

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.472

**ПРОБЛЕМЫ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ****В. А. Ванке, В. М. Лопухин, В. Л. Саввин**

*Принципиальные схемы СКЭС.— Вопросы преобразования солнечной энергии в электрическую.— Трансляция энергии концентрированным пучком электромагнитных волн.— Экономические оценки.— Перспективы.*

«Под взвешенным производством я понимаю целый комплекс мероприятий. Сейчас над этими вопросами работают ученые и инженеры во многих странах. К таким вопросам относится создание космической энергетики.»

*В. П. Глушко<sup>1</sup>*

«... Я хочу напомнить, что электротехника, прежде чем прийти на службу энергетике, в прошлом веке занималась широко только вопросами электросвязи (телеграф, сигнализация и пр.). Вполне вероятно, что история повторится: теперь электроника используется главным образом для целей радиосвязи, но ее будущее лежит в решении крупнейших проблем энергетики.»

*П. Л. Капица<sup>2</sup>***ВВЕДЕНИЕ**

Энергетика в ее широком смысле всегда являлась основой для роста материальной культуры человеческого общества. Последние столетия характеризовались увеличением выработки энергии в основном за счет природных топливных запасов, прежде всего — угля, нефти, газа.

Ограниченность природных ресурсов, их потенциальная ценность в качестве сырья для технологических процессов будущего со всей очевидностью выдвигают задачу создания и использования новых источников энергии<sup>3-5</sup>.

Развитие энергетики в широких масштабах самым существенным образом связано с проблемой защиты экологической среды, в том числе от теплового загрязнения в глобальном объеме<sup>5</sup>. Не исключено, что в будущем для решения этой «сопутствующей» задачи Человечеству придется осуществлять гигантские по масштабам проекты<sup>6</sup>.

Интерес к проблеме использования солнечной энергии, неистощимой и «чистой» по своей природе, в последнее время существенно возрос<sup>5-17</sup>. В таких развитых капиталистических странах, как США, ФРГ и Япония, эта проблема введена в ранг государственных программ.

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1977 г.

Целесообразность использования солнечной энергии для электро-, водо- и теплоснабжения автономных потребителей не вызывает сомнений, и это направление имеет широкие перспективы<sup>3, 4, 18-20</sup>.

Трудности использования солнечной энергии в больших масштабах связаны прежде всего с изменчивым характером и низкой средней плотностью потока солнечной радиации на поверхности Земли (порядка  $100 \text{ вт/м}^2$ )<sup>4</sup>.

Существующий уровень космической техники, стремительные темпы ее развития позволяют уже сегодня анализировать возможности индустриального использования Космоса<sup>1, 16, 21-28</sup>, в том числе с целью размещения солнечных коллекторов непосредственно в космическом пространстве, где поток солнечной радиации стабилен и имеет существенно более высокую плотность ( $\sim 1,4 \text{ кВт/м}^2$ ).

Хотя технико-экономические показатели солнечных космических электростанций (СКЭС) \*) пока могут прогнозироваться лишь с определенной долей надежности, целесообразность и перспективность дальнейшей проработки комплекса этих проблем не вызывают сомнения.

### ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СКЭС

Первый проект, предусматривающий крупномасштабное использование космической солнечной радиации с последующим преобразованием ее в электрическую энергию, был предложен и разработан В. П. Глушко еще в 1928—1929 гг. для питания двигателей Гелиоракетоплана<sup>26</sup>.

Идея СКЭС сформулирована Глейзером в 1968 г.<sup>27</sup> Разработка ее в дальнейшем была продолжена и расширена \*\*).

Суть идеи сводилась к следующему. На геосинхронной орбите ( $\sim 35800 \text{ км}$ ) размещаются крупные панели солнечных батарей, вырабатывающие электроэнергию в виде постоянного тока. Последняя используется для питания системы мощных СВЧ генераторов, конструктивно

\*) В зарубежной литературе преимущественно используется термин Satellite Solar Power Station (SSPS), либо Powersat.

\*\*) В 1970 г. вышел специализированный выпуск «Journal of Microwave Power»<sup>28</sup>, посвященный проблемам СКЭС. В 1971 г. Глейзером получен патент на эту идею<sup>29</sup>. Годом позже образована исследовательская группа с участием четырех фирм — Arthur D. Little, Inc., Grumman Aerospace Corp., Raytheon Co, Textron, Inc.

В 1973 г. Конгресс США выделил около 3 млрд. долл. и поручил НАСА (NASA, National Aeronautics and Space Administration) вести работы по проблеме использования солнечной энергии, подчеркнув необходимость проработки проектов СКЭС<sup>30</sup>. С этого времени координация работ осуществлялась через Научно-исследовательский центр им. Льюиса НАСА (NASA Lewis Research Center).

В 1974—1975 гг. фирма «Боинг» (Boeing Aerospace Co.) опубликовала свой собственный проект СКЭС<sup>31-33</sup>.

В середине 1975 г. начала пятилетия программа наземных экспериментальных работ, осуществляемая Лабораторией реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory) и Научно-исследовательским центром им. Льюиса, по проблемам трансляции энергии<sup>34</sup>.

В начале 1976 г. Вильям Ленуар (William B. Lenoir, NASA Johnson Space Center), американский ученый-космонавт, возглавляющий тему СКЭС по линии НАСА, представил в подкомитет Сената (Senate Aerospace Technology and National Needs Subcommittee) программу работ из нескольких этапов, которая предусматривает экспериментальную отработку трансляции энергии из космоса на Землю в середине — конце 80-х годов<sup>35</sup>, коммерческие образцы СКЭС — к 1995—2000 гг.<sup>24, 25</sup>.

В 1976 г. достигнуто соглашение, что Управление по исследованиям и разработкам в области энергетики (ERDA, Energy Research and Development Agency) возглавит работы по этой специфической энергетической программе; НАСА в свою очередь продолжит основные темы, имеющие непосредственное отношение к СКЭС<sup>36, 37</sup>.

В Европе проекты СКЭС анализировались фирмой «Дорнье» (Dornier) и концерном «Телефункен» (AEG — Telefunken)<sup>38, 90</sup>.

размещенных на высокоэффективной передающей антенне, транслирующей энергию на Землю направленным пучком электромагнитных волн (рис. 1). Наземное приемное устройство преобразует эту энергию в энергию постоянного или переменного тока низкой частоты и передает ее потребителям.

СКЭС, расположенная на геосинхронной орбите в экваториальной плоскости Земли, окажется неподвижной относительно земной поверхности, а благодаря  $23,5^\circ$ -ному наклону экваториальной плоскости к плоскости

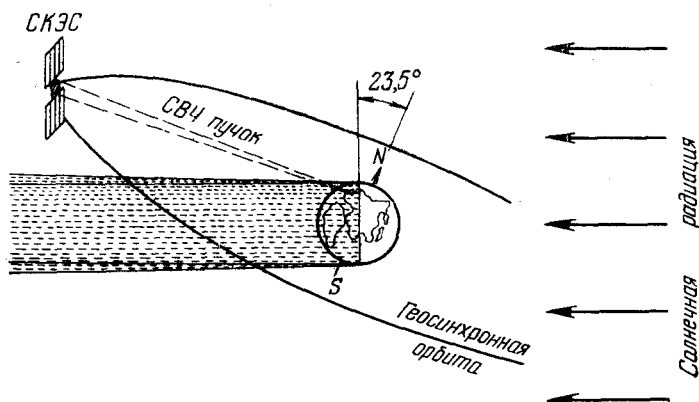


Рис. 1. СКЭС на геосинхронной орбите.

эклиптики будет подвергаться освещению солнечными лучами в течение  $>99\%$  времени года. Земная тень нарушает работу СКЭС только временно — в течение 24 суток до и после дней весеннего и осеннего равноденствия с максимальной длительностью  $\sim 1,2$  часа. Эти отрезки времени могут точно предсказываться, и, кроме того, они близки к полнотчи на приемном конце, когда потребность в энергии здесь обычно снижается.

Интенсивность солнечной радиации на геосинхронной орбите практически постоянна и составляет величину  $1,395 \text{ квт/м}^2 \pm 2\%$ <sup>39</sup>, что в 7,5—15 раз выше, чем на поверхности Земли (табл. I).

Таблица I

	Поверхность Земли	Геосинхронная орбита	Относительное значение (Земля/орбита)
Интенсивность солнечной радиации, $\text{квт/м}^2$	1,1	1,4	4/5
Среднее время, в течение которого может быть использована радиация, час	8	24	1/3
Процент безоблачного неба	50	100	1/2
Косинус угла падения	0,5 (1)	1	1/2 (1)
Результирующее значение 1/15 (1/7,5)			

Таким образом, на геосинхронной орбите эффективность использования дорогостоящих солнечных батарей оказывается примерно на порядок выше. При их наземном применении потребовались бы дополнительно буферные аккумулирующие устройства, которые в свою очередь увеличивают стоимость и снижают надежность энергосистемы в целом.

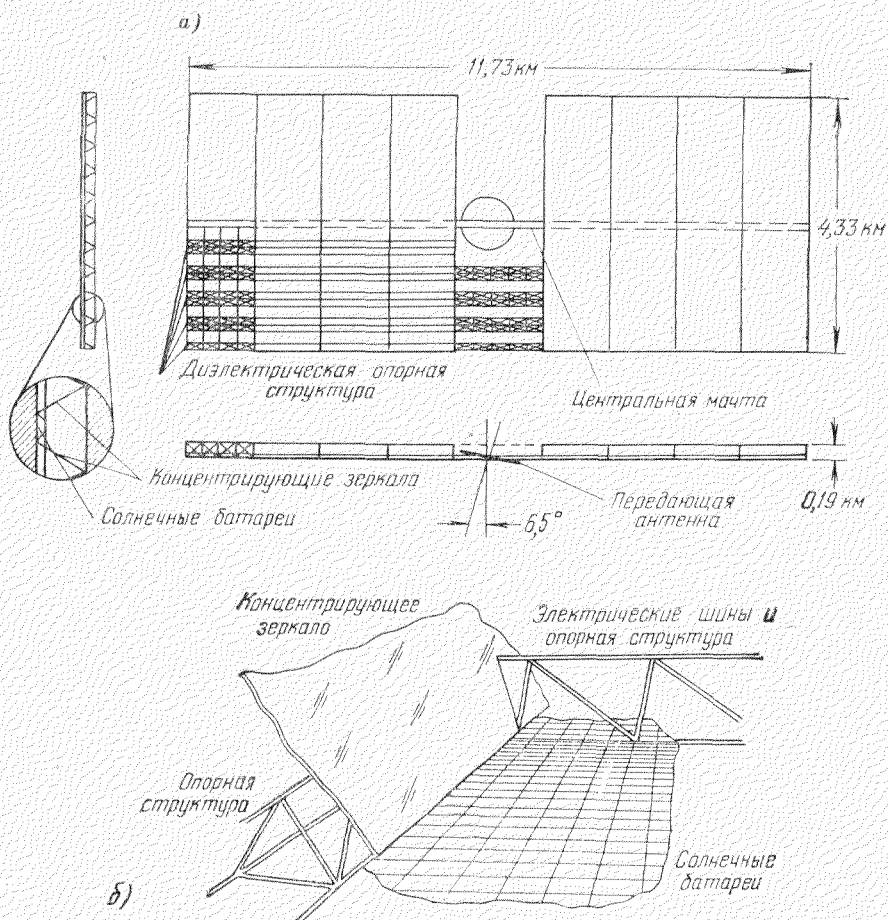
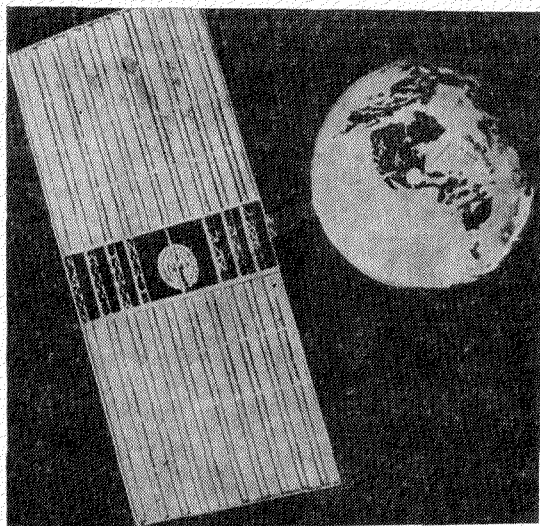


Рис. 2. а) Общий вид СКЭС с фотоэлектрическим преобразованием солнечной энергии. (Arthur D. Little, Inc., Grumman Aerospace Corp.) б) схема СКЭС с фотоэлектрическим преобразованием солнечной энергии (Arthur D. Little, Inc., Grumman Aerospace Corp.)

СКЭС, оперирующая в условиях невесомости и глубокого вакуума, может представлять собой сравнительно большие инженерные сооружения с минимальными затратами материалов, так как наряду с невесомостью здесь отсутствуют такие факторы, как ветер, влага, пыль, которые

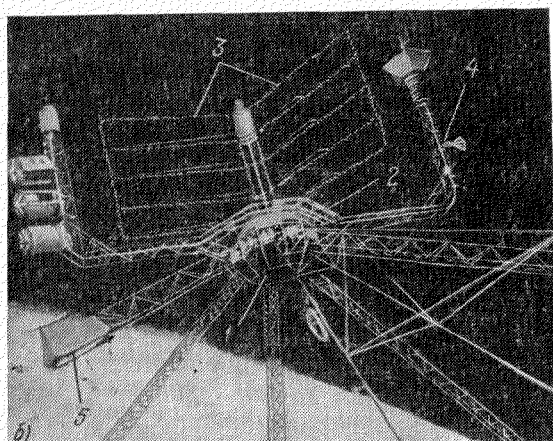
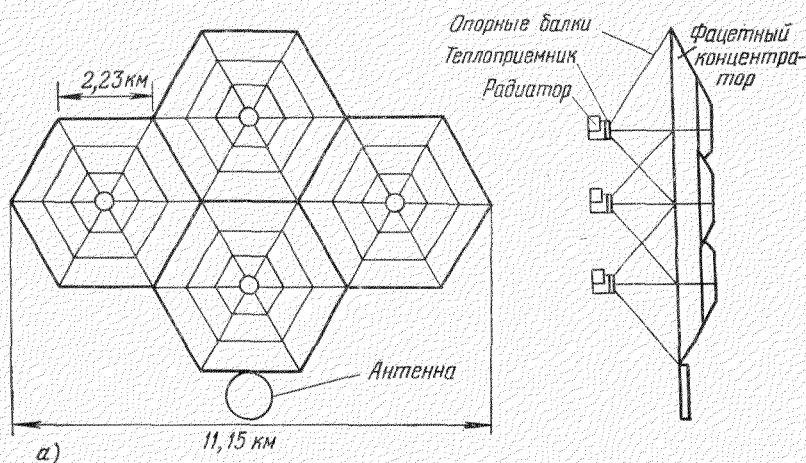


Рис. 3. а) Схема СКЭС, использующая турботепловое преобразование солнечной энергии в электрическую (Boeing Aerospace Co); б) турботепловой вариант СКЭС в процессе сборки на околоземной орбите.

1 — теплоприемник, 2 — отсек с турбогенераторами, 3 — панели радиатора, 4 — причал и космическое транспортное средство, доставляющее узлы СКЭС, 5 — монтаж одной из опорных балок концентратора (Boeing Aerospace Co.).

в наземных условиях заметно усложняют конструкцию и увеличивают стоимость солнечных энергосистем.

Давление солнечной радиации, «отдача» за счет СВЧ излучения, магнитные силы и влияние флуктуаций гравитационного поля Земли потребуют дополнительных силовых установок (например, ионных двигателей с общей тягой  $\sim 45$  н) для фиксации СКЭС в заданной точке геосинхронной орбиты.

Экономически оправданные уровни мощности СКЭС лежат в пределах 2—20 млн. квт<sup>24, 40</sup>.

Базовый вариант конструкции СКЭС (Arthur G. Little, Inc., Grumman Aerospace Corp.), использованный как основа для технико-экономического анализа, показан на рис. 2.

Две панели солнечных батарей, общей площадью около  $45 \text{ км}^2$  смонтированы на опорной диэлектрической раме и вырабатывают по 4 млн. *квт* электроэнергии каждая (40 *кв*, 100 000 *а*). С учетом результирующего к. п. д. это должно дать 5 млн. *квт* электроэнергии земным потребителям.

Отражающие зеркала обеспечивают приблизительно удвоение концентрации светового потока и выполнены из специальной тонкой пленки, отражающей ту часть спектра, которая наиболее пригодна для фотобатарей. Это снижает нагрев солнечных элементов и увеличивает их к. п. д.

Передающая антенна диаметром 1 *км* представляет собой активную фазированную решетку и посылает мощный когерентный пучок электромагнитных волн ( $f = 2450\text{—}3000 \text{ Мгц}$ ,  $\lambda \approx 10\text{—}12 \text{ см}$ ) на приемную антенную систему, которая расположена на поверхности Земли и имеет диаметр около 7 *км*.

Вариант СКЭС, основанный на использовании солнечных батарей, предполагает существенное технологическое усовершенствование последних в будущем, прежде всего с точки зрения снижения стоимости и веса.

Основываясь на существующих инженерных возможностях, параллельно разработан другой вариант СКЭС (Boeing Aerospace Co.)<sup>31-33</sup>, использующий для преобразования энергии солнечные концентраторы в сочетании с турботепловыми машинами, функционирующими по замкнутому циклу Брайтона. Конструкция имеет несколько независимых модулей (рис. 3) и рассчитана на выработку 13,5 млн. *квт* электроэнергии, что реально должно соответствовать 10 млн. *квт* для наземных потребителей.

Шесть таких станций могут удовлетворить потребности Японии в электроэнергии, 30—40 — США<sup>33</sup>.

СКЭС могут выполнять также функции централизованных источников энергии для космических лабораторий и промышленных комплексов будущего.

Вес конструкций первого варианта СКЭС оценивается в 10—12 тыс. *т*, второго — 60—70 тыс. *т*.

Оба варианта СКЭС рассчитаны на 30-летний период эксплуатации и способны производить электроэнергию по цене 2,5 цента за киловатт-час.

Предполагаемый срок реализации — 90-е годы текущего столетия (эксперименты в космосе к 1985 г., прототип СКЭС — к 1992 г., коммерческие экземпляры в 1997 г.<sup>24</sup>).

## ВОПРОСЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Известны различные способы преобразования солнечной энергии в электрическую — фотоэлектрический, термоэлектрический, термоэмиссионный, турботепловой и т. д.

Только один из них — фотоэлектрический — осуществляет прямое преобразование энергии, в остальных неизбежно присутствует промежуточная стадия преобразования в тепло.

1. Фотоэлектрические батареи основаны на поглощении квантов света в области *p-n*-перехода полупроводниковых структур, изготовляемых преимущественно на основе кремния — одного из самых распространенных элементов в природе.

Дискретность энергетического перехода в полупроводниках и сравнительно широкий спектр солнечного излучения, облучающего этот переход, приводит к тому, что часть фотонов с энергией меньше энергии перехода вообще не участвует в процессе образования электронно-дырочных пар. Фотоны же, обладающие более высокой энергией, бесполезно расходуют ее часть на тепловой нагрев полупроводника \*). Уже этот простейший механизм существенно ограничивает к. п. д., который для кремниевых фотоэлементов с учетом ряда дополнительных факторов имеет теоретическую границу порядка 22—26% <sup>7, 41</sup>.

Реальные значения к. п. д. кремниевых фотопреобразователей обычно лежат в пределах 10—16%.

Фотоэлементы создавались в основном на основе монокристаллических пластинок кремния размером несколько см<sup>2</sup>, которые объединялись в батареи с соответствующей коммутацией для получения необходимых величин напряжения и тока <sup>41</sup>.

Американский «Авангард-1» и Третий советский ИСЗ (соответственно март и май 1958 г.) были первыми космическими аппаратами, снабженными солнечными батареями. Если мощность, которую получал от фотопреобразователей «Авангард-1», была всего 0,1 *вт*, то современные космические станции могут располагать уровнями мощности порядка 20—25 *квт* <sup>15</sup>.

Солнечные батареи возникли как один из самых дорогих источников энергии — более ста тысяч долларов за киловатт. Стабилизации этого высокого уровня цен в известной мере способствовала ограниченная сфера применения солнечных батарей — преимущественно в космической технике, где их стоимость составляла тем не менее лишь незначительную долю стоимости всего конкретного космического проекта в целом.

Широкая программа наземного бытового и промышленного использования солнечной энергии <sup>7, 18, 20, 42, 43</sup>, осуществляемая в последнее время, коренным образом изменила постановку этой проблемы — себестоимость электроэнергии здесь, по-существу, полностью определяет рентабельность использования солнечных батарей.

Программа развития фотоэлектрических источников энергии, осуществляемая Управлением по исследованиям и разработкам в области энергетики США (ERDA), предусматривает снижение их цен до 250—500 долларов за киловатт уже к 1985 г. <sup>42, 43</sup>.

Для крупномасштабных космических применений не менее важна проблема снижения веса солнечных батарей на единицу вырабатываемой мощности. Большие перспективы в этом направлении имеет развитие технологии тонкопленочных батарей на основе кремния, арсенида галлия либо сульфида кадмия <sup>19, 41-44</sup>, позволяющей в десятки раз снизить вес и себестоимость фотопреобразующих устройств.

Для СКЭС Глейзер планирует использовать солнечные батареи с удельным весом ~0,9 *кг/квт*, толщиной 50 *мкм* и к. п. д. 18%, в виде тонкопленочной конструкции на основе арсенида галлия (рис. 4).

Солнечные фотопреобразователи, функционирующие в околоземном космическом пространстве, испытывают старение за счет метеорной эрозии, космической радиации, воздействия протонов и электронов в области радиационных поясов Земли <sup>19, 41</sup>.

Существующие спутники связи проектируются на 10-летний срок действия («Intelsat-IV»), поэтому в перспективе для СКЭС планируется 30-летний период эксплуатации <sup>40</sup>. При этом уменьшение мощности,

\*) В принципе возможна многокаскадная структура фотоэлектрических генераторов, когда один и тот же световой поток пронизывает последовательно *p-n*-переходы полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

вырабатываемой солнечными батареями (около 6% за 5 лет), должно компенсироваться добавлением небольшого количества панелей свежих батарей.

Дальнейшее совершенствование и снижение веса конструкций СКЭС может быть достигнуто за счет увеличения степени концентрации светового потока, попадающего на фотопреобразующие устройства. Концентраторы, предназначенные для работы в космических условиях, могут быть выполнены в виде легких, геометрически точных и механически прочных конструкций<sup>45, 46</sup>. С другой стороны, под руководством Н. С. Лидоренко уже разработан новый тип фотопреобразующих устройств, представляющих собой систему параллельно или последовательно скоммутированных матриц фотобатарей с рабочей поверхностью, перпендикулярной плоскости переходов и способных работать при высокой степени концентрации световых пучков<sup>47-50</sup>.

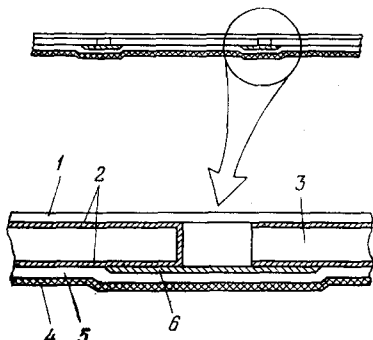


Рис. 4. Схема тонкопленочной солнечной батареи<sup>54</sup>.

1 — защитный пластик, 25 мкм; 2 — металл, 6 мкм; 3 — солнечная батарея; 4 — картонно-пластиковая основа, 13 мкм; 5 — защитный пластик, 13 мкм; 6 — внутреннее металлическое соединение, 25 мкм.

способных функционировать при равновесной температуре 300 °С. В перспективе — увеличение к. п. д. этих элементов до 35—40%<sup>53</sup>.

2. Турботепловой способ преобразования солнечной энергии сложнее фотоэлектрического, но он хорошо изучен и здесь накоплен несравненно больший технический опыт благодаря его широкому применению в наземной энергетике.

Известно, что к. п. д. тепловых машин не превышает к. п. д. цикла Карно  $(T_1 - T_2)/T_1$  ( $T_1$ ,  $T_2$  — соответственно температура нагревателя и холодильника в единицах шкалы Кельвина). При этом верхнее значение температуры ограничено прочностью материалов теплоприемника и турбины, нижнее связано с техническими возможностями холодильника. Реальные значения к. п. д. составляют, как правило, 55—70% к. п. д. цикла Карно и по величине обычно не превышают 40—45%.

В турботепловом варианте СКЭС (см. рис. 3) важным звеном выступают концентраторы солнечного излучения, позволяющие собрать с большой площади и сконцентрировать световой поток на теплоприемнике тепловой машины. Идеальный концентратор в виде параболоида вращения при необходимой точности поверхности и столь гигантских размерах оказался бы слишком массивным, обладая весом в пересчете на единицу поверхности порядка 1,5—3 кг/м<sup>2</sup>. Приемлемое техническое решение достигается использованием фацетного принципа образования параболоида. Каждая фацета выполнена на основе тонкой пленки с алюминиевым покрытием и имеет простую форму, что позволяет снизить показатель веса до 0,15—0,25 кг/м<sup>2,32</sup>. Отражающее алюминиевое покрытие может периодически реставрироваться автоматизированным процессом вакуумного напыления алюминия непосредственно в процессе эксплуатации системы.

В качестве тепловой машины Вудкок и Грегори<sup>31-33</sup> использовали совокупность турбогенераторов, функционирующих по замкнутому цик-



лу Брайтона (рис. 5) с рабочим веществом в виде смеси двух инертных газов — аргона и ксенона. Прототип такого генератора мощностью

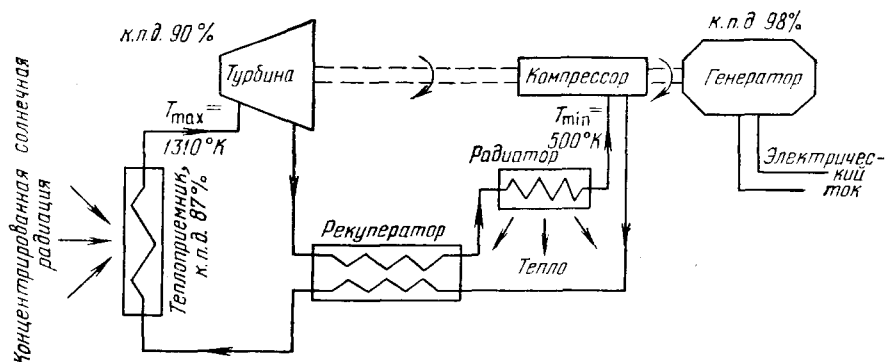


Рис. 5. Схема турботепловой машины с замкнутым циклом Брайтона.

2—15 *квт*, предназначенный для работы в космических условиях в комбинации с ядерным реактором, был построен и испытан<sup>55</sup>.

Каждый отдельный генератор в схеме СКЭС рассчитан на 500 *Мвт* и имеет вес на единицу мощности  $\sim 2$  *кг/квт*. Это меньше, чем соответствующий показатель для существующих солнечных батарей ( $\geq 4$  *кг/квт*), но превышает цифру, планируемую для них в будущем (0,8—1 *кг/квт*).

Результирующий к. п. д. формируется из к. п. д. отдельных подсистем<sup>32</sup> (табл. II).

Эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую здесь оказывается, таким образом, приблизительно той же, что и у фотоэлектрических систем.

Наличие вращающихся узлов и деталей, высокий удельный состав наиболее слабого звена — лопаток турбин, вносят элемент ненадежности в турботепловой вариант.

Бóльшие перспективы могут быть связаны с использованием МГД-генераторов, осуществляющих прямое преобразование тепловой энергии в электрическую с к. п. д. до 55—60%<sup>3, 56</sup>.

Проработка МГД-систем с замкнутым циклом, предназначенных для работы в условиях космоса, позволит вскрыть дополнительные возможности для совершенствования космических энергосистем.

Таблица II

	К. п. д.
Генератор	0,98
Тепловая машина	0,37
Теплоприемник	0,87
Концентратор	0,69
Фацеты	0,84
Результирующее значение	0,183

## ТРАНСЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Идея «передачи энергии без проводов» связана с именем выдающегося электротехника своего времени Никола Тесла. Высказанная на заре XX века, она более чем на столетия опережала необходимый уровень развития техники.

Становление радиолокации в годы Второй мировой войны стимулировало интенсивные научно-исследовательские и технические работы по освоению диапазона сверхвысоких частот (СВЧ). Совершенствовались методы генерации, методы приема и методы когерентного излучения

направленных пучков сантиметровых волн. Видимо, первым, кто отметил и количественно оценил реальную возможность трансляции энергии, связанную с рождающейся техникой, был Тетельбаум<sup>57</sup>.

В наземных условиях новые перспективы, связанные с передачей энергии по волноводам в виде СВЧ колебаний, исследовал и подчеркивал Капица<sup>2</sup>. Большие уровни мощности, малые потери, отсутствие изоляторов, мачт и опор, возможность расположения волноводов под землей

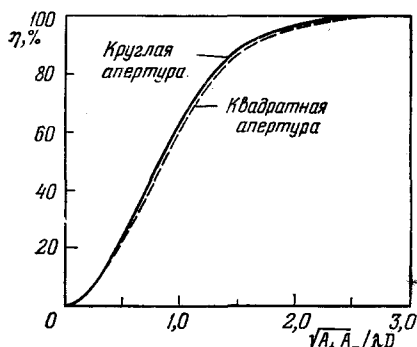


Рис. 6. Зависимость к.п.д. тракта передачи энергии от параметра  $\tau$ .

с целью сохранения лесных и земельных угодий — главные привлекательные стороны этого пути. И хотя экономические оценки в определенных случаях указывали на преимущественную рентабельность этого нового способа<sup>58</sup>, конкурировать с уже созданной мощной электротехнической промышленностью, в целом решавшей соответствующие задачи, довольно сложно.

Для космического пространства, где традиционные способы передачи электроэнергии малопригодны, либо вообще неприемлемы, использование мощного когерентного пучка электромагнитных волн может решить задачу

оперативного обмена энергией как между самими космическими аппаратами, так и непосредственно с поверхностью Земли<sup>2</sup>.

Первые опыты по передаче энергии СВЧ пучком осуществлены в Спенсеровской лаборатории (Raytheon Co.) в 1963 г.<sup>59а, 60</sup>. В последние 7—8 лет эта проблема исследовалась преимущественно по отношению к задачам СКЭС<sup>61–70</sup>.

1. При длине волны 10—12 см электромагнитный луч проходит толщу ионосферы и атмосферы практически без искажений фазового фронта и с небольшими потерями<sup>61, 62</sup>. Величина последних достигает 3—7% только при сравнительно интенсивных осадках (100—150 мм/час). Для меньших длин волн быстро растет затухание, большие — нежелательны, так как требуют соответствующего увеличения размеров антенн.

К. п. д. тракта передачи энергии определяется значением параметра  $\tau = \sqrt{A_r A_t} / (\lambda D)$  (рис. 6), где  $A_r$ ,  $A_t$  — площади апертур приемной и передающей антенн,  $D$  — расстояние между ними,  $\lambda$  — длина волны<sup>61</sup>. Кривые на рис. 6 построены для оптимизированных распределений амплитуд и фаз, соответствующих максимальному к. п. д. Оптимизированный волновой пучок имеет сферический фазовый фронт на передающем и приемном концах, с радиусом, равным расстоянию  $D$ . Соответствующие распределения плотности мощности представлены на рис. 7\*).

Проектируемые размеры передающей и приемной антенн, а также соответствующие значения плотности мощности излучения для СКЭС 5 Гвт-уровня показаны на рис. 8. Максимальная интенсивность в центре пучка порядка 870 Вт/м<sup>2</sup>, что ниже уровня обычной солнечной радиации в безоблачный день. На краях приемной апертуры плотность сни-

\*) Структура поля соответствует низшему типу колебаний в открытых резонаторах с конфокальными сферическими зеркалами. Задача об оптимальной передаче энергии между двумя апертурами исследовалась Губо<sup>59а</sup>, Вайнштейном<sup>60б</sup> и рядом других авторов.

жается до  $87 \text{ вт/м}^2$ . Это меньше допустимого биологического уровня, принятого в США ( $100 \text{ вт/м}^2$ ), но существенно превосходит соответствующий стандарт СССР ( $0,1 \text{ вт/м}^2$ ).

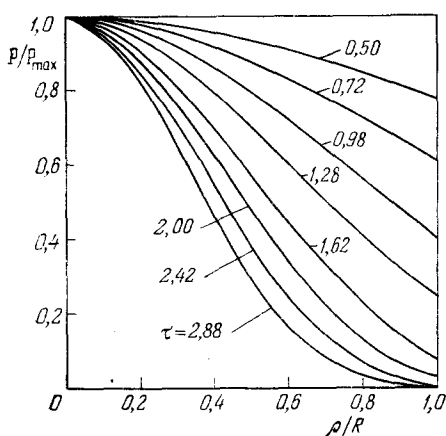


Рис. 7. Распределение плотности мощности по радиусу для оптимизированного пучка ( $R$  — радиус апертуры приемной или передающей антенны).

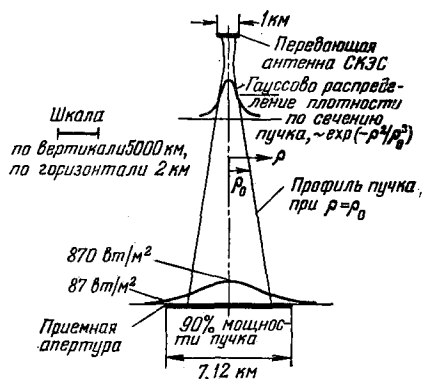


Рис. 8. Профиль СВЧ пучка, транспортирующего энергию с геосинхронной орбиты на поверхность Земли.

2. Для получения больших уровней СВЧ мощности в условиях космического пространства важное значение приобретает к. п. д. СВЧ устройств, их долговечность и надежность. Браун считает<sup>65-69</sup>, что наиболее подходящим классом приборов являются амплитроны (рис. 9) — разновидность СВЧ усилителей со скрещенными полями. Существующие амплитроны развивают к. п. д. до 85%, а в лабораторных условиях — до 90%. Эта последняя цифра может быть взята за основу, так как при разработке амплитронов специально для космических применений можно сосредоточить внимание на тех параметрах, которые в данном случае являются решающими (в ущерб, например, широкополосности и т. д.). Кроме того, к. п. д. амплитронов растет с увеличением отношения циклотронной частоты к рабочей, а современный уровень развития высокоэффективных самарий-кобальтовых магнитов позволяет обеспечить 10-кратное отношение частот.

Глубокий естественный космический вакуум и вторично-эмиссионный катод с платиновым покрытием помогают преодолеть вторую трудность и обеспечить практически неограниченный срок действия этих устройств в сочетании с компактным техническим выполнением (рис. 10). При отсутствии герметизации вводов и выводов амплитроны могут работать при

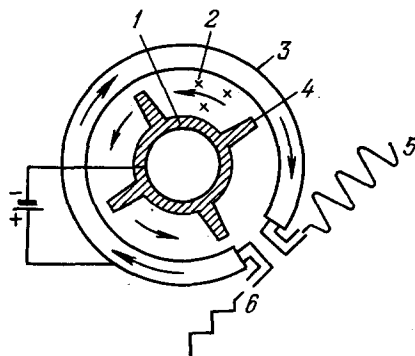


Рис. 9. Иллюстрация принципа действия амплитрона: вращающиеся «спицы» пространственного заряда наводят токи в СВЧ цепи и обеспечивают эффективное усиление входного сигнала.

1 — поверхность вторично-эмиссионного катода из чистого металла; 2 — магнитное поле, параллельное оси; 3 — СВЧ цепь (замедляющая система); 4 — вращающиеся «спицы» пространственного заряда; 5 — выход усиленного сигнала; 6 — входной СВЧ сигнал. К. п. д. = (выходная СВЧ мощность — входная СВЧ мощность)/(мощность, потребляемая от источника постоянного тока).

температуре вплоть до  $300^{\circ}\text{C}$  практически без снижения долговечности и надежности. Это позволяет сравнительно просто решить проблему охлаждения приборов, применяя эффективные радиаторы из пиролитического графита, имеющего естественную эмиссионную способность 0,92,

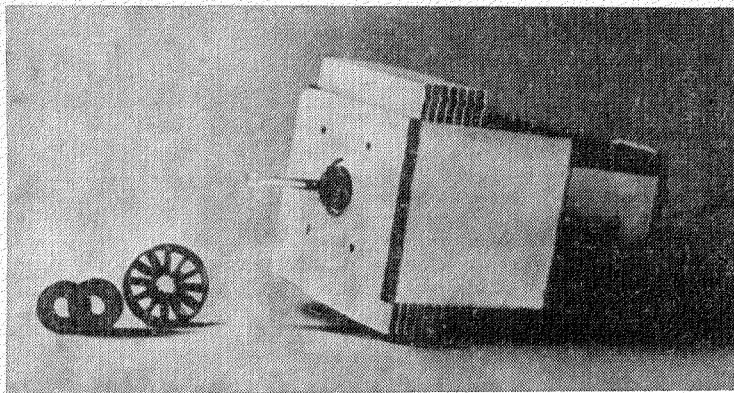


Рис. 10. Внешний вид амплитрона для наземных применений (справа) и его узлы, используемые в космических условиях (слева).

когда излучение происходит при  $300^{\circ}\text{C}$  в космическую среду ( $\sim 0^{\circ}\text{K}$ ) (рис. 11). Поглощение солнечной радиации снижает эффективность радиаторов, но незначительно, так как плотность рассеиваемой мощности

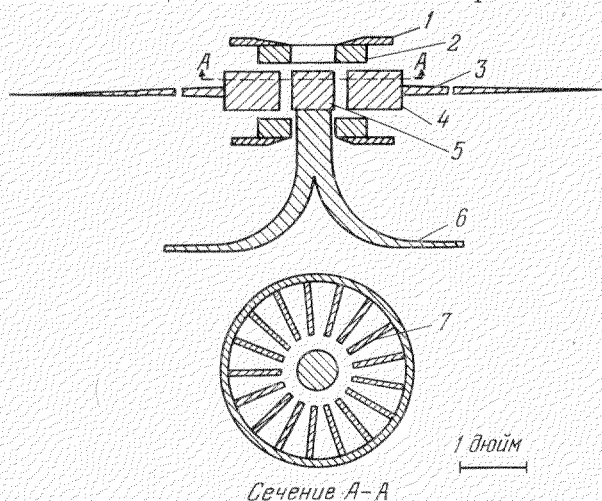


Рис. 11. Устройство радиаторов для рассеивания тепла.

1 — железный полюсный наконечник, 2 — SmCo-магнит, 3 — охлаждающий радиатор (анод), 4 — анод, 5 — катод, 6 — охлаждающий радиатор (катод), 7 — ламели амплитрона.

достигает  $10,6 \text{ кВт/м}^2$ , а поглощаемой не превосходит  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ . В целом для амплитронов может быть достигнут показатель веса менее  $0,13\text{—}0,3 \text{ кг/кВт}$ , при стоимости не более  $25 \text{ долл/кВт}$ .

3. При столь больших размерах передающей апертуры ( $\sim 1 \text{ км}$ ) и жестких требованиях к фазовой когерентности пучка, обратнопереизлучающая активная фазированная решетка является наиболее пригодным видом

излучателя, не требующего особой механической точности поверхности и позволяющего обеспечить необходимую форму распределения амплитуды и фазы поля по сечению апертуры.

Антенна состоит из секций ( $5 \times 5 \text{ м}^2$ ), каждая из которых выполнена в виде щелевых волноводов с системой встроенных амплитронных усилителей (рис. 12). При этом 80% мощности волны, распространяющейся по волноводу, тратится на излучение через щели, а оставшиеся 20% используются для возбуждения амплитрона следующего каскада и т. д.<sup>69</sup>

Для стабилизации передающей антенны относительно точки приема используется пилот-сигнал, исходящий из центра приемной системы и содержащий дополнительную частотную модуляцию на субгармонике рабочей частоты СКЭС<sup>61</sup>. Последняя используется в системе автоматической коррекции фазового фронта СВЧ пучка<sup>69</sup>. Существующие электронные системы позволяют обеспечить среднеквадратичную ошибку наведения СВЧ луча около  $10 \text{ м}$ <sup>70</sup>, что ничтожно мало по сравнению с апертурой приемной системы ( $7-10 \text{ км}$ ). При отсутствии пилот-сигнала (например, при аварийной ситуации) излучение становится рассеянным и, в основном, теряется в космическом пространстве.

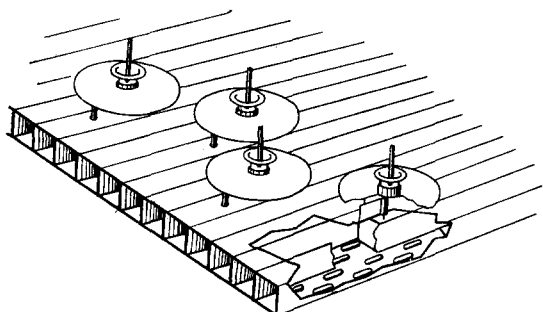


Рис. 12. Блок антенной решетки со встроенными амплитронными усилителями.

4. Если техника генерации и излучения СВЧ пучков имела непосредственные приложения в радиолокации и системах связи и здесь поэтому накоплен определенный опыт, то вопросы обратного преобразования СВЧ колебаний в постоянный ток изучены неизмеримо слабее. Техника приема радиоволн развивалась до сих пор преимущественно по пути извлечения информации из поступающих сигналов, совершенствуя приемные устройства с точки зрения их уровня собственных шумов, помехоустойчивости и т. д.

Большинство мощных электронных приборов СВЧ (магнетроны, клистроны, ЛБВ и др.) в принципе способны работать в обратном режиме, когда в электродинамическую систему прибора поступает энергия внешнего СВЧ сигнала, а в нагрузке коллекторной цепи выделяется полезная мощность в виде постоянного или переменного тока низкой частоты<sup>2, 59a</sup>.

Исходя из этого, приемную систему можно представить себе как обращенный вариант передающей. При этом вместо амплитронов используются, например, родственные им магнетроны, осуществляющие обратное преобразование СВЧ мощности в постоянный ток. Поскольку каждая из секций работает теперь независимо, приемная система в целом становится малонаправленной, менее критичной к механической точности общей поверхности и т. д.

Оказывается, однако, что на пути эффективного использования классических приборов СВЧ для выпрямления колебаний возникает ряд трудностей, которые в известной мере удастся преодолеть, если отказаться от традиционных принципов и конструкций, используя для выпрямления более простую и естественную идею преобразования энергии электронных пучков в реверсивных магнитных полях<sup>59a, 71, 72</sup>.

Другой путь связан с использованием полупроводниковых элементов в антенной решетке. Антенна, состоящая из совокупности полуволновых диполей со встроенными полупроводниковыми диодами, предназначенная для одновременного приема и выпрямления СВЧ колебаний, получила название ректенны \*) (рис. 13).

Каждый из полуволновых диполей имеет встроенный высокоэффективный диод с барьером Шоттки и ряд фильтров, предотвращающих потери

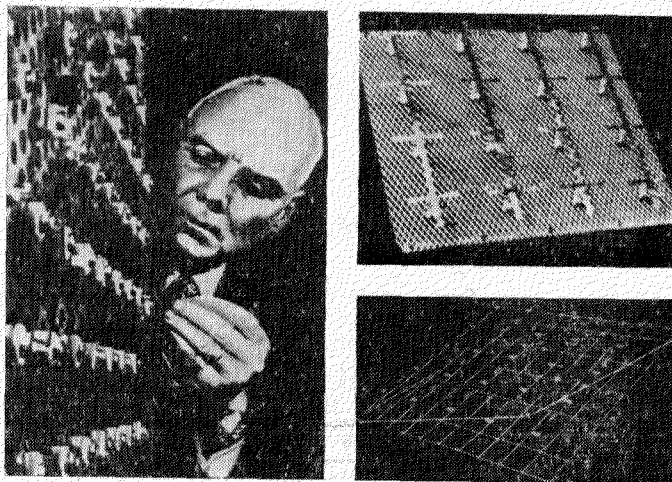


Рис. 13. Варианты лабораторных образцов ректенн.

мощности за счет переизлучения на второй гармонике рабочей частоты <sup>68</sup>. Отдельные диполи объединяются низкочастотной цепью для получения требуемых значений напряжения и тока (рис. 14).

Результаты лабораторных испытаний ректенн в последние годы непрерывно улучшались <sup>63-69, 73, 74</sup>, демонстрируя возможность преобразования до 80% энергии СВЧ пучка (табл. III).

В середине 1975 г. Лабораторией реактивного движения совместно с Научно-исследовательским центром им. Льюиса (НАСА, США) осуществлена трансляция 30 *квт* СВЧ мощности на расстояние в 1 милю (1,6 *км*) <sup>34, 73</sup>. Был использован параболический излучатель, предназначенный для систем дальней космической связи (рис. 15, а). На приемную решетку (рис. 15, б) размером  $3,6 \times 7,5 \text{ м}^2$  и содержащую около 5000 диполей, попадала лишь часть мощности СВЧ пучка, равная 36,8 *квт*. Мощность постоянного тока достигала 30,4 *квт*, что соответствует к. п. д. ректенны 82,5% при точности измерений 2,5%. Дальнейшая программа работ предусматривает использование излучателя в виде активной фазированной решетки для улучшения к. п. д. и исследования тракта передачи энергии в целом <sup>34</sup>.

Обработка трансляции энергии на трассе Космос — Земля планируется в середине — конце 80-х годов с использованием космического самолета \*\*) <sup>35</sup>.

Можно указать следующие достоинства ректенн <sup>68</sup>:

1) Приемная поверхность имеет слабую направленность, и нет необходимости точно направлять ее на передатчик.

\*) От слов rectifier и antenna.

\*\*) В зарубежной литературе принят термин Space Shuttle — космический челнок.

Таблица III

Достигнутые и проектируемые значения к. п. д. СВЧ тракта

(Частота 3000 Мгц, $\lambda = 10$ см)	Достигнутые значения к. п. д., %	Значения к. п. д., ожидаемые при существующей технологии, %	Значения к. п. д., ожидаемые при дополнительных разработках, %
К. п. д. генерации мощности СВЧ	76,7	85	90
К. п. д. передачи энергии от выхода генератора до апертуры приемной системы	94	96	96
Прием и выпрямление (к. п. д. ректенны)	80	85	90
Полная эффективность (отношение мощности постоянного тока на выходе ректенны к мощности постоянного тока, питающего СВЧ генератор):			
а) рассчитанное значение	57,7	69	78,0
б) измеренное значение	54		

Лабораторные эксперименты при уровне мощности 300—900 *вт.*

2) Весьма понижены требования к механическим допускам на конструкцию приемной апертуры.

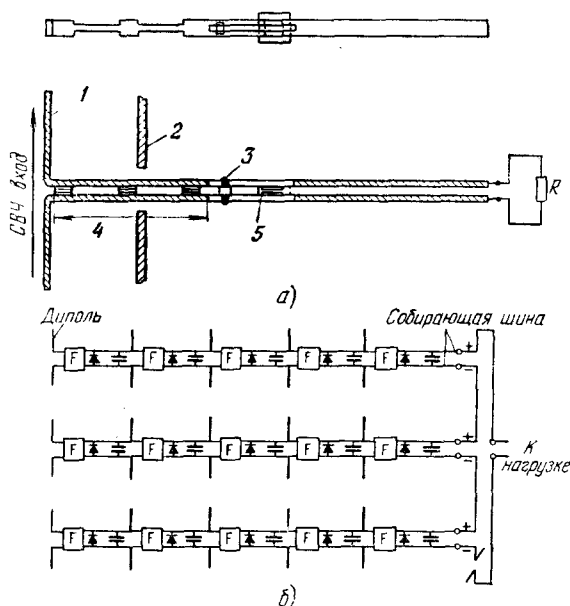


Рис. 14. а) Экспериментальный полуволновой диполь со встроенным двухсекционным фильтром нижних частот и однополупериодным выпрямителем на диоде с барьером Шоттки.

1 — полуволновая дипольная антенна, 2 — отражающая плоскость, 3 — подвижный диод с барьером Шоттки, 4 — фильтр нижних частот, 5 — подвижный плунжер с пружинными штифтами и блокировочным конденсатором.

б) Вариант соединения отдельных диполей в ректенне (F — фильтр, устраняющий переизлучение гармоник).

3) Нет проблемы согласования распределения освещения, определяемого падающим излучением, с диаграммой направленности обычной приемной апертуры.

4) Не создает проблем неоднородность интенсивности и фазы освещения приемной апертуры, которая получается при сочетании очень большой приемной апертуры с неоднородными атмосферными условиями на поперечном сечении падающего пучка.

5) Количества энергии СВЧ, принимаемые локальными участками приемной апертуры, хорошо согласованы с энергетическими возможностями твердотельных выпрямителей СВЧ.

6) Тепло, выделяющееся из-за неэффективности процессов выпрямления, можно легко отвести от локальных участков приемной апертуры.

Общий вид ректенного поля, предназначенного для работы на широте  $40^\circ$ , показан на рис. 16, а. Ректенна занимает площадь эллиптической формы и имеет ступенчатую конструкцию, так что рабочая поверхность

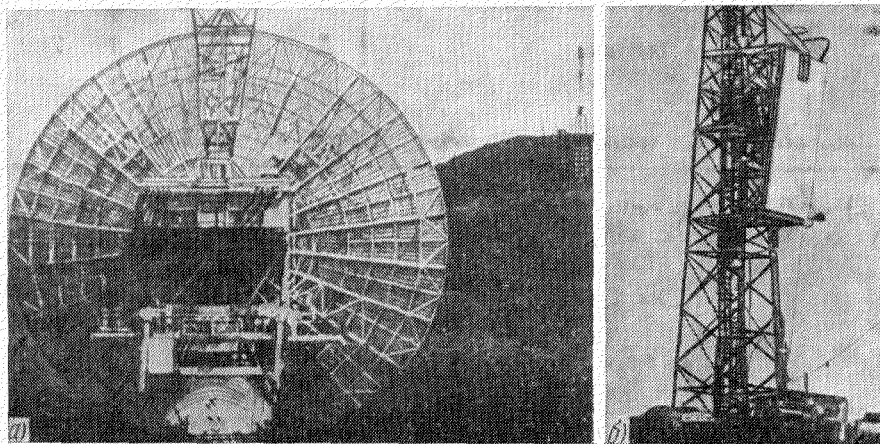


Рис. 15. а) Облучающая антенна с параболическим зеркалом; б) приемная ректенна.

оказывается везде нормальной к облучающему пучку. Лицевая поверхность представляет собой мелкую металлическую сетку с большим количеством элементарных диполей на ней. Такая конструкция должна обеспечить максимальную простоту при минимальной стоимости.

Вариант композиции комплекса, осуществляющего ежегодный запуск СКЭС, и общий вид первой ректенны, расположенных на мысе Кеннеди <sup>32</sup>, показаны на рис. 16, б. Электрическая мощность, вырабатываемая ректенной (10 млн. *квт*), используется частично для производства горючего (жидкие  $H_2$ ,  $O_2$ ), частично передается потребителям на основной территории США.

Некоторые технические характеристики ректенн объединены в табл. IV <sup>69</sup>.

Эксплуатационные характеристики ректенн, связанные с возможностью получения высоких напряжений, желательных при последующей трансляции энергии потребителям, а также эффективность их работы в различных метеорологических условиях (повышенные температуры, влажность, снежный покров, обледенение и т. д.), нуждаются в дополнительном изучении.

Апертура приемной системы может строиться на комбинированной основе. Часть ее работает с полупроводниковыми диодами и поставляет энергию близлежащим потребителям, другая — содержит высоковольтные электровакуумные преобразователи <sup>71, 72</sup> и обеспечивает энергоснабжение дальних потребителей.



Таблица IV

Длина волны	10 см
Диаметр ректенны	7,4 км
Площадь	$43 \cdot 10^6 \text{ м}^2$
Средняя плотность мощности:	
при 10 млн. кВт	232 Вт/м <sup>2</sup>
при 5 млн. кВт	116 Вт/м <sup>2</sup>
Общее число элементов ректенны	$1,23 \cdot 10^{10}$
Плотность элементов (диполей) в ректенне	284 м <sup>-2</sup>
Максимальная мощность на 1 элемент:	
при 10 млн. кВт	3,0 Вт
при 5 млн. кВт	1,5 Вт
Капитальные затраты на кВт вырабатываемой мощности постоянного тока:	
при 10 млн. кВт	50 долл/кВт
при 5 млн. кВт	100 долл/кВт

5. Определенный смысл в будущем может иметь концентрация энергетических комплексов (ядерная энергетика, солнечная энергетика и т. д.) в удаленных, малонаселенных местах <sup>4</sup>. В этом случае возникает проблема

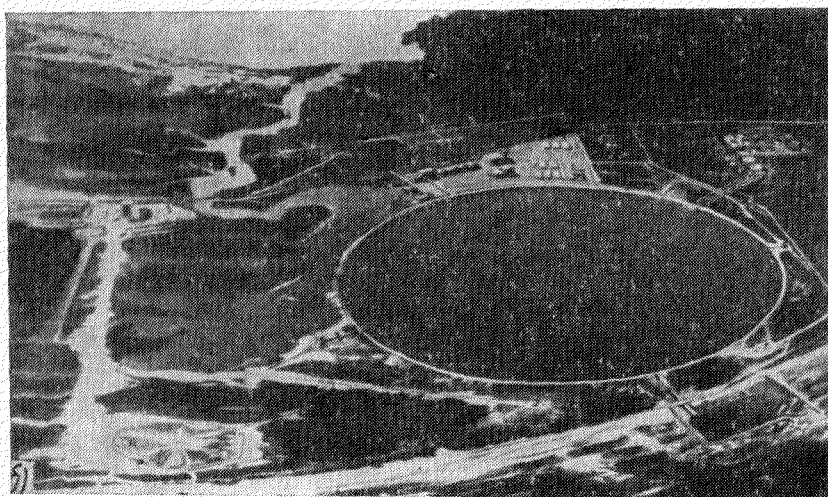
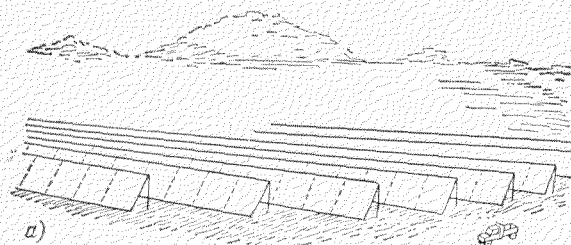


Рис. 16. а) Эскиз конструкции ректенны для местности с широтой 40°; б) эскиз композиции комплекса на мысе Кеннеди.

передач больших количеств энергии через материк и водные массивы к потребителям. Как вариант возможного кардинального решения этой проблемы Крафтом Эрике <sup>73, 75-77</sup> предложен путь использования

спутников-отражателей в Космосе. В районе такого энергетического комплекса находится СВЧ передающий центр, далее электромагнитный пучок испытывает отражение от пассивного зеркала в космосе и попадает на ректенну, расположенную в непосредственной близости к потребителю (рис. 17). Отражающее зеркало при размерах передающей и приемной апертур порядка 8 км имеет диаметр около 1,25 км, общий вес 250—350 т, может быть выполнено из легкой металлической сетки и содержит минимум дополнительных устройств, обеспечивающих лишь его нужную ориентацию и фиксацию на геосинхронной орбите \*).

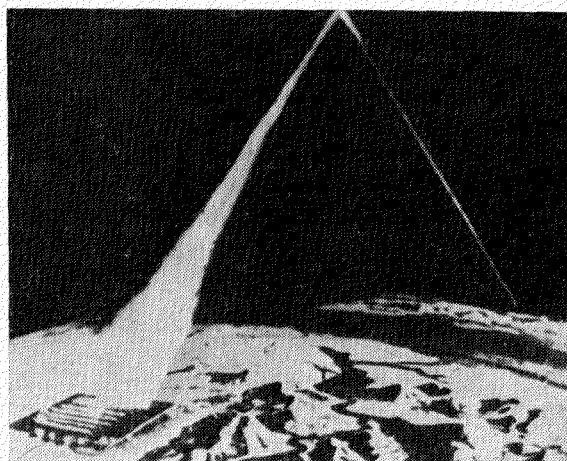


Рис. 17. Трансляция энергии от энергетического комплекса к потребителям через пассивный отражатель, расположенный на геосинхронной орбите.

6. Мощный СВЧ пучок, попадающий на поверхность Земли, порождает ряд важных проблем, которые должны быть внимательно изучены.

До известной степени укоренилось мнение, что медико-биологический эффект воздействия СВЧ пучка связан в основном с тепловым нагревом. На краю ректенны уровень падающей радиации ниже  $100 \text{ вт/м}^2$ , т. е. ниже уровня, который принят в США в качестве допустимого при длительном облучении. Область под ректенной в силу высокого поглощающего и экранирующего действия последней становится полностью безопасной и может быть использована для различных целей, включая размещение энергоемких промышленных комплексов, осуществляющих, например, производство алюминия или электролиз воды с целью получения жидкого водорода.

Самолеты и вертолеты, оказавшись в зоне действия излучения, отражают практически всю падающую на них радиацию. Животные и птицы должны испытывать непривычный для них вид теплового воздействия и поэтому, вероятно, будут покидать эту область <sup>77</sup>.

Мощный СВЧ пучок неизбежно создаст радиотехнические помехи за счет излучения в стороны, вызванного флуктуациями фазового фронта падающего пучка. Предварительные оценки показывают, что полоса частот, где эти помехи существенны, оказывается порядка  $100 \text{ Мгц}$  <sup>69</sup>.

\*) Мы вынуждены полностью опустить обсуждение различного рода космических отражателей солнечного света (см., например, <sup>18, 22, 45, 46</sup>), а также вариант СКЭС, когда она расположена на гелиостационарной орбите, а СВЧ пучок транслируется на Землю через промежуточный геосинхронный пассивный отражатель <sup>22</sup>.

Плотность поглощаемой в атмосфере СВЧ мощности не превосходит  $20\text{--}40 \text{ вт/м}^2$ , что существенно ниже уровня естественных процессов, связанных с поглощением солнечной и переизлученной землей радиаций.

Хотя результаты предварительного рассмотрения выглядят довольно оптимистично, комплекс подобных проблем, связанных с воздействием на экологическую среду, требует особенно детального и всестороннего исследования в дальнейшем.

7. Трансляция энергии в космическом пространстве свободна от атмосферных ограничений и целесообразна в более коротковолновых диапазонах длин волн. Минимальная длина волны здесь будет, в основном, определяться готовностью микроволновой техники обеспечить приемлемые значения к. п. д. тракта передачи энергии в целом. По-видимому, пока речь может идти лишь о коротковолновой части сантиметрового или, в лучшем случае, о длинноволновой области миллиметрового диапазонов длин волн.

При  $\lambda = 1 \text{ см}$ , передающей апертуре  $1 \text{ км}$  и приемной —  $20 \text{ м}$  (отдельный космический модуль) к. п. д. передачи энергии пучка  $90\%$  соответствует расстоянию  $1000 \text{ км}$ .

Применимость ректенн для энергетически плотных и коротковолновых СВЧ пучков требует изучения. Не исключено, что большими перспективами здесь будут обладать пассивные концентраторы в сочетании с мощными электронными преобразователями энергии.

Лазерные системы передачи энергии, хотя и являются потенциально перспективными, пока не способны обеспечить приемлемых значений к. п. д. Проблема здесь прежде всего в несоответствии спектральной области, в которой созданы мощные лазеры со сравнительно высоким к. п. д., спектральному участку, где удастся осуществить эффективное обратное преобразование оптической энергии <sup>78</sup>.

### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Отличительной чертой конструкций СКЭС является наличие большого количества однотипных элементов, узлов и деталей, таких, как концентратор, пленочные солнечные батареи, элементы опорной структуры, амплитроны, волноводы, диполи и диоды ректенны и т. д. Все это позволяет в принципе применить настолько высокую степень автоматизации процесса производства, что стоимость этих узлов и деталей будет, по существу, определяться стоимостью исходных материалов. Объем последних в пересчете на единицу вырабатываемой мощности оказывается необычно низким ( $\sim 2\text{--}2,5 \text{ кг/квт}$  \*), с точки зрения существующих наземных энергосистем.

Прогнозы в виде капитальных затрат на единицу мощности СКЭС встречаются в литературе неоднократно <sup>21, 28, 31, 32, 37, 40, 54, 66, 70, 73, 77, 79, 85, 91</sup> и нужно отметить, что эти оценки имеют довольно широкий интервал — от  $500 \text{ долл/квт}$  до  $4000\text{--}4500 \text{ долл/квт}$ . Частично это связано с разными этапами технико-экономической проработки самой идеи, с другой стороны — существует, вероятно, некая объективная трудность экономического прогнозирования на два десятилетия вперед. В табл. V объединены среднетипичные, на наш взгляд, значения этих величин.

Сравнение этих данных с соответствующими показателями наземных энергосистем требует известной осторожности, так как инженерные цены таблицы должны быть трансформированы в коммерческие, учитывающие

\*) Количество драгоценных металлов типа платины, необходимой для вторично-эмиссионных катодов амплитронов, не превышает  $2\%$  годового потребления США.

Таблица V

Фотоэлектрический вариант СКЭС, <i>долл/квт</i>		Турботепловой вариант СКЭС <sup>32</sup> , <i>долл/квт</i>	
Солнечные батареи и концентраторы	300—700	Турботепловые машины	240
Передающая СВЧ система	80—150	Генераторы	70
Наземная ректенна	50—120	Теплоприемники	70
Дополнительное оборудование	30—50	Радиаторы	160
Транспортировка и сборка	150—500	Концентраторы	170
		Дополнительное оборудование	30
		Наземная ректенна	120
		Транспортировка и сборка	390
Всего	610—1520	Всего	1300

в том числе стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; с другой стороны, СКЭС позволяют транслировать энергию непосредственно в районы локализации потребителя, в то время как наземные энергетические комплексы требуют часто дополнительных затрат на сооружение линий передач, разработку месторождений, обогащение сырья, доставку горючего и пр. Наконец, существует важный социальный аспект оценки стоимости источника электроэнергии, который учитывает такие факторы, как его влияние на окружающую среду, безопасность, демографические эффекты и т. д.

Доставка на орбиту заготовок, блоков и узлов СКЭС целесообразна на основе второго поколения космических транспортных средств многократного использования. Разрабатываемый космический самолет первого поколения<sup>80</sup> обеспечит удельную стоимость вывода полезного груза на околоземную орбиту порядка 360 *долл/кг*, в дальнейшем эта цифра может быть снижена на порядок и более<sup>246, 32, 81—83</sup>. Конкретные вопросы транспортировки и сборки СКЭС обсуждались в ряде специальных работ (см., например, <sup>32, 79, 84</sup>).

Трансляция энергии через отражающий спутник, расположенный на геосинхронной орбите (см. рис. 17), требует минимальных затрат и должна окупаться увеличением стоимости электроэнергии примерно на 1 *цент/квт·час* при уровне передаваемой мощности 7—10 *Гвт*<sup>75, 77</sup>. Общая стоимость такого энергетического комплекса, включая производство электроэнергии (10 *Гвт*), ее преобразование в СВЧ, трансляцию через спутник отражатель и наземные преобразующие устройства, оценивается в 5,03 млрд. долларов<sup>73</sup>.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ

«Пока это дело неблагоприятное, рискованное и безмерно трудное.

... Но зато как прекрасно будет достигнутое.»

К. Э. Циолковский<sup>86</sup>

Сегодня, вероятно, еще трудно представить себе энергетику будущего в достаточно четком виде. Однако ясно, что на смену традиционным источникам энергии, уже на протяжении столетий базирующихся на использовании ископаемых запасов топлива, должна прийти новая энергетика, скорее всего, по-прежнему многоплановая по своей структуре (включая солнечную, термоядерную, геотермальную и т. д.), главными, характер-

ными чертами источников которой будут увеличенная мощность, мобильность и минимальное воздействие на экологическую среду.

Дальнейшее развитие процесса освоения Человечеством околоземного космического пространства неизбежно приведет к возрастающей роли космической энергетики.

Сегодня это комплекс относительно маломощных автономных источников энергии, питающих отдельные космические летательные аппараты различного назначения. Уже в ближайшие десятилетия ситуация может коренным образом измениться.

Внеземное индустриальное производство, на первых этапах целесообразное, прежде всего, для существенно новых технологических областей с использованием невесомости (или регулируемой «гравитации»), высокого вакуума и низких температур, будет развиваться по пути получения высококачественных видов продукции, которые, как правило, и требуют увеличенных затрат энергии. Не менее очевидно, что в дальнейшем (появление лунной индустрии и так далее) объем космической энергетики будет только возрастать.

Второе важное направление связано с использованием энергии, вырабатываемой в Космосе, для нужд наземного индустриального и бытового потребления.

«Чистота» получаемой энергии, в том числе минимальные тепловые потери в атмосфере, практически равноценная доступность различных уголков Земли для обеспечения энергией, возможность оперативного переключения потребителей — главные привлекательные стороны этого пути.

Общность интересов по защите от загрязнений экологической среды Земного шара как единого целого, перспективы последующего широко-масштабного (межгосударственного, межконтинентального) кооперирования в области распределения энергии — могут служить хорошей основой для интернационального объединения усилий на этапах научно-исследовательских, опытно-конструкторских и производственных работ.

Результаты предварительной проработки двух основных проектов СКЭС — первый и важный шаг, позволивший оценить технико-экономические показатели и допустимые сроки реализации системы в целом.

Нет сомнения, что здесь может быть вскрыто еще немало дополнительных возможностей и новых радикальных подходов. В том числе не исключено, что в будущем окажется в полтора — три раза дешевле изготовление и сборка СКЭС на обитаемых космических индустриальных комплексах из материалов, доставляемых с поверхности Луны<sup>87-89</sup>, преодоление слабого гравитационного поля которой при отсутствии атмосферы требует существенно меньших затрат энергии.

Наряду с СКЭС перспективны ядерные, а в дальнейшем — и термоядерные космические энергетические станции. Первые могут производить столько же плутония, сколько потреблять, так что отпадает необходимость в его опасной транспортировке с поверхности Земли. Для вторых — космическое пространство особенно благоприятно из-за высокой степени вакуума в неограниченных объемах и легкости создания сверхпроводящих магнитов. Ежегодная доставка топлива не будет превосходить 5 т на 1 Гвт вырабатываемой мощности, что не составит особых транспортных проблем даже для сотни и более таких станций<sup>22</sup>. В обоих случаях космическая изоляция снижает или исключает полностью проблемы, возникающие при наземном использовании ядерных и термоядерных энергетических комплексов — тепловое загрязнение атмосферной среды, взрывоопасность, удаление и транспортировка радиоактивных отходов и т. д.

Широкие перспективы, которые могут быть связаны с развитием космической энергетики, обретут реальность при условии, если параллельно

появится достаточно гибкая и эффективная система трансляции энергии, пригодная для новых специфических условий.

От успешного решения этой задачи будет зависеть как степень централизации энергетических систем, предназначенных для космических применений, так и тот допустимый уровень «чистой» энергии из Космоса, на который может рассчитывать Человечество для развития цивилизации будущего.

Решение такой фундаментальной проблемы должно осуществляться на комплексной основе, включая инженерно-физические, технико-экономические, медико-биологические и социальные аспекты.

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В кн: А. П. Романов, Ракетам покоряется пространство, М., Политиздат, 1976
2. П. Л. Капица, Электроника больших мощностей, М., Изд-во АН СССР 1962
3. В. А. Кириллин, Коммунист, № 1, 43 (1975).
4. П. Л. Капица, УФН 118, 307 (1976).
5. Н. Н. Семенов, Наука и жизнь, № 10, 16; № 11, 25 (1972).
6. E. Stuhlinger, J. Microwave Power 5, 207 (1970).
7. А. Дж. Розенблатт, Электроника № 7, 26 (1974).
8. F. Daniels, Direct Use of the Sun's Energy, N.Y., Ballantine Books, 1975.
9. Б. Дж. Бринкворт, Солнечная энергия для человека, М., «Мир», 1976.
10. А. В. Шеклеин, Труды Энергетического института им. Г. М. Кржижановского, вып. 24, 6 (1974).
11. А. В. Шеклеин, Гелиотехника, № 4, 81 (1976).
12. И. И. Соболевман, УФН 120, 85 (1976).
13. Как добыть солнечное топливо («Штерн»), За рубежом, № 15, 20 (1975).
14. Дж. Уилхем, Укрощение солнечного луча, *ibid.*, №: 25, 20 (1976).
15. W. R. Chergu, Astronaut and Aeronaut, No. 8, 30 (1973).
16. А. Владимов, Наука и жизнь, № 7, 78 (1976).
17. Special Report on Solar Energy, Astronaut. and Aeronaut. No. 11 (1975).
18. П. А. Недотко, Е. А. Лебедева, Энергохозяйство за рубежом, № 1, 38 (1975).
19. Н. С. Лидоренко, Гелиотехника, № 6, 3 (1969).
20. Н. С. Лидоренко и др., Коммунист, № 2, 62 (1976).
21. G. R. Woodcock, Raumfahrtforschung. Nr. 3, 135 (1973).
22. K. A. Ehrlicke, Schweissen und Schneiden 27, 479 (1975).
23. R. Salkeld, Astronaut. and Aeronaut., No. 9, 30 (1975).
24. а) Р. Е. Glaser, in: 26th Intern. Congress of IAF, Lisbon, 1975.  
б) J. Grey, Astronaut. and Aeronaut. No. 10, 29 (1976).
25. G. F. von Tiesenhausen, in: 27th Intern. Congress of IAF, Los Angeles Oct. 1976.
26. В. П. Глушко, Ракетные двигатели ГДЛ-ОКБ, М., Изд-во АПН, 1975.
27. Р. Е. Glaser, Science 162 (No. 3856), 857 (1968); см. также: П. Е. Глейзер, Гелиотехника, № 1, 37 (1971).
28. Special Issue on Satellite Solar Power Station and Microwave Transmission to Earth, J. Microwave Power 5 (4) (1970).
29. Р. Е. Glaser, Patent of USA, No. 3.781.647; 26.07.1971.
30. Congress Asks NASA Work on Solar Energy, Electron. Design 21, No. 16, 48 (1973).
31. J. T. Patha, G. R. Woodcock, J. Spacecraft and Rockets 11, 409 (1974).
32. G. R. Woodcock, D. L. Gregory, AIAA Paper, No. 640 (1975).
33. Boeing Engineers Envision 10 000 Megawatt Power Station in Space, Aerospace Daily, July 15, 78 (1975).
34. R. T. Davis, Microwaves, No. 10, 9 (1975).
35. C. Covault, Aviation Week and Space Technology, Feb. 9, 54 (1976).
36. Senate Unit Hits Energy Fund Oversight, *ibid.*, Apr. 26, 20 (1976).
37. Satellite Power Station: Unplugged, Astronaut. and Aeronaut., No. 3, 10 (1976).
38. N. Treinies, Umschau der Wissenschaft und Technik 75, 661 (1975).
39. K. M. Hubbert, Scientific American 224 (3), 60 (1971).
40. Р. Е. Glaser, AIAA Paper, No. 637 (1975).
41. А. М. Васильев, А. П. Ландсман, Полупроводниковые фотопреобразователи, М., «Сов. радио», 1971.

42. Программа исследований по солнечным элементам в конгрессе, *Электроника*, № 17, 16 (1975).
43. Солнечные батареи: проекты и конфликты, *ibid.*, № 20, 15.
44. М. Б. Каган, Н. С. Королева, Т. А. Нуллер, *Гелиотехника*, № 2, 28 (1970).
45. А. В. Лукьянов, *Косм. исслед.* 7, 952 (1969).
46. А. В. Лукьянов, *Пленочные отражатели в Космосе*, М., Изд-во Моск. ун-та, 1977.
47. А. П. Ландсман, Д. С. Стребков, *Гелиотехника*, № 2, 15 (1970).
48. А. П. Ландсман, Д. С. Стребков, *Радиотехн. и электрон.* 15, 2625 (1970).
49. А. П. Ландсман, Д. С. Стребков, *Гелиотехника*, № 3, 3 (1970).
50. А. М. Васильев, В. М. Евдокимов, А. П. Ландсман, А. Ф. Милованов, *ibid.* No. 2, 18 (1975).
51. Солнечные батареи с высоким к. п. д., *Электроника*, № 11, 4 (1975).
52. Varian Develops New Type Solar Cell, *Interavia Air Lett.*, No. 8288, 6 (July 4, 1975).
53. GaAs Cell produced 10w from Sunlight, *Electronic Design*, July 19, 22 (1975).
54. P. E. Glaser, *Astronaut. and Aeronaut.*, No. 8, 60 (1973).
55. T. J. Miller, in: *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings*, 1971, p. 403.
56. Магнито-гидродинамический метод получения электроэнергии, под ред. В. А. Кириллина и А. Е. Шейдлина, М., «Энергия», 1972.
57. С. И. Тетельбаум, *Электричество*, № 5, 43 (1945).
58. Данин, Лоевентерн, СВЧ энергетика, под ред. Э. Окреса, т. 1, М., «Мир», 1971.
59. а) Сборник, цит. в<sup>58</sup>.  
б) Л. А. Вайнштейн, *Открытые резонаторы и открытые волноводы*, М., «Сов. радио», 1966.
60. W. C. Brown, *IEEE Intern. Conv. Rec.* 12 (pt. 2), 8 (1964).
61. G. Goubau, *J. Microwave Power* 5, 223 (1970).
62. V. J. Falcone, *ibid.*, p. 269.
63. W. C. Brown, *ibid.*, p. 279.
64. W. J. Robinson, *ibid.*, p. 233.
65. W. C. Brown, *ibid.* 7, 223 (1972).
66. W. C. Brown, *IEEE Spectrum.*, No. 3, 38 (1973).
67. W. C. Brown, *IEEE Trans. MTT-21*, 753 (1973).
68. W. C. Brown, *Proc. IEEE* 62, 11 (1974) (имеется перевод: *Тр. ИИЭР* 62, 13 (1974)).
69. W. C. Brown, *AIAA Paper*, No 642 (1975).
70. E. Andrew, R. Schuh, цит. в<sup>24</sup> сборник.
71. D. C. Watson, R. W. Grow, C. C. Johnson, *J. Microwave Power* 5, 72 (1970).
72. В. А. Барденков, В. А. Ванке, И. С. Горшков, В. М. Лопухин, *Радиотехн. и электрон.* 21, 821 (1976).
73. W. von Braun, *Popular Science* 13 (9), 65 (1975).
74. *Energy via radio*, *ibid.* (7), 8.
75. K. A. Ehrlicke, *Rockwell Intern. Report E-74-3-1*, March 1974.
76. C. Covault, *Aviation Week and Space Technol.*, Jan. 8, 47 (1973).
77. J. R. Williams, *Astronaut. and Aeronaut.* No. 11, 46 (1975).
78. K. W. Billman, *ibid.*, No. 7/8, 56 (1975).
79. R. Kline, C. A. Nathan, *AIAA Paper*, No. 641 (1975).
80. В. Шаталов, *Наука и жизнь*, № 11, 25 (1974).
81. R. Salkeld, *Astronaut. and Aeronaut.*, No. 3, 52 (1974).
82. B. Z. Henry, J. P. Decker, *ibid.*, No. 9, 18 (1976).
83. «Outlook» panel sees cost gains in shuttle upgrade heavy launcher, *Aerospace Daily* 77 (40), 320 (1976).
84. T. A. Hagler, *Astronaut. and Aeronaut.*, No. 5, 56 (1976).
85. R. P. Hudock, *ibid.*, No. 9, 11 (1976).
86. К. Э. Циолковский, *Избранные труды*, под ред. А. А. Благоврадова, М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 368.
87. G. K. O'Neill, *Science* 190 (No. 4218), 943 (1975).
88. T. A. Heppenheimer, M. Hopkins, *Astronaut. and Aeronaut.*, No. 3, 58 (1976).
89. G. K. O'Neill, *ibid.*, No. 10, 20.
90. B. Gohrbandt, E. F. Schmidt, in: *27 th Intern. Congress of IAF*, Los Angeles, Oct. 1976.
91. P. E. Glaser, *Spaceflight* 18 (6), 198 (1976).