеет более высокую спектральную чувствительность, чем при работе во фронтальном режиме, а режим с использованием отражающей поверхности обеспечивает более высокую чувствительность, чем режим без отражающей поверхности. Однако предполагается, что наибольшие значения интегрального тока будут наблюдаться у фронтальнобарьерных элементов с отражающей поверхностью, так как спектральная чувствительность тыльнобарьерных элементов равна нулю в области длин волн, меньших длины волны, соответствующей ширине запрещенной зоны CdS ( $\lambda < 0,51$  мкм). В этой спектральной области заключено 15 — 20% фотонов от их общего числа в спектре солнечного излучения, соответствующего единичной воздушной массе (условия AM1). Следует отметить, что кривая спектральной чувствительности элемента с отражающей поверхностью при работе во фронтальном режиме имеет спад при длине волны 0,51 мкм, соответствующей ширине запрещенной зоны CdS. Наличие этого спада связано с ростом спектральной чувствительности вследствие отражения света с длиной волны  $\lambda > 0,51$  мкм от теневой поверхности. У элементов с очень тонкими слоями Cu<sub>2</sub>S появление спада при длинах волн, меньших  $\lambda = 0,51$  мкм, также связано с образованием носителей в CdS. Существование этого спада свидетельствует о том, что в большинстве элементов при работе во фронтальном режиме происходит отражение света от теневой поверхности.

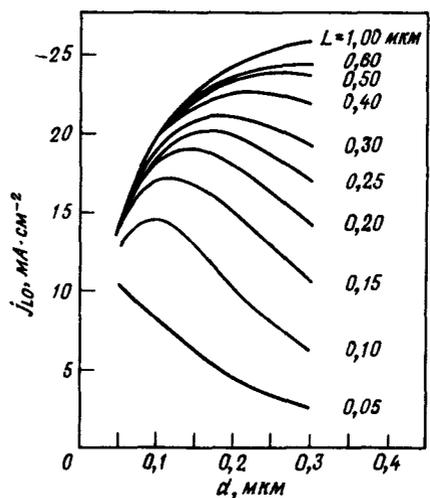
По-видимому, наиболее важным параметром, характеризующим ток короткого замыкания, является диффузионная длина для электронов в слое Cu<sub>2</sub>S. На фиг. 8 приведены кривые спектральной чувствительности элементов с отражающей поверхностью при работе во фронтальном режиме, для которых параметром является величина  $L$ . Согласно представленным данным, у эффективных элементов  $L \geq 0,3$  мкм. Потери на отражение не учитывались.

Величину  $L$  можно оценить с помощью зависимости интегрального тока короткого замыкания от толщины слоя Cu<sub>2</sub>S. Результаты расчета с учетом потерь на отражение, но без учета затенения поверхности контактной сеткой приведены на фиг. 9. Плотности тока, наблюдаемые в реальных элементах, а также значения толщины, которым соответствует максимальный ток, показывают, что  $L \geq 0,3$  мкм.

На фиг. 10 представлены результаты расчета тока поликристаллических солнечных элементов с планарной геометрией при интенсивной

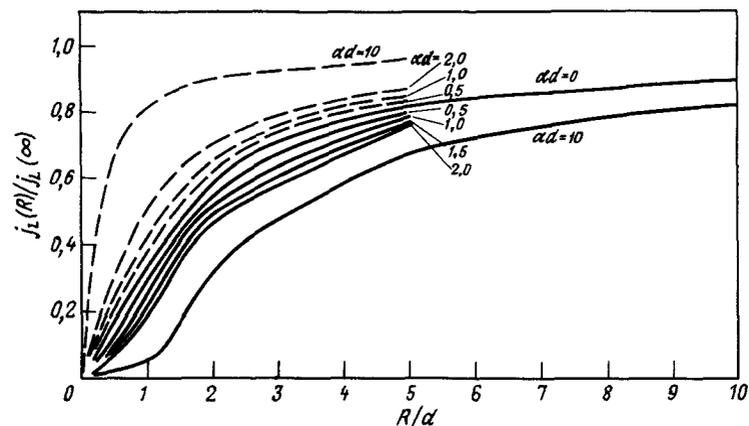


Фиг. 8. Теоретические зависимости спектральной чувствительности элемента с отражающей поверхностью, работающего во фронтальном режиме. В расчетах использованы значения  $\alpha(\lambda)$ , приведенные в табл. 2 (метод а).



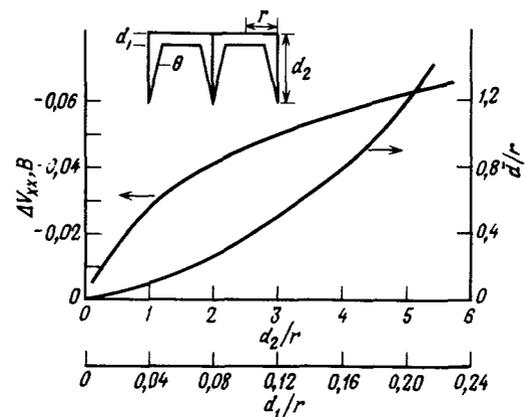
Фиг. 9. Теоретические зависимости плотности тока от толщины слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$  в условиях АМ1.

рекомбинации на границах зерен. В этом случае при работе в тыльном режиме элементы имеют более высокую чувствительность. Для типичных элементов  $R/d > 5$ , а величина  $\alpha d$  в фиолетовой области



Фиг. 10. Теоретические зависимости тока короткого замыкания от размера границ зерен при различных значениях параметра  $\alpha d$ .

— элемент, работающий во фронтальном режиме; --- элемент, работающий в тыльном режиме.



Фиг. 11. Теоретические зависимости напряжения в режиме хопостого хода от параметров слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$ , образующегося по границам зерен.

спектра имеет значение  $\approx 10$ . Так как при изготовлении элементов методом погружения на границах зерен образуется слой  $\text{Cu}_2\text{S}$ , то необходима коррекция результатов, полученных для планарной модели. У элементов с непланарной структурой ожидаются более высокие токи.

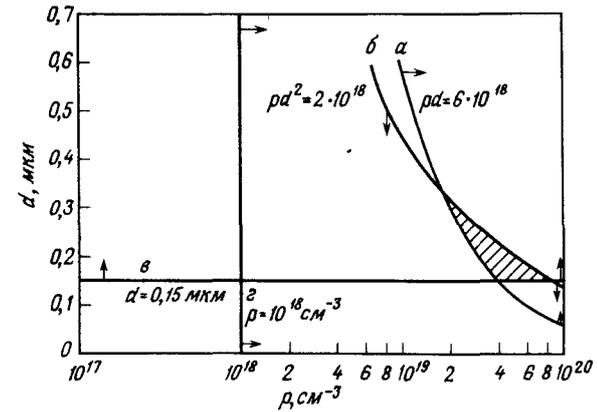
При непланарной геометрии из-за значительного увеличения площади перехода изменяется напряжение в режиме холостого хода. На фиг. 11 приведены результаты расчета изменения  $V_{xx}$  на основе модели зерен в виде цилиндров, схематически показанной вверху фиг. 11. Предполагается, что рост  $\text{Cu}_2\text{S}$  у границ зерен происходит со значительно большей скоростью, чем в центре зерна. Величина  $\bar{d}$  является отношением общего объема  $\text{Cu}_2\text{S}$  к площади элемента с планарной геометрией. Эта величина определяется электрохимическим или химическим методом. Выражение для  $\bar{d}$  имеет вид

$$\bar{d} = d_1 + d_2^2 \operatorname{tg} \theta (1 - d_2 \operatorname{tg} \theta / 3r) / r \approx d_1 + d_1 d_2 / r - d_1^2 d_2 / 3r^2. \quad (9)$$

Отношение площадей приблизительно равно  $A_j/A_1 \approx 1 + 2d_2/r$ , а изменение напряжения в режиме холостого хода  $\Delta V_{xx} = kT \ln(A_j/A_1)$ . Результаты, приведенные на фиг. 11, были получены при  $\operatorname{tg} \theta = 0,04$ . Экспериментально установлено, что между величиной  $\bar{d}$  и временем окупания существует линейная зависимость [19]. Это согласуется с уравнением (9), где  $d_1 d_2$  прямо пропорциональны  $t^{1/2}$ , если определяющим в этом уравнении является второй член. В работе [20] сообщалось, что  $d_1$  связана с  $t^{1/2}$  прямой пропорциональной зависимостью. Принимая во внимание топографию поверхности, можно объяснить изменения  $V_{xx}$  до 0,08 В изменением площади перехода.

В рассматриваемых расчетных данных не учитывалось влияние поверхностной рекомбинации, скорость которой равна  $S$ , и дрейфового поля напряженностью  $F_1$ . Согласно сделанным нами оценкам, у хороших элементов рекомбинация на поверхности раздела уменьшает ток короткого замыкания менее чем на 10%, в то время как дрейфовое поле напряженностью  $F_1$  в случае  $a$  (фиг. 1) может увеличить  $j_{L0}$  на  $\sim 10\%$ .

Другим важным параметром солнечного элемента является последовательное сопротивление  $R_S$ . Когда последовательное сопротивление определяется параметрами слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$ , оно зависит от концентрации носителей и толщины слоя в соответствии с соотношением  $R_S \sim c_1/pd$ . Ток короткого замыкания также зависит от концентрации носителей и толщины и определяется отношением диффузионной длины к толщине слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$ . У оптимизированных элементов  $L/d > 2$ , причем  $L \sim p^{-1/2}$  [7]. Используя условие  $R_S < R_{S0}$  совместно с ограничениями  $L/d > 2$  и  $d > d_0$  (что необходимо для эффективного поглощения фотонов), можно определить область значений



фиг. 12. Схематическое изображение области оптимальных значений концентрации носителей и толщины слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$  в солнечных элементах.

толщины слоя  $\text{Cu}_2\text{S}$  и концентрации носителей, обеспечивающих требуемые свойства элементов.

Заштрихованная область на фиг. 12 определяет область значений  $d$  для хороших элементов в пределах 1500 – 3500 Å, а значений  $p$  – в пределах  $2 \cdot 10^{19} - 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В слое  $\text{Cu}_2\text{S}$  этим значениям  $p$  соответствуют  $x = 1,996 \div 1,999$ . Реальные элементы с параметрами, лежащими внутри полученной области, имеют хорошие характеристики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет реалистически оценить теоретические возможности улучшения характеристик солнечных элементов на основе структуры  $\text{CdS} - \text{Cu}_2\text{S}$ . В табл. 1 показано влияние различных механизмов потерь на величину тока короткого замыкания. Расчеты проводились для элементов с лучшими характеристиками, исходя из нижнего предела потерь, и так как полностью исключить потери нельзя, то предполагалось, что плотность тока короткого замыкания может быть увеличена от существующих в настоящее время значений  $\sim 20 \text{ мА/см}^2$  до значений  $\sim 25 \text{ мА/см}^2$ . Если при этом  $V_{xx} = 0,5 \text{ В}$  и коэффициент заполнения равен  $\sim 0,75$ , то соответствующее значение к.п.д. в условиях АМ1 составляет  $\sim 9\%$ . Чтобы к.п.д. превысил 10%, необходимо существенно увеличить напряжение в ре-

жиме холостого хода. В табл. 1 приведены также результаты расчета  $V_{xx}$  при комнатной температуре и показан вклад различных механизмов потерь для случаев рекомбинации на поверхности раздела и объемной рекомбинации. При условии, что параметры решетки и электронное сродство обоих материалов соответствуют друг другу, можно получить  $V_{xx} \approx 0,8$  В. Такое напряжение холостого хода в сочетании с более высоким значением тока короткого замыкания позволит получить к.п.д. солнечных элементов  $\sim 15\%$ . Если исключить эффект увеличения площади перехода и увеличить коэффициент заполнения, то можно еще повысить верхний предел к.п.д. элементов.

### Литература

1. Reynolds D.C., Leies G., Antes L.I., Marburger R.E., *Phys. Rev.*, **96**, 533 (1954).
2. Stanley A.G., *Applied Solid State Science*, vol. 5, Academic Press 1975, p. 251 – 366.
3. Conference Record Eleventh IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Scottsdale Arizona, May 1975, 75CH0948-OED.
4. International Workshop on Cadmium Sulfide Solar Cells and Other Abrupt Heterojunctions, University of Delaware, May 1975, NSF-RANN AER75-15858
5. Shiozawa L.R., Angustine F., Sullivan G.A., Smith J.M., III, Cook W.R., Jr., Clevite Final Report, ARL69-0155, Oct. 1969.
6. McCarthy S.J., Yee S.S., *Solid State Electronics*, **17**, 485 (1974).
7. Rothwarf A., [4], p. 9 – 50.
8. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W., *Proc. IRE*, **45**, 1228 (1957).
9. Te Velde T.S., *Solid State Electronics*, **16**, 1305 (1973).
10. Rothwarf A., NSF/RANN/AER72-03478/A04/PR75/4.
11. Milnes A.L., Feucht D.L., *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*, Academic Press, New York, N.Y., 1972.
12. Smith R.A., *Semiconductors*, Cambridge, 1968, p. 163.
13. Cuong N. Duc, Blair J., *J. Appl. Phys.*, **37**, 1660 (1966); Potter A.E., Schalla R.L., 6th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. Rec., 1967, p. 24; Potter A.E., Schalla R.L., Brandhorst H.W., Rosenblum L., 7th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. Rec., 1968, p. 62; Gill W.D., Bube R.H., *J. Appl. Phys.*, **41**, 3731 (1970); Lindquist P.F., Ph.D. Thesis, Stanford U., 1970.
14. Lindmayer J., Revesz A.G., *Solid State Electronics*, **14**, 647 (1971); Lindquist P.F., Bube R.H., *J. Appl. Phys.*, **43**, 2839 (1974); Singh V.P., [4], p. 560 – 574.
15. Palz W., Besson J., Duy T. Nguyen, Vedel J., 10th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. Rec., 1973, p. 69.

16. Fonash S.J., [3], p. 376; Yeh Y.M., Stirn R.J., [3], p. 391.
17. Rothwarf A., NSF/RANN/AER72-03478/A03/TR75/3; Rothwarf A., Burton L., Hadley H., Storti G.M., [3], p. 476; Rothwarf A., Böer K.W., *Progress in Solid-State Chemistry*, **10**, 71 (1975).
18. Mnlдер B.J., *Physica Status Solidi*, **13a**, 79 (1972).
19. NSF/RANN/AER72-03478 A04 University of Delaware; Shiozawa et al., [5]; Lindquist P.F., Bube R.H., *J. Electrochem. Soc.*, **119**, 936 (1972).
20. Aerschodt A.E.V., Reinhartz K.K., *Solar Cells*, Gordon and Breach, N.Y., 1971, p. 95; Singer J., Faeth P.A., *Appl. Phys. Lett.*, **11**, 130 (1971); Sreedhar A.K. et al., *Radiation Effects*, Gordon and Breach, London, 1970, p. 103; Buckley R.W., Woods J., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **7**, 663 (1974).

## Успехи, достигнутые в создании дешевых солнечных элементов на основе $CdS-Cu_2S$

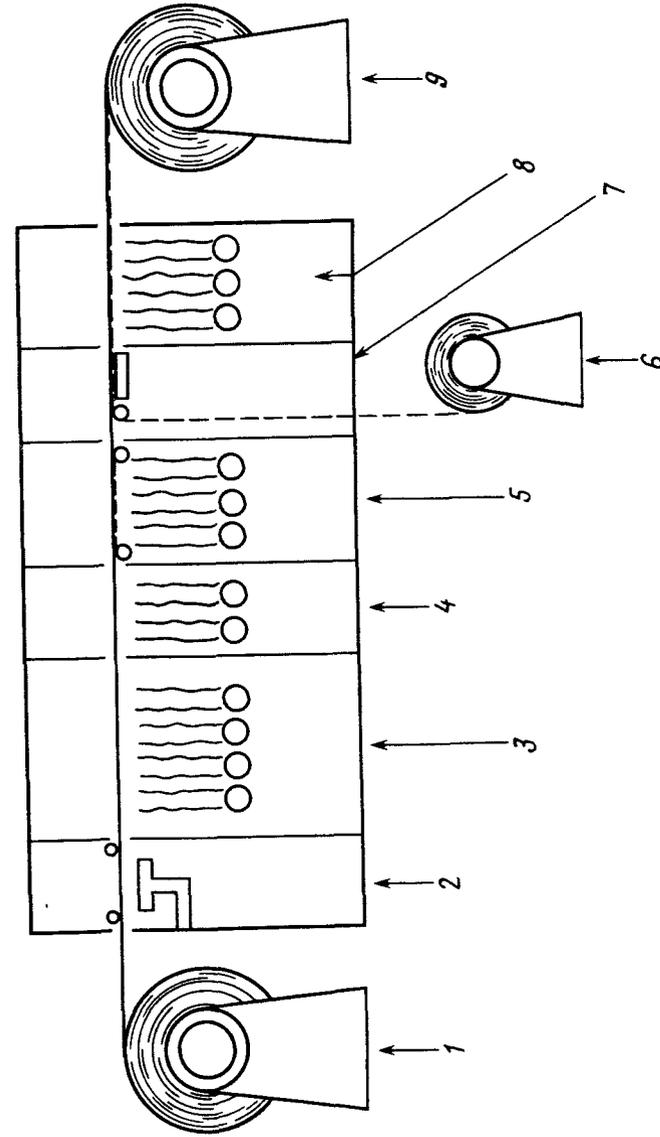
Д. Ф. Джордан<sup>1)</sup>

### НЕКОТОРЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С СОЗДАНИЕМ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время в США ведутся интенсивные исследования в области фотоэлектрического преобразования солнечной энергии. Так как основная часть жилых помещений в США уже подключена к энергетической сети, то наибольшим спросом и поэтому наибольшим вниманием пользуются крупные центральные станции. В этой области энергетики одной из наиболее важных проблем является стоимость киловатта генерируемой мощности и, следовательно, стоимость киловатт-часа энергии.

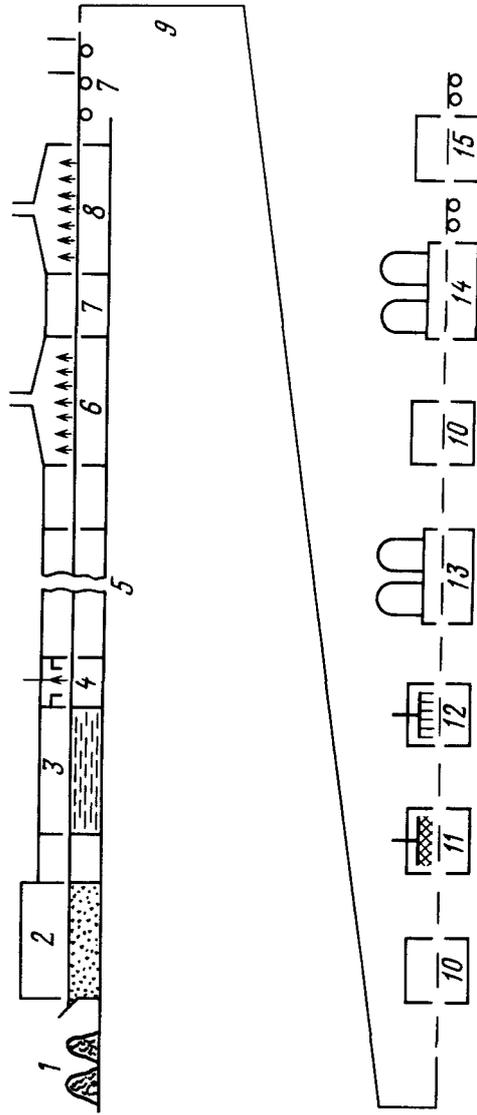
Хотя основные усилия направлены на исследование и разработку дешевых кремниевых солнечных элементов (кремний является хорошо изученным материалом), тем не менее наиболее перспективным путем снижения стоимости элементов является создание тонкопленочных элементов. Основные усилия в этой области направлены на разработку солнечных элементов на основе гетеросистемы  $CdS-Cu_2S$ , процесс изготовления которых может быть в значительной степени автоматизирован.

Существуют два автоматизированных способа производства тонкопленочных элементов. Один из них (фиг. 1), предложенный фирмой "Вестингауз" [1], основан на методе испарения в вакууме. Другой способ (фиг. 2), обсуждаемый в настоящей работе, включает химическое распыление [2]. Этот способ основан на хорошо известном поплавокном методе получения стекла, в который внесены ряд дополнительных процессов. Сначала на горячую поверхность стекла распыляется раствор солей, и в результате образуется окись олова (прозрачный проводник). После этого при более низкой температуре на поверхность слоя окиси олова распыляются растворы солей, обра-



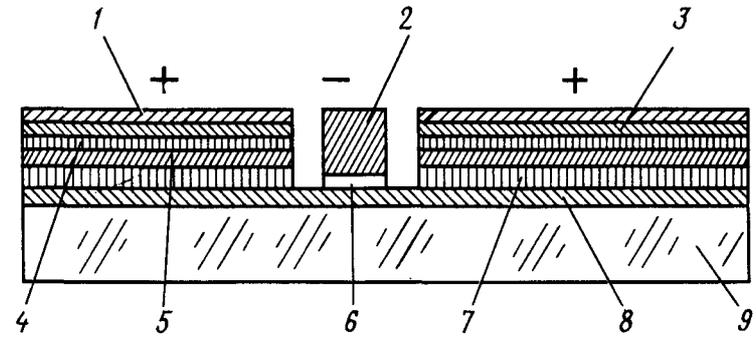
Фиг. 1. Схематическое изображение процесса изготовления солнечных элементов со структурой  $CdS-Cu_2S$ , полностью основанного на методе испарения в вакууме.  
1 — исходное сырье; 2 — очистка; 3 — испарение  $CdS$ ; 4 — испарение  $Cu_2S$ ; 5 — напыление контактной сетки; 6 — материал токоъемной шины; 7 — прикрепление токоъемной шины; 8 — напыление стеклянного покрытия; 9 — готовые солнечные элементы.

<sup>1)</sup> J.F. Jordan, D.H. Baldwin Co., Cincinnati, Ohio, USA.



Фиг. 2. Схематическое изображение процесса изготовления солнечных элементов со структурой CdS — Cu<sub>2</sub>S на основе поплавкового метода получения стекла и химического распыления.

1 — исходное сырье; 2 — ванна со стеклом; 3 — ванна 1 с жидким металлом и слоем стекла на поверхности; 4 — ванна 2 с жидким металлом для распыления SnO<sub>x</sub>; 5 — печь для отжига; 6 — ванна 3 с жидким металлом для распыления CdS; 7 — охлаждение; 8 — ванна 4 с жидким металлом для распыления Cu<sub>2</sub>S; 9 — резка; 10 — нанесение фоторезиста; 11 — травление; 12 — промывка; 13 — напыление подслоя Cu; 14 — напыление Cu; 15 — термообработка при 260°С.



Фиг. 3. Поперечное сечение тыльнобарьерного солнечного элемента.

1 — Pb — 2,0 мкм; 2 — токосъемный контакт Cu; 3 — Cu — 0,7 мкм; 4 — Cu<sub>2</sub>S  
5 — нелегированный CdS; 6 — подслой; 7 — сильно легированный CdS; 8 — отрицательный электрод SnO<sub>x</sub>; 9 — стекло.

зующие тонкие слои сульфида кадмия (толщиной 2 — 3 мкм). В процессе следующего, третьего этапа распыления, проводимого при еще более низкой температуре, образуется сульфид меди. На поверхность слоя сульфида меди наносится сплошной медный электрод. Металлический электрод покрывается оловом, слой которого обеспечивает дополнительную защиту элемента от воздействия кислорода и водяных паров. На фиг. 3 изображено поперечное сечение элемента со значительно увеличенными вертикальными размерами. При такой структуре элемента солнечное излучение достигает перехода после прохождения стеклянной подложки, слоя окиси олова и сульфида кадмия. Для уменьшения влияния сопротивления окисного слоя олова на его поверхности создается контактная сетка с частыми интервалами. Полученная структура в действительности имеет два слоя сульфида кадмия: один (первый) из них сильно легирован алюминием, другой слой, нанесенный на поверхность первого, относительно чистый. Образующаяся в результате пленка сульфида кадмия оказывается плотной и прочной, причем превращение части слоя сульфида кадмия в сульфид меди в процессе распыления, окунания или электролитического обмена ионов происходит без закорачивания слоя.

Данные стоимости самих элементов представлены в табл. 1. Они соответствуют уровню цен в конце 1975 г., который установился в США после инфляции, и относятся к производству солнечных эле-

Таблица 1

Общая стоимость (долл./м<sup>2</sup>) солнечных элементов на основе CdS — Cu<sub>2</sub>S, полученных методом химического распыления, на ноябрь 1975 г. (при минимальном годовом производстве — 3,72 · 10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>) без учета расходов на установку, подготовку площадки и оборудование для распределения энергии

Материал (в том числе стекло)	2,6770	
Дополнительные затраты труда	0,0256	
Амортизация и капиталовложения	0,3551	
Эксплуатационные расходы	0,1388	
Расход энергии	0,4304	
Убытки от аварии (исключая убытки, включенные в стоимость стекла)	0,0925	
<b>Итого</b>	<b>3,696</b>	
Интенсивность излучения 1000 Вт/м <sup>2</sup>		
К.п.д., %	5,85	10
Стоимость 1 Вт пиковой мощности, долл.	0,0636	0,0372

ментов в больших масштабах (не менее 3,72 · 10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>). Как видно из табл. 1, стоимость 1 Вт мощности зависит от к.п.д. элементов. Однако такого объема производства не достаточно для создания центральных станций; например, для того чтобы выработать 20% энергии от того количества электроэнергии, которое, как предполагается, будет производиться в США в 2000 г., потребовалась бы продукция восьми таких предприятий стоимостью 137 млн. долл. каждое при условии, что к.п.д. солнечной батареи равен 10%. Проектируемая в настоящее время небольшая опытная линия, которая может быть построена без больших затрат, предназначена для выпуска солнечных элементов (с к.п.д., равным 5%), которые вырабатывают значительно более дешевую энергию по сравнению с кремниевыми элементами.

Строгие расчеты стоимости 1 кВт · ч энергии были бы очень сложными и трудоемкими. Однако следует провести приближенные расчеты с использованием данных работы [3] с учетом поправок, связанных с недавней инфляцией в США. При рассмотрении этого вопроса предполагается, что энергия распределяется в существующей электрической сети по принятой сейчас схеме. Стоимость аккумуляторов, использование которых в конечном итоге будет необходимым, не учи-

Таблица 2

Оценочная стоимость 1 кВт электрической мощности, вырабатываемой солнечной батареей при интенсивности излучения, характерной для юго-западных районов США (шт. Феникс, Аризона)<sup>1)</sup>

К.п.д., %	5,85	10
Средняя плотность падающей энергии, кВт · ч/м <sup>2</sup>	6,025	6,025
Средняя плотность генерируемой энергии, кВт · ч/м <sup>2</sup>	0,317	0,542
Среднесуточная плотность генерируемой энергии, 10 <sup>5</sup> кВт · ч/м <sup>2</sup>	3,177	5,42
Среднегодовая плотность генерируемой энергии, 10 <sup>8</sup> кВт · ч/м <sup>2</sup>	1,147	1,98
Максимальная выходная мощность батареи, 10 <sup>4</sup> кВт	4,71	8,06
Стоимость энергетической установки, долл.:		
Солнечные элементы	3 719 000	3 719 000
Инвертеры (из расчета 42,00 долл./кВт)	1 979 000	3 386 000
Трансформаторы и другое оборудование (из расчета 16,50 долл./кВт)	777 000	1 330 000
Площадка для оборудования (данные на 1975 г.)	10 414 000	10 414 000
Помещения	170 000	170 000
Земельный участок	247 000	247 000
<b>Итого</b>	<b>17 306 000</b>	<b>19 266 000</b>
Стоимость 1 кВт пиковой мощности	367,000	239,00

<sup>1)</sup> Данные по стоимости получены путем подстановки стоимости солнечных элементов на основе CdS в расчеты Спаковского и Шуэ (NASA, 1972 г.). При расчете выходной мощности предполагалось, что коэффициент заполнения панели равен 90%.

тывалась. Технология изготовления тепловых аккумуляторов, принцип работы которых основан на действии силы тяжести (используются резервуары, расположенные на равной высоте, и гидрозлектрический привод), уже существует и применяется в США в ограниченном масштабе для покрытия пиковых нагрузок.

Результаты расчетов, представленные в табл. 2, основаны на данных интенсивности солнечного излучения в юго-западных районах США, которые являются полусухими и имеют большие участки, удобные для установки солнечных батарей. В графе "Площадка для оборудования" указана стоимость простой горизонтальной конструк-

ции солнечной батареи (описанной Спаковским и Шуэ), немного приподнятой над поверхностью земли с помощью приспособления, крепящегося на теневой стороне, что необходимо для отвода воды.

Полученные оценочные значения стоимости 1 кВт·ч энергии приведены в табл. 3. Был проведен расчет стоимости конструкции, предназначенной для поддержки батареи солнечных элементов в таком положении, чтобы ее можно было вручную перемещать вокруг оси при изменении высоты Солнца. К сожалению, в этом случае стоимость 1 кВт·ч энергии повышается на 32% при к.п.д. 5,85% и на 26% при к.п.д. 10%.

Приведенные значения стоимости минимальны и при отсутствии точных данных о конструкции в лучшем случае неопределенны. Однако результаты показывают, что по мере роста стоимости топлива широкое применение фотоэлектрического метода преобразования энергии становится все более реальным, причем важным фактором является к.п.д. элементов.

Таблица 3

Оценочная стоимость энергии (долл./кВт·ч) на ноябрь 1975 г., вырабатываемой фотоэлектрической системой на юго-западе США (предполагается, что энергия поступает в существующую энергетическую сеть, т.е. стоимость аккумуляторов и прибыль не учитываются).  
Срок службы солнечных элементов 20 лет

К.п.д., %	5,85	10
Стоимость элементов (амортизация капиталовложения) <sup>1)</sup>	0,00302	0,00175
Оборудование для распределения энергии (амортизация и капиталовложения) <sup>2)</sup>	0,00192	0,00191
Средства обслуживания		
Площадка для оборудования (амортизация и капиталовложения) <sup>2)</sup>	0,00725	0,00420
Помещения (амортизация и капиталовложения) <sup>2)</sup>	0,00012	0,00007
Земельный участок (капиталовложения)	0,00017	0,00010
Эксплуатационные расходы (из расчета 2,60 долл./кВт)	0,00104	0,00104
Стоимость 1 кВт·ч энергии	0,01352	0,00907

<sup>1)</sup> Амортизация в течение 20 лет и капиталовложения из расчета 7% в год.

<sup>2)</sup> Амортизация в течение тридцати лет и капиталовложения из расчета 7% в год.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Параметры современных тонкопленочных элементов приведены в табл. 4. Максимальный к.п.д. составляет 5,2%. Удельное сопротивление сульфида кадмия равно 30 Ом·см, что на порядок выше значения, полученного расчетным путем в предположении, что подвижность носителей составляет 50 см<sup>2</sup>/(В·с). Высокое удельное сопротивление является одним из недостатков, которые мы пытаемся устранить.

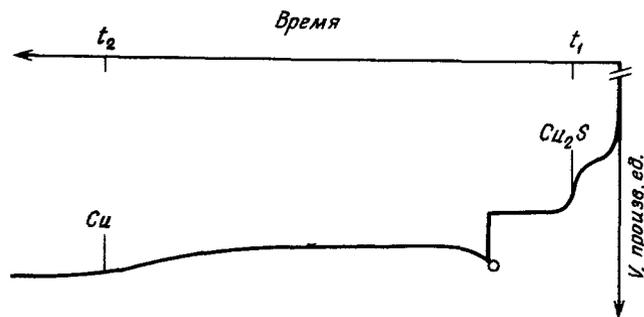
Толщина слоя сульфида меди измерялась тремя методами: по изменению веса всего образца после удаления слоя в растворе KCN, по количеству поглощенных атомов и по данным электрических измерений. На фиг. 4 представлена типичная зависимость, которая наблюдается при определении состава сульфида меди методом Веделя и Кастеля [4]. Данные, полученные на основе этой зависимости, могут быть использованы для определения толщины слоя Cu<sub>x</sub>S путем нахождения суммарного заряда, израсходованного во время реакции, и определения, таким образом, общего количества удаленной серы. Все три метода (в предположении однородности состава и постоянства плотности во всем объеме слоя) дают одинаковое значение толщины, равное 0,27 мкм. В действительности, как показано на фиг. 5\*<sup>1)</sup>, распределение меди не является однородным, поэтому

Таблица 4

Параметры современных солнечных элементов на основе CdS — Cu<sub>2</sub>S

Максимальный к.п.д. при освещении солнечным излучением	5,2%
Концентрация носителей в CdS (из вольт-емкостных измерений)	$4,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Расчетное значение удельного сопротивления $\rho$ в предположении, что $\mu = 50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	2,7 Ом·см
Экспериментальное значение (данные компании "Болдвина")	20 — 40 Ом·см
Экспериментальное значение (данные лаборатории "Сандиа")	30 Ом·см
Толщина слоя Cu <sub>x</sub> S	0,27 мкм
Состав Cu <sub>x</sub> S (измерения по методу Веделя и Кастеля):	
Среднее значение $x$ , получаемое в настоящее время	1,98
Среднее значение $x$ , полученное ранее	1,95

<sup>1)</sup> Здесь и далее звездочкой отмечены данные, полученные лабораториями "Сандиа" Управления энергетических исследований и разработок США.

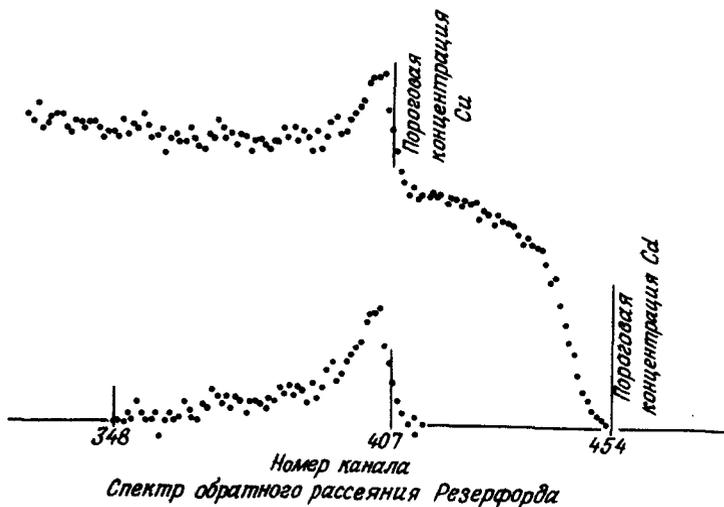


Электрохимический анализ состава слоя Cu<sub>x</sub>S

$$(x = 2 - \frac{2Q_1}{Q_1 + Q_2})$$

o - момент увеличения тока

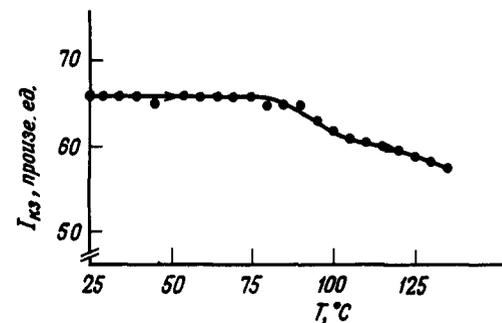
Фиг. 4. Применение аналитического метода Веделя и Кастеля для определения толщины слоя Cu<sub>2</sub>S.



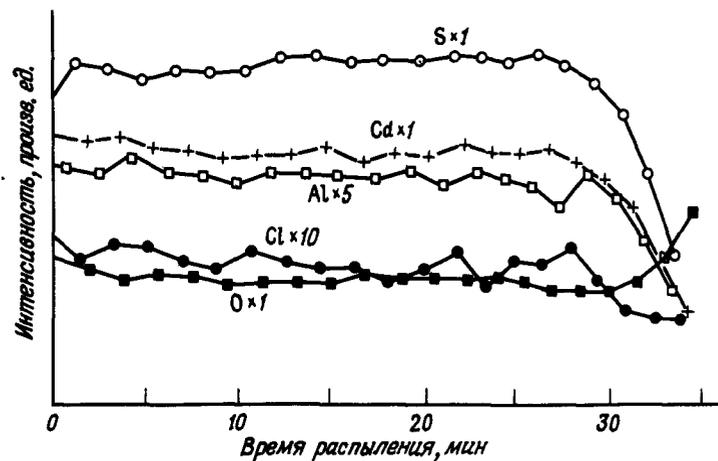
Фиг. 5. Распределение меди в слое сульфида меди.

глубина проникновения Cu<sub>x</sub>S в слой CdS выше указанной ранее.

Слой Cu<sub>x</sub>S имеют состав, близкий к стехиометрическому с  $x = 1,98$  в отличие от ранее полученного значения  $x = 1,95$ . Тот факт, что  $x < 1,995$ , подтверждается характером представленной на фиг. 6 температурной зависимости тока короткого замыкания. Из фиг. 6 видно, что ток короткого замыкания начинает уменьшаться при 80°C. Предыдущими исследователями [5] было показано, что при наличии стехиометрического состава уменьшение тока короткого замыкания не начинается до тех пор, пока температура не превысит 90°C. Оказывается, что в полученных прочных и плотных пленках CdS намного сложнее создать слой стехиометрического состава Cu<sub>2</sub>S, чем в пленках, осажденных методом испарения.



Фиг. 6. Зависимость тока короткого замыкания от температуры.



Фиг. 7. Распределение основных примесей по глубине легированного слоя CdS, полученное методом Оже-спектроскопии.

На фиг. 7 представлены данные, полученные при исследовании состава первого, сильнолегированного слоя CdS методом Оже-спектроскопии, которые свидетельствуют о равномерности распределения в пленке всех компонентов. Присутствие хлора нежелательно, поэтому необходимо проведение дальнейших исследований для разработки способа его устранения.

В табл. 5 приведены данные по содержанию примесей в исходных химикатах. Содержание примесей в пленках, полученных распылением растворов, и изменение их концентрации в процессе распыления представлены в табл. 6. Возможно, что некоторые из перечисленных в этой таблице примесей, которые входят в состав подложки, внедряются в исследуемый образец в процессе отделения очень тонких слоев сульфида кадмия от стекла. Вероятно, значительное количество олова (как видно из табл. 6) также осаждается на образец при отделении пленки сульфида кадмия от стекла, так как при проведении процесса распыления стекло находится на поверхности расплавленного олова. Наличие других примесей, таких, как свинец, объяснить сложнее; например, они могут попадать в пленку из воды и воздуха в процессе распыления. Что касается свинца, то такое предположение справедливо, так как процесс проводится на небольшом расстоянии от тигля с расплавленным свинцом. Необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на снижение концентрации примесей.

На фиг. 8 приведены прямая и обратная темновые вольтамперные характеристики типичного элемента. Эти характеристики не имеют каких-либо специфических особенностей.

Световые вольт-амперные характеристики типичного элемента представлены на фиг. 9. Следует заметить, что обратный ток (кривая, расположенная в третьем квадранте) резко возрастает в области отрицательных напряжений, близких к  $-1$  В. Установлено, что этот эффект определяется спектральными свойствами структуры.

На фиг. 10 представлена зависимость обратного тока от длины волны падающего излучения. Обратный ток имеет резкий максимум при длине волны, соответствующей ширине запрещенной зоны сульфида кадмия. В дальнейшем этот эффект будет изучаться при низких температурах. Для сравнения приведена зависимость тока короткого замыкания от длины волны.

На фиг. 11 изображены спектральные характеристики типичного элемента. Изучение зависимости тока короткого замыкания от длины

Таблица 5

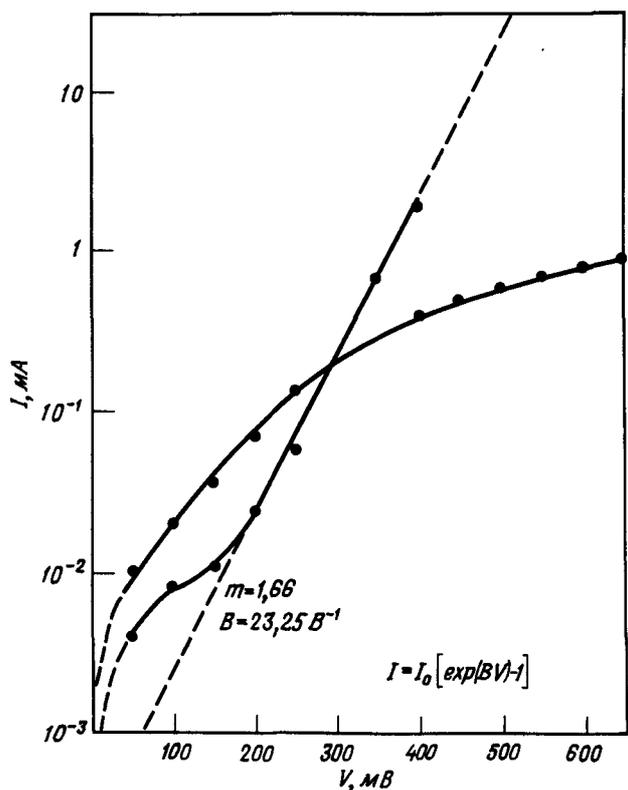
Данные лабораторий "Сандиа" о содержании примесей (млн<sup>-1</sup>) в исходных химикатах, применяемых для создания легированного слоя CdS, полученные методом Оже-спектроскопии (точность измерений составляет  $\times/3$ )

Исходный химикат	Тиомочевина	CdCl <sub>2</sub>	AlCl <sub>3</sub>
Fe	Не обнаружено	5	5
Mg	5	3	6
Si	12	Не обнаружено	2
Cu	Не обнаружено	0,5	0,5
Zn	" "	60	Не обнаружено
Ni	" "	10	" "
Al	" "	2	" "
Ca	12	16	40
Na	5	Не обнаружено	60
Li	1	" "	Не обнаружено
K	12	" "	15
Sr	8	" "	Не обнаружено

Таблица 6

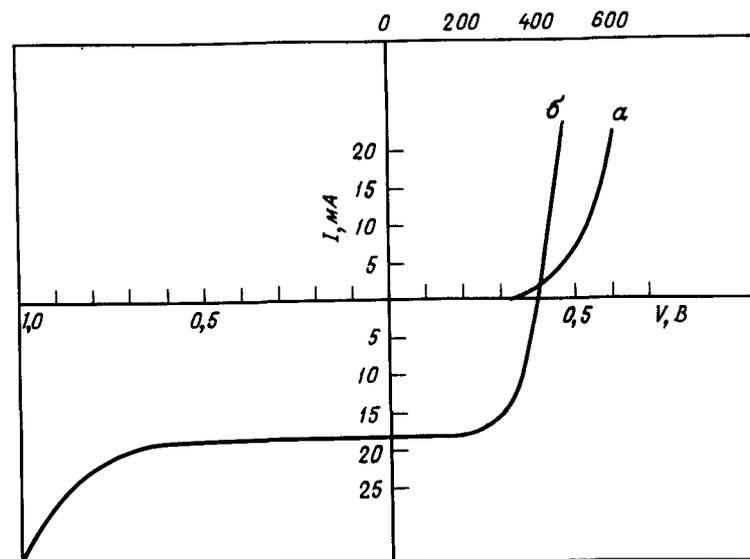
Данные лаборатории "Сандиа" о содержании примесей (млн<sup>-1</sup>) в полученных химическим распылением легированном и нелегированном слоях CdS, измеренные методом Оже-спектроскопии (точность измерений составляет  $\times/3$ )

Примесь	Легированный	Нелегированный
Na	320	630
K	130	60
Sr	5	3
Ca	33	25
Al	13 000 (?)	50
Ti	80	Не обнаружено
Sn	5 200	1 600
Ag	2	Не обнаружено
Cu	33	16
Fe	520	630
Mg	160	10
Pb	320	Не обнаружено
Mn	8	4
Si	520	160

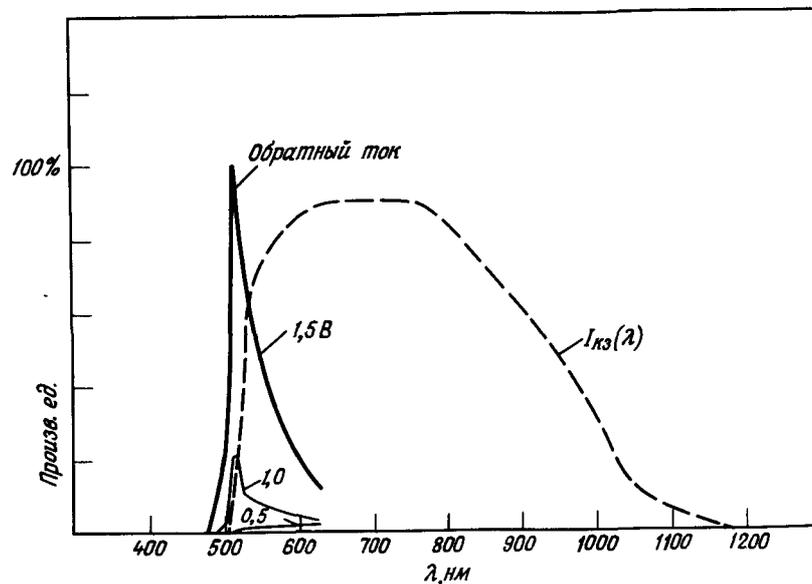


Фиг. 8. Прямая и обратная темновые вольт-амперные характеристики тличного элемента при температуре 27°C.

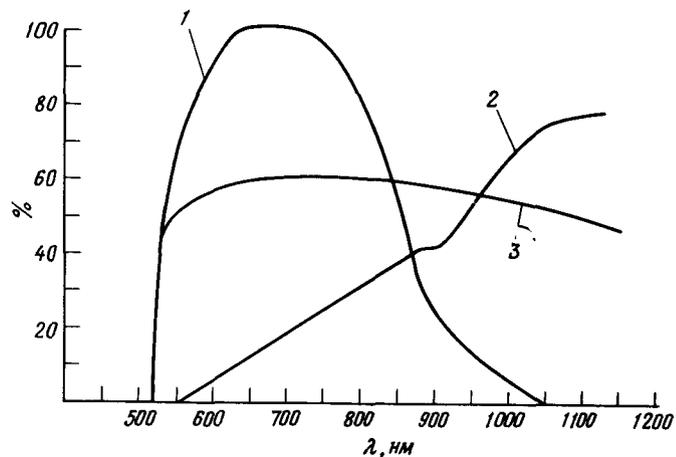
волны показывает, что элементы имеют низкую чувствительность в длинноволновой области. Полагают, что чувствительность может быть повышена путем создания более толстых пленок  $\text{Cu}_x\text{S}$  стехиометрического состава. Коэффициент пропускания пленок  $\text{Cu}_x\text{S}$ , как показано на фиг. 11, имеет наибольшие значения в длинноволновой области. В то время как коэффициент пропускания слоя окиси олова на стекле при длине волны 550 нм равен 89% (на фиг. 11 не показано), максимальное значение коэффициента пропускания аналогичной структуры с пленкой сульфида кадмия составляет только 60%, что свидетельствует о значительном рассеянии и поглощении света в сульфиде кадмия. Такой уровень потерь не является неожиданным, если



Фиг. 9. Вольт-амперные характеристики элемента при отсутствии освещения (в) и при интенсивности падающего излучения, равной 97,8 мВт/см<sup>2</sup> (б).



Фиг. 10. Зависимость обратного тока от длины волны падающего излучения.



Фиг. 11. Спектральные характеристики солнечного элемента.

1 — ток короткого замыкания; 2 — коэффициент пропускания пленки  $Cu_xS$ ;  
3 — коэффициент пропускания структуры  $CdS - SnO_x$  — стекло.

принять во внимание наличие большого количества примесей, представленных в табл. 6.

При наличии перечисленных отрицательных факторов получение солнечных элементов с к.п.д., составляющим в среднем 5%, (согласно измерениям при солнечном освещении), является высоким результатом, и при устранении всех этих факторов в конечном итоге могут быть получены к.п.д.  $\sim 10\%$ .

### ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ

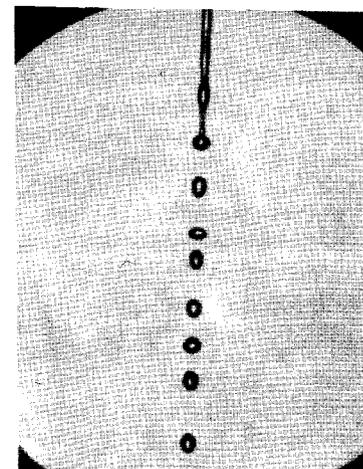
Факторы, влияющие на процесс роста пленки на стекле при химическом распылении, приведены в табл. 7. Те факторы, которые подлежат контролю, перечислены в пунктах 4 — 8 и 10 представленного списка. Свойства капли определяются ее диаметром (массой), поверхностным натяжением и скоростью ее движения. Поверхностное натяжение зависит от свойств используемого раствора. Капля с относительно небольшими размерами будет отскакивать от поверхности и перемещаться вдоль нее, постепенно уменьшаясь в размере, до тех пор пока окончательно не испарится. У капли с относительно большими размерами поверхностное натяжение недостаточно велико для того, чтобы она могла противостоять действию столкновений. Капля не отскаки-

Таблица 7

Факторы, влияющие на процесс роста пленок на стекле при химическом распылении

1. Молярность раствора
2. Вязкость раствора
3. Поверхностное натяжение раствора
4. Диаметр капель раствора
5. Скорость капель
6. Общий поток жидкости, приходящийся на единицу площади стеклянной подложки
7. Температура поверхности стекла
8. Характеристики поверхности стекла (структура слоя  $SnO_x$ )
9. Тепловой поток через стеклянную подложку
10. Поток откачиваемого газа над поверхностью стекла

вает от поверхности, и если она очень велика, то из нее образуется небольшая группа не соединенных между собой кристаллов разной формы, что приводит к образованию разрывов в пленке. Очень мелкие капли имеют тенденцию к испарению до соприкосновения с поверхностью, и растворенное вещество либо уносится с потоком откачиваемого газа, либо падает на подложку и взаимодействует с ней нежелательным образом. Поэтому для улучшения роста пленки необходимо, чтобы капли были однородными по размеру и имели одинаковую скорость.



Фиг. 12. Мгновенная фотография процесса получения однородных капель.

Поскольку сульфид меди образуется из верхнего слоя пленки сульфида кадмия, следует обратить внимание на то, что качество этой пленки будет в свою очередь определять свойства сульфида меди.

Некоторое время мы проводили эксперименты по получению однородных капель, и на фиг. 12 представлена мгновенная фотография таких капель, которые образуются при распространении возмущения вдоль цилиндрического потока жидкости. Полученные таким образом капли приобретают сферическую форму после нескольких колебаний, возникающих при их образовании. Период колебаний зависит от их массы и поверхностного натяжения. Для того чтобы капли не могли догнать своих предшественниц и образовать крупные капли, необходимо создать поток газа, ускоряющего их движение и рассеивающего их над нужной частью поверхности, однако чтобы облегчить съемку при получении фотографии фиг. 12, ускоряющий поток газа не использовался.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечные элементы на основе тонких пленок могут стать экономичным источником энергии в районах с высокой годовой интенсивностью солнечного излучения при условии повышения их к.п.д.; что представляется реально осуществимым. Тем не менее необходимо применение системы аккумуляторов приемлемой стоимости.

### Литература

1. Brody T.P., Shirland F.A., Brody T.P., Prognosis for CdS Solar Cells NSF Solar Energy Conversion Symposium, Tucson, Arizona, May 20, 1974.
2. Jordan J.F., Low Cost CdS - Cu<sub>2</sub>S Solar Cells by the Chemical Spray Method, 11th IEEE Photovoltaic Conference, Scottsdale, Arizona, May 6 - 8, 1975, 75-CH0948-OED.
3. Spakowski, Shure, NASA Technical Memorandum NASA TMX-2520, March 1972.
4. Vedel J., Castel E., Electrochemical Determination of the Copper Sulfide Composition: Application to CdS - Cu<sub>2</sub>S Solar Cells, International Congress "The Sun in the Service of Mankind", Palais de l'U.N.E.S.C.O., Paris, July 2 - 6, 1973.
5. Palz W. et al., Review of Solar Cell Activities IEEE Photovoltaic Special Conference, Nov. 1973, Palo Alto, Ca. IEEE catalog No. 73CH0801-ED.

## Технология изготовления солнечных элементов большой площади на основе Cu<sub>x</sub>S - CdS

Г.-В. Шок, Г. Билгер, Г.Г. Хевиг, Ф. Пфистерер, В.Г. Блосс<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

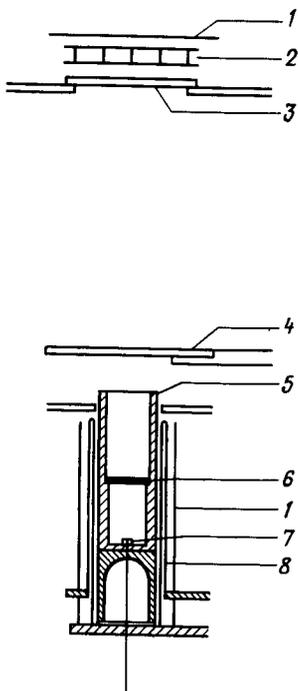
В настоящей работе тонкопленочные солнечные элементы на основе соединений Cu<sub>x</sub>S - CdS изготавливались по одной из существующих технологий, при этом в качестве исходных использовались дешевые материалы, пригодные для создания наземных солнечных элементов.

### ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Порошок CdS испарялся из танталового или графитового источника. Процесс испарения с использованием танталового источника, снабженного защитным экраном из кварцевой ваты, обеспечивал высокое качество пленок, но не всегда давал воспроизводимые результаты. Поэтому была разработана конструкция графитового источника. Поперечное сечение устройства для испарения показано на фиг. 1. Графитовый испаритель, который нагревается теплом, излучаемым танталовым цилиндром, не имеет защитного экрана из кварцевой ваты, так как в этом случае частицы ваты могут попасть на подложку. Разбрызгиванию порошка CdS препятствует укрепленная в верхней части испарителя кварцевая фритта, имеющая поры размером 100 мкм. Применяются порошки, изготовленные различными фирмами, при этом воспроизводимые по свойствам высококачественные слои CdS могут быть получены даже при использовании порошков с очень мелкой зернистостью. Скорость роста слоя CdS составляет ~1 мкм/мин.

Для подогрева подложки применяется графитовый секционный нагреватель, который обеспечивает равномерный нагрев подложек любого типа.

<sup>1)</sup> H.-W. Schock, G. Bilger, G.H. Hewig, F. Pfisterer, W.H. Bloss, Institut für Physikalische Elektronik Universität Stuttgart, FRG.



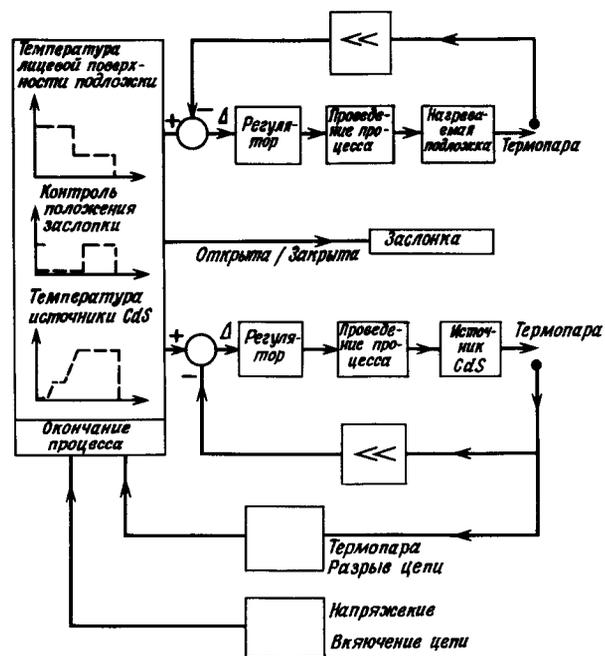
Фиг. 1. Оборудование для проведения процесса испарения.

1 — тепловая защита; 2 — графитовый нагреватель; 3 — стеклянная подложка; 4 — заслонка; 5 — графитовый источник; 6 — кварцевая фритта; 7 — термопары; 8 — танталовый нагреватель.

В качестве подложки применялись молибден и стекло различных сортов с близкими значениями коэффициента теплового расширения. Оказалось, что для этих целей может быть использовано даже дешевое оконное стекло.

Тыльным контактом элемента служил нанесенный испарением слой серебра.

Для получения при испарении воспроизводимых результатов необходимо точно контролировать температуру источника и подложки. Поэтому было разработано специальное устройство контроля с программным управлением. Устройство, блок-схема которого представлена на фиг. 2, позволяет фиксировать изменения течения процессов, такие, как кратковременные отклонения температуры подложки и источника, и контролировать положение заслонки.

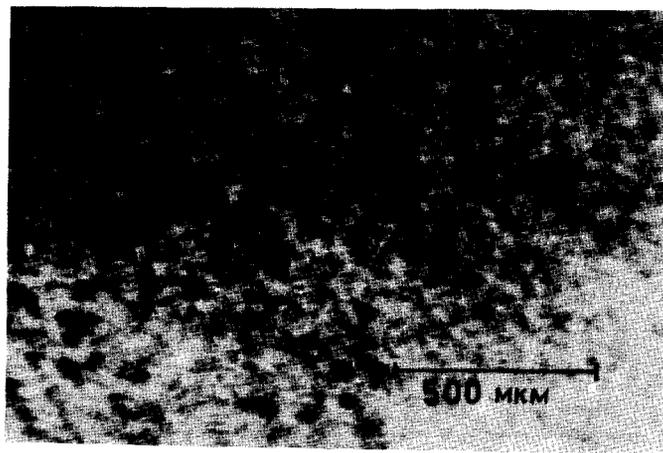


Фиг. 2. Блок-схема устройства контроля за ходом процесса испарения.

После испарения слой  $CdS$  изучались с помощью оптического микроскопа. Кроме того, однородность слоя  $CdS$  определялась по интенсивности катодолуминесценции, возбуждаемой сканирующим электронным лучом [1]. На фиг. 3 представлена типичная картина катодолуминесценции неоднородного слоя  $CdS$ . Темные пятна являются, вероятно, следствием разбрызгивания порошка  $CdS$ .

Слой  $CdS$ , пыленные в вакууме, подвергались травлению в разбавленном растворе  $HCl$ , в результате которого улучшались их поверхностные свойства и увеличивался коэффициент поглощения света солнечных элементов. Для получения слоя  $Cu_xS$  использовалась технология, применяемая фирмой "Клевайт" [2]. Кислотность раствора определялась путем измерения величины рН.

Для получения солнечных элементов с оптимальными параметрами проводилась кратковременная термообработка.



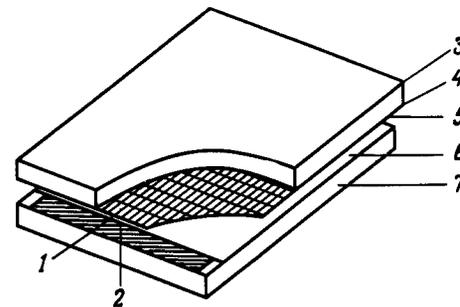
Фиг. 3. Катодолуминесценция слоя CdS, полученного испарением; энергия электронов 4 кэВ.

К.п.д. элементов может быть увеличен путем нанесения в вакууме поверхностного слоя меди толщиной  $\sim 100 \text{ \AA}$  и проведения дополнительной термообработки на воздухе в течение 15 мин. Увеличение к.п.д. может составлять 50 – 100% [3, 4].

Лицевым контактом служила позолоченная медная сетка. Контактная структура создавалась на основе медной фольги методом шелкографии. Максимальная ширина контактных полос равнялась 80 мкм, что позволяло создавать сетку, обладающую высокой прозрачностью при большой плотности контактных полос.

На поверхности элементов при помощи высокотемпературного клеящего состава укреплялись защитные покрытия. Для защиты лицевой поверхности использовалась фольга из майлара или стекло. Однако только с помощью листов стекла удалось полностью защитить элементы от воздействия кислорода и водяных паров. На фиг. 4 показана структура солнечного элемента с защитным покрытием.

Описанным способом могут быть изготовлены два типа солнечных элементов: мелкие элементы площадью  $4 \text{ см}^2$ , которые используются для изучения технологических параметров, и крупные элементы площадью  $40 \text{ см}^2$ .



Фиг. 4. Солнечный элемент со слоем CdS на стеклянной подложке с защитным покрытием из стекла.

1 – позолоченная медная сетка; 2 – серебряный тыльный контакт; 3 – защитное стекло; 4 – лицевой контакт; 5 – высокотемпературный клеящий состав; 6 – слой  $\text{Cu}_x\text{S} - \text{CdS}$ ; 7 – стеклянная подложка.

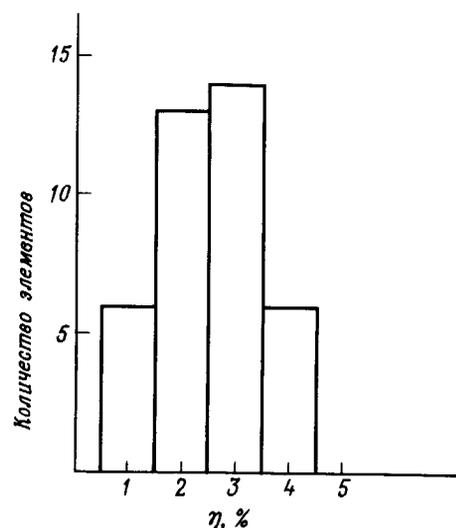
С использованием опыта по изготовлению мелких элементов при тех же параметрах технологического процесса было изготовлено несколько групп солнечных элементов площадью  $40 \text{ см}^2$ . Несмотря на то что при проведении каждого цикла испарения слой CdS создавался только для одного элемента, благодаря точному контролю параметров процесса удалось получить высокую производительность и достаточно хорошую воспроизводимость.

Статистические данные о к.п.д. полученных солнечных элементов представлены на фиг. 5. Большая часть элементов имела к.п.д. в пределах 2 – 3%. Максимальное значение к.п.д. составляло 4,5%. Только три элемента имели к.п.д. менее 1%.

Измерения параметров солнечных элементов проводились с помощью метода (flying spot tube), о котором сообщалось на конгрессе "Солнце на службе человечества", состоявшемся в Париже в 1973 г., Результаты измерений показали наличие резких локальных изменений к.п.д. Однородные элементы имели бы вдвое больший к.п.д. по сравнению с первыми элементами большой площади, о которых здесь сообщается [5].

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОКУНАНИЯ

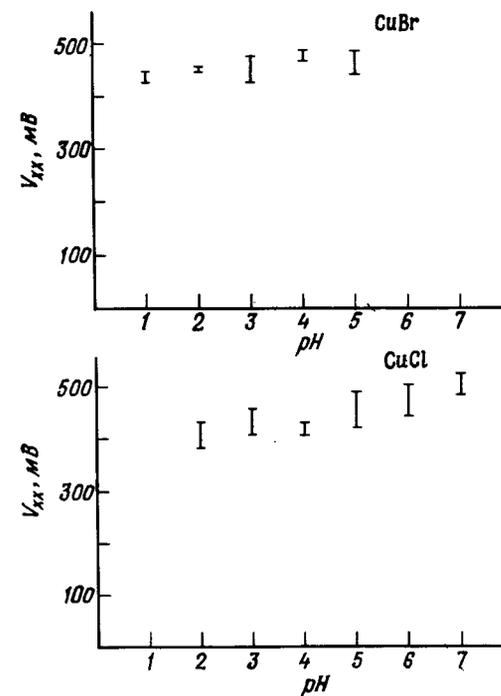
Изучение влияния кислотности раствора, применяемого в процессе окунания, на параметры солнечных элементов проводилось



Фиг. 5. Статистические данные по распределению к.п.д. солнечных элементов площадью 40 см<sup>2</sup>.

с использованием элементов на стеклянных подложках площадью 4 см<sup>2</sup>. Растворы с различными значениями pH готовились путем добавления определенного количества кислоты к исходному нейтральному раствору, насыщенному медью. Были приготовлены две группы растворов: первая – на основе CuCl и HCl, вторая – на основе CuBr и HBr. Как видно из фиг. 6, напряжение в режиме холостого хода элементов зависит от кислотности раствора. Это напряжение увеличивается с ростом pH раствора, содержащего ионы Cu<sup>+</sup>.

Существуют две возможные причины, объясняющих характер поведения солнечных элементов. Одна из них может быть связана с тем, что в растворе существует недостаток ионов Cu<sup>++</sup>, вызванный смещением равновесия между концентрациями ионов Cu<sup>+</sup> и Cu<sup>++</sup> в сторону увеличения концентрации Cu<sup>+</sup>, что особенно характерно для раствора CuCl – HCl, в то время как ионы Cu<sup>+</sup> в растворе CuBr – HBr более стабильны. Вследствие этого параметры слоя Cu<sub>x</sub>S улучшаются при высоких значениях pH. Это предположение можно подтвердить с по-

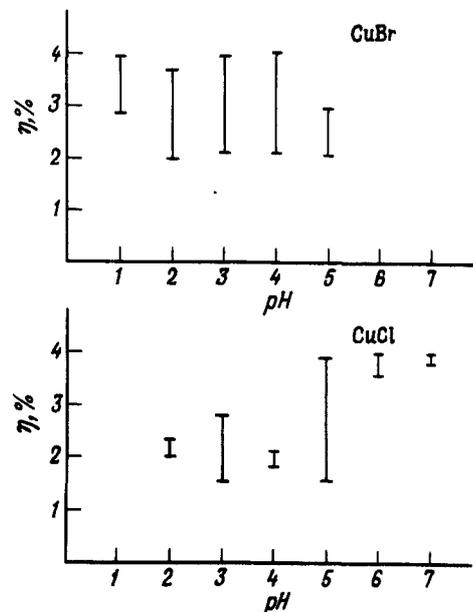


Фиг. 6. Типичная зависимость напряжения холостого хода от pH.

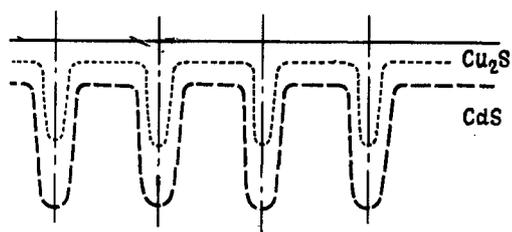
мощью диаграммы, на которой показаны стандартные зависимости к.п.д. от значений pH для обоих растворов (фиг. 7).

Другая причина связана с особенностями структуры солнечных элементов на основе Cu<sub>x</sub>S – CdS [6]. На фиг. 8 схематически изображено поперечное сечение элемента. Пунктирными и штриховыми линиями показана форма перехода при использовании нейтрального и кислотного растворов соответственно. Толщина слоя Cu<sub>x</sub>S и глубина его проникновения вдоль границ зерен уменьшаются с ростом значения pH.

Измерения спектральной чувствительности свидетельствуют о том, что при использовании нейтрального раствора толщина слоя Cu<sub>x</sub>S уменьшается [6]. На фиг. 9 показано изменение относительной квантовой эффективности при энергии фотонов, меньшей 2,4 эВ. Солнечные элементы, которые окунались в раствор с меньшей кислотностью,



Фиг. 7. Типичная зависимость к.п.д. от pH.

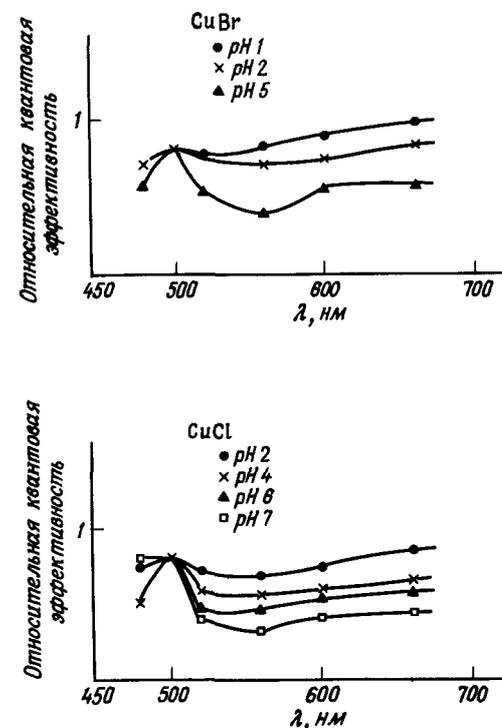


Фиг. 8. Схематическое изображение поперечного сечения солнечного элемента на основе  $Cu_xS - CdS$ .

--- нейтральный раствор, — — — кислотный раствор.

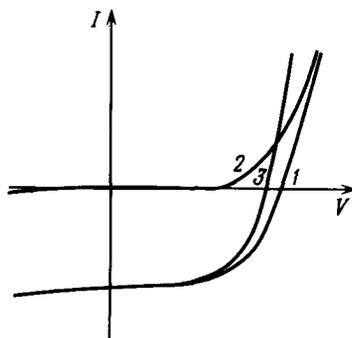
в рассматриваемом спектральном интервале имеют более высокую квантовую эффективность, так как в этом случае большее количество падающего света проходит в  $CdS$ , не поглощаясь в слое  $Cu_xS$ .

Принимая во внимание результаты измерений и учитывая особенности структуры элемента (фиг. 8), можно дать следующее объяснение



Фиг. 9. Зависимость относительной квантовой эффективности от длины волны для солнечных элементов на основе  $Cu_xS - CdS$ , полученных методом окунания, при различных значениях pH раствора.

наблюдаемому уменьшению напряжения при использовании кислотного раствора. Неосвещенные части перехода, расположенные в глубине полупроводника, являются шунтирующими диодами по отношению к освещенным областям элемента. Таким образом, из-за наличия неосвещенных или слабо освещенных диодов возникают циркулирующие токи [7, 8]. Можно показать, что если половина общей площади перехода освещена, а другая половина остается в темноте, то уменьшение напряжения в режиме холостого хода определяется суммированием темновой и световой характеристик элемента (фиг. 10). Предполагается, что кривая 1 является характеристикой равномерно освещенного перехода. Темновая характеристика элемента представлена кривой 2. Результатом сложения этих двух кривых является кривая 3.



Фиг. 10. Уменьшение напряжения холостого хода и эффект пересечения характеристик, вызванные внутренними токами.

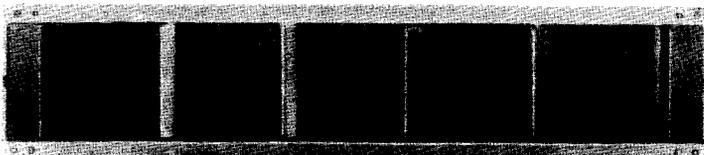
1 — темновая характеристика; 2 — равномерно освещенный переход; 3 — сумма характеристик 1 и 2.

Таким способом можно объяснить не только уменьшение напряжения в режиме холостого хода, но и наличие эффекта пересечения темновой и световой вольт-амперных характеристик. Однако следует заметить, что, по-видимому, такой механизм не является единственным механизмом, обуславливающим пересечение характеристик [9, 10].

Следовательно, для объяснения поведения солнечных элементов на основе  $Cu_xS - CdS$  недостаточно учитывать только свойства гетероперехода, а необходимо также принимать во внимание структурные особенности элементов с горизонтальным и вертикальным расположением перехода.

### МОДУЛИ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе солнечных элементов, изготовленных данным способом, были смонтированы модули двух конструкций. Одна из конструкций представляет собой пять элементов площадью  $40 \text{ см}^2$  (фиг. 11). При интенсивности излучения  $100 \text{ мВт/см}^2$  выходная мощность модуля составляет  $\sim 0,5 \text{ Вт}$ , а напряжение в режиме холостого хода равно  $\sim 2,3 \text{ В}$ .



Фиг. 11. Модуль солнечных элементов на основе  $Cu_xS - CdS$  мощностью  $0,5 \text{ Вт}$ .

Другая конструкция модуля состоит из 12 элементов площадью  $4 \text{ см}^2$ . Ряды, состоящие из четырех элементов, соединяются либо последовательно, либо параллельно, при этом напряжение в режиме холостого хода меняется в пределах  $2 - 6 \text{ В}$ , а ток короткого замыкания — в пределах  $60 - 180 \text{ мА}$ .

### ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЭЛЕМЕНТА

Так как одной из главных целей исследований являлась разработка дешевых солнечных элементов, то была проведена оценка их стоимости, основанная на существующей в настоящее время технологии изготовления и реальных ценах на материалы, без учета возможного уменьшения стоимости при производстве элементов в широких масштабах. Ниже приведена стоимость различных материалов (долл./ $\text{м}^2$ ):

Стеклоподложка	4
Серебряный контакт	2
$CdS$	6
Лицевой контакт	6
Защитное покрытие (стекло, майлар)	1 - 4
<b>Итого</b>	<b>19 - 22</b>

Кроме того, необходимо учитывать расход энергии, потребляемой оборудованием в процессе изготовления элементов, который составляет  $\sim 30 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ .

### ВЫВОДЫ

В результате исследований, которые проводились в течение года, созданы солнечные элементы большой площади на основе  $Cu_xS - CdS$ . Можно надеяться, что в ближайшее время будет проведено дальнейшее усовершенствование элементов.

### Литература

1. Bloss W.H., Pfisterer F., Metz S., Maly R., DFG-Rep. Bl 79/13-LED, 1 Aug. 1973 - 31 Aug. 1974.
2. Shiozawa L.R., Augustine F., Sullivan G.A., Smith J.M., Cook W.R., Jr., Final Rept.; Contract AF 33 (615)-5224, 1 June 1966 - 31 May 1969.
3. Bogus K., Mattes S., Proc. IXth IEEE Photov. Spec. Conf., Silver Spring, May 2 - 4, 1972, p. 91.

4. Pfisterer F., Hewig G.H., Bloss W.H., XIth IEEE Photov. Spec. Conf., Scottsdale, May 6 - 8, 1975.
5. Hewig G.H., Pfisterer F., Int. Congr. "The Sun In The Service of Mankind", Proc, Sect. "The Photov. Power and...", Paris, July 2 - 6, 1973, p. 208.
6. Mukherjee M.K., Pfisterer F., Schock H.-W., Hewig G.H., Proc. Conf. "Solar Electricity", Toulouse, March 1 - 5, 1976.
7. Rahilly W.P., Proc. IXth Photov. Spec. Conf., Silver Spring, May 2 - 4, 1972.
8. Dhariwal S.M., Kothari L.S., Jain S.C., *J. Phys., D*, **8**, 1321 (1975).
9. Gill W.D., Bube R.H., *J. Appl. Phys.*, **41**, 3731 (1970).
10. Hewig G.H., Diss., Univ. Stuttgart, 1973.

## Свойства пленок CdS , полученных методом реактивного распыления

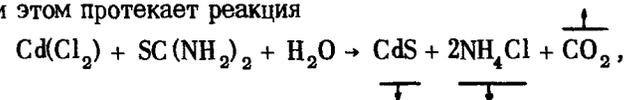
С. Мартинуци, Ф. Кабан-Брути, Ж. Жервэ, А. Мостэван<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

Метод реактивного распыления из жидкой фазы, так называемый метод Spray, разработанный Чемберленом и Шаркманом, широко используется для промышленного производства CdS-пленок. При такой технологии изготовления исключаются потери материала, которые неизбежны при производстве толстых пленок (20 - 40 мкм) методом термического испарения и конденсации. Несомненным преимуществом новой технологии является ее простота.

Схематически технологический процесс получения пленок CdS можно представить себе следующим образом.

Раствор из соединения кадмия и серы наносится методом реактивного распыления на подложку, нагретую до температуры 200°C. При этом протекает реакция



в результате которой образуется CdS. Состав полученного соединения близок к стехиометрическому составу, а само соединение более компактно, чем CdS в пленках, образованных в результате термического испарения. Так как пленки CdS, полученные реактивным распылением, содержат меньший избыток кадмия и серы, то они оказываются более прочными, и толщина таких пленок может быть сведена к нескольким микрометрам. Кроме того, вещество, которое в процессе распыления не осядет на подложку, может быть использовано повторно.

<sup>1)</sup> S. Martinuzzi, F. Cabane-Brouty, J. Gervais, A. Mostavan, Laboratoires de Photoélectricité et de Métallurgie, Faculté des Sciences et Techniques de Marseille St. Jérôme, France.

Разработка технологии получения пленок CdS проводилась в SAT (Париж), а измерения физических свойств пленок – в лабораториях Института науки и техники (Марсель).

### ОБЗОР ПОЛУЧЕННЫХ РАНЕЕ ДАННЫХ МЕТОД ПОДГОТОВКИ

Чемберлен и Шаркман [1] установили, что газ, применяемый для распыления растворов, не оказывает влияния на качество осадка, так же как и атмосфера, в которой производится распыление. Чистота осадка, температура реакции, а также способ введения присадки зависят от выбора веществ, поставляющих ионы Cd и S в раствор. На аморфных подложках (стекло, кварц и т. д.) обычно получают хорошо кристаллизованные пленки, в то время как на поликристаллических подложках (металл) образуются аморфные пленки. Кристаллическая ориентация определяется отношением числа ионов серы к числу ионов кадмия в растворе, так, например, предпочтительная ориентация [002] получается при отношении, равном 1. Термообработка (отжиг) улучшает кристаллизацию, увеличивая размер кристаллитов, без изменения их ориентации.

Соединение CdS может быть получено реактивным распылением растворов, которые содержат два вещества из перечисленных ниже:

пропионат кадмия	тиомочевина
ацетат кадмия	роданистый аммоний
нитрат кадмия	N <sub>1</sub> N-диметилтиомочевина
хлорид кадмия	

Температуру подложки можно менять в пределах 340 – 450°C. Концентрация раствора не должна превышать 0,01 М.

Легирование пленок осуществляется либо введением присадки в раствор, либо путем отжига в атмосфере аргона в присутствии порошка CdS, легированного при 650°C.

### СВОЙСТВА ПЛЕНОК CdS

Удельное сопротивление нелегированных распыленных пленок обычно выше, чем пленок, полученных испарением ( $\rho \approx 10^5$  Ом·см), за исключением тех случаев, когда пленки приготавливаются на базе раствора CdCl<sub>2</sub>. Такие пленки содержат примеси хлора и, следовательно, обладают меньшим удельным сопротивлением ( $\rho \approx 10^2 \div 10^3$  Ом·см).

Мишелетти и Марк [2] отметили сильное влияние хемосорбированного кислорода на концентрацию свободных электронов и на их подвижность. Хемосорбция наблюдалась даже при температуре окружающей среды. Такое сродство к кислороду имеет место, без сомнения, вследствие малых размеров кристаллов и относительно большой поверхности контактов зерен.

Вю и Бьюб [3] показали, что пленки CdS, полученные реактивным распылением, светочувствительны и наибольшей чувствительностью обладают пленки, легированные медью (в темноте  $\rho \approx 10^9$  Ом·см). Подвижность электронов может быть выражена формулой

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{0,22}{kT}\right), \quad \text{где } \mu_0 = 0,1 \div 1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1};$$

изменение  $\mu$  в зависимости от освещенности является еще одним доказательством влияния границ зерен.

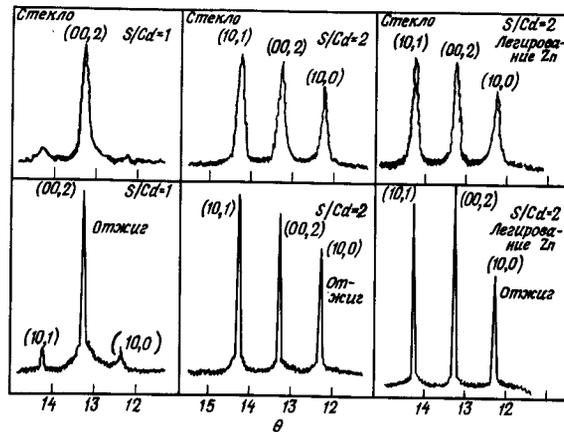
Наложение постоянного электрического поля напряженностью не менее 0,5 В/см при температуре более 100°C вызывает быстрое снижение удельного сопротивления во времени. Под действием поля при температуре 120°C в течение 1 ч удельное сопротивление уменьшается до 1 Ом·см. В случае снижения поля до нуля изменение удельного сопротивления медленно обратимо при температуре окружающей среды.

### РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ АВТОРАМИ

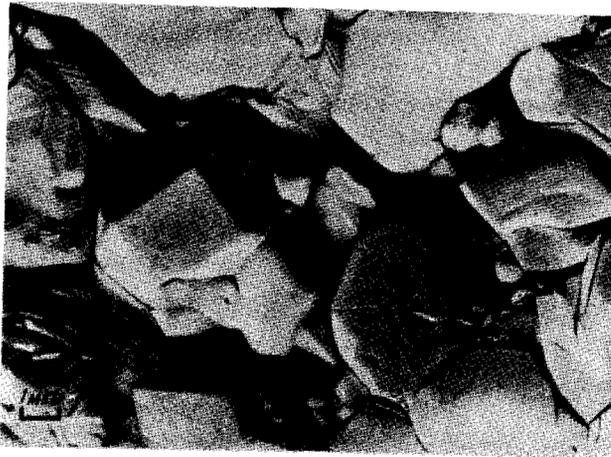
#### ПРИГОТОВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПЛЕНОК

Пленки изготовлялись фирмой SAT путем последовательных распылений. Чтобы исключить присутствие воды, температура подложки в процессе каждого распыления поддерживалась постоянной ( $\approx 120^\circ\text{C}$ ). Полученный осадок нагревался до 230°C. Образовавшийся CdS подвергался отжигу при 340°C, в процессе которого благодаря сублимации удаляется NH<sub>4</sub>Cl. После очередного распыления получали 0,1 – 0,2 мкм CdS.

Применялись растворы с различным отношением ионов серы и кадмия; расход составляет 50 см<sup>3</sup>/ч. На фиг. 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа. Пленки, нанесенные на аморфную подложку (стекло, керамика), тонко кристаллизованы, и средний размер кристаллитов составляет 500 Å. Кристаллизация проходит



Фиг. 1. Дифракция рентгеновских лучей на пленках CdS до и после отжига при 450°C.



Фиг. 2. Процесс кристаллизации в пленках CdS после отжига при 450°C.  $\times 3600$ .

хуже, если подложкой служит металлизированный картон. Предпочтительной ориентацией обладают только те пленки, у которых  $S:Cd = 1$ .

В результате отжига при 450°C в течение недели в присутствии порошка CdS размер кристаллитов возрастает до 1 мкм, но их ориентация не меняется. На фиг. 2 показана микрофотография пленок после

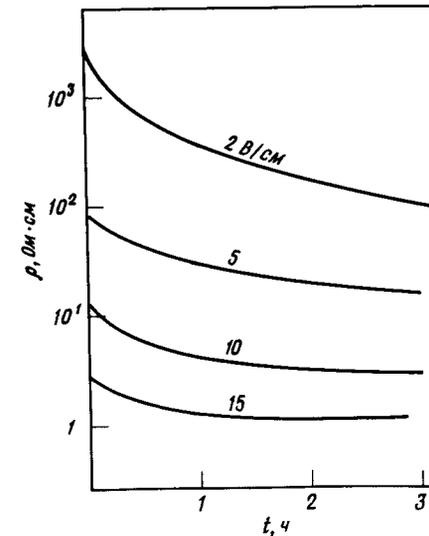
отжига (увеличение составляет 9600). Легирование цинком не оказывает никакого влияния.

#### СВОЙСТВА ПЛЕНОК CdS

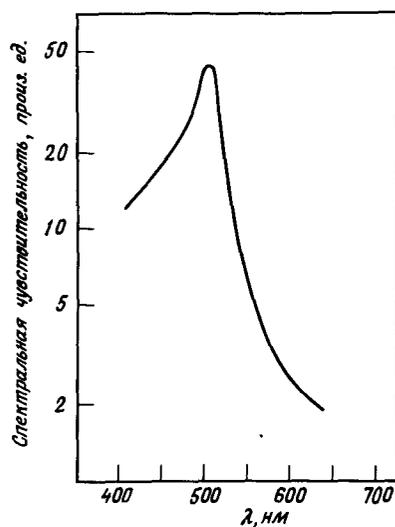
Для проведения электрических измерений на пленку наносились электроды из индия. Высокое удельное сопротивление пленки  $\rho \approx 10^4$  ом·см при легировании цинком (3% в растворе) снижалось до  $10^2 - 10^3$  Ом·см. В интервале от  $-100$  до  $+100$  °C удельное сопротивление изменялось экспоненциально с энергией активации 0,8 эВ. При температуре выше 100 °C в присутствии электрического поля напряженностью, превышающей 0,5 В/см,  $\rho$  с течением времени уменьшалось и достигало значения  $\sim 1$  Ом·см (фиг. 3). Изменение  $\rho$  имеет обратимый характер: исходное удельное сопротивление возвращается после выдержки пленок при температуре 120 °C в течение 12 ч в отсутствие электрического поля.

Так как подвижность электронов в основном зависит от плотности контактов зерен, то даже в пленках, подвергавшихся отжигу, она оставалась ниже  $5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Пленки были мало прозрачны для света как до, так и после отжига. Эта непрозрачность объяснялась геометрическими дефектами



Фиг. 3. Зависимость удельного сопротивления от времени при 120 °C и разной напряженности приложенного электрического поля.



Фиг. 4. Спектральная чувствительность фотоэлементов.

поверхностных слоев, которые в сильной степени рассеивают свет. Оптическая прозрачность для длин волн более 0,5 мкм не превышала 3%. Для более коротких волн пленки оказались абсолютно непрозрачными.

Хотя пленки обладали фотопроводимостью, их спектральная чувствительность до отжига была столь малой, что едва поддавалась измерению. После недельного отжига при 450 °С спектральная чувствительность достигала максимального значения, которое составляло примерно 10 мкА/(мкВт · см<sup>2</sup>). Кривые спектральной чувствительности показаны на фиг. 4. Влияние явлений захвата хорошо заметно для отожженных пленок. Время срабатывания порядка 0,1 с.

### ВЫВОДЫ

Пленки CdS, полученные реактивным распылением, по своим физическим свойствам близки к пленкам, образованным испарением. Однако, прежде чем начать массовое производство фотоэлементов на основе реактивно распыленных пленок CdS, необходимо более тщательное изучение физических характеристик и метода получения таких пленок.

### Литература

1. Chamberlin R.R., Skarman J.S., *J. Electrochem. Soc.*, **113**, № 1, 86 (1966); см. также *Solid State Elect.*, **9**, 819 (1966).
2. Micheletti F.B., Mark P., *Appl. Phys. Lett.*, **10**, 4, 136 (1967).
3. Chen-Ho Wu, Bube R., *J. Appl. Phys.*, **45**, №2, 648 (1974).
4. Notice SAT № 7964/76, Marché DGRST 74.07.1366.

**Солнечные элементы на основе  
двухслойной системы CdS–CdZnS  
с верхним слоем Cu<sub>2</sub>S**

С. Мартинуцы, Ф. Кабан-Брути, Т. Кабо, А. Франко,  
Ж. Каммонцис<sup>1)</sup>

**ВВЕДЕНИЕ**

Соединение Cu<sub>2</sub>S представляет собой вырожденный полупроводник *p*-типа с довольно высоким коэффициентом оптического поглощения в видимой части спектра ( $K > 10^4 \text{ см}^{-1}$ ) и значительной шириной запрещенной зоны (1,2 эВ для непрямых переходов, 1,8 эВ для прямых переходов), т.е. он удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к материалам, которые используются для изготовления тонкослойных фотоэлементов. Однако на основе столь сильно вырожденного материала ( $p \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) можно создать только фотоэлементы с гетероструктурой. Проще всего реализовать гетероструктуру с помощью химической реакции обмена между ионами кадмия из CdS и ионами меди раствора CuCl, в процессе которой Cu<sub>2</sub>S наносится на слой CdS *n*-типа. Чтобы весь сульфид меди был представлен только в виде соединения Cu<sub>2</sub>S, реакция обмена должна строго контролироваться. При получении гетероструктуры такой контроль играет важную роль, и его методика была хорошо освоена фирмой SAT [1] с учетом данных работы Ведела [2]. В результате реакции обмена образуется очень чистая гетероструктура без поглощенного газа и примесей на поверхности раздела.

Параметры решеток Cu<sub>2</sub>S и CdS различаются незначительно только в том случае, когда Cu<sub>2</sub>S представляет собой β-халькоцит (гексагональный Cu<sub>2</sub>S), который, согласно диаграмме фазового состояния Cu<sub>2</sub>S, образуется при 103 °C [3, 4]

Действительно, имеем для CdS  $a = 4,1367 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,7161 \text{ \AA}$  и для Cu<sub>2</sub>S (β)  $a = 3,961 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,722 \text{ \AA}$ .

Есть основания предполагать, что Cu<sub>2</sub>S(β) образуется на CdS либо в процессе реакции обмена, либо во время термообработки и получения верхнего токосъемного контакта.

В работе [5] показано, что при реакции обмена в процессе роста Cu<sub>2</sub>S наблюдается полное структурное соответствие и в атмосфере нейтрального газа образуется только Cu<sub>2</sub>S.

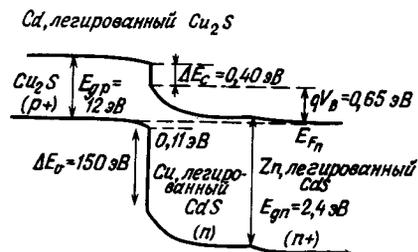
Различие параметров решетки  $a$  составляет 4%, что приводит к возникновению энергетических уровней, локализованных в запрещенных зонах обоих материалов вблизи поверхности раздела ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ). Различие параметров решетки  $c$  (0,1%) пренебрежимо мало, и, вероятно, выравнивание постоянных решетки осуществляется постепенно, что уменьшает плотность уровней, находящихся у поверхности раздела, и распределяет их на несколько сот ангстрем с обеих сторон перехода. Очевидно, что при таких условиях к.п.д. преобразования должен быть не меньше 6 – 7%, так как его предел определяется лишь наличием нарушений кристаллической структуры и дефектов поверхности раздела, которые могут ухудшить коэффициент собирания и уменьшить фотонапряжение.

Результаты послойных химических анализов и исследований вольт-амперных характеристик, зависимостей фототока от освещенности, емкостных измерений и спектральных характеристик показали, что гетероструктуру (как это и предполагалось Брандхорстом [6]) можно представить следующим образом: Cu<sub>2</sub>S(*p*<sup>+</sup>) на поверхности; Cu<sub>2</sub>S(*p*), слегка компенсированный диффузией кадмия, на расстоянии нескольких сот ангстрем от самой поверхности раздела; CdS(*n*), частично компенсированный диффузией меди, на глубину нескольких тысяч ангстрем от поверхности раздела; CdS(*n*<sup>+</sup>), легированный цинком вплоть до металлического электрода.

Уровень Ферми сливается с краем валентной зоны в Cu<sub>2</sub>S(*p*<sup>+</sup>) и на 0,1 эВ выше в Cu<sub>2</sub>S(*p*). Квазиуровень Ферми электронов в CdS находится на 0,15 эВ от края зоны проводимости в области *n* и на несколько сотых долей электронвольта в области *n*<sup>+</sup>.

Диффузионный потенциал, полученный на основе данных вольт-емкостных характеристик, равен  $0,65 \pm 0,05$  эВ. В характере хода зон проводимости у поверхности раздела не обнаружено никаких особенностей. Для разных образцов получены различные значения диффузионного потенциала, которые, возможно, не являются его истинным значением.

<sup>1)</sup> S. Martinuzzi, F. Cabane-Brouty, T. Cabot, A. Franco, J. Kalliontzis, Laboratoires de Photoelectricité et de Métallurgie Faculté des Sciences, et Techniques de Marseille St. Jérôme, France.



Фиг. 1. Зонная структура гетероперехода  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$ .

На фиг. 1 показана предполагаемая зонная структура гетероперехода, возможность которой следовало бы подтвердить точным определением электронного сродства  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

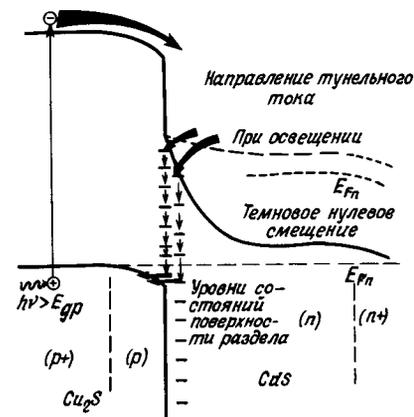
Темновые характеристики ток – напряжение – температура указывают на присутствие туннельных токов, протекающих благодаря процессу рекомбинации через незанятые уровни, расположенные вблизи поверхности раздела [7]. Этот тип проводимости является доминирующим в прямом или обратном смещении до  $60^\circ\text{C}$ .

Исследование гетероструктур  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$ , полученных химическим "мокрым" способом – окунанием монокристаллов  $\text{CdS}$  в раствор, содержащий ионы одновалентной меди, показало, что выше  $-3^\circ\text{C}$  прямые токи принадлежат к обычному типу [8]. Это означает, по-видимому, что кристаллические дефекты оказывают большее влияние на характер проводимости через поверхность раздела, чем различие в параметрах кристаллических решеток.

Наличие туннельных токов может объяснить низкие значения фотонапряжения, полученные для этих фотоэлементов. Действительно, наблюдались значения, равные лишь  $0,48\text{ В}$  со слоями чистого  $\text{CdS}$  и  $0,44\text{ В}$  со слоями, легированными  $\text{Cu} - \text{In}$  или  $\text{CuCl}$  (такое легирование необходимо для стабильности фотоэлементов). Достигнутые значения невелики по сравнению с  $0,55\text{ В}$  для кремния, хотя ширина запрещенной зоны у последнего меньше, чем у  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Фотоэлектрический механизм можно себе представить следующим образом.

При освещении фотоэлемента основная часть фотонов поглощается  $\text{Cu}_2\text{S}$ , и фототок возникает главным образом вследствие инжекции электронов из  $\text{Cu}_2\text{S}$  в  $\text{CdS}$  (как схематически это показано на фиг. 2). Переход в таком случае становится прямо смещенным,



Фиг. 2. Фотоэлектрический эффект и туннельные токи.

и ток основных носителей, проходя благодаря туннельному эффекту через переход, противодействует фототоку. При разомкнутой внешней цепи равновесие устанавливается, когда ток основных носителей становится равным фототоку. При этом на клеммах фотоэлемента возникает напряжение холостого хода  $V_{xx}$ . Следовательно, при заданном освещении значение  $V_{xx}$  станет тем ниже, чем значительнее будет ток основных носителей, иначе говоря, чем сильнее будет влияние туннельных эффектов.

Легирование слоя  $\text{CdS}$  уменьшает ширину области пространственного заряда в  $\text{CdS}$ , что еще больше содействует осуществлению туннельного механизма протекания тока, и, таким образом, фотонапряжение уменьшается.

Так как легирование слоя  $\text{CdS}$  исключить нельзя (оно необходимо для стабильности фотоэлемента), то единственный способ согласовать повышенное значение к.п.д. и приемлемую надежность состоит в том, чтобы по крайней мере восстановить значение фотонапряжения.

Для этого возможны два пути:

1. Перекристаллизовать слой  $\text{CdS}$ , чтобы уменьшить кристаллические дефекты (точечные дефекты, смещения, контакты зерен и т.д.), энергетические уровни которых, неосмненно, содействуют туннельному эффекту.

2. Слегка увеличить ширину запрещенной зоны  $\text{CdS}$ , чтобы увеличить среднее энергетическое расстояние между уровнями, ответ-

ственными за туннельный эффект. Таким путем уменьшают вероятность перехода электронов, рассчитанную Францем [9], с одного локализованного уровня на следующий и тем самым уменьшают туннельный ток.

Сначала был испытан второй способ как более простой. Действительно, введение ZnS в CdS (смешиваемость полная) дает тройные твердые растворы, у которых ширина запрещенной зоны может иметь любые промежуточные значения между ее значениями для CdS (2,4 эВ) и для ZnS (3,7 эВ).

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОРОШКОВ И ПЛЕНОК CdZnS. СВОЙСТВА ПЛЕНОК

Для нанесения пленок CdZnS на подложки, нагретые до 180 – 200 °С, применялось обычное термическое испарение.

В результате испарения из двух тиглей, один из которых содержит CdS, а другой – ZnS, образовывались пленки, представляющие собой гомогенные твердые растворы. Однако авторы использовали такое оборудование, которое не позволяло получить пленки CdZnS с концентрацией ZnS ниже чем 15%. Для получения пленок толщиной 20 мкм, которые представляли бы собой твердые растворы и содержали менее 10% ZnS, испарению подвергались порошки, которые уже являлись твердыми растворами с содержанием ZnS от 1 до 5%.

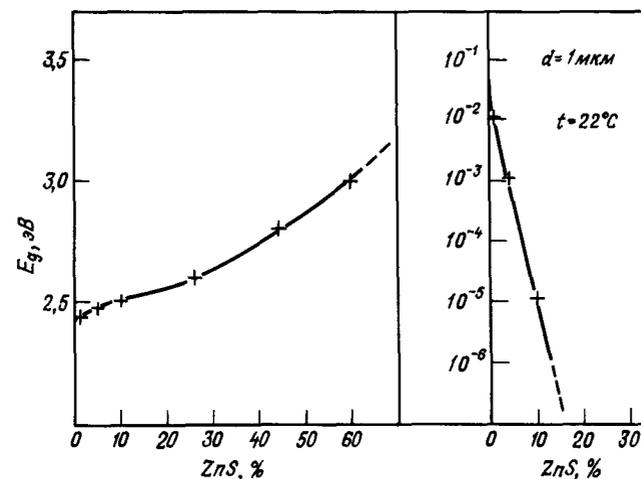
Эти порошки были изготовлены на базе тонкогранулированного (ОАО) или перекристаллизованного (ОАТ) CdS, к которому добавлялся ZnS чистотой 99,95%.

После механической гомогенизации порошок превращался в таблетки и подвергался отжигу в запаянных ампулах при 800 °С в течение 48 ч для CdS ОАУ и 5 сут для CdS ОАТ. Затем эта обработка повторялась, и, таким образом, получался гомогенный твердый раствор с вполне определенной концентрацией (проверенной рентгеновским и спектроскопическим анализом).

Применяя такие порошки, авторы получили пленки, представляющие собой твердые растворы, у которых концентрация ZnS практически такая же, как и у порошка (если только температура в тигле строго равномерная).

Были измерены электропроводность  $\sigma$ , а также спектральные коэффициенты оптического пропускания и отражения, что позволило определить ширину запрещенной зоны  $E_g$ .

На фиг. 3 приведены изменения  $\sigma$  и  $E_g$  в зависимости от концентрации ZnS в слоях. Эти результаты согласуются с теми, которые

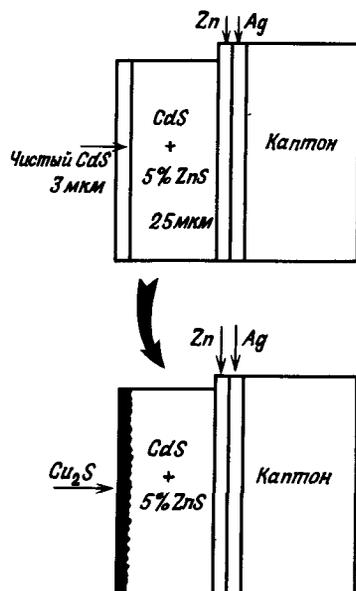


Фиг. 3. Зависимости  $E_g$  и  $\sigma$  от концентрации ZnS.

были получены Бонэ [10] и Дэвисом и Линдом [11], и показывают, что при концентрации ZnS 5% имеет место существенный рост ширины запрещенной зоны  $E_g$  (с 2,4 до 2,48 эВ), причем проводимость остается еще приемлемой для приготовления фотоэлементов.

Фотоэлементы с описанным типом пленок, изготовленные фирмой SAT, показывают хорошие значения напряжения в режиме холостого хода (при 5% ZnS до 580 мВ). Однако фототок значительно ниже, чем для обычных фотоэлементов, – 15 мА · см<sup>-2</sup>. По-видимому, цинк в слишком большом количестве оказывает вредное действие на Cu<sub>2</sub>S и снижает фототок.

Была сделана попытка совместить увеличение фотонапряжения с приемлемым значением фототока. Для этого использовались двухслойные системы CdZnS – CdS, в которых слой чистого CdS в 2 – 3 мкм покрывал пленку CdZnS толщиной от 2 до 3 мкм. Этот процесс схематически изображен на фиг. 4. Образование Cu<sub>2</sub>S происходило за счет чистого CdS, и поверхность раздела формировалась у контакта с CdZnS. Для создания таких двухслойных систем процесс нанесения пленок проводится в два этапа. Сначала на подложку из обычного металлизированного каптона, нагретую до 200 °С, конденсировалась пленка CdZnS, а затем пленка чистого CdS. Вторая конденсация начиналась незадолго до конца первой, что позволило свести до минимума загрязнение поверхности раздела остаточными газами.



Фиг. 4. Структура фотоэлемента с двухслойной системой CdZnS – CdS – Cu<sub>2</sub>S.

Двухслойная система подвергалась термообработке. Установлено, что в одинаковых экспериментальных условиях фотоэлементы на базе двухслойной системы и на базе чистого CdS имеют одинаковые характеристики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель данной работы состояла в изучении возможности создания фотоэлементов с двухслойной системой. Ниже проводится сравнение результатов, полученных при исследовании элементов с двухслойными системами, с характеристиками стандартных элементов, приготовленных в аналогичных условиях (тот же метод испарения, та же толщина CdS  $\approx$  20 мкм).

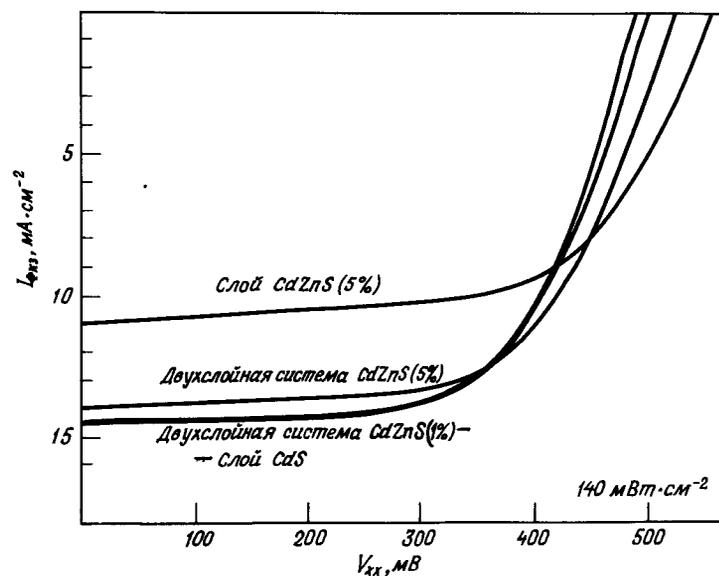
### ФОТОТОКИ И ФОТОНАПРЯЖЕНИЯ

В табл. 1 даны типичные значения фототоков короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжений в режиме холостого хода, измеренные сразу после приготовления фотоэлементов в условиях имитированной солнечной освещенности в 140 мВт/см<sup>2</sup>. На фиг. 5 показаны вольт-амперные характеристики фотоэлементов при освещении.

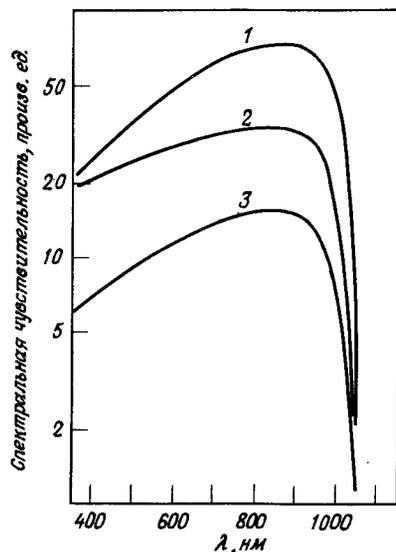
Таблица 1

Состав слоя n	Фототок $I_{кз}$ МА/СМ <sup>2</sup>	Напряжение $V_{хх}$ , МВ
CdS	14,5	480
CdS – CdS	14,5	480
CdZnS (5% ZnS)	9 – 11	550 – 580
CdZnS – CdS (1% ZnS)	14,5	490
CdZnS – CdS (5% ZnS)	14	515

Как можно видеть из табл. 1 значения фототоков невелики. Аналогично обстоит дело и с напряжениями, малые значения которых связаны с образованием поверхности раздела без промежуточного слоя чистого CdS.



Фиг. 5. Вольт-амперные характеристики, полученные при освещении элементов.



Фиг. 6. Зависимость спектральной чувствительности от длины волны для обычных фотоэлементов и элементов с двухслойной системой.

1 — обычный фотоэлемент (SAT); 2 — двухслойная система (1% ZnS); 3 — двухслойная система (5% ZnS).

#### СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ФОТОНАПРЯЖЕНИЕ — ОСВЕЩЕННОСТЬ

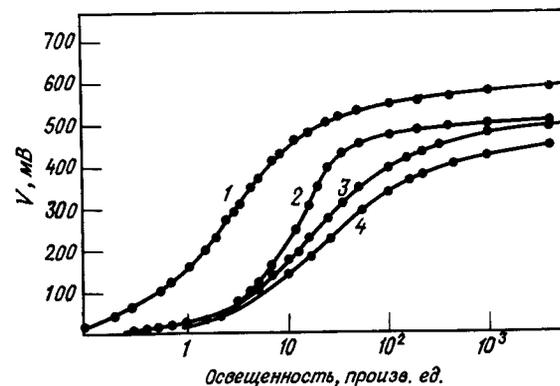
Так как ход спектральной чувствительности подобен для всех типов фотоэлементов (фиг. 6), то, следовательно, природа слоя CdS не оказывает существенного влияния на спектральную чувствительность. На фиг. 7 приведены кривые зависимости напряжения в режиме холостого хода от освещенности при комнатной температуре.

Спектральный состав света корректировался при этих измерениях с помощью широкополосного фильтра МТО, прозрачного между 0,6 и 0,8 мкм.

Анализ характеристик показывает, что для фотоэлементов  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$  не наблюдается явного насыщения значений напряжения холостого хода при увеличении освещенности. Это насыщение возникает тем позже, чем меньше его значение по сравнению с начальным значением  $V_{\text{хх}}$ . По-видимому, должна существовать связь между этим изменением  $V_{\text{хх}}$  в зависимости от освещенности и наличием туннельных токов.

#### ВЫВОДЫ

Показано, что двойные слои типа CdS — CdZnS могут быть использованы при изготовлении фотоэлементов на основе  $\text{Cu}_2\text{S}$ .



Фиг. 7. Характеристики фотонапряжения — освещенность для обычных элементов, элементов на основе CdZnS и элементов с двухслойной системой. 1 — монослойная система (5% ZnS); 2 — двухслойная система (5% ZnS); 3 — двухслойная система (1% ZnS); 4 — обычный фотоэлемент (SAT).

Они не изменяют существенно основных характеристик этих преобразователей, позволяя в то же время получать приемлемое значение фототока и повышенное фотонапряжение.

Чтобы уточнить их способность улучшить к.п.д. фотоэлементов необходимо оптимизировать: концентрацию ZnS, легирование слоя CdZnS, толщину верхнего слоя чистого CdS, технику окунания для получения поверхности раздела  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdZnS}$ .

Необходимо также оценить усложнение технологии, возникающее с применением двухслойной системы.

Настоящее исследование показывает, что следует работать над созданием фотоэлементов с тыльным освещением. В этом случае слой CdZnS может быть нанесен на прозрачную проводящую подложку, а слой  $\text{Cu}_2\text{S}$  может образовываться за счет слоя чистого CdS.

Освещение элемента с теневой стороны через слой CdZnS с содержанием 20 — 30% ZnS обеспечило бы полосу пропускания (450 — 1100 нм), достаточную для наземного применения, и повышенный коэффициент собирания во всей полосе, что позволило бы достигнуть значений к.п.д. порядка 20% (при 30% ZnS расхождения в параметрах решеток  $\text{Cu}_2\text{S}$  и CdZnS были бы снижены до 2% и менее).

Наконец, заметим, что для создания двухслойной системы может быть использован метод реактивного распыления из жидкой фазы, или пульверизации.

## Литература

1. Gautier A. et al., Proc. Int. Conf. Photovoltaic Power Generation, Hamburg, 1974, p. 193.
2. Vedel J., Castel E., Conf. Record of the UNESCO Conf., The Sun in Service of Mankind, Paris, 1972, p. 117.
3. Roseboom E.H., *Econo. Geol.*, **61**, 641 (1966).
4. Buerger M.J. et al., *Ann. Mineral.*, **29**, 55 (1944).
5. Tseng W.F., Greenfield I.G., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **26**, 643 (1974).
6. Branhorst H.W., Conf. Record of 7th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1968, p. 33.
7. Martinuzzi S., Mallem O., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **16**, 339 (1973).
8. Mallem O., Thèse de Spécialité, Université de Provence Marseille, 1974.
9. Franz W., *Handbuch der Physik* (Berlin), **17**, 155 (1956).
10. Bonnet D., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **11**, K. 135 (1972).
11. Davis E.A., Lind E., *J. Phys. Chem. Sol.*, **29**, 79 (1968).

СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ  
НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯПрограмма работ по развитию фотоэлектрического  
метода преобразования энергииЛ.М. Мэвид<sup>1)</sup>

## ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрические системы преобразования энергии (ФСПЭ) предназначены для прямого преобразования солнечной энергии с помощью фотоэлементов или солнечных элементов. Принцип действия составных частей ФСПЭ хорошо изучен в основном благодаря опыту, приобретенному при их использовании для осуществления космических программ. При разработке новых, более дешевых способов изготовления компонент ФСПЭ эти системы могут стать источником большого количества энергии.

Для того чтобы ФСПЭ смогли получить широкое применение, необходимо решить две основные проблемы: проблему снижения стоимости (в настоящее время стоимость 1 кВт пиковой мощности, вырабатываемой фотоэлектрическими панелями в наземных условиях, составляет приблизительно 21 000 долл.) и проблему увеличения объема производства (в США в 1975 г. рынок сбыта ФСПЭ для наземного применения оценивался в 100 кВт пиковой мощности).

Программа США по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии предусматривает решение этих проблем и предполагает значительное повышение годового объема выпуска ФСПЭ низкой стоимости. В связи с этим основной задачей является введение таких производственных мощностей, которые к 1986 финансовому году смогут обеспечить выпуск модулей солнечных батарей пиковой мощностью не менее 500 МВт/год при рыночной стоимости менее 500 долл./кВт и к 2000 финансовому году — пиковой мощностью не менее 50 000 МВт/год при рыночной стоимости 100 — 300 долл./кВт.

<sup>1)</sup> L.M. Magid, Division of Solar Energy, Energy Research and Development Administration, Washington, D.C., 20545.

При выполнении последнего условия общая мощность вырабатываемой электроэнергии будет составлять  $\sim 20\,000$  МВт или  $\sim 3\%$  того количества электроэнергии, которое, согласно оценочным расчетам, будет потребляться в США в 2000 г. Это в свою очередь приведет к ежедневной экономии  $\sim 160$  млн.л нефти<sup>1)</sup>.

### ЦЕЛЬ ПРОГРАММЫ

Основной целью программы Управления исследований и разработок в области энергетики (ERDA) по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии является разработка дешевых и надежных ФСПЭ и создание такого промышленного и торгового потенциала, который позволит изготовить и снабдить системами, предназначенными для широкого применения в наземных условиях, жилые помещения, торговые и правительственные учреждения. Разработанная программа предусматривает выполнение следующих задач.

Провести исследования, разработки и демонстрационные испытания, направленные на снижение стоимости солнечных батарей к 1986 г. в 40 раз (до 500 долл./кВт пиковой мощности).

Сконцентрировать усилия в области исследования и разработок новых материалов и приборов и показать возможность снижения таким путем стоимости 1 кВт пиковой мощности, вырабатываемой солнечными батареями, к 1986 г. в 100 раз и более (уменьшить стоимость до 100 – 300 долл./кВт пиковой мощности) и определить возможность внедрения усовершенствованной технологии к 2000 г.

Разработать системы концентраторов и с их помощью показать возможность первоначального снижения стоимости электрических (и тепловых) систем преобразования энергии.

Продолжить изучение систем и возможностей их применения с целью дальнейшего повышения экономической эффективности фотоэлектрических систем преобразования энергии.

Провести исследовательские и демонстрационные испытания фотоэлектрических систем, установленных в правительственных учреждениях, торговых, промышленных и коммунальных предприятиях с целью определения их практической применимости и стимулирования широкого признания таких систем.

<sup>1)</sup> Если общий к.п.д. ФСПЭ составляет 10%, отношение годовой максимальной интенсивности солнечного излучения к среднесуточной интенсивности равно 5, отношение общей площади к площади коллектора равно 2 и максимальная интенсивность солнечного излучения составляет 1 кВт/м<sup>2</sup>, то такое количество энергии может быть получено при площади батарей ФСПЭ, равной 2000 км<sup>2</sup>.

### СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

Структура программы ERDA по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии, предусматривающей достижение перечисленных целей, представлена на фиг. 1.

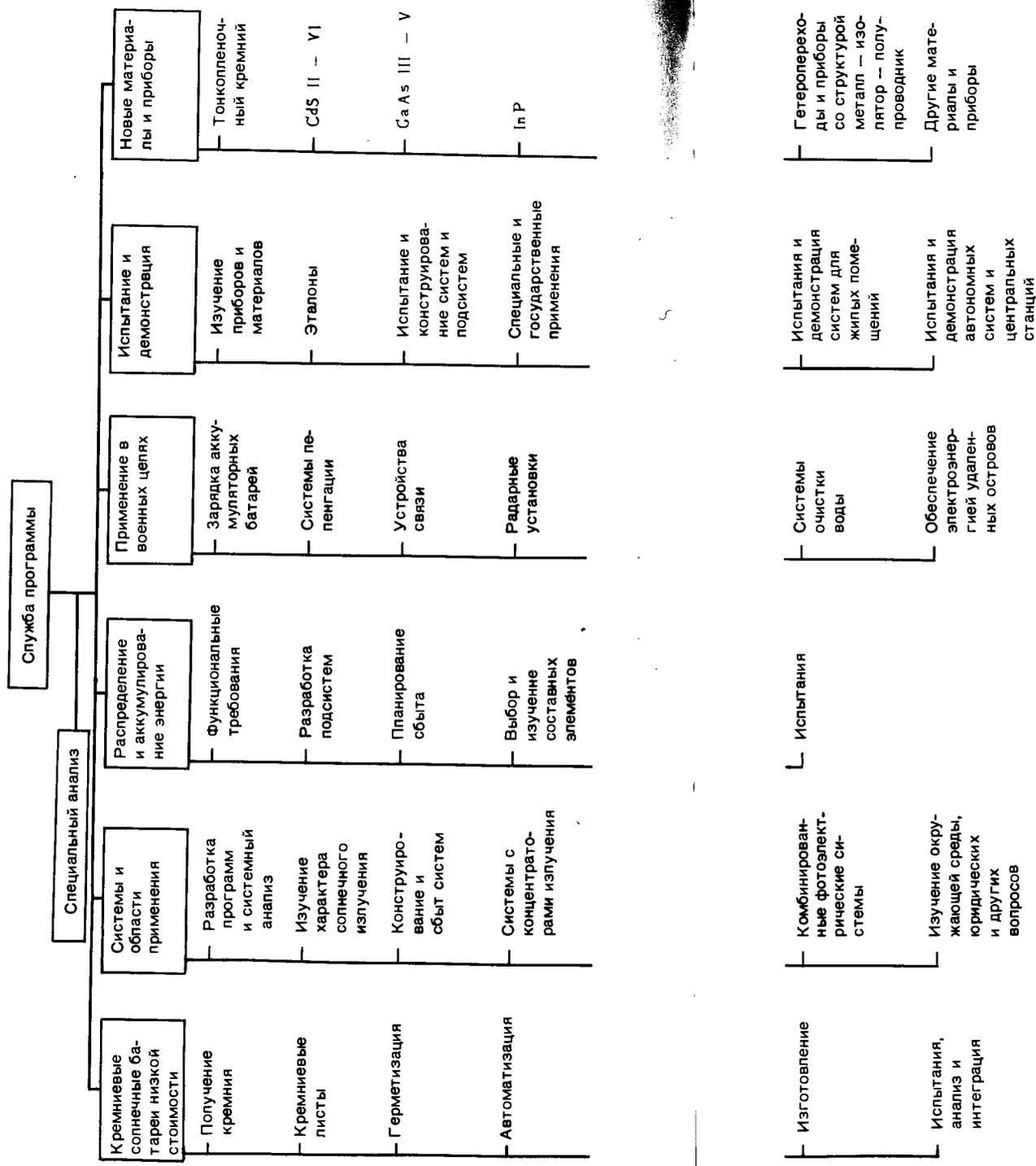
Согласно программе, в настоящее время основное внимание уделяется исследованиям, разработке и проведению демонстрационных испытаний дешевых и надежных кремниевых батарей. Техническая применимость этих приборов для создания стабильных систем энергопитания была установлена в процессе осуществления космических программ и при промышленном изготовлении солнечных элементов для наземного применения. К 1986 г. предполагается создать такой технологический и промышленный потенциал, который обеспечит годовой выпуск кремниевых солнечных батарей пиковой мощностью более 500 МВт при к.п.д. батарей, превышающем 10%, и стоимости 1 кВт пиковой мощности менее 500 долл.

Другая область исследований, осуществляемых параллельно, связана с использованием новых материалов и разработкой новых, более дешевых и эффективных приборов по сравнению с элементами на основе монокристаллического кремния. В настоящее время основной задачей является более глубокое изучение различных тонкопленочных фотоэлектрических материалов, в том числе: кремния, сульфида кадмия, сульфида меди, арсенида галлия, фосфида индия и других полупроводниковых соединений II – VI и III – V групп. Намечено изучение новых фотоэлектрических преобразователей с барьером Шоттки, со структурой металл – изолятор – полупроводник и с инверсионным слоем. После того как будет установлена применимость того или иного материала или нового прибора, они будут включены в ту часть программы, которая предусматривает проведение испытаний и демонстрационных показов.

Будут проведены также исследования возможности применения оптических концентраторов. Использование концентрированного излучения позволит снизить стоимость фотоэлектрических систем как путем уменьшения количества (или размеров) солнечных элементов, необходимого для получения определенной электрической мощности, так и путем одновременного получения электрической и тепловой энергии с помощью комбинированных систем преобразования излучения.

Испытания, оценка и демонстрация характеристик фотоэлектрических систем, подсистем, материалов и приборов включены в раздел программы "Испытания и демонстрация". В этот раздел также входят сбор данных по интенсивности солнечного излучения в различных

Структура программы ERDA



Фиг. 1. Структура программы ERDA по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии.

районах страны, создание эталонов для измерения характеристик солнечных элементов, определение надежности и срока службы элементов.

Раздел программы "Аккумуляирование и распределение энергии" определяет специальные требования, которые предъявляются к используемым в энергосистеме солнечным элементам и которые связаны главным образом с необходимостью аккумуляирования и компенсации энергии с учетом циклического суточного изменения интенсивности солнечного излучения, а также с влиянием на работу систем аккумуляторов таких кратковременных явлений, как облачность и плохие погодные условия. Кроме того, в этот раздел должен быть включен анализ ограничений, накладываемых на конструкцию системы при решении ряда проблем, связанных с подключением системы к энергосети, в том числе проблема преобразования низкого постоянного выходного напряжения в переменное напряжение.

Наконец, согласно программе развития ФСПЭ, будут продолжаться специальные исследования по изучению различных областей применения фотоэлектрических систем и их основных подсистем с целью выявления наиболее перспективных областей применения и определения приемлемой стоимости и требуемого уровня характеристик. Разработка конструкций и их анализ будут проводиться одновременно, при этом предполагается создание трех широких групп фотоэлектрических систем: 1) автономных систем для жилых помещений (пиковой мощностью 2 – 10 кВт); 2) систем промежуточного уровня (пиковой мощностью 0,1 – 10 МВт); 3) систем для центральных станций (пиковой мощностью 50 – 1000 МВт). Эти исследования позволят выявить и разрешить основные проблемы взаимосвязи подсистем. Кроме того, будут предприняты исследования по определению возможных экономических, социальных, юридических вопросов и вопросов, связанных с воздействием на окружающую среду, которые возникнут при широком распространении фотоэлектрических систем.

### ПЛАН ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОГРАММЫ

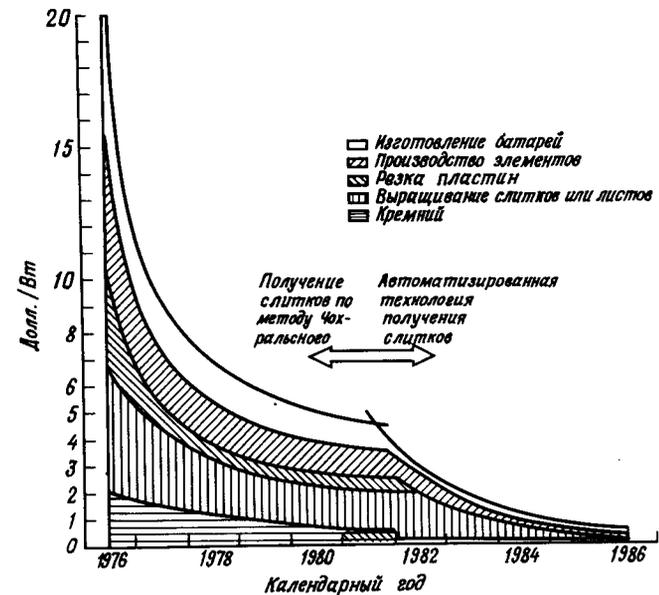
Основные этапы плана осуществления программы, который включает решение технических и исследовательских проблем, связанных с развитием ФСПЭ в ближайшие 10 лет, представлены на фиг. 2. Этот план составлен в виде перечня показателей по семи основным разделам программы: системы и области применения, кремниевые батареи низкой стоимости, системы концентраторов, испытания и демонстрация, новые материалы и приборы, аккумуляирование и распределение энергии и оценка планируемых результатов.

Финансовый год	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
1. Системы и области применения, конструкции, проекты и анализ	Предварит. стадия для кон-струкций	Предварит. стадия для кон-струкций	Предварит. стадия для кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций	Детальная специфика-ция кон-струкций
2. Кремниевые батареи низкой стоимости, промышленные разра-ботки	Доступные 20000 долл./кВт	Доступные 20000 долл./кВт	Доступные 20000 долл./кВт	Доступные 5000 долл./кВт	Доступные 500 долл./кВт	Доступные 500 долл./кВт	Доступные 500 долл./кВт	Доступные 500 долл./кВт	Доступные 1000 долл./кВт	Доступные 1000 долл./кВт	Доступные 500 долл./кВт
3. Системы с концентрато-рами	Получение 150 кВт	Получение 270 кВт	Получение 270 кВт	Получение 500 кВт	Получение 1 МВт	Получение 2 МВт	Получение 3 МВт	Получение 4 МВт	Получение 7 МВт	Получение 10 МВт	Получение 10 МВт
4. Испытания и демонстрация систем, методы испытаний и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны	Испытание в условиях окружающей среды и эталоны
5. Новые материалы и приборы	45 кВт	170 кВт	285 кВт	600 кВт	1 МВт	2 МВт	4 МВт	7 МВт	10 МВт	10 МВт	10 МВт
6. Аккумуляирование и распределение энергии	Исследования, изучение технологий										
7. Определение условий выполнения плана	Начальная оценка	Начальная оценка	Начальная оценка	Отбор под-систем	Методолог. проработка	Разработка протокола, проведение испытаний					

Фиг. 2. Основные этапы десятилетнего плана выполнения программы по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии.

Первоначально основное внимание уделяется техническому усовершенствованию конструкций, повышению эффективности, надежности, срока службы и уменьшению периода окупаемости энергетических затрат на изготовление солнечных батарей путем усовершенствования технологии получения кремния. Основное значение будет придаваться получению дешевого кремния и кремниевых листов большой площади; разработке материалов и способов герметизации батарей; усовершенствованию элементов и разработке конструкций батарей, отвечающих определенным условиям окружающей среды; разработке высокопроизводительных и экономически эффективных автоматизированных процессов сборки элементов в батарею. Предполагается, что к 1983 финансовому году будут введены в действие опытные предприятия, которые смогут производить ежегодно более 5 млн. м<sup>2</sup> кремниевого листового материала рыночной стоимостью менее 18 долл./м<sup>2</sup>. Как ожидается, к 1984 финансовому году промышленными предприятиями будет производиться ежегодно приблизительно 2000 т кремния рыночной стоимостью менее 10 долл./кг. К 1986 финансовому году общая мощность производства установится на уровне, способном обеспечить годовой выпуск герметизированных модулей солнечных батарей пиковой мощностью более 500 МВт при рыночной стоимости менее 500 долл./кВт пиковой мощности. На фиг. 3 представлен уровень цен, планируемый на данный период.

Наряду с проведением работ по получению кремния большое внимание будет уделяться исследованиям и разработкам новых фотоэлектрических материалов и приборов, а также использованию новых принципов при разработке материалов и элементов приборов, которые окажутся перспективными при выполнении долгосрочной программы, целью которой является достижение к 2000 финансовому году пиковой мощности модулей солнечных батарей, равной 50 000 МВт/год, при рыночной стоимости 100 – 300 долл./кВт пиковой мощности. До 1986 г. намечено проведение исследований, направленных на более глубокое изучение и усовершенствование методов контроля основных процессов роста и формирования структуры различных перспективных тонкопленочных материалов, в том числе: поликристаллического кремния, сульфида кадмия, сульфида меди, арсенида галлия, фосфида индия и других соединений II – VI и III – V групп. Частью программы является также изучение других фотоэлектрических систем, таких, как приборы с барьером Шоттки, со структурой металл – изолятор – полупроводник и с инверсионным слоем.



Фиг. 3. Планируемая стоимость кремниевых солнечных батарей для наземного применения.

В этой области цели программы определены следующим образом: к 1980 г. необходимо создать одну или несколько тонкопленочных батарей, способных обеспечить к.п.д. преобразования энергии, равный 10%, а к 1986 г. необходимо показать возможность снижения стоимости пиковой мощности, вырабатываемой устройствами такого типа, до 100 – 300 долл./кВт.

В течение ближайших десяти лет намечено провести теоретические и экспериментальные исследования для определения возможностей технологии изготовления, конструктивных особенностей и возможностей реализации фотоэлектрических систем с концентраторами излучения. Основное внимание будет уделяться: созданию солнечных элементов, предназначенных для работы при высокой температуре; разработке систем концентраторов излучения, слежения за Солнцем и охлаждения; определению оптимальных значений коэффициента концентрации в зависимости от интенсивности солнечного излучения; определению стоимости солнечных элементов и конструкции, а также эффективности комбинированных энергетических систем, генерирующих одновременно электрическую и тепловую энергию.

Предполагается, что фотоэлектрические системы с концентраторами излучения первого поколения в 1978 г. будут вырабатывать электроэнергию стоимостью 2000 долл./кВт пиковой мощности и ниже. В последующие годы стоимость 1 кВт пиковой мощности, согласно намеченному плану, будет составлять: в 1980 г. — 1000 долл., в 1982 г. — 500 долл. и в 1986 г. — 250 долл.

Испытания и оценки характеристик различных фотоэлектрических материалов, приборов, систем и подсистем, проводимые в рамках программы, начаты в 1975 г. и будут продолжаться на протяжении всего периода осуществления программы. Организована лаборатория стандартов, которая будет проводить испытания на воздействие окружающей среды и продолжительность срока службы солнечных батарей и материалов, устанавливать причины аварий и разрабатывать методику ускоренных испытаний.

Основная часть раздела программы "Испытание и демонстрация" связана с проведением ряда испытаний прототипов системы, которые будут субсидироваться независимо от других исследований, и с экспериментальной демонстрацией различных фотоэлектрических систем преобразования энергии. На 1976 г., согласно программе, намечено начало проведения испытаний и демонстрации систем военного назначения планируемой пиковой мощностью 90 кВт (совместно с Министерством обороны) наряду с испытаниями специальных систем в сочетании с государственными энергетическими системами гражданского назначения (совместно с другими федеральными учреждениями). В то время как Министерство обороны и другие организации осуществляют финансирование этих испытаний, задачей ERDA, согласно другой части плана осуществления десятилетней программы, является проведение испытаний более крупных систем, предназначенных для жилых помещений, торговых организаций и центральных станций, совместно с коммунальными и частными предприятиями.

Ниже более подробно перечислены основные разделы текущего десятилетнего плана ERDA по проведению испытаний и демонстрации систем.

В 1976 и 1977 гг. предполагается использовать для военных целей солнечные батареи, поставляемые ERDA, общей пиковой мощностью ~ 90 кВт. Они будут применяться для обеспечения электроэнергией небольших аккумуляторных батарей, радиорелейных линий, систем пеленгации, устройств связи, отдаленных радарных установок, систем очистки воды, кроме того, значительную часть энергии они будут отдавать в энергосеть военных баз, расположенных на удаленных островах.

Фотоэлектрические системы специального и государственного назначения будут использоваться начиная с 1976 г. Солнечные батареи будут применяться в различных гражданских энергетических системах, которые представляются перспективными как с точки зрения возможности их эффективного сбыта, так и с точки зрения расширения в ближайшее время рынка сбыта фотоэлектрических приборов.

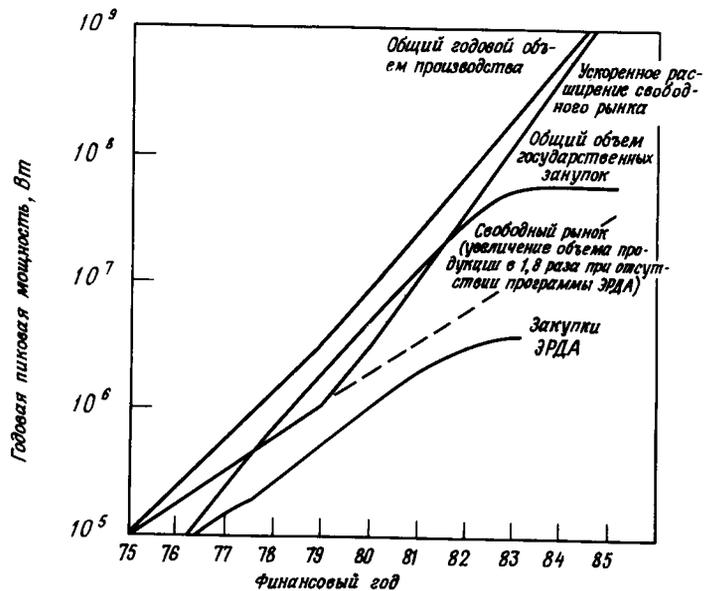
Оборудование, необходимое для первого этапа испытаний фотоэлектрических систем, будет введено в действие в 1976 г., затем его мощность увеличится и к 1979 г. достигнет наибольшей величины, равной 100 кВт. Это оборудование в дальнейшем будет использоваться для проведения испытаний новых фотоэлектрических систем на протяжении всего периода выполнения программы.

В 1977 г. намечено ввести в действие прототип системы, предназначенной для применения в жилых помещениях, а в последующие годы планируется создание ряда экспериментальных систем такого типа для различных районов и проведение их демонстрации.

Намечено проведение испытаний и демонстрации систем, предназначенных для конкретных потребителей, общей пиковой мощностью 200 кВт в 1979 г. при ее увеличении до 10 МВт в 1984 г., а также продолжение испытаний и изучение характеристик систем на протяжении всего периода выполнения программы до 1986 г.

В течение всего этого периода будут также проводиться испытания и оценки характеристик систем аккумуляции и распределения энергии. Будут проведены исследования, которые позволят решить вопросы о праве собственности и ответственности за оборудование для демонстрации экспериментальных систем и об изменениях организации труда, порядка ведения строительства и архитектурных принципов создания конструкций, которые необходимы при практическом использовании фотоэлектрических систем. Передача технологии будет осуществляться на конференциях, совещаниях, с помощью публикаций в печати, руководств, технических и производственных отчетов. Этот этап проведения демонстрационных испытаний будет осуществляться при поддержке местных промышленных и небольших торговых предприятий.

В период 1976 — 1979 гг. будут проводиться исследования и разработки, связанные с определением требований к промежуточным устройствам при совместной работе систем аккумуляции и распределения энергии. Необходимо оценить параметры, надежность и стоимость существующих в настоящее время подсистем аккумуляции и распределения энергии и спроектировать конструкции, специально



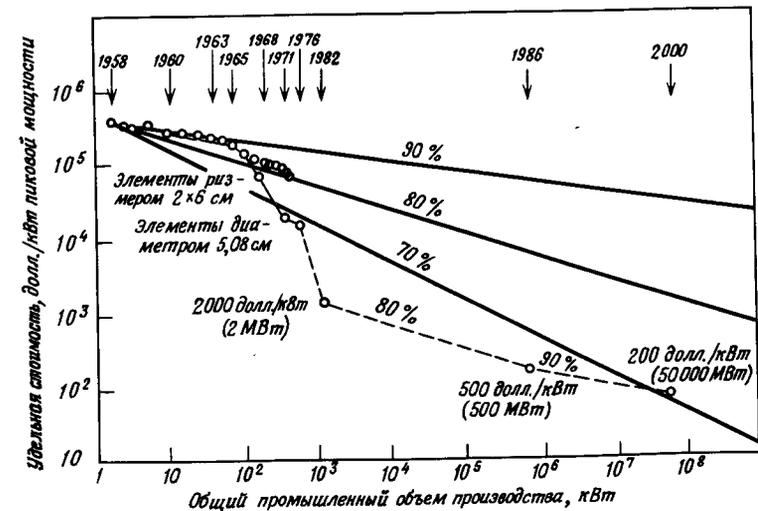
Фиг. 4. Планируемый объем производства фотоэлектрических систем.

предназначенные для использования в сочетании с фотоэлектрическими преобразователями. Разработка и испытания подсистем и промежуточных устройств, необходимые для приспособления подсистем аккумулярования и распределения энергии к условиям работы фотоэлектрических приборов, будут завершены в начале 80-х годов, так же как и исследования по изучению юридических вопросов, вопросов безопасности и влияния использования подсистем аккумулярования и распределения энергии на окружающую среду и по разработке методов устранения или ослабления этого влияния.

Целью осуществления раздела программы, связанного с испытаниями и демонстрацией систем, является не только определение возможностей применения ФСПЭ с технической и экономической точки зрения, но и ускорение процесса их признания в кругах частных предпринимателей. На основе бесед со многими представителями промышленных предприятий по производству фотоэлектрических и полупроводниковых приборов была составлена схема планируемого роста объема производства фотоэлектрических систем преобразования энергии, выраженного в единицах ежегодно вырабатываемой пиковой мощности, которая представлена на фиг. 4. В нее включены: 1) планируемые

закупки ERDA по 1983 г. включительно; 2) предполагаемый общий объем государственных закупок с учетом систем, которые после проведения демонстрационных испытаний, финансируемых ERDA, будут приобретены различными организациями, которые смогут найти для этих систем экономически эффективные применения; 3) ускоренное расширение свободного рынка сбыта (также стимулированное программой ERDA); 4) сумма этих отдельных составляющих, которая представляет собой общий годовой объем производства ФСПЭ. Как показано на фиг. 4, планируемому уровню производства соответствует годовое увеличение объема продукции почти в 3 раза. Достижение такой скорости роста объема производства привело бы в действительности к получению намеченной программой на конец десятилетнего периода пиковой мощности 500 МВт/год приблизительно на один год раньше срока. Для сравнения на фиг. 4 представлена также кривая роста свободного рынка, которой соответствует годовое увеличение объема продукции в 1,8 раза, что, согласно плану, должно иметь место при отсутствии программы ERDA по развитию фотоэлектрического метода преобразования.

На фиг. 5 планируемые результаты выполнения десятилетней программы представлены в виде промышленной прогнозирующей кривой.



Фиг. 5. Характер снижения стоимости фотоэлектрических батарей.

Предполагается, что в результате настойчивых исследований, разработок и демонстрационных испытаний будут осуществлены технические усовершенствования, необходимые для получения стоимости, составляющей 2000 долл./кВт пиковой мощности, которая обеспечивается, согласно оценкам, при объеме производства, равном  $\sim 2$  МВт пиковой мощности. Если исходить из этой точки, то для достижения намеченной на 1986 г. цели, по-видимому, необходимо, чтобы рост объема продукции соответствовал кривой 80%-ного изменения стоимости. Несмотря на то что может потребоваться применение совершенно новых технологических методов и степень неопределенности этого способа прогнозирования значительно больше предполагаемой, интересно отметить, что даже с помощью прогнозирующей кривой 90%-ного изменения стоимости можно перейти из точки, которая соответствует стоимости, планируемой на 1986 г., к точке, соответствующей 2000 г., которая определяется долгосрочной программой широкого применения ФСПЭ.

Наконец, как отмечалось ранее, одна из целей программы состоит в том, чтобы к 1986 г. привести в состояние готовности технологическое оборудование предприятий по производству фотоэлектрических приборов. Можно надеяться, что основной заключительный вывод программы о дальнейшем продолжении в США работ, направленных на достижение в 2000 г. цели, намеченной долгосрочной программой, будет прочно основан на реальных возможностях различных технологических методов и достаточной степени подготовленности системы предприятий свободных предпринимателей, желающих и способных выполнить свою часть работы.

### ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ПУНКТЫ ПРОГРАММЫ

Ниже перечислены основные этапы выполнения программы по развитию ФСПЭ.

В 1976 г. совместно с Министерством обороны начать испытания первой ФСПЭ пиковой мощностью 30 кВт, предназначенной для военных целей.

В 1976 г. приступить к основным исследованиям и разработкам в области новых материалов и приборов.

В 1976 г. определить методики предварительных измерений для проведения испытаний и создания эталонов и ввести в действие оборудование, предназначенное для испытаний фотоэлектрических систем.

В 1976 г. начать применение ФСПЭ для специальных и государственных целей.

В 1976 г. завершить начальный этап проектирования и анализа фотоэлектрических систем преобразования энергии.

В 1976 г. приступить к исследованиям и разработкам устройств и систем концентраторов излучения для фотоэлектрических установок.

В 1977 г. начать испытания другой группы ФСПЭ военного назначения пиковой мощностью 60 кВт, предназначенных для энергообеспечения военных баз Министерства обороны, расположенных на удаленных островах.

В 1977 г. завершить предварительную спецификацию конструкций фотоэлектрических систем и специфицировать характеристики солнечных элементов.

В 1977 г. изготовить первые промышленные образцы концентраторов излучения.

В 1977 г. ввести в действие прототип первой ФСПЭ, предназначенной для жилых помещений.

В 1978 г. разработать метод герметизации ФСПЭ.

В 1978 г. приступить к демонстрации экспериментальных систем, предназначенных для жилых помещений.

В 1978 г. ввести в действие системы концентраторов излучения для гелиоустановок, обеспечивающих получение электроэнергии с удельной стоимостью 2000 долл./кВт пиковой мощности.

В 1979 г. провести спецификацию систем и подсистем, которые будут введены в действие после 1986 г.

В 1979 г. провести демонстрацию действующих солнечных батарей стоимостью 5000 долл./кВт пиковой мощности.

В 1980 г. провести демонстрацию действующих систем концентраторов стоимостью 1000 долл./кВт пиковой мощности.

В 1980 г. показать возможность изготовления и продажи солнечных батарей стоимостью 500 долл./кВт пиковой мощности.

В 1980 г. провести демонстрацию батареи с к.п.д., равным 10%, на основе тонкопленочных солнечных элементов.

В 1980 г. определить уровень развития государственных и частных промышленных предприятий, выпускающих фотоэлектрические приборы, необходимый для выполнения в 1986 г. плана, намеченного программой.

В 1981 г. достигнуть общей установленной мощности промышленных предприятий, необходимой для годового выпуска солнечных батарей пиковой мощностью 500 МВт при рыночной стоимости менее 500 долл./кВт.

В 1986 г. установить фотоэлектрические системы с концентраторами излучения стоимостью 250 долл./кВт пиковой мощности.

В 1986 г. продемонстрировать возможность создания солнечных батарей на основе тонкопленочных элементов стоимостью 100 – 300 долл./кВт пиковой мощности.

В 1986 г. технически подготовить фотоэлектрическую промышленность к выполнению наиболее перспективной задачи, намеченной программой, связанной с получением в США в 2000 г. 3% необходимого количества электроэнергии с помощью ФСПЭ.

В 1986 г. принять план дальнейшего развития конкурентоспособных фотоэлектрических систем преобразования энергии для достижения в 2000 г., согласно принятой программе, годового объема продукции, равного 50 000 МВт пиковой мощности, при рыночной стоимости 1 кВт мощности, составляющей 100 – 300 долл.

### ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЛАНА

При выполнении плана расширения использования ФСПЭ функции — ERDA являются организация, координирование и руководство исследованиями и разработками, направленными на повышение удельных характеристик систем (отношение мощности к стоимости), уменьшение технико-экономического риска и неопределенностей, подтверждение расчетных рабочих характеристик солнечных энергетических систем и определение их экономической эффективности. Первоначальные широкие демонстрационные испытания ускорят признание фотоэлектрических систем общественностью и потребителями и стимулируют промышленное производство. Будет проводиться ряд исследований, связанных с выявлением факторов, влияющих на окружающую среду, на юридические и социальные проблемы и направленных на определение возможных способов устранения факторов, ограничивающих признание систем общественностью и потребителями. Будут проведены исследования, направленные на изучение вопросов о праве собственности на промышленное оборудование и действующие предприятия. Программы других федеральных организаций, связанные с программой ERDA, включают: 1) создание высокоэффективных кремниевых солнечных батарей космического назначения (NASA); 2) изучение состояния рынка и создание для федеральных и местных организаций определенных условий (таких, как снижение налогов), которые позволят стимулировать разработку и применение солнечных элементов (ФЭА).

Центром технической информации ERDA (Ок-Ридж, шт. Теннесси, 37830) будут собираться различные виды информации и данных по ФСПЭ, в том числе:

доклады, журнальные статьи, диссертации, монографии, описания проектов и другие рукописные материалы, относящиеся к исследованиям, разработкам и применениям фотоэлектрических систем преобразования энергии;

техническая информация по проектированию, сооружению и обслуживанию фотоэлектрических систем преобразования энергии;

общая информация об областях применения фотоэлектрических систем преобразования энергии, предназначенная для широкой общественности;

данные о физических и химических свойствах и возможном воздействии на окружающую среду материалов, необходимых для функционирования фотоэлектрических систем преобразования энергии и оборудования;

данные о технических характеристиках оборудования и приборов, использующих энергию, вырабатываемую фотоэлектрическими системами.

Кроме того, ERDA будет обеспечивать соответствующей информацией федеральные, государственные и местные правительственные организации и их подрядчиков, университеты, колледжи и другие учебные организации, а также частный сектор, включая общественные, промышленные, торговые организации и т.д.

## Исследования в области кремниевых фотоэлементов, проводимые во Франции

А. Дюран<sup>1)</sup>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе освещаются современное состояние и перспективы исследований и разработок, направленных на совершенствование и расширение применения солнечных фотоэлектрических батарей. Подробно обсуждаются результаты, достигнутые в мировой практике, и в особенности результаты и дальнейшие задачи исследований, проводимых во Франции в области кремниевых фотоэлементов. Экономические факторы, связанные с дальнейшим развитием технологии изготовления кремниевых элементов, рассматриваются кратко, так как они нашли отражение в большом количестве публикаций (см., в частности, обзоры Вольфа [1, 2]).

Считается, что до конца века будут последовательно решены две задачи:

а) в ближайшие 5 – 10 лет – снижение стоимости фотоэлектрических генераторов в 5 – 10 раз путем использования монокристаллического кремния, полученного с помощью классического метода Чохральского;

б) примерно к 1985 г. – внедрение в промышленность технологии, основанной на применении пленок (как кремния, так и других материалов, например соединений III – V и особенно II – VI групп периодической системы); такая технология постепенно заменит использование монокристаллов и сможет вызвать дополнительное снижение стоимости в 5 – 10 раз.

Следует отметить, что работы в области фотоэлектричества представляют собой один из редких примеров, когда, несмотря на колос-

<sup>1)</sup> H. Durand, Laboratoires, d'Electronique et de Physique appliquée dimeil – Brevannes (France).

сальные усилия, которые еще надо затратить на фундаментальные исследования, научные и технические объекты уже определены априорно из чисто экономических соображений. Действительно, возможность использования фотоэлектрического эффекта доказывать уже не приходится, а конечный результат, выраженный в киловатт-часах, всем понятен. Следовательно, использование Солнца для получения электроэнергии происходит при явном превосходстве экономики над наукой. Эти соображения не применимы к другому примеру, связанному с энергетикой, – контролируемому ядерному синтезу, где еще требуется доказать возможность самого процесса и где всякие экономические сравнения в настоящее время весьма преждевременны.

Следует отметить, что в результате работ в области фотоэлектричества не обязательно будут созданы солнечные батареи, способные конкурировать по стоимости выработанной энергии с крупными тепловыми или атомными станциями мощностью 1000 МВт и более. Необходимо учитывать выгоду использования децентрализованного использования солнечной энергии, что экономически оправдывает потребление электроэнергии от солнечных батарей наряду с распределенной или полураспределенной электроэнергией, под которой мы понимаем энергию, потребляемую в географических зонах со значительной плотностью населения. В западных странах, в которых средства производства чрезвычайно уплотнены, что в свою очередь приводит к определенным законам потребления энергии, данная проблема решается путем укрупнения энергетических систем до гигантских размеров. Развивающиеся страны, которым предстоит создать свой тип распределения электроэнергии, должны разработать новые оригинальные пути решения этой проблемы с использованием солнечной энергии.

### СТОИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ, В БЛИЖАЙШЕМ БУДУЩЕМ

Мощность кремниевых фотоэлектрических батарей для наземных применений к началу 1976 г. составила около 150 кВт/год. Примерное распределение этой мощности по странам приведено в табл. 1. Мощность наземных фотогенераторов впервые превзошла мощность космических (80 – 100 кВт/год) в 1975 г. Солнечные панели на базе других материалов (в основном CdS/Cu<sub>2</sub>S) в настоящее время практически не производятся. Можно полагать, что до 1980 г. возможности производства и продажи панелей будут увеличиваться ежегодно

Таблица 1

Оценка мощности солнечных батарей в конце 1975 г. — начале 1976 г. используемых для наземных применений в разных странах мира

Страны	Количество фирм	Пиковая мощность, кВт/год (примерно)
США	5 — 6	100
Франция	1	30
Япония	1 — 2	5 — 10
ФРГ	1	< 5 (?)
Другие страны	?	?
Итого		150

вдвое или втрое и мощность такой продукции, произведенной в 1980 г., достигнет по крайней мере 1 МВт/год, а общая мощность произведенных к тому времени во всем мире фотогенераторов будет равна 10 МВт.

Удельную стоимость электроэнергии, выработанной из солнечной энергии в 1975 г. можно принять в среднем равной 100 фр. на 1 Вт пиковой мощности для элементов, смонтированных в панели. Анализ предложений фирм, проведенный осенью 1975 г. Комитетом исследований и развития энергетики США и Национальным комитетом по аэронавтике и исследованию космического пространства США, показал, что стоимость энергии на 1 Вт пиковой мощности составляла 20 — 25 долл. [3] и 21 долл. для единичных заказов порядка десятка киловатт. Это согласуется со стоимостью заказов такого масштаба во Франции, а в Японии она в настоящее время значительно выше.

Следует, однако, учитывать условия определения ватта пиковой мощности, которые практически в разных случаях могут быть неодинаковыми. Обычно измерения проводятся для нормальной солнечной радиации интенсивностью 1 кВт/м<sup>2</sup>, но часто без точного установления соотношения между диффузной и прямой составляющими радиации, а также их спектрального состава и при температурах либо 0 °С, что приводит к завышению измеряемых характеристик, либо 25 °С, что более правильно. Остается неясным, является ли эта температура температурой окружающей среды, средней температурой панели или кремниевого фотоэлемента.

Для лучшего определения особенностей и унификации таких измерений в США (Национальное бюро стандартов), в Европе (Евро-

пейское экономическое сообщество) и в Японии (в рамках проекта "Sunshine") разработаны специальные программы. Усилия в этом направлении достойны поощрения (вспомним, что несколько лет назад даже наиболее квалифицированные исследователи часто оперировали в своих экономических расчетах стоимостью мощности энергии в 1 Вт отдельных солнечных элементов, которая намного ниже, чем стоимость такой же мощности в случае панели).

Наконец, экономические расчеты зачастую проводятся, исходя из сроков службы, выбранных произвольно. "Официальный" гарантийный срок, традиционно равный 6 месяцам или 1 году, имеет тенденцию к увеличению. При наземной эксплуатации не одного элемента, который очень надежен, а целой установки ожидаемый срок службы, обоснованный экономически, значительно выше. Этот срок определяется, например, качеством сварки элементов друг с другом и способом защиты панели от внешнего воздействия. Десять лет представляется нам как вполне разумный минимум срока службы, кстати, часто превышаемый на практике при тщательном изготовлении панелей. Срок 20 лет и даже значительно больше, безусловно, возможен. Хотя расчеты, которые приходится проводить при оценке стоимости киловатт-часа электроэнергии, получаемой от данного устройства, мало зависят от больших или меньших сроков службы, принятие единого подхода к экономическим расчетам, конечно, облегчило бы взаимопонимание между экспертами.

Опыт приобретенный в разных странах с различными климатическими условиями и схемами потребления электроэнергии, показывает, что в настоящее время фотоэлектрические устройства могут конкурировать с классическим двигателем внутреннего сгорания в пределах мощностей порядка 1 кВт или энергий примерно в несколько киловатт-часов в день, и, бесспорно, они вне конкуренции при более низкой мощности, что и объясняет существование в настоящее время многочисленных маломощных установок. Не подлежит сомнению, что разница в стоимости установок для радиорелейной линии, которая должна работать с надежностью 99,9% при любых климатических условиях, и насоса, который благодаря гидроаккумулятиванию мало чувствителен к периодам облачности средней продолжительности, может быть значительной (также, между прочим, как и для соответствующих дизелей).

В табл. 2 приведена экономическая оценка энергетической системы для подъема воды, сделанная на основе результатов исследований, недавно проведенных в этой области. При оценке учитывалась

Таблица 2

Экономическая оценка системы подъема воды на высоту 3 м для цепей ирригации (система обладает высоким к.п.д., электронной регупировкой и (или) устройством для регупирования дневного аккумулярования энергии буферной батареей)

Технические и экономические характеристики системы	1976 г.	1976 г.	1980 г.
Максимальная мощность солнечной батареи, кВт	1	10	100
Коэффициент нагрузки	0,2	0,2	0,2
Стоимость, тыс. фр.			
панелей	100	500	2000
мотопомпы	5	20	100
Регупировка батарей, кВт·ч	4	20	Нет
Стоимость, тыс. фр.			
регупировки батарей	2	8	<<
электронной регупировки	1	2	20
установки панелей	2	15	100
установка мотопомпы	5	10	30
резервуара (на 2 дня)	10	60	300
Всего капиталовложений, тыс. фр.	125	600	2550
Гидравлический к.п.д. η	0,5	0,6	0,65
Годовая производительность, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup>	45	550	6 · 10 <sup>3</sup>
Техническая амортизация (срок службы 20 лет) в год, тыс. фр.	6	30	130
Эксплуатационные расходы (оценка), тыс. фр.	2	5	10
Финансовая амортизация, %	6	10	6
тыс. фр.	4	6	20
Итого в год, тыс. фр.	12	14	55
Стоимость подъема 1 м <sup>3</sup> воды, 0,01 фр.	27	31	10
			12
			3,7
			4,5

возможность краткосрочного аккумулярования энергии (дневной ритм) с применением резервуара большой емкости, что позволяет обеспечивать высокое значение гидравлического к.п.д. установки [4]. Эти исследования, начатые в районе Парижа, продолжают в университете Дакара. Они показывают, что при условии двукратного последовательного снижения цен с 1976 по 1980 г. в два раза конкурентоспособность солнечных водоподъемников должна постепенно увеличиваться на основе повышения мощности от 1 до 10 кВт, а затем до 100 кВт. При этом учитываются указанные в таблице большие размеры 10% финансовой амортизации, весьма значительной для солнечных

систем, стоимость которых почти полностью определяется амортизацией начальных капитальных вложений. Для сравнения укажем, что стоимость 1 м<sup>3</sup> воды, поднятой малой дизельной установкой, сравнимой с солнечной установкой мощностью 10 кВт, в настоящее время в Египте равна 12 сантимам и, несомненно, намного выше в менее развитых районах. Есть сообщения, что для крупных установок мощностью порядка 100 кВт стоимость подъема 1 м<sup>3</sup> воды составляет 6 – 8 сантим. Таким образом, табл. 2 ясно показывает широкие возможности, связанные с внедрением солнечных фотоэлектрических устройств в этой области применения.

### ИСТОРИЯ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК ВО ФРАНЦИИ

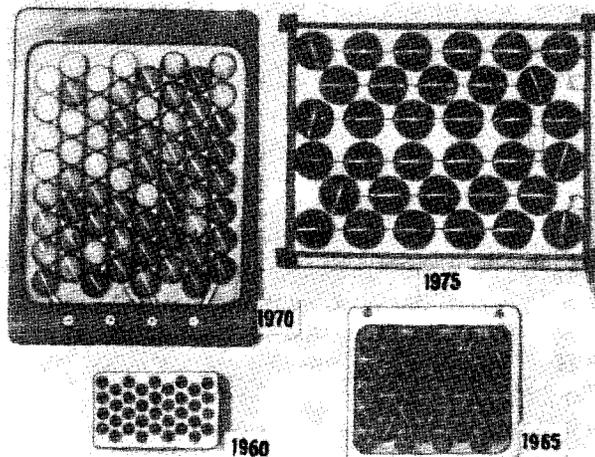
После приведенных общих соображений остановимся на французской программе работ в области фотоэлектричества. Строго говоря, такой единой программы, как программы ERDA в США или Sunshine в Японии, во Франции нет. В университетах и на промышленных предприятиях функционируют несколько программ весьма широко и свободно координируемых совещаниями, на которых государственный и частный секторы обмениваются идеями и опытом. На указанный свободный обмен следует обратить внимание, так как он встречается не часто в стране, хозяйство которой считается плановым, что, однако, неправильно, по крайней мере по отношению к рассматриваемой тематике.

Отсутствие единой программы во Франции, по-видимому, связано с тем, что здесь фотоэлектрические исследования и разработка даже для наземных применений начались давно [6, 7]: первые работы, основанные на использовании германия и кремния, проводились 20 лет назад. Они были начаты как в Национальном центре научных исследований (CNRS), так и в промышленности (Лаборатория электроники и прикладной физики (LEP)). После того как стали известны первые результаты, государственные органы Франции правильно оценили требования времени и сосредоточили основные усилия ученых в области космических исследований, причем Национальный центр космических исследований в течение примерно 10 лет осуществлял руководство выполнением программ использования кремния (в одной, а затем в двух фирмах), CdTe (с незначительными в то время достижениями) и CdS (в этом случае, несмотря на сложность задачи, были получены результаты международного значения, признанные весьма ценными).

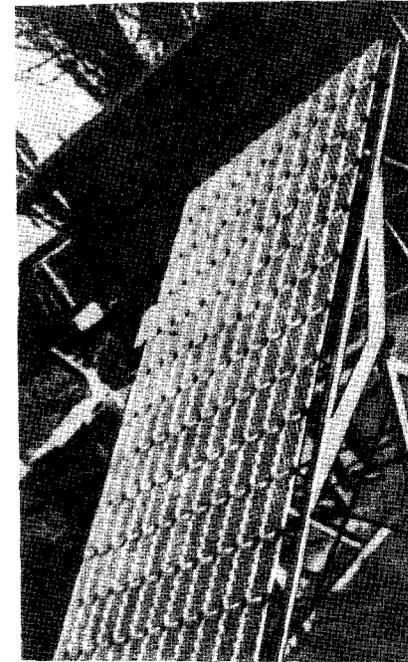
В течение этого периода промышленность при эпизодической поддержке комитетов гражданской и военной авиации (1965 – 1968 гг.)

продолжала проводить фотоэлектрические исследования для последующих наземных применений солнечной энергии. Затем последовали первые заказы французского телевидения, связанные с проведением экспериментов по использованию телевидения в школах стран Африки, говорящих на французском языке (1971 г.). Так как результаты этих длительных исследований описаны в работе [8], то здесь можно ограничиться лишь данными фиг. 1, показывающими эволюцию промышленных батарей: изготовленных в 1960 г. (элемент диаметром 19 мм), затем в 1965 г. (диаметром 25 мм), 1970 г. (диаметром 40 мм) и, наконец, в 1975 г. (диаметром 57 мм). К.п.д. фотоэлектрического преобразования увеличился при этом сначала с 8 до 10%, а затем и до 12%.

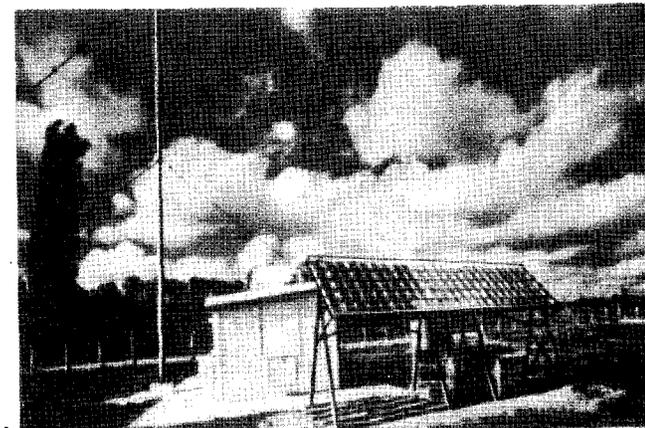
Модель 1960 г. послужила основой для установки мощностью 100 Вт, введенной в эксплуатацию в Чили (фиг.2) и успешно работающей более 15 лет. Эта установка потребовала изготовления около 5000 элементов при использовании практически только ручного труда. Пример фотоэлементов поколения 1965 г. показан на фиг. 3 (питание радиомаяка аэропорта "Бордо-Мериньяк", непрерывно действующее уже более 8 лет). Поколение фотоэлементов 1970 г. изготавливалось и продавалось в течение 5 лет (по мощности в среднем 1 кВт/год). Интересный пример такой установки показан на фиг. 4 (осветительное оборудование вокруг аэропорта в Медине). В конце 1975 г., мощность панелей, изготавливаемых в течение месяца, во Франции была



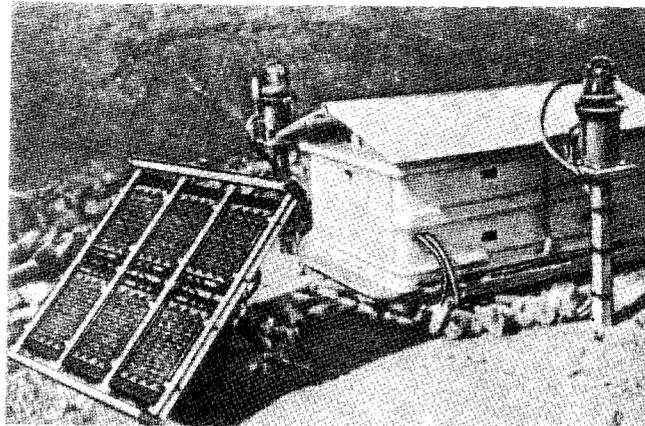
Фиг. 1. Последовательные поколения панелей, изготовленных фирмой RTC (La Radiotechnique Comelec).



Фиг. 2. Пример системы, в которой использованы панели поколения 1960 г. Станция мощностью 100 Вт, построенная в 1961 г. в Антофагасте, Чили.



Фиг. 3. Пример системы, в которой использованы панели поколения 1965 г. Станция мощностью 550 Вт, построенная в 1968 г. в Сен-Жиран и питающая навигационный маяк воздушного коридора Париж — Бордо.



Фиг. 4. Пример системы, в которой использованы панели покoпения 1970 г. Станция мощностью 50 Вт, построенная в 1973 г. и питающая светомаяки на горах вокруг аэропорта "Медин".

порядка 3 кВт, т.е. по мощности за 10 дней выпускалось столько же панелей, сколько ранее — за год. На последующие годы предусматривается непрерывное увеличение темпов производства батарей.

### СОВРЕМЕННАЯ ПРОГРАММА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК ВО ФРАНЦИИ

В начале 1971 г. государство впервые официально выделило 1 млн. фр. на проведение исследований и расширение применения фотоэлементов в наземных условиях. В то же время Национальный центр научных исследований, с одной стороны, и промышленные лаборатории, с другой стороны, усилили свою деятельность в этом направлении, а Национальный центр космических исследований перевел на эти цели часть средств, запланированных для выполнения космической программы. Можно считать, что уже начиная с 1975 г. на работу в области фотоэлектричества для наземных применений во Франции ежегодно расходовалось около 10 млн. фр.

В 1976 г. координационные органы, занимающиеся осуществлением французской части программ, разработанных к концу 1975 г. Европейским экономическим сообществом [9], сумели точнее определить техническое и финансовое содержание сотрудничества, существующего между государственным и частным финансированием, между государственной программой и усилиями промышленности. Программа

Таблица 3

Программа работ 1976 г. во Франции в области фотоэлектричества

Виды распределения средств (ассигновано ~20 млн. франков)	% от ассигнованных средств
Принятая технология с использованием кремния	25
Будущая технология с использованием кремния	15
Другие соединения:	
материалы	20
структуры	15
Герметизация, концентрация	15
Системы и электротехника	10
	<hr/> 100
Источники финансирования	
Основные кредиты государственных организаций (Национального центра научных исследований, Национального центра космических исследований)	30
Дополнительные кредиты государственных организаций (Национального центра научных исследований, Комиссариата по атомной энергии)	10
Государственные фонды субсидий программ	20
Французский вклад в программу Европейского экономического сообщества	10
Собственные средства предприятий	30
	<hr/> 100
Объекты исследований	
Краткосрочные (1977 — 1980 гг.): монокристаллический кремний, концентрация, системы	~45
Долгосрочные (позже 1980 г.): схемы с использованием пенек, прогрессивные системы	~55
	<hr/> 100

работ 1976 г. во Франции была рассчитана на 20 млн. фр., распределение которых весьма приблизительно показано в табл. 3. Столь перспективная область должна характеризоваться не только показателем абсолютного роста, но и темпом роста. По сравнению с 1975 г. число исследовательских работ, проведенных в Франции в 1976 г. возросло в 2 раза, однако это не отражает действительных национальных возможностей. Существует большое число исследователей в частном и особенно в государственном секторе, которые прямо или косвенно могли бы принять участие в исследованиях по фотоэлектрическому

преобразованию солнечной энергии: химики; металлурги, которым следовало бы сосредоточить свои усилия в области материаловедения, широко представленной в настоящее время в работах по преобразованию энергии; специалисты по физике твердого тела; механики, которые могли бы способствовать уменьшению стоимости батарей путем лучшего использования сырья и большей автоматизации процесса монтажа и герметизации элементов.

Большее число электротехников могли бы заниматься улучшением приспособления "капризной" солнечной энергии к бесчисленным возможным схемам потребления. Специалисты по системному анализу и экономисты могли бы изучить моделирование и операционный расчет этих схем и т.п.

### МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАБОТ, ПРЕДПРИНЯТЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Для того чтобы показать сложность проблемы сначала в плане технической оптимизации (так как многие этапы не прошли стадии экспериментов), а затем и экономического анализа (если это в наших силах), необходимо в первую очередь выделить основные *специфические* элементы технологии изготовления фотоэлектрической батареи - только применительно к кремнию.

- сырье;
- получение возможно более тонкого слоя полупроводника (но толще 50 мкм);
- структура фотоэлемента;
- токосъемный контакт;
- нанесение просветляющего антиотражающего покрытия;
- последовательное соединение элементов;
- оптимальное сочетание со схемой потребления электроэнергии;
- испытания и т.д.

Однако имеется такое количество вариантов технологии, что рассмотрение всех возможных процессов привело бы к огромному числу решений. Необходимо составить реальный перечень возможных решений, в который не входили бы многие заранее исключенные варианты, и для каждого из таких решений провести качественный анализ и оценку вероятности технического успеха.

В табл. 4 приведена последовательность операций на разных стадиях изготовления элементов и различные варианты технологии для трех конструкций фотоэлементов. В эту таблицу (которая в действи-

Упрощенная схема "Технической выполнимости" первичных операций изготовления солнечных кремниевых элементов

Операция	Выбор технологии	Узлы
I. Выбор сырья	Кремний высокой чистоты (1) Кремний для изготовления солнечных элементов (2) Кремний металлургический (3) Другие соединения кремния (4)	1, 2, 3, 4
II. Обработка материала	Выращивание по методу Чокрайслера Диаметр (1) 50 мм (2) 75 мм (3) 100 мм (4) 150 мм (5) 200 мм (6) Толщина (7) 0,3 мм (8) 0,2 мм (9) 0,15 мм (10)	1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 7a, 8a, 9a, 10a, 1b, 2b, 3b, 4b, 5b, 6b, 7b, 8b, 9b, 10b
	Ленты через фильеру (ГУСО) (1) лента с резкими краями (ЛЕР) (2) горизонтальная вытяжка (НУСТО СЕКАМ) (3)	1, 2, 3
	Поликристаллический слиток на подложке Фаза: паровая (1) жидкая (2) Подложка: графит (3) металлургический Si (4) луженый металл (5) другие (6)	1, 2, 3, 4, 5, 6
Прокитка (?)		1
III. Структура фотоэлемента	p-n - переход Фаза: паровая (1) жидкая (2) Твердая-твердая (3) Поверхностный (физический) (4) Нормальный (5)	1, 2, 3, 4, 5
	Гетероструктура или Шоттки (1) Тонкая металлическая (2) Прозрачная (окись) (3)	1, 2, 3
	Передняя панель: нормальная (1) черная (2)	1, 2
	Задняя панель: нормальная (1) с полем p+ (2)	1, 2
IV. Контакты	Передняя панель металлические: в вакууме (1) печатные (2) прозрачные: в вакууме (3) "Spray" (4)	1, 2, 3, 4, a, b
	Задняя панель Нанесение: в вакууме (1) печатные (2) не образующие слой p+ (3) образующие слой p+ (4) Подложка как таковая (5)	1, 2, 3, 4, 5, a, b, c
V. Антиотражательный слой	Не существует (1) классический (2) в вакууме (a) проводящий (3) химический (b) другие (4)	1, 2, 3, 4, a, b, c
<p>К операциям окончательной отделки</p> <p>VI. Сборка последовательных соединений</p> <p>VII. Герметизация и электрические выводы</p> <p>VIII. Испытания (детально в настоящей статье не рассматриваются)</p>		<p>Обозначения</p> <p>— Нормальные элементы 1975 г.</p> <p>- - - Принятые элементы будущей технологии (1980 г.?)</p> <p>--- Поликристаллические элементы на графитовой подложке (1980 г.)</p>

тельности может быть значительно более сложной, так как каждая операция может разделяться на несколько вариантов) не вошли операции окончательной отделки. При пользовании таблицей необходимо проследить три отдельных направления, соответствующие трем различным конструкциям (классический элемент 1975 г.; улучшенный, но все еще монокристаллический элемент 1980 г.; наконец, перспективный элемент на базе поликристаллического ориентированного кремния с использованием всех возможных усовершенствований, которые могут быть выполнены в более далеком будущем).

В действительности, конечно, технологические направления нельзя считать прямыми, так как в некоторых узлах появляются разветвления, обозначающие различные технологические варианты. Можно количественно охарактеризовать каждый этап, обозначенный в таблице, вводя в нее стоимость исследований и (или) их длительность, а также вероятность технического успеха и оценку реализуемой технологии. Таким образом, для каждого варианта решений получим вероятную стоимость мощности 1 Вт с учетом времени и стоимости соответствующих исследований. Хотя такая таблица и сложна, она все же полезна для определения перспективы использования различных технологических процессов и позволяет выбрать из них наиболее целесообразные. Это — особый вид диаграммы, прогнозирующей дальнейшее развитие технологии, в которую может не входить длительность осуществления программ, но обязательно включена общая экономичность процесса.

### СЫРЬЕ. КРЕМНИЙ

В табл. 5 приведено распределение стоимости последовательных этапов изготовления основного материала элемента диаметром 57 мм и цены при его коммерческой продаже на международном рынке. На фиг. 5 показана цена, рассчитанная на 1 см<sup>2</sup> площади поверхности для элементов разных диаметров и двух толщин, принятых в настоящее время в качестве стандартных (для получения мощности 1 Вт необходимо, чтобы площадь поверхности элемента составляла 80 — 85 см<sup>2</sup>).

Вольф [10] экстраполировал изменение стоимости производства значительных количеств монокристаллических дисков по мере увеличения их размеров и уменьшения толщины.

Оценка сделана для дисков, которые получают с помощью оборудования, выпускаемого фирмой "Лейбальд Хераус", в предположении,

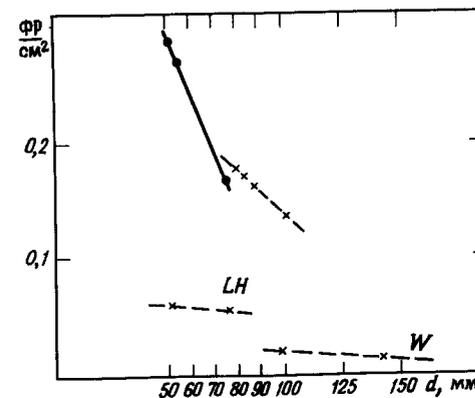
Таблица 5

Стоимость кремния (пересчитано на 1 кг содержания чистого кремния)

Основные этапы изготовления кремния для элемента и характеристики стоимости кремния	Цена фр./кг
Песок	0
Si металлургический (98%)	3
Si "чистый" (99,8%)	75
Si полупроводниковый (99,99999%)	350
Монокристалл, полученный по методу Чохральского	1100
Диски: толщиной 300 мкм	2700
или на 1 см <sup>2</sup>	0,2
Себестоимость на 1 Вт мощности элемента (11%)	18
Продажная цена на 1 Вт мощности элемента (150% себестоимости)	27

что используется основной материал меньшей стоимости.

В работе [10] ясно показано, что, кроме весьма существенных затрат, вызываемых потерями при резке, следует обратить особое внимание на стоимость тигля из плавленого кварца, в котором расплавляется кремний. Стоимость тигля составляет наибольшую статью расходов, за исключением самого сырья. Приняв стоимость последнего, равной 10 долл. за килограмм, что примерно в 7 раз меньше, чем в настоящее время, можно получить показанные на фиг. 5 значения удельной стоимости элемента, характерные для современно-



Фиг. 5. Стоимость единицы площади кремниевых фотоэлементов в зависимости от диаметра дисков кремния и их толщины.

го оборудования фирмы Leybold Heraeus (прямая *LH*); экстраполяция Вольфа — прямая *W*; в последнем случае цены снижаются примерно до 1,5 — 2 сант. на 1 см<sup>2</sup> поверхности диска диаметром  $\approx 195$  мм.

Следует отметить, что затраты на резку кристаллов не включены в приведенные значения стоимости, так как здесь имеется в виду резка монокристаллических слитков диаметром 15 — 20 см на диски толщиной 0,2 мм при ширине реза не более 0,12 мм. Маловероятно, чтобы такая операция когда-нибудь оказалась возможной. Но если бы любой из методов, разрабатываемых в настоящее время для нанесения на подложку слоя оптимальной толщины 50 — 100 мкм, был доведен до промышленной стадии даже при меньших значениях к.п.д. (скажем, 8%), то отпала бы необходимость в значительной части усилий, затрачиваемых на снижение стоимости поликристаллического кремния, предназначенного для выращивания монокристаллов, на увеличение диаметра слитков и уменьшение толщины дисков.

Например, если от современной технологии (600 мкм — суммарная толщина материала, имеющего стоимость 1100 фр./кг) удастся перейти к технологии, при которой используется в три раза более дешевый материал толщиной 60 мкм, то стоимость активного фотоэлектрического вещества уменьшится в 30 раз и станет ниже 1 сант. на 1 см<sup>2</sup> поверхности или 1 фр. на 1 Вт мощности. Тогда подложка, соединения и герметизация элементов станут определять стоимость панелей.

Отметим, что более низкий к.п.д. будет при этом частично компенсирован за счет более высокого коэффициента заполнения панелей, составленных из больших прямоугольных элементов.

Следовательно, успех в разработке одного технологического процесса может повлечь за собой снижение интенсивности проведения других работ, которые, однако, остаются полезными. До настоящего времени экономическая оптимизация технологии все еще производится на основе интуитивной оценки вероятности научно-технического успеха.

## КРАТКИЙ ОБЗОР РАБОТ, ПРОВОДИМЫХ ВО ФРАНЦИИ В ОБЛАСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

### МАТЕРИАЛЫ

Во Франции промышленные методы получения кремния высокой чистоты отсутствуют, хотя страна является крупным изготовителем металлургического кремния и силанов. Проводятся перспективные

исследования в области разработки новых методов получения кремния высокой чистоты. Некоторые работы, начатые в 1976 г., представляют интерес главным образом для лабораторий общей физической химии Национального центра научных исследований и имеют целью определить совместно с промышленными предприятиями допустимое содержание примесей в кремнии и попытаться выработать технические условия на кремний, пригодный для производства солнечных элементов. В промышленности (например, в Лаборатории электроники и прикладной физики радиотехнической фирмы *Comelec*) были успешно проведены существенные работы в области усовершенствования методики выращивания кремния для солнечных элементов по Чохральскому. Процессы, влияющие на качество получаемого кремния и ранее не поддававшиеся анализу, теперь успешно регулируются.

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Для развития этой технологии важное значение имеют упомянутые выше исследования и следующие разработки в промышленности: улучшение теневого (тыльного) контакта с одновременным получением  $p^+$ -слоя;

улучшение печатного контакта на теневой стороне и позднее на лицевой;

оценка влияния теневого (тыльного)  $p^+$ -слоя, оптического отражения от теневой (тыльной) поверхности элемента;

создание так называемых черных элементов;

Перенос этих новых технологических процессов на элементы больших диаметров (100 мм).

Одновременно проводятся и уже дали плодотворные результаты теоретические исследования по моделированию тонких элементов с улучшенными характеристиками (Лаборатория электроники и прикладной физики) и по расшифровке механизмов образования и переноса заряда в области перехода (исследования процессов ионного внедрения в Лаборатории электроники и прикладной физики).

### ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И ДИОДЫ ШОТТКИ

Некоторые университеты в тесном сотрудничестве с промышленными лабораториями исследуют структуры Шоттки (металлические и

прозрачные) на основе  $\text{In}_2\text{O}_3$  или  $\text{SnO}_2$ . В общем плане эти работы проводятся Лабораторией электроники и прикладной физики в Тулузе. В конкретной области получения таких структур на кремнии имеется координация между Лабораторией электроники и прикладной физики и Центром научных исследований в Страсбурге. Эти исследования полезны для создания кремниевых тонкослойных элементов, хотя гетероструктуры или диод Шоттки будут иметь, наверное, более низкий к.п.д. преобразования, чем фотоэлементы с  $p-n$ -переходом, полученные методом диффузии в паровой фазе, если только метод, основанный на диффузии в твердой фазе, который начинают исследовать в Лаборатории электроники и прикладной физики, не изменит это положение.

#### ПЛЕНКИ КРЕМНИЯ

В поисках перспективных процессов некоторые группы исследуют процессы получения пленок:

небольшая группа в Монпелье изучает основные закономерности осаждения кремния из сплавов при средних температурах;

Лаборатории электроники и прикладной физики в Гренобле исследуют осаждение кремния из паровой фазы на луженый металл, причем слой расплавленного олова способствует кристаллизации Si. В настоящее время производится оценка этого метода;

в Лаборатории электроники и прикладной физики значительные усилия (сначала с умеренным успехом) были затрачены на исследование процесса вытяжки кремния в виде лент. В настоящее время Лаборатория ориентируется на более перспективный метод и изучает осаждение жидкого кремния на графитовую подложку. Первые эксперименты, проведенные в прерывистом режиме, дали обнадеживающие результаты [11]. В дельнейшем предполагается перейти к непрерывному процессу с гибкой лентой большой длины.

Одновременно с этими процессами Национальный центр научных исследований предполагает изучить в своих лабораториях, занимающихся проблемами общей металлургии, межзеренные границы в кремнии.

#### СБОРКА. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ И НАДЕЖНОСТЬ

Эти вопросы входят главным образом в компетенцию промышленности. Однако существенный вклад в их решение могут внести некоторые государственные организации путем проведения испытаний и

оценки готовой продукции. Промышленность разработала обширную программу, направленную, с одной стороны, на автоматизацию сборки элементов, а с другой — на герметизацию модулей новым методом, увеличивающим срок их службы по меньшей мере до 10 — 20 лет с одновременным снижением стоимости. Национальный центр научных исследований предполагает осуществить измерения физических характеристик панелей в самых различных условиях и довести до конца разработку технических условий на контроль качества.

#### КОНЦЕНТРАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наряду с классическим максимальным снижением стоимости энергии концентрация солнечного излучения помогает получить большую мощность с одной и той же поверхности кремния за счет сравнительно низких дополнительных капиталовложений. Конечно, этот метод полностью обнаруживает свои достоинства лишь при особенно благоприятном солнечном климате. Возникает вопрос о сравнительной стоимости будущих плоских панелей и панелей с концентрацией излучения, которые сложны и, несомненно, менее надежны. Однако, так как для кремниевых солнечных элементов желательно поддерживать температуру на уровне, не превышающем 60 — 70 °С, концентрация будет невысокой, как правило, от 5 до 50; при этом точность фокусировки не имеет первостепенного значения. Это справедливо, если только не отдается предпочтение работе при более высокой температуре, для того чтобы обеспечить одновременно производство электроэнергии и обогрев помещений за счет нагреваемой жидкости (страны с солнечным климатом, как правило, нуждаются не в отоплении, а в кондиционировании, которое требует еще более высоких температур, неприемлемых для кремния). Как бы то ни было, умеренная концентрация излучения, осуществляемая просто при помощи зеркал с сезонным изменением положения, может быть, позволит в ближайшем будущем снизить стоимость производимого электричества. В связи с этим в промышленности начаты исследования по программе оптимизации кремниевых элементов с большой плотностью тока. Желательно, чтобы испытательные средства в этой области, имеющиеся в распоряжении Общего исследовательского центра Европейского экономического сообщества [12], могли быть использованы в качестве стенда для проверки свойств новых фотоэлементов.

### СИСТЕМЫ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

До настоящего времени, если не считать работы по использованию фотоэлектричества для питания электронных систем наземного применения или для маломощных систем подъема воды, было проведено лишь немного систематических исследований по фундаментальным вопросам производства электроэнергии в значительных масштабах. Национальный центр научных исследований и Национальный центр космических исследований совместно с Управлением электроснабжения Франции исследуют такие различные проблемы, как энергоснабжение изолированных зданий или экономика энергетики неэлектрифицированных поселков в развивающихся странах.

Предусматриваются и другие области применения кремниевых фотоэлементов: Национальный центр космических исследований [13] и промышленность реализовали или собираются реализовать энергоснабжение парусных судов в открытом море, питание походных фармацевтических холодильников и главным образом расширение применения солнечной энергии для подъема воды.

Последняя программа требует значительной дотации сверх указанных в табл. 3 фондов и предназначена для обеспечения возможности водоснабжения в Сахеле в рамках помощи, оказываемой Францией в борьбе против засухи в этом районе.

### ВЫВОДЫ

Целью настоящей работы, затрагивающей вопросы науки и экономики, фундаментальных исследований и внедрения, было показать, что несмотря на финансовую дотацию меньшего размера, чем в США или в Японии, совокупность мероприятий, предпринятых во Франции для развития кремниевых фотоэлементов, позволяет стране оставаться до сегодняшнего дня в авангарде исследований в этой области. Это стало возможным благодаря традиционному 20-летнему приоритету Франции в области фотоэлектричества. Однако ясно, что как в области исследований, так и в промышленности такое положение непрочное, так как оно обеспечивается в значительной мере использованием научного потенциала, накопленного в то время, когда другие страны почти не проводили работ по созданию фотоэлементов наземного применения. Несмотря на капризы Солнца, прямое преобразование остается великолепным способом использования этой даровой энергии. Следует обеспечить науку и промышленность Франции средствами и

рынками сбыта, позволяющими успешно противостоять интеллектуальной и коммерческой конкуренции, которая неизбежно возникает при ожидаемом развитии этого нового направления науки и техники.

### Литература

1. Wolf M., *Energy Conversion*, **14**, 49, 49 – 60 (1975).
2. Wolf M., *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 15, 984 – 999 (1975).
3. NASA, Release № 75.280, Oct. 21, 1975.
4. Durand H., Naaijer G.J., *Rev. Int. Heliotechn.*, **2**, 35 – 41 (1975).
5. Rodot M., частное сообщение.
6. Beauzée C., *Acta Electronica*, **5**, 3, 305 – 329 (1961).
7. Desvignes F., Beauzée C., *Acta Electronica*, **5**, 3, 379 – 392 (1961).
8. Dalibot B., *Communication présentée au Colloque sur L'Electricité Solaire*, Toulouse, 1976.
9. *Journal officiel des Communautés* (2 Septembre 1975).
10. Wolf M., Proc. 11th Photovoltaic Conf., Phoenix, Ariz., 1975, p. 306 – 314.
11. Brissot J.J., Belouet C., *Rev. Int. Heliotechn.*, **2**, 42 – 47 (1975).
12. Krebs K., *Communication présentée au Colloque sur L'Electricité Solaire*, Toulouse, 1976.

**Программа усовершенствования технологии изготовления наземных солнечных электрических генераторов, осуществляемая в ФРГ**

Х.-В. Шуман, Р. Бус<sup>1)</sup>

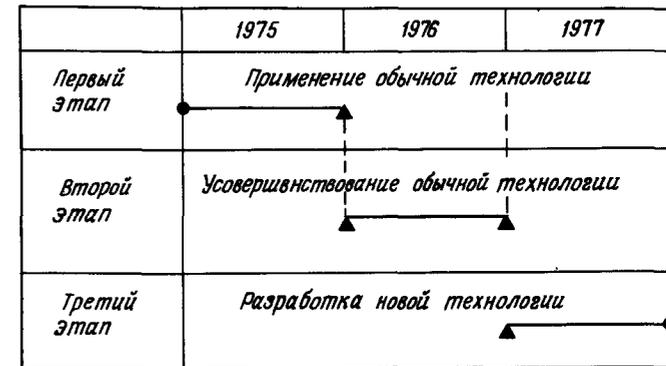
**ВВЕДЕНИЕ**

Основное направление, по которому ведется в ФРГ усовершенствование технологии изготовления солнечных элементов и солнечных батарей, определяется возможностью их использования для космических целей. Благодаря поддержке программ таких исследований правительством ФРГ развитие технологии достигло высокого уровня. Растущий интерес к солнечным батареям для наземного использования, а также интенсивные поиски перспективных источников энергии привели к разработке программы исследований в области создания солнечных батарей низкой стоимости. В связи с этим главной целью трехлетней программы, которая субсидировалась Министерством научных исследований и технологии ФРГ и выполнялась фирмой AEG-Telefunken, являлось определение возможностей создания дешевых солнечных электрических генераторов.

**ЦЕЛЬ ПРОГРАММЫ**

Программа, осуществление которой началось в 1975 г., состоит из трех этапов.

На первом этапе (фиг. 1) в основном применялась обычная технология, т.е. использовались материалы и технологические методы, применявшиеся в производстве солнечных батарей для работы в космосе, за исключением тех дорогостоящих усовершенствований, которые необходимы для создания приборов исключительно космического назначения.



Фиг. 1. Этапы программы создания солнечных наземных электрических генераторов.

Второй этап программы связан с усовершенствованием обычных технологических методов, что необходимо главным образом для значительного сокращения стоимости процесса изготовления солнечных элементов.

На третьем этапе предусматриваются исследование и применение новых материалов (в том числе и исходного материала для кремневых элементов) и технологических процессов (соединение элементов), а также внедрение новых технологических методов.

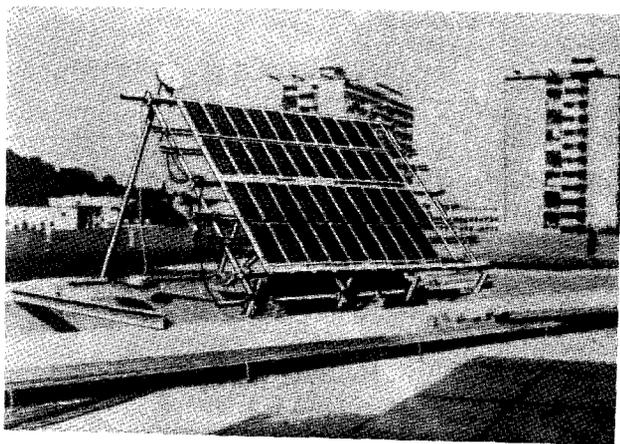
Изготовление солнечных элементов осуществляется фирмой AEG-Telefunken в г. Хейльбронне. Исходный материал для солнечных элементов поставляет фирма Wacker-Chemitronic, находящаяся в г. Бургхаузене. Фирма AEG-Telefunken в г. Веделе осуществляет сборку и защиту солнечных батарей, а также координирует работы по выполнению программы.

**СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Первый этап программы был завершен в 1976 г. Результатом исследований явилось создание двух типов промышленных модулей. Модули обоих типов состоят из 32 последовательно соединенных круглых солнечных элементов диаметром 50,8 мм, генерирующих при температуре 25 °С максимальную мощность ~7,5 Вт. Тридцать девять модулей, установленных в г. Штутгарте (фиг. 2), обеспечивают выходную мощность 300 Вт.

В настоящее время в Штутгартском университете проводятся длительные испытания этих модулей в реальных условиях. Материалы и

<sup>1)</sup> H.-W. Schuemann, R. Buhs, AEG - Telefunken, Wedel, RFA.



Фиг. 2. Группа модулей, укрепленных на большой раме и установленных на крыше зданий в г. Штутгарте.

технологические методы, применявшиеся для изготовления модулей, описаны в последующих разделах.

Основные особенности первого этапа работы по программе перечислены в табл. 1.

Таблица 1

Наземные солнечные электрические генераторы  
Первый этап — 1975 г.  
Применение обычной технологии

	Солнечный элемент
Исходный материал	Монокристаллический кремний
Удельное сопротивление исходного материала	2 Ом · см
Тип проводимости	<i>n</i> на <i>p</i>
Толщина	270 — 400 мкм
Диаметр	50,8 мм
Контактная система	Ti/Pd/Ag
Просветляющий слой	TiO <sub>x</sub>
К.п.д. (условия АМ0)	11 — 12%
	Генератор
Соединение элементов	Сварка за счет нагрева электрическим током
Материал соединений	Ag
Материал защитной оболочки	Стекло или пластик
Интервал рабочих температур	от —40 до +80 °С

### ИСХОДНЫЙ (БАЗОВЫЙ) МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исходным материалом для солнечных элементов является кремний, легированный бором (фирма-поставщик Wacker-Chemitronic). Кремний поставляется в виде пластин, которые получают резанием кремневых слитков диаметром 50,8 мм, выращенных методом зонной плавки. Пластины имеют толщину в пределах 270 — 400 мкм.

Удельное сопротивление исходного материала составляет 1 — 3 Ом · см.

### СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

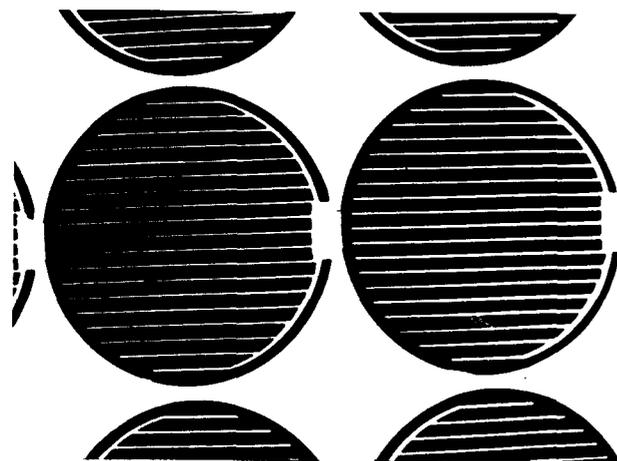
Технология изготовления солнечных элементов и кремниевых пластин существенно не отличалась от технологии изготовления элементов, предназначенных для работы в космосе. Солнечные элементы имеют, например, просветляющее покрытие из TiO<sub>x</sub> и контактную систему на основе Ti/Pd/Ag. При освещении внеатмосферным солнечным излучением (условия АМ0) к.п.д. элементов составляет 11 — 12%.

Первоначальное сокращение стоимости элементов для наземных применений было достигнуто путем исключения промежуточных контрольных операций, необходимых при изготовлении солнечных элементов космического применения. Дальнейшее уменьшение стоимости достигнуто за счет полного использования исходного материала в виде круглых пластин в отличие от ранее изготавливавшихся элементов для работы в космосе, когда для получения высокого коэффициента заполнения солнечной батареи элементам придавалась прямоугольная форма и в результате резки терялось большое количество материала.

### ТЕХНОЛОГИЯ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Восемь лет назад фирма AEG-Telefunken начала исследования возможности применения различных методов сварки для соединения солнечных элементов. Через 2 года было изготовлено стандартное оборудование для автоматического процесса сварки, которое применялось фирмой AEG-Telefunken для соединения солнечных элементов космического назначения [1]. Первые солнечные элементы для наземного применения соединялись также методом сварки, что было необходимо для выяснения вопроса, является ли этот метод приемлемым с экономической точки зрения.

Для солнечных элементов круглой формы было изготовлено специальное сварочное зажимное приспособление, предназначенное для установки элементов. В качестве материала для соединений применя-



Фиг. 3. Часть модуля.

лись полоски фольги толщиной 50 мкм из чистого серебра. Для того чтобы избежать потерь мощности, солнечные элементы в соответствии с их электрическими параметрами разделялись перед соединениями на группы. Осуществлялось только последовательное соединение элементов. На фиг. 3 показана часть модуля.

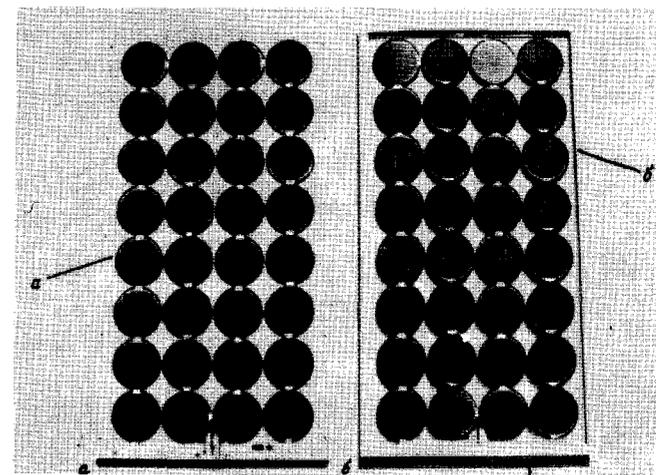
С точки зрения качества технологии применение этого метода представляется перспективным для создания наземных солнечных батарей. Однако с экономической точки зрения процесс оказывается низкопроизводительным и дорогостоящим.

В дальнейшем предполагается увеличить скорость процесса и проводить сварку нескольких соединений одновременно с использованием нескольких сварочных головок. Удастся ли таким образом снизить стоимость процесса, покажут анализ и сравнение с другими методами осуществления соединений.

#### ЗАЩИТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Основными направлениями исследований, проводимых на первом этапе, являлись изучение и усовершенствование материалов и технологических методов и определение возможности применения систем солнечных генераторов в наземных условиях.

Для всех рассматривавшихся конструкций защитной оболочки требуется оптически прозрачный материал, стойкий к воздействию ультрафиолетового излучения и внешней среды. В настоящее время



Фиг. 4. Два типа изготавливаемых модулей — с защитным покрытием из пластика (а) и стекла (б).

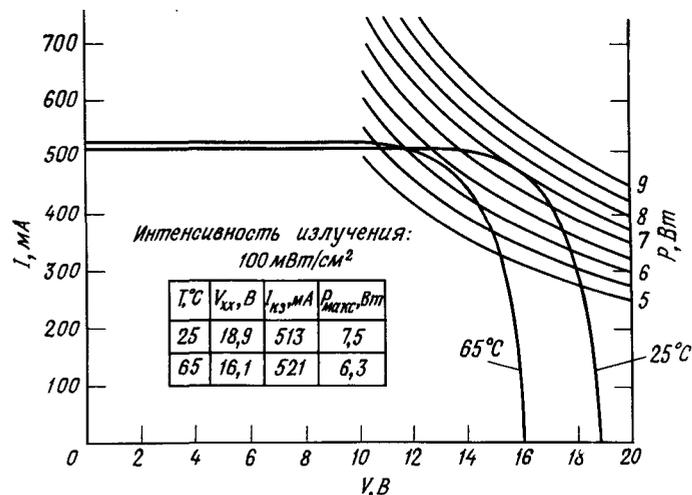
могут быть изготовлены два типа конструкций модулей (фиг. 4).

В конструкции типа *a* солнечные элементы помещаются между двумя тонкими слоями пластика, армированного стекловолокном. Выбор акрилового полимера в качестве материала для создания такой конструкции обусловлен тем, что он оказывается очень стойким к продолжительным атмосферным воздействиям.

В конструкции типа *b* солнечные элементы помещаются между двумя жестко соединенными стеклянными пластинами. Промежуточный слой эластичного материала отделяет солнечные элементы от защитных пластин. Такая система, помещенная в вакуум, обладает высокой устойчивостью к воздействию внешней среды.

Изготовленные модули обоих типов имеют одинаковые размеры (450 × 240 мм). Модули заключены в алюминиевые рамки. В модуле типа *b*, в котором используются стеклянные пластины, рамка обеспечивает защиту промежуточного слоя от влаги и кислорода. В модуле типа *a*, имеющем покрытие из пластика, рамка обеспечивает механическую жесткость. Обе конструкции модулей выдержали ускоренное испытание на циклическое изменение температуры в интервале от -40 до +80 °С без деградации и повреждений.

В настоящее время в Штутгартском университете проводятся длительные испытания модулей в реальных условиях. На фиг. 5 представлены вольт-амперные характеристики модуля.



Фиг. 5. Вольт-амперные характеристики наземных солнечных электрических генераторов (первый этап).

### НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В будущем, согласно выполняемой программе, основные усилия будут сосредоточены на дальнейшем исследовании внедряемых в производство материалов и технологических процессов и применении новых процессов и материалов. Сюда входят разработка и применение специальных базовых материалов и солнечных элементов большой площади (не менее 100 см<sup>2</sup>), которые будут создаваться с использованием усовершенствованных или новых методов проведения диффузии, создания просветляющих покрытий, контактов и т.п. Предполагается исключить все технологические операции, выполнение которых приводит к снижению к.п.д. Целью программы является получение в условиях АМО к.п.д., больших 8%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа усовершенствования наземных солнечных батарей, осуществляемая в настоящее время фирмой AEG-Telefunken, будет завершена в конце 1977 г.

Целью программы является выбор таких материалов и технологических процессов, которые позволят провести первоначальное значительное снижение стоимости производства солнечных батарей с учетом оптимального отношения выходной мощности к ее стоимости.

### Литература

1. Buhs R., Dürre H.J., Boller H.W., Welding of Solar Cells in Production Line, Proceedings of the 11, Photovoltaic Conference, Phoenix, May 1975.

## Содержание

Предисловие редакторов перевода.....	5
Предисловие.....	10
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (под редакцией Ю.Н. Малевского)	
СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ	
<b>С. Дей Оувнс.</b> Сравнение электростанций различных типов по занимаемой территории, материалоемкости и энергоотдаче (перевод С.И. Смирнова).....	11
<b>Ж. Мартинэ, Ж. Пёб.</b> Системы термодинамического преобразования солнечной энергии (перевод М.Б. Гарф)....	30
<b>Л.Л. Вант-Халл.</b> Солнечная станция башенного типа для выработки тепловой и электрической энергии (перевод С.И. Смирнова).....	39
<b>К. Фукуда, Х. Хигучи, К. Яанаги, А. Йосихара.</b> Исследование солнечной энергетической станции башенного типа (перевод С.И. Смирнова).....	54
<b>А.Б. Мейнел, Д.Б. Мак-Кенни, М.П. Мейнел.</b> Солнечная энергетическая станция модульного типа с неподвижным концентратором, работающая по циклу Брайтона (перевод С.И. Смирнова).....	66
<b>А.Ф. Ромеро.</b> Солнечная электростанция мощностью 10 МВт с ограниченным временем действия (перевод С.И. Смирнова).....	75
<b>Ж.-П. Жирардьё.</b> Солнечные энергетические станции малой мощности с плоскими коллекторами (перевод М.Б. Гарф).....	85

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ СТАНЦИЙ

<b>Б. Дессю, Ш. Мерсье, Ф. Фарабо, Ж. Абатию.</b> Взаимосвязь между полем гелиостатов и термодинамической системой солнечной станции башенного типа (перевод М.Б. Гарф)....	93
<b>Грассен, Тувенин, Веро, Роше.</b> Исследование системы гелиостатов для солнечной теплосиловой станции мощностью 10 МВт (перевод М.Б. Гарф) .....	114
<b>Ф. Курреж.</b> Оценка эффективной площади поля отражателей через относительное распределение установленных отражателей (перевод М.Б. Гарф).....	124
<b>Ж. Пери, Ф. Папини, Р. Паскетти.</b> Оптимальное сочетание селективности и концентрации в солнечных установках (перевод М.Б. Гарф).....	131
<b>Этьеван, Пёб, Виаларон, Аплар, Боннин, Фарабо.</b> Проблемы теплового аккумулирования (перевод М.Б. Гарф).....	138

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

<b>Ж.-Л. Бой-Маркотт, А. Потирон.</b> Оптимизация размеров основных элементов солнечной энергетической станции для обеспечения минимальной стоимости энергии (перевод М.Б. Гарф).....	154
<b>Б. Девен, Р. Пуаяр, Ж. Колом.</b> Влияние геометрии размещения коллекторов на технико-экономические показатели системы преобразования солнечной энергии постоянной мощности (перевод М.Б. Гарф).....	169
<b>Ж. Фурнье, Ж. Мейлан.</b> Влияние режимов потребления электроэнергии на выбор схемы солнечных энергетических станций (перевод М.Б. Гарф).....	181

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
(под редакцией М.М. Колтуна)

## КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

<b>М. Вольф.</b> Кремниевые солнечные элементы —(перевод И.П. Гавриловой).....	195
<b>Дж. Лори, К. Богус.</b> Характеристики высокоэффективных кремниевых солнечных элементов (перевод И.П. Гавриловой).....	232
<b>А.Д. Хейг.</b> Поликристаллические кремниевые солнечные элементы с печатным контактом в виде сетки с гексагональными ячейками (перевод И.П. Гавриловой).....	252

<b>Е. Фабр, Р. Тижбург.</b> Солнечные элементы с гетеропереходом $\text{In}_2\text{O}_3 (n^+) - \text{Si}(p)$ (перевод <i>М.Б. Гарф</i> ).....	261
<b>А. Мейленберг.</b> Рифленое защитное покрытие для солнечных элементов (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	267
ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ	
<b>А. Ротворф.</b> Теоретические возможности улучшения характеристик солнечных элементов на основе $\text{CdS} - \text{Cu}_2\text{S}$ (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	278
<b>Д.Ф. Джордан.</b> Успехи, достигнутые в создании дешевых солнечных элементов на основе $\text{CdS} - \text{Cu}_2\text{S}$ (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	296
<b>Г.-В. Шок, Г. Билгер, Г.Г. Хевиг, Ф. Пфистерер, В.Г. Блосс.</b> Технология изготовления солнечных элементов большой площади на основе $\text{Cu}_x\text{S} - \text{CdS}$ (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	313
<b>С. Мартинуци, Ф. Кабан-Брути, Ж. Жервэ, А. Мостеван.</b> Свойства пленок $\text{CdS}$ , полученных методом реактивного распыления (перевод <i>М.Б. Гарф</i> ).....	325
<b>С. Мартинуци, Ф. Кабан-Брути, Т. Кабо, А. Франко, Ж. Камнионцис.</b> Солнечные элементы на основе двухслойной системы $\text{CdS} - \text{CdZnS}$ с верхним слоем $\text{Cu}_2\text{S}$ (перевод <i>М.Б. Гарф</i> ).....	332
СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ	
<b>Л.М. Мэгид.</b> Программа работ по развитию фотоэлектрического метода преобразования энергии (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	343
<b>А. Дюран.</b> Исследования в области кремниевых фотоэлементов, проводимые во Франции (перевод <i>М.Б. Гарф</i> ).....	360
<b>Х.-В. Шуман, Р. Бус.</b> Программа усовершенствования технологии изготовления наземных солнечных электрических генераторов, осуществляемая в ФРГ (перевод <i>И.П. Гавриловой</i> ).....	380

### Солнечная энергетика

Научные редакторы *О.Н. Вишнякова, Т.П. Саложкова*

Мл. научный редактор *Л.Г. Краснюк*

Художник *В.Е. Карпов*

Художественный редактор *Л.Е. Безрученkoa*

Технические редакторы *Л.А. Тихомирова, М.И. Ван Энгеланд*

Ст. корректор *И.П. Максимова*

ИБ № 1706

Подписано к печати 24/1-79 г.

Бумага офс. № 1.  $60 \times 90 \frac{1}{8} = 12,25$  бум. л.

Печ. п. 24,50. Уч.-изд. л. 21,02. Изд. № 20/9695

Тираж 1500 экз. Цена 3 руб. 40 коп. Зак. 88.

Издательство "Мир"

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Тульская типография Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

г. Тула, проспект им. В.И. Ленина, 109