

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

Лекция 10. **ИЗОТОПНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТЕПЛА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И СВЕТА**

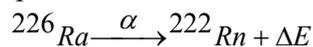
Содержание

1. ИЗОТОПЫ ДЛЯ АТОМНЫХ БАТАРЕЙ	2
2. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ В КОСМОСЕ	4
3. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	7
4. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ ДЛЯ МАЯКОВ, БАКЕНОВ И СТОРННЫХ ЗНАКОВ	8
5. ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ	10
6. ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕРМОЭМИССИОННЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ	13
7. ИСТОЧНИКИ СВЕТА	17
8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	18

Одним из критериев улучшения условий жизни человека, является количество электроэнергии, которое он потребляет. Анализ явления радиоактивности в плане его возможного применения в сфере энергетики показывает, что запасенную ядерную энергию можно конвертировать в тепловую в процессах радиоактивного распада, аннигиляции вещества с антивеществом, ядерных реакциях деления тяжелых ядер (под действием тепловых и/или быстрых нейтронов), или в ядерных реакциях синтеза легких ядер (в первую очередь – изотопов водорода).

Самый эффективный способ – аннигиляция – пока не нашел практического применения ввиду отсутствия на Земле антивещества. Поэтому сейчас запасенная ядерная энергия может быть выделена в ходе следующих процессов:

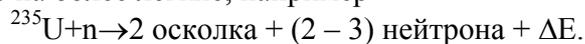
- при радиоактивном распаде, например



- при синтезе тяжелых ядер из легких, например



- при делении тяжелых ядер на более лёгкие, например



Реакции синтеза и деления ядер имеют цепной характер.

Энергия ΔE , выделяющаяся при протекании ядерной реакции, определяется разностью масс начальных и конечных продуктов (дефектом массы). Масса, равная 1 а.е.м., соответствует энергии 931,5 МэВ, т.е. почти 1 ГэВ. Выделение ядерной энергии возможно как при синтезе легких ядер, так и при делении тяжелых.

В практической энергетике удалось реализовать первый и третий процесс, ведется интенсивные поиски осуществления в контролируемых условиях второго процесса – термоядерного синтеза.

В данной лекции мы посвятим изотопным источникам тока (атомным батареям), обеспечивающим превращение энергии, выделяющейся в процессе радиоактивного распада ядер, в тепло, электрический ток, и/или свет.

1. Изотопы для атомных батарей

Поглощение излучения, испускаемого радионуклидами в самом образце, приводит к тому, что образец нагревается. На этом основан принцип действия изотопных источников тепла и тока (изотопных батарей). В изотопных (атомных) батареях тепловая энергия превращается в электрическую энергию путем термоэлектрического преобразователя; при этом коэффициент полезного действия составляет 3 – 5%.

Радионуклидный источник энергии - источник энергии, основанный на превращении кинетической энергии, выделяющейся при распаде ядер радионуклидов, в тепловую; преобразование тепловой энергии в электрическую осуществляется с помощью термоэлектрических генераторов. Применяется в космических энергоустановках малой мощности.

Ядерная батарея (атомная батарея), блок источников электрического тока, работающих на энергии распада радиоактивных элементов (напр., ^{90}Sr , ^{137}Cs). Мощность от нескольких Вт до нескольких сотен Вт. Миниатюрный автономный источник электроэнергии на космических летательных аппаратах, маяках и бакенах, в мобильных телефонах, стимуляторах сердечной деятельности, слуховых аппаратах и часах, а также в системах регенерации воды, установленных на космических аппаратах. Атомные батареи занимают небольшой объем, не нуждаются в уходе и надежны даже в экстремальных условиях.

В настоящее время накоплено огромное количество радиоактивных изотопов. При их распаде выделяется тепловая энергия, которую при желании можно преобразовать в электрическую. Тепловая энергия – это конечный продукт торможения в веществе частиц, образующихся при радиоактивных распадах. Первоначально такие источники получили распространение в космосе в необитаемых кораблях, поскольку не надо было беспокоиться об их защите. В дальнейшем они нашли применение и в других областях человеческой деятельности, где использование других источников энергии либо невозможно, либо совершенно нерентабельно.

Источники теплового потока обычно изготавливаются на основе таких радионуклидов, как никель-63, очень мягкий β -излучатель, $T=91,6$ лет), стронций-90 ($T=29$ лет)+иттрий-90 ($T=64$ часа, ^{90}Sr и ^{90}Y находятся в вековом равновесии, оба β -излучатели), цезий-137 (β -, γ -излучатель, $T=26,6$ лет), церий-144 (β - излучатель, $T=290$ дней), прометий-147 (мягкий β -излучатель, $T=2,64$ года), ^{210}Po (α -излучатель, $E_\alpha=5,3$ МэВ, $T=138,4$ суток) плутоний-238 (α -излучатель 238, $T=89$ лет), кюрий-242 (α -излучатель, $T=162,5$ дня), кюрий-244 (α -излучатель, $T=17,6$ лет) и др.

Для конкретности, приведём некоторые примеры использования разных радионуклидов в атомных батареях.

Полониевая батарея. Полоний-210 - практически чистый альфа-излучатель. Распад полония сопровождается гамма-излучением слабой интенсивности. В связи с относительно небольшим периодом полураспада при использовании полония-210 в изделиях практически не возникает проблемы долговременного хранения радиоактивных отходов. Так, источник на основе полония-210 с тепловой мощностью 10 Вт через 12 лет будет иметь активность $\leq 0,1$ микро Ки, что по санитарным правилам РФ уже не превышает уровень радиоактивности источников, для работы с которыми требуется разрешение Государственного санитарного надзора. При разбавлении этой активности в 10 кг инертного вещества полученный материал уже не является радиоактивными отходами. Радиоизотопные источники тепла на полонии-210 были успешно использованы в четырех космических аппаратах: в первых двух типа «Космос» - для электропитания бортовой аппаратуры, а на «Луноходах» - в качестве источников тепла для поддержания нормального температурного режима в приборном отсеке в период «лунной ночи».

В СССР первая экспериментальная модель термоэлектрического генератора «Л-106» с радиоизотопным источником тепла (РИТ), содержание полония-210 в котором составило 1850 кюри, была создана в марте 1962. Вторая экспериментальная модель термоэлектрического генератора на основе полония-210 «Лимон-1» построена в 1963.

Основные характеристики установки "Лимон-1"				
Характеристика	Время эксплуатации			
		48	1000	1400

	часов	часов	часов	часов
Тепловая мощность РИТ, Вт	244	200	185	163,5
ЭДС, В	2,85	2,3	2,09	1,88
Напряжение на нагрузочном сопротивлении 0,34 Ом, В	1,4	1,14	1,04	0,92
Выходная электрическая мощность изделия, Вт	5,8	3,79	3,24	2,52
Активность РИТ по полонию-210, Ки	7700	6300	5820	5140
Нейтронный фон на расстоянии 0,5 м от источника, н/(с*см ²)	20-30			
Вес изделия, г	3200			
Габариты изделия, мм	Диаметр 190, высота 210			

Цериевая батарея. В источнике «Бета» в качестве источника тепла используется β -радиоактивный изотоп ^{144}Ce . Он предназначен для питания автоматических метеорологических станций и радиопередатчиков (мощность 200 Вт).

Прометиевая батарея. В прометиевой атомной батарее происходит ионизация β -излучением прометия пограничного слоя полупроводника, в результате чего возникает электрический ток. Такое явление называют бетавольтэффектом. Оксид прометия-147 массой в 24 г, запрессованный под давлением в платиновую капсулу, дает энергию в 8 Вт. В современной модификации прометиевой батареи реализовано двукратное преобразование энергии. Сначала излучение прометия заставляет светиться специальный люминесцирующий состав (фосфор), а эта световая энергия преобразуется в электрическую в кремниевом фотоэлементе. На одну батарейку расходуется всего 5 мг окиси прометия-147. Особенность прометия-147 в том, что он практически не дает гамма-лучей, а дает лишь мягкое бета-излучение, задерживаемое даже тонким слоем фосфора и корпусом батарей. Длительность работы такой батареи ограничена лишь периодом полураспада изотопа (2,6 года).

Плутониевая батарея. Батарея с 4 кг $^{238}\text{PuO}_2$ при тепловой мощности 1480 Вт имеет электрическую мощность 60 Вт и рассчитана на работу в течение 10 лет.

При выборе типа термоионных изотопных батарей для конкретного аппарата следует руководствоваться их назначением. Если желательны долгоживущие источники энергии, например, для измерительных или запускаемых в космос приборов, для снабжения током светящихся буев и автоматических метеостанций либо для обогрева одежды водолазов или космонавтов, то предпочтителен кюрий-244 или плутоний-238. Если же, напротив, требуется на короткое время выработка больших количеств энергии, то выгоднее батарея из кюрия-242.

Сделаем теперь несколько оценок.

В радиоизотопные преобразователи типа (США) загружаются изотопами полония ^{210}Po (период полураспада 0,38 года) или плутония ^{238}Pu (период полураспада 89 лет). Оценим количество радиоизотопа ^{238}Pu , необходимого для обеспечения такой же тепловой мощности, как и при загрузке ^{210}Po , если тепловая мощность преобразователя 60 Вт, а масса изотопа полония 0,38 г. Для грубой оценки можно составить пропорцию: чем меньше период полураспада, тем больше удельная активность препарата. И если период полураспада изотопа плутония в 234 раза больше периода полураспада полония, то и масса изотопа плутония, необходимая для создания той же тепловой мощности, должна быть приблизительно в 234 раза больше массы изотопа полония.

Оценим теперь активность используемых радиоактивных источников. Зная массу и период полураспада изотопа ^{210}Po , найдём его активность и выразим её в кюри. Зная молярную массу изотопа полония и число Авогадро, легко сосчитать, что за одну секунду происходит $4 \cdot 10^{13}$ распадов, т.е. активность препарата равна 1100 кюри. Активность очень большая: защититься от радиации можно металлической фольгой, но без защиты источник в руки брать смертельно опасно!

2. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ В КОСМОСЕ

Первое широкое применение атомные батареи нашли в космосе, поскольку именно там требовались источники энергии, способные вырабатывать тепло и электричество в течение длительного времени, в условиях резкого и очень сильного перепада температур, при значительных переменных нагрузках, и поскольку в условиях непилотируемых полётов радиоизлучение от источника питания не несло большой угрозы (в космосе и без него излучений хватает). Химические источники энергии не оправдали себя. Так, когда 4.10.1957 в СССР был выведен на орбиту первый искусственный спутник Земли, то его химические батареи могли давать энергию в течение 23-х дней. После этого мощность их была исчерпана. Кремниевые солнечные батареи эффективны лишь при полётах вблизи Солнца, для полётов к удалённым планетам солнечной системы они не годятся.

Способы преобразования энергии на космических аппаратах бывают двух видов: прямое и машинное. Типы преобразователей тепловой энергии в электрическую делятся на статические (т.е. без подвижных частей), и динамические (т.е. с подвижными, вращающимися или двигающимися частями). Проблема выбора вида преобразования энергии по-прежнему остается актуальной разработчиков различных преобразователей и космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) на их основе.

Так, в рамках известной инициативы НАСА по космическим ядерным энергетическим установкам для реализации программы «Прометей» по проекту «Джимо» (орбитальная экспедиция к ледяным лунам Юпитера) выбран **динамический преобразователь** (газо-турбинная установка на основе цикла Брайтона). Ресурс КЯЭУ 10 лет при выходной электрической мощности от 250 кВт(эл).

Начиная с начала шестидесятых годов, достаточно широкий размах в СССР, США и ряде других стран получили работы по **прямому преобразованию** тепловой энергии в электрическую на основе **термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей**. Подобные методы преобразования энергии принципиально упрощают схему установок, исключают промежуточные этапы превращения энергии и позволяют создать компактные и лёгкие энергетические установки.

В 1959 в рамках проекта «Орион» комиссия по атомной энергии США приняла решение создать целую серию ядерных вспомогательных источников энергии – сокращённо SNAP (System for nuclear auxiliary Power). В соответствии с этой программой, в США приступили к разработке устройств, в которых электроэнергия получается при использовании тепла – либо выделяемого при радиоактивном распаде изотопов, либо вырабатываемого при делении ядер урана в небольших ядерных реакторах (таким источникам тока присваивались нечётные номера).

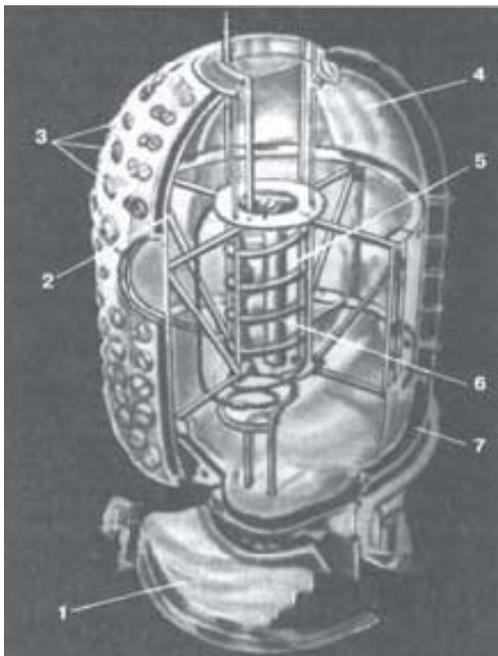


Рис.1 Источник энергии SNAP-1А.

1 – тепловая изоляция, 2 – тепловые экраны, 3 – термоэлектрические преобразователи, 4 – пространство, заполненное ртутью, 5 – таблетки церия, 6 – охлаждаемый змеевик, 7 – изоляция

Исторически первым был разработан термоэлектрический генератор SNAP-1А мощностью 125 Вт с ртутной защитой. Работы над установкой были закончены в 1960 году после испытания модели с электрическим подогревом. На **Рис.1** хорошо видны таблетки изотопа ^{144}Ce , при радиоактивном распаде которого выделяется тепло, и змеевик охлаждения. Всё это находится в пространстве, залитым ртутью. На поверхности изолирующего покрытия расположены термоэлектрические преобразователи. Примерно тогда же

был создан изотопный термоэлектрический преобразователь SNAP-3, предназначенный для проверки основных принципов работы таких устройств. Этот преобразователь был загружен изотопом полония ^{210}Po . Он имел начальную мощность 3 Вт и проработал долгие годы.

Радиоизотопные термоэлектрические преобразователи типа SNAP-1A, загруженные изотопом плутония ^{238}Pu имели мощность 2,7 Вт и массу 1,84 кг (2,5 кг вместе с термоэлектрическим преобразователем). Малые размеры (11,875*12,25 см), относительно небольшая масса, и длительный период полураспада (89 лет), обеспечивающий указанную мощность по крайней мере в течение 5 лет, позволили использовать их в космосе, в частности, как вспомогательные источники электроэнергии в навигационных спутниках серии «Транзит-4А» и «Транзит-4Б», запускаемых с 1961 года. Спутник «Транзит-4А» с радиоизотопным источником, запущенный 28 июня 1961 года – первый случай использования атомной энергии в космосе. Важно, что в плутонии-238, в отличие от плутония-239, не может поддерживаться цепная ядерная реакция, а значит при использовании этого изотопа исключена опасность ядерного взрыва. Источник SNAP-9A мощностью 25 Вт был разработан для установки на спутнике «Транзит-5». Использованный в нём радиоизотоп плутония ^{238}Pu обеспечивал надёжную работу в космосе в течение 6 лет.

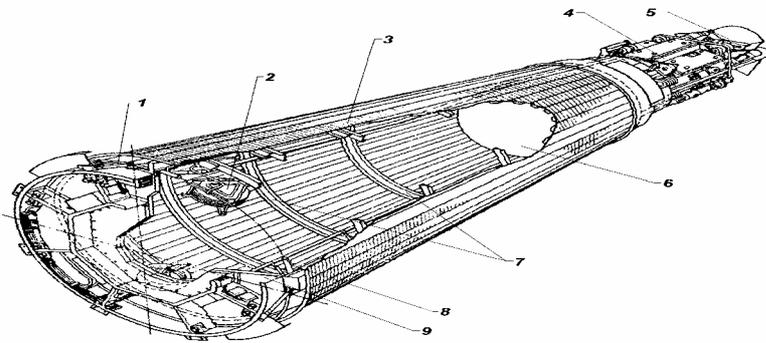
В США метеоспутник "Нимбус", который вращается вокруг Земли с мая 1968, имеет батарею на плутонии-238 мощностью 60 Вт. Американский лунный зонд «Сарвейор», который в 1966 передал по радио на Землю первый химический анализ лунного грунта, обладал энергетической установкой (термоэлектрический генератор SNAP-11) мощностью в 20 Вт, питаемой 7,5 г кюрия-242 (срок работы 120 дней).

Мини-электростанция SNAP-27 имеет мощность 73 Вт, которая обеспечивается 4,3 кг плутония-238. Ее размеры составляют 45*40 см. 12 ноября 1969 года астронавты "Аполлона 12" установили SNAP-27 на Луне. Из соображений безопасности на время космического полета американские космонавты закрепили плутониевый стержень, имеющий температуру 700°C, на наружной стенке лунного корабля. Только после посадки они поместили его внутрь генератора. SNAP-27 сразу стали давать электрический ток, а позднее -- снабжать энергией оставленную на Луне измерительную аппаратуру. Еще раньше, при первой посадке на Луну, американцы использовали источники энергии из плутония-238. Такие батареи помещали в измерительные приборы, и они гарантировали их безупречную работу, даже при тех резких перепадах температур, которые существуют на спутнике нашей Земли. В полетах космических кораблей "Аполлон" источник энергии из 570 г плутония-238 обеспечивал регенерацию питьевой воды. С его помощью американские астронавты могли ежедневно регенерировать 8 л воды.

СССР использовал атомные батареи в спутниках типа «Космос». В сентябре 1965 в составе аппаратов «Космос-84» и «Космос-90» были запущены радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) «Орион-1» электрической мощностью 20 Вт. Вес РИТЭГ составлял 14,8 кг, расчётный ресурс - 4 месяца. Ампулы РИТЭГ, содержащие полоний-210, были сконструированы в соответствии с принципом гарантированного сохранения целостности и герметичности при всех авариях. Этот принцип оправдал себя при авариях ракет-носителей в 1969, когда, несмотря на полное разрушение объектов, топливный блок, содержащий 25000 кюри полония-210, остался герметичным.

Исследовательский корабль «Луноход-1», спущенный на поверхность Луны Советским Союзом в ноябре 1970 года, был обеспечен радиоактивными изотопами (полоний-210) для регулировки температуры. «Луноход-1» функционировал в течение 322 дней. За 11 лунных суток он прошёл 10,5 км, исследуя район Моря Дождей, осуществил детальное топографическое обследование 80000 кв.м. лунной поверхности. За это время был проведён 171 сеанс связи, с помощью радиотелесистем «Лунохода-1», на Землю было передано свыше 200 тысяч снимков лунной поверхности». Успешно работал радиоизотопный термоэлектрический генератор тока и на аппарате «Луноход-2».

Источники энергии, снабженные долгоживущими изотопами, особенно необходимы для космических зондов, находящихся в "дальних странствиях" к удаленным планетам. Поэтому американские зонды «Викинг», которые были высажены на Марс в июле и сентябре 1976 с целью поисков там разумной жизни, имели на борту два радиоизотопных генератора для обеспечения энергией спускаемого аппарата. Космические станции вблизи Земли, такие, как «Салют» (СССР) и «Скайлэб» (США), получают энергию от солнечных батарей, питаемых энергией Солнца. Однако зонды для Юпитера нельзя оснащать солнечными батареями. Излучения Солнца, которое получает зонд вблизи далекого Юпитера, совершенно недостаточно для обеспечения прибора энергией. Кроме того, при космическом перелете Земля - Юпитер требуется преодолеть огромные межпланетные расстояния при продолжительности полета от 600 до 700 дней. Для таких космических экспедиций основой удаи является надежность энергетических установок. Поэтому американские зонды планеты Юпитер – «Пионер 10», который стартовал в феврале 1972 года, а в декабре 1973 года достиг наибольшего приближения к Юпитеру, а также его преемник «Пионер-2» - были оснащены четырьмя мощными батареями с плутонием-238, помещенными на концах кронштейнов длиной в 27 м. В 1987 году «Пионер 10» пролетел мимо самой удаленной от Земли



планеты - Плутона, а затем это произведенное на земле космическое тело покинуло нашу Солнечную систему.

Рис. 2 КЯЭУ «SNAP-10А» 1 – узлы крепления ЯЭУ к ракете-носителю; 2 – компенсационный бак ЖМК; 3 – ХИ-ТЭГ; 4 – ЯР; 5 – ЭМН; 6 – РЗ; 7 – силовой каркас; 8 - коллектор контура теплоносителя; 9 – аппаратный отсек.

Табл.1 Основные характеристики КЯЭУ, получившие реальный опыт использования в составе космических аппаратов в США и СССР/России

	SNAP-10A	БУК	ТОПАЗ
Тепловая мощность, кВт	34	100	150
Электрическая мощность, кВт	0,54	2,5	7
Ресурс, мес.	1,5	6	12
Масса, т	0,45	0,9	1,2
Количество запусков	1	32	2
Год запуска	1965	1970-1988	1987

На **Рис. 1-3** приведены их конструктивно-компоновочные схемы.

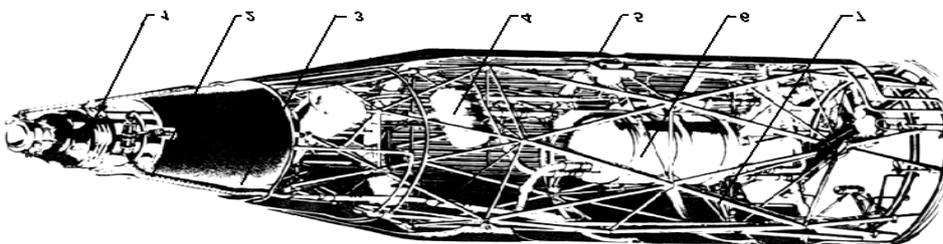


Рис 3. КЯЭУ «БУК» 1 – реактор; 2 – трубопровод жидкометаллического контура; 3 – радиационная защита; 4 – компенсационный бак ЖМК; 5 – холодильник-излучатель; 6 – ТЭГ; 7 – силовая рамная конструкция.

Можно сказать, что использование радиоизотопных источников тепла вместо химических позволило в десятки и даже в сотни раз увеличить длительность пребывания спутников на орбите. Однако при использовании спутников с большим энергопотреблением мощности радиоизотопных

генераторов оказывается недостаточно. При энергопотреблении более 500 Вт более рентабельно использовать ядерную реакцию деления, т.е. маленькие атомные станции.

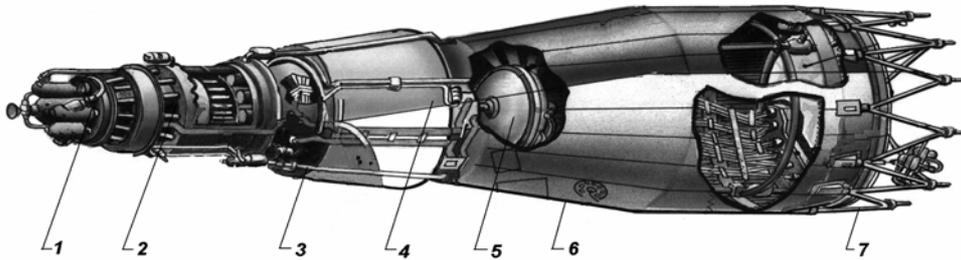


Рис.4 КЯЭУ «ТОПАЗ» 1 – блок системы подачи пара цезия и приводов органов регулирования; 2 – ТРП; 3 – трубопровод ЖМК; 4 – РЗ; 5 – компенсационный бак

ЖМК; 6 – ХИ; 7 – рамная конструкция.

3. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Перспективно применение атомных батарей и в медицине, например, для снабжения энергией сердечных регуляторов. От таких батарей требуется, чтобы они периодически посылали сердечной мышце электрические импульсы. Химические батареи неизмеримо больше атомных по размерам и работают только два-три года. Батареи на основе плутония-238 являются «вечными». К атомным регуляторам предъявляются особенно жесткие требования по технике безопасности, чтобы ни при каких обстоятельствах чрезвычайно токсичный плутоний не смог вырваться наружу. В 1970 году французские врачи имплантировали двум людям сердечные регуляторы, которые весили всего по 40 г. Требуемую мощность в 200 мкВт обеспечивали 150 мг плутония-238. С тех пор эти регуляторы поддерживают сердечную деятельность обоих пациентов. Столь убедительный успех создал целую медицинскую школу. Медики имплантируют сердечные регуляторы из плутония-238 или прометия-247, в России и Польше. Атомные батареи служат источником энергии для «искусственного сердца» - насоса для крови, спасителя жизни при остановке кровообращения.

В 2004 в Корнелльском Университете (США) с помощью технологии MEMS (microelectromechanical-systems) изобретен элемент питания, основанный на никеле-63, способный работать более 50 лет. Опытный образец имеет форму куба с ребром меньшим 1 мм. Механизм работы этого элемента питания можно описать так: MEMS батарея переводит сохраненную энергию на радиоактивном изотопе в движение микроскопической консоли, позволяя перемещать непосредственно MEMS компоненты или производить электричество для схемы. Медная консоль установлена над тонким слоем радиоактивного изотопа никеля-63 (β -излучатель). Консоль накапливает испускаемые электроны, что создает отрицательный заряд. В то же самое время слой становится положительно заряженным. Бета-частицы передают заряд от слоя изотопа к консоли, а разность потенциалов заставляет консоль сгибаться к слою изотопа. Пока изотоп распадается консоль продолжает свои движения вверх-вниз. Атомные батареи - лучшее решение для постоянно работающих датчиков и других устройств для долгосрочного контроля. Период полураспада никеля-63 - более 100 лет, но атомная батарея будет работать должным образом только в течение первой половины ее полураспада, или приблизительно 50 лет. Военные найдут много применений подобным атомным батареям - например, датчики, которые контролируют ракеты или датчики поля битвы, которые должны быть скрыты и оставлены без присмотра на долгое время. Гражданские применения же включают в себя, прежде всего, медицинские устройства, которые могут быть имплантированы в тело человека на долгий срок.

4. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ ДЛЯ МАЯКОВ, БАКЕНОВ И СТОРНЫХ ЗНАКОВ

Атомные батареи нашли широкое применение в качестве автономных источников питания маяков, бакенов, створных знаков, автоматических метеостанций, устанавливаемых в труднодоступных регионах.

Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГи) - источники автономного электропитания с постоянным напряжением от 7 до 30 В для различной автономной аппаратуры мощностью от нескольких ватт до 80 Вт. Совместно с ритэгами используются различные электротехнические устройства, обеспечивающие накопление и преобразование электрической энергии, вырабатываемой генератором. Наиболее широко ритэги используются в качестве источников электропитания навигационных маяков и световых знаков. Ритэги также используются как источники питания для радиомаяков и метеостанций.

РИТЭГ обычно содержит корпус с теплоотводящим радиатором, тепловой блок с радиоизотопным источником тепла, тепловую изоляцию, термоэлектрический преобразователь, теплопереход между тепловым блоком и термоэлектрическим преобразователем, тепловой шунт с переменным тепловым сопротивлением, термостат с электронным преобразователем напряжений и накопителем, высокотемпературный терморегулятор для термоэлектрического преобразователя и низкотемпературный терморегулятор для термостата в виде тепловых труб с газовыми резервуарами и конденсатор.

Конструкции РИТЭГ отличаются между собой применяемыми изотопами, термоэлектрическими материалами, параметрами по выходному электрическому напряжению, выходной электрической мощности, массе, габаритам, конструктивными формами и др.

Примером может служить серия радиоизотопных источников типа SNAP-7 (США) с загрузкой изотопом стронция ^{90}Sr : SNAP-7А мощностью 5 Вт и SNAP-7В мощностью 30Вт используются в качестве источников энергии для навигационных маяков, а источники SNAP-7D мощностью 30 Вт – в автоматических метеостанциях, расположенных в удалённых районах.



Рис.5 РИТЭГ советского производства на удалённом маяке.

В СССР создана серия изотопных термоэлектрических генераторов «Бета» (мощность порядка 10 Вт), служащих для энергопитания радиометеорологических станций. Главное действующее лицо в нем – изотоп стронция.

Гарантийный срок службы генератора «Бета-С» -10 лет, в течение которых он способен снабжать электрическим током нуждающиеся в нем приборы. А все обслуживание его заключается лишь в профилактических осмотрах - раз в два года. Наиболее широко применяется РИТЭГ типа «Бета-М», который был одним из первых разработанных в конце 60х годов прошлого века изделий. В настоящее время в эксплуатации находится около 700 РИТЭГов этого типа. Этот тип РИТЭГА, к сожалению, не имеет сварных соединений и, как показала практика, может быть разобран на месте эксплуатации с использованием обычного слесарного инструмента.

Другой РИТЭГ, выпускаемый в России, с источником тепла на основе стронций-90 «РИТ-90» представляет собой закрытый источник излучения, в котором топливная композиция обычно в форме керамического титанатастронция-90 (SrTiO_3) дважды герметизирована аргоно-дуговой сваркой в капсуле. В некоторых РИТЭГах стронций используется в форме стронциевого боросиликатного стекла. Капсула защищена от внешних воздействий толстой оболочкой, сделанной из нержавеющей стали, алюминия и свинца. Биологическая защита



изготовлена таким образом, чтобы на поверхности устройств доза радиации не превышала 200 мР/ч, а на расстоянии метра — 10 мР/ч. На момент изготовления РИТ-90 содержат от 30 до 180 кКи ^{90}Sr . Мощность дозы гамма-излучения РИТ-90 самого по себе, без металлической защиты, достигает 400— 800 Р/ч на расстоянии 0,5 м и 100— 200 Р/ч в 1 м от РИТ-90. По классификации МАГАТЭ РИТЭГи относятся к 1 классу опасности (strongest sources, сильнейшие излучатели).

Рис.6. Гарантийное обслуживание РИТЭГа

В настоящее время в России имеется около 1 000 радиоизотопных термоэлектрических генераторов, большая часть которых используется как элемент питания световых маяков. Всего в СССР было создано около 1 500 РИТЭГов. Около 80% всех изготовленных РИТЭГов было направлено в гидрографические войсковые части Минобороны и гражданские гидрографические базы вдоль Северного морского пути. Срок службы всех типов РИТЭГов составляет 10 лет. В настоящее время все РИТЭГи, находящиеся в эксплуатации, выработали свой срок службы и должны быть утилизированы.

Табл. 2. Радиоактивный элемент РИТ-9

Размер цилиндра	10*10 см
Вес	5 кг
Мощность	240 Ватт
Содержание стронция-90	1500 ТБк (40000 Кюри)
Мощность	240 Ватт
Температура на поверхности	300-400°C

Мощность экспозиционной дозы на расстоянии до 0,02-0,5 м 2800-1000 Р/час

Безопасной активности РИТ-90 достигают только через 900-1 000 лет.

Для высокоэнергетических радионуклидных энергетических установок в качестве топлива применяют плутоний-238. Однако использование в РИТЭГах источников тепла на основе плутония-238 наряду с некоторыми техническими преимуществами требует значительных финансовых затрат, поэтому в последние 10 - 15 лет не осуществлялась поставка таких РИТЭГов отечественным потребителям для наземных целей.

США использовали РИТЭГи в основном для космических нужд, но 10 ритэгов было установлено на удалённых военных объектах в Аляске в 1960 - 70х годах. Однако после того как из-за стихийного пожара в 1992 году один из РИТЭГов оказался под угрозой, ВВС США начали заменять их на дизель-генераторы.

Табл. 3. Типы и основные характеристики РИТЭГов советского производства

Тепловая мощность РИТ, Вт	Начальная номинальная активность РИТ, тысячи	Электрическая мощность РИТЭГа, Вт	Выходное электрическое напряжение РИТЭГа, В	Масса РИТЭГа, кг	Начало производства
---------------------------	--	-----------------------------------	---	------------------	---------------------

Кюри

Эфир-МА	720	111	30	35	1250	1976
ИЭУ-1	2200	49	80	24	2500	1976
ИЭУ-2	580	89	14	6	600	1977
Бета-М	230	35	10		560	1978
Гонг	315	49	18	14	600	1983
Горн	1100	170	60	7 (14)	1050	(3 1983 РИТ)
ИЭУ-2М	690	106	20	14	600	1985
Сеностав	1870	288			1250	1989
ИЭУ-1М	2200 (3300)	340 (510)	120 (180)	28	2 (3) x 1050	1990

В Канаде на острове Аксель-Хейберг в труднодоступном месте действует атомная метеорологическая станция. Источником энергии для аппаратуры станции служит изотоп стронция (всего 400 граммов), помещенный в специальный трехслойный сплав и защищенный свинцовым экраном. Теплота, образующаяся при радиоактивном распаде стронция, превращается в электрический ток, который питает приборы для измерения температуры, атмосферного давления, скорости и направления ветра. Полученные данные фиксируются самопишущими приборами и передаются по радио с помощью двух транзисторных передатчиков на расстояние свыше 1500 километров. Вся аппаратура смонтирована в стальном цилиндре высотой 2,5 метра, диаметром 0,65 метра и общей массой около тонны.

5. ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Космическая гонка, особенно в военной сфере, потребовала энергооснащенности спутников, в десятки раз превышающей ту, что могли обеспечить солнечные батареи или изотопные источники питания. Действительно, на базе радиоактивного изотопа трудно построить прямой преобразователь тепла в электроэнергию (на термоэлементах) большой мощности. В этом отношении намного перспективнее использование цепной ядерной реакции. В космическом пространстве в 2000 находилось 55 ядерных реакторов. Использование атомной-тепловой энергии можно разделить на машинное и безмашинное. Необходимую мощность дают компактные ядерно-энергетические установки (ЯЭУ), которые из-за ограниченных размеров спутников должны работать без габаритных парогенераторов или турбин. Прямое преобразование ядерной тепловой энергии в электрическую имеет решающие преимущества по сравнению с машинным для автономных реакторных энергоустановок сравнительно небольшой мощности (от 3 кВт до 3-5



МВт) и большой ресурсоспособности (от 3 лет непрерывной эксплуатации до 10 лет в перспективе).

Рис.7. Термоэлектрическая космическая ядерная установка

Ядерная электрическая установка (ЯЭУ) предназначена для питания электроэнергией аппаратуры

космических аппаратов используется принцип непосредственного преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электричество в полупроводниковом термоэлектрическом генераторе. Захоронение ЯЭУ после окончания эксплуатации производится переводом на орбиту, где время существования реактора достаточно для распада продуктов деления до безопасного уровня (не менее 300 лет). В случае любых аварий с космическим аппаратом ЯЭУ имеет в своём составе высокоэффективную дополнительную систему радиационной безопасности, использующую аэродинамическое диспергирование реактора до безопасного уровня.

Использование термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей энергии в сочетании с ядерными реакторами позволило создать принципиально новый тип установок, в которых источник тепловой энергии - ядерный реактор и преобразователь тепловой энергии в электрическую были объединены в единый агрегат - реактор-преобразователь.

Типичная ядерная энергетическая установка содержит: реактор на быстрых нейтронах с боковым бериллиевым отражателем, включающим 6 цилиндрических регулирующих стержней, холодильник излучатель; 2 контура теплоносителя (эвтектика натрия - калия), электромагнитный насос, термоэлектрический генератор и приводы регулирующих стержней; теньевую радиационную защиту гидрида лития обеспечивающую ослабление ионизирующих излучений реактора до уровня допустимых для приборов и оборудования космического аппарата; - излучатель для сброса тепла в космос со второго контура теплоносителя; приставку с агрегатами системы выброса сборки тепловыделяющих элементов реактора из корпуса реактора. Мощность электрическая - 3 кВт, мощность тепловая - 100 кВт, масса ЯЭУ - 930 кг, загрузка урана 235 - 30 кг.

В 50-х годах в СССР начаты работы по созданию реакторной термоэлектрической энергоустановки «БУК» с малогабаритным реактором на быстрых нейтронах и находящимся вне реактора термоэлектрическим генератором на полупроводниковых элементах. Более 30 установок «БУК» эксплуатировались на космических аппаратах серии «Космос» в течение ряда лет.

В 1964 в Институте ядерной энергии им. И.В.Курчатова запущен первый реактор прямого преобразования тепла в электричество, «Ромашка». Основой является высокотемпературный реактор на быстрых нейтронах, активная зона которого состоит из дикарида урана и графита. Активная зона реактора (цилиндр) окружена бериллиевым отражателем. Температура в центре активной зоны - 1770°C, на наружной поверхности реактора - 1000°C. На наружной поверхности отражателя находится термоэлектрический преобразователь, состоящий из большого числа кремний-германиевых полупроводниковых пластин, внутренние стороны которых нагреваются теплом, выделяемым реактором, а наружные охлаждаются. Неиспользованное тепло с преобразователя излучается в окружающее пространство ребристым холодильником-излучателем. Тепловая мощность реактора 40 кВт. Снимаемая электрическая мощность с термоэлектрического преобразователя 500 Вт.

Высокотемпературный ядерный реактор-преобразователь позволяет непосредственно получать электроэнергию без участия каких-либо движущихся рабочих тел и механизмов. В «Ромашке» наиболее полно воплощены идеи реактора прямого преобразования: там нет ничего движущегося. В отличие от американского реактора SNAP-10A там нет теплоносителя и насосов. Американцы вынуждены были отказаться от своего варианта реактора из-за непрочных позиций в области высокотемпературного материаловедения.

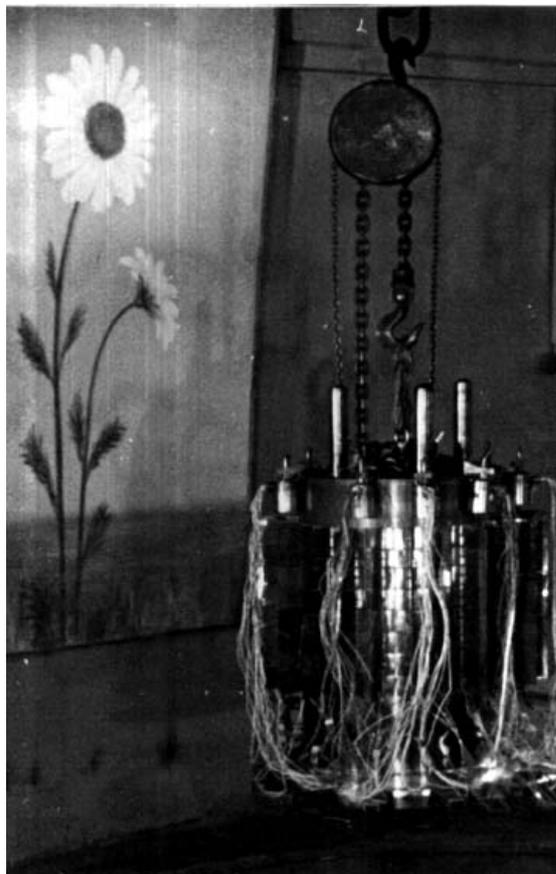


Рис.8 Реактор «Ромашка»

Реактор-преобразователь "Ромашка" успешно проработал 15000 часов (вместо ожидаемых 1000 ч.), выработал при этом - 6100 кВт.час электроэнергии.

Выполненный комплекс работ с установкой "Ромашка" показал её абсолютную надёжность и безопасность.

Эффективность работы подобных генераторов можно повысить путём использования вместо термоэлектрического преобразователя энергии плоских модульных термоэмиссионных элементов, располагаемых на границе активной зоны и радиального отражателя.

На базе установки "Ромашка" была создана опытная установка «Гамма» - прототип автономной транспортируемой АЭС «Елена» электрической мощностью до 500 кВт, предназначенной для энергоснабжения отдаленных районов.

Первая в нашей стране космическая ядерная электрическая станции (КАЭС) «БЭС-5» с гомогенным реактором на быстрых нейтронах и термоэлектрическим генератором (ТЭГ) разрабатывалась для электропитания аппаратуры космического аппарата радиолокационной разведки на участке выведения и в течение всего времени активного существования спутника на круговой орбите высотой порядка 260 км. Генерирующая выходная мощность "БЭС-5" 2800 Вт, с ресурсом 1080 часов. 3 октября 1970 осуществлён запуск ЯЭУ «БЭС-5» в составе космического аппарата радиолокационной разведки («Космос-367»). После проведения 9 запусков ЯЭУ "БЭС-5" в 1975 была принята на вооружение ВМФ СССР. Всего к моменту снятия с эксплуатации ЯЭУ «БЭС-5» (1989) была запущена в космос 31 установка.

В процессе эксплуатации установки проводились работы по доработке и модернизации БЭС, связанные с повышением радиационной безопасности, увеличением электрической мощности в конце ресурса до 3 кВт и увеличением ресурса до 6-12 месяцев. Первый запуск модернизированного варианта ЯЭУ был произведён 14 марта 1988 года в составе космического аппарата «Космос-1932».

Табл.4 Радионуклидные термоэлектрические генераторы (РТГ) и блоки обогрева (БО) на полонии-210 и плутонии-238, источник гамма-излучения (ИИ) на тулии-170

Спутник	Дата запуска	Высота орбиты, место нахождения	РТГ, БО, ИИ	Электрич./тепловая мощность, Вт	Время работы, час
Космос-84	03.09.1965	1300 км	РТГ «Орион-1» на полонии-210	~20 Вт _{ЭЛ}	~3000
Космос-90	18.09.1965	1300 км	РТГ «Орион-2» на полонии-210	~20 Вт _{ЭЛ}	~3000
Луна-17	17.11.1970	Луноход-1	БО на полонии-210	~900 Вт _{ТЕП}	~2000
Орбитальная станция «Салют-1»	19.04.1971	200-222 км Станция спущена в	ИИ на тулии-170	—	—

		Тихий океан 11.10.1971 г.			
Луна-21	16.01.1973	Луноход-2	БО на полонии-210	~900 Вт _{ТЕП}	~3000
Марс-96	16.11.1996	Падение при запуске в Индийский океан	РТГ «Ангел» и БО на плутонии-238 в малых станциях и пенетраторах	~0,2 Вт _{ЭЛ}	?

Типичным представителем КАЭС, используемых в качестве источников питания мощных радиотехнических спутников (космических радиолокационных станций и телетрансляторов), с прямым преобразованием тепла в электричество, является установка «Бук», которая по сути дела, представляла собой ТЭГ - полупроводниковый преобразователь Иоффе, только вместо керосиновой лампы в нем использовался ядерный реактор. Как обычно, один полупроводниковый спай помещался в холод, а другой - в тепло: между ними пробегал электрический ток. С холодом в космосе все в порядке - он повсюду. Для тепла же годился металлический теплоноситель, что омывал портативный ядерный реактор. Это был быстрый реактор мощностью до 100 кВт. Полная загрузка высокообогащенного урана составляла около 30 кг. Тепло из активной зоны передавалось жидким металлом - эвтектическим сплавом натрия с калием полупроводниковым батареям. Электрическая мощность достигала 5 кВт. Время работы «Бука» - 1-3 месяца. теперь уже в качестве, продолжались до начала перестройки. С 1970 по 1988 год в космос запустили около 30 радиолокационных спутников с ядерно-энергетическими установками "Бук" с полупроводниковыми реакторами-преобразователями. Если установка отказывалась, спутник переводили на орбиту длительного существования высотой 1000 км.

Основные достижения отечественной науки и техники в области термоэлектрической технологии для космических миссий связаны с НИОКР по созданию ЯЭУ «Ромашка», КЯЭУ «БУК» и реальным опытом ее эксплуатации в космосе в период 1970-1988 гг. в ходе 32-х запусков [6,15-17].

В **Табл. 5** приведены результаты положительного и отрицательного опыта использования термоэлектрических Si-Ge преобразователей в космосе.

Табл. 5 Опыт эксплуатации в космосе ЯЭУ с ТЭГ

Минусы	низкий ресурс ($\leq 0,5$ года); 25-30% деградация электрических характеристик (в основном из-за роста сопротивления электрических контактов); высокий системный показатель удельной массы ($\gamma > 50$ кг/кВт _{ЭЛ}).
Плюсы	высокая надежность ТЭГ; радиационные дефекты отжигаются при $T \geq 750$ К и не вызывают роста внутреннего сопротивления термобатареи

6. ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЕРМОЭМИССИОННЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В СССР параллельно работам по созданию ЯЭУ с термоэлектрическими генераторами проводились работы по ЯЭУ с термоэмиссионными преобразователями, имеющими более высокие технические характеристики. По сути, здесь используется тот же, что и в полупроводниковом преобразователе принцип, но вместо холодного и горячего спаи применяют горячий карбидурановый катод и холодный стальной анод, а между ними находятся легко ионизирующиеся пары цезия. Эффект - электрическая разность потенциалов, то есть натуральная космическая электростанция. Термоэмиссионное преобразование по сравнению с термоэлектрическим позволяет увеличить к.п.д., повысить ресурс и улучшить массогабаритные характеристики энергоустановки и космического аппарата в целом. Принцип термоэмиссионного преобразования тепловой энергии в электрическую заключается в том, что раскаленная выделяемым в реакторе теплом металлическая поверхность эффективно испускает ионы, адсорбируемые расположенной с небольшим зазором охлажденной стенкой.

В 1970-71 в СССР была создана термоэмиссионная ядерно-энергетическая установка «Топаз» (Термоэмиссионный Опытный Преобразователь в Активной Зоне), в которой использовался тепловой

реактор мощностью до 150 кВт. Полная загрузка урана составляла 31,1 кг 90% урана-235. Вес установки 1250 кг. Основой реактора были тепловыделяющие элементы – «гирлянды». Они представляли собой цепочку термоэлементов: катод - "наперсток" из вольфрама или молибдена, заполненный окисью урана, анод - тонкостенная трубка из ниобия, охлаждаемая жидким натрий-калием. Температура катода достигала 1650°C. Электрическая мощность 10 кВт. «Топазы» обладали кпд теплоэлектрического преобразования 5—10% против 2—4% у прежних реакторов.

Помимо урана-235 перспективен в качестве топлива реакторов космического назначения диоксид плутония-238, благодаря своему очень высокому удельному энерговыделению. В этом случае относительно низкий кпд термоэмиссионного реактора прямого преобразования компенсируется активным энерговыделением плутония-238.

Испытаны два термоэмиссионных реактора-преобразователя на промежуточных нейтронах (без замедлителя) - «Топаз-1» и «Топаз-2» электрической мощностью 5 и 10 кВт соответственно. В установке «Топаз» прямое (безмашинное) преобразование энергии осуществляется во встроенных в активную зону малогабаритного теплового реактора электрогенерирующих каналов. Установка «Топаз-1» снабжена тепловым реактором-преобразователем и жидкометаллическим теплоносителем (натрий-калий или литий). Принцип прямого преобразования тепловой энергии в электрическую заключается в нагреве в вакууме катода до высокой температуры при поддержании анода относительно холодным, при этом с поверхности катода «испаряются» (эмиттируют) электроны, которые, пролетев межэлектродный зазор, «конденсируются» на аноде, и при замкнутой наружной цепи по ней идёт электрический ток. Основное преимущество такой установки по сравнению с электромашинными генераторами — отсутствие движущихся частей. Реализация концепции реактора-преобразователя на быстрых нейтронах с литиевым охлаждением в будущем возможно позволяет решить задачу создания установки электрической мощностью 500-1000 кВт и более.



Рис.9. Термоэмиссионная космическая ядерная установка «ТОПАЗ»

Ядерная энергетическая установка содержит: термоэмиссионный реактор-преобразователь с замедлителем из гидрида циркония и боковым бериллиевым отражателем, включающим поворотные органы регулирования; систему реактора-преобразователя: приводы органов регулирования подачи цезия в электрогенерирующие каналы, скомпонованные в

блок, расположенный перед реактором-преобразователем; теньевую радиационную защиту из гидрида лития, обеспечивающего ослабление радиационного излучения реактора до уровней, допустимых для приборов космического аппарата; систему отвода неиспользованного тепла от реактора теплоносителем (эвтектика натрия-калия), включающая электромагнитный насос, питаемый электроэнергией от реактор-преобразователя, излучатель, для сброса тепла в космическое пространство и другие агрегаты. Мощность электрическая - 5 кВт, мощность тепловая - 150 кВт, ресурс, включая работу до 1 года на 100 кВт режиме - 7 лет, загрузка урана 235 - 11,5 кг, масса - 980 кг.

Табл.6 Краткая характеристика ЯЭУ «Топаз 1»

Объем активной зоны	22 л. 12 кг U235
Длина	7 м
Максимальный диаметр	1,3 м

Масса	около 1,2т
Мощность	6 Квт
Напряжение постоянного тока	32В

Ядерное топливо в Топазе-1 (диоксид урана обогащенный ураном-235) заключено в сердечнике из тугоплавкого материала, служащей катодом (эмиттером) для электронов. Тепло, выделяющееся в результате деления урана в реакторе, разогревает эмиттер до 1500-1800 градусов Цельсия, в результате чего происходит испускание электронов. Попадая на анод (коллектор), электроны обладают достаточной энергией, чтоб во внешней замкнутой цепи между электродами термоэмиссионного преобразователя (эмиттером и коллектором) произвести работу во внешней нагрузке. Межэлектродный зазор составляет несколько десятых долей миллиметра. Пары цезия, вводимые в межэлектродный зазор (МЭЗ), существенно активизируют процесс получения электроэнергии в реакторе. В конструкции энергоустановки реализована расходная цезиевая система, в которой пары цезия прокачивались через МЭЗ для удаления примесей. Прошедшие МЭЗ пары цезия поглощались ловушкой на основе пирографита, а газообразные примеси удалялись в космическое пространство. Цезиевая система имела термостат-генератор паров цезия с электронагревателями, с помощью которых обеспечивалось поддержание заданной температуры наиболее холодной зоны термостата. В генераторе паров цезия применялся ряд устройств, обеспечивающих удержание жидкой фазы в определенном положении и препятствующих её попаданию в парообразный тракт при действии малых перегрузок в космическом полете. В примененной конструкции генератора паров цезия максимальное количество цезия составило 2,5 кг, что при заданном расходе паров, определяемом проводимостью дросселя на выходе из РП, однозначно ограничивало возможный ресурс ЯЭУ. Требование минимизации массы и габаритов приходилось реализовывать с учетом того обстоятельства, что теплоотвод в космическом пространстве возможен лишь посредством излучения за счет использования специальной конструкции холодильника-излучателя. Реализация системы теплоотвода существенно затруднена, поскольку в ней используются агрессивная жидкометаллическая натрий-калиевая эвтектика. К этому добавляются высокие требования к надежности автономного функционирования и ресурсоспособности ЯЭУ в условиях перегрузок при выведении на орбиту, произвольной ориентации и отсутствия сил тяжести при работе на орбите, необходимости обеспечения ядерной и радиационной безопасности в условиях возможных аварий ракет-носителей при выведении КА с ЯЭУ на орбиту, а также обеспечения метеорной безопасности в космическом полёте и т.п.

Ядерная электроэнергетическая установка «Топаз» предназначена для питания электроэнергией аппаратуры космических аппаратов военного применения. Использование на спутниках ядерных реакторов позволяет обеспечить стабильное электропитание не зависимо от расположения на орбите. Ядерная и радиационная безопасность обеспечивается конструкцией ядерного реактора. При любых авариях, включая гипотетические с ракетой-носителем на стартовой позиции и на участке выведения на орбиту, ядерный реактор остается подкритичным. За счет введения блокировок пуск реактора невозможен по достижению орбиты. Блокировка снимается по радиокоманде с Земли только после подтверждения вывода на расчетную орбиту непосредственными траекторными измерениями. Высота орбита выбрана из условия, чтобы существование космического аппарата после прекращения функциональной установки с учетом любых аварийных ситуаций с установкой было достаточно для распада продуктов деления до безопасного уровня. Это время превышает 350 лет. Таким образом обеспечивается гарантированная безопасность населения Земли при использовании установок подобного типа.

ЯЭУ «Топаз-1» разрабатывалась для спутников радиолокационной разведки, «Топаз-2» – для космических аппаратов системы непосредственного телевизионного вещания из космоса. Первый летный образец - спутник «Космос-1818» с установкой «Топаз» вышел на радиационно безопасную стационарную круговую орбиту высотой 800 км 2 февраля 1987 года и безотказно

проработал полгода, до исчерпания запасов цезия. Второй спутник – «Космос-1876» был запущен через год. Он отработал на орбите почти в два раза дольше. Успех «Топазов» стимулировал разработку ряда проектов реакторов с термоэмиссионными преобразователями, в частности ядерно-энергетической установки электрической мощностью до 500 кВт на основе реактора с литиевым охлаждением.

На основе ЯЭУ «БЭС» и «Топаз» подготовлен ряд проектов установок с улучшенными характеристиками. Подготовлены технические предложения по термоэлектрической ЯЭУ «Заря-1» для космического аппарата оптико-электронной разведки. ЯЭУ «Заря-1» отличается от «БЭС» уровнем электрической мощности (5,8 кВт против 2,9 кВт) и повышенным ресурсом (4320 часов против 1100 часов). В 1978 создана ЯЭУ «Заря-2» электрической мощностью 24 кВт и ресурсом 10000 часов, а потом и космическая ядерная энергодвигательная установка «Заря-3» электрической мощностью 24,4 кВт и ресурсом 1,15 года. Она предназначалась для создания импульсов тяги коррекции орбиты спутников и энергообеспечения специальной аппаратуры.

Термоэмиссионная космическая ядерная установка «ТОПАЗ 100/40» представляет собой двухрежимную ядерную энергетическую установку (ЯЭУ). Она предназначена для питания электроэнергией электроракетных двигателей (ЭРД) при выводе на высокую (вплоть до геостационарной) орбиты спутников системы спутниковой связи «Космическая звезда» (Space Star) и питания электроэнергией бортовой аппаратуры. Вывод на мощность реактора энергоустановки происходит только при достижении космическим аппаратом радиационно-безопасной орбиты (800 км и выше). Конструкция ЯЭУ удовлетворяет принятым на 47 сессии Генеральной Ассамблеи ООН документа «Принципы, касающиеся использования ядерных источников в космическом пространстве». В стартовом положении ЯЭУ размещена в отсеке космического аппарата диаметром 3,9 метра и длиной 4,0 метра под обтекатель. В орбитальном положении ЯЭУ раздвинута (реактор максимально отдалён от аппаратуры) и имеет длину 16,0 метров и диаметр 4 метра.

Ядерная энергетическая установка содержит: термоэмиссионный реактор-преобразователь с обслуживающими системами: привод органов регулирования, подача рабочего тела (цезий) в электрогенерирующие каналы; теньевую радиационную защиту из гидрида лития, обеспечивающую ослабление радиационного излучения реактора до уровня, допустимого для приборов космического аппарата; систему отвода неиспользованного тепла от реактора с жидкометаллическим (эвтектический сплав натрия и калия) теплоносителем, включающую электромагнитный насос, холодильник излучатель, состоящий из 9 панелей на тепловых трубах, для сброса тепла в космическое пространство и другие агрегаты. Мощность электрическая - 40 кВт, мощность электрическая в режиме питания ЭРД - 100 кВт, ресурс, включая работу до 1 года на 100 кВт режиме - 7 лет, масса ЯЭУ - 4400 кг, загрузка урана 235 - 45 кг. Во избежание быстрого падения ЯЭУ на Землю спутники по завершении активного существования переводятся на орбиту захоронения высотой около 1000 км, где отработавший реактор должен просуществовать от 300 до 600 лет. На подобную орбиту переводятся и аварийные спутники. Сделать это, однако, удавалось не всегда. За почти 20 лет запусков было четыре случая падения спутника на Землю: два - в океан и один - на сушу.

Историческое первенство в космических ядерных авариях принадлежит США - в 1964 г. не смог выйти на орбиту американский навигационный спутник с атомным реактором на борту, и этот реактор развалился в атмосфере вместе со спутником на куски.

В СССР первая авария связана с запущенным 18 сентября 1977 4300-килограммовым спутником серии УС-А (псевдоним «Космос-954», параметры орбиты: перигей 259 км, апогей 277 км, наклонение 65 градусов). Спутник входил в состав спутниковой системы морской космической разведки и целеуказания МКРЦ «Легенда», предназначенной для обнаружения кораблей вероятного противника и выдачи данных для применения по ним нашим флотом крылатых ракет. В конце октября 1977 «Космос-954» прекратил регулярные коррекции орбиты, но перевести его на орбиту захоронения не удалось. По последующим сообщениям ТАСС, 6 января 1978 спутник

внезапно разгерметизировался, из-за чего бортовые системы вышли из строя. Неуправляемое снижение аппарата под действием верхних слоев атмосферы завершилось 24 января 1978 сходом с орбиты и падением радиоактивных обломков на севере Канады в окрестности Большого Невольничьего озера. Урановые элементы спутника полностью сгорели в атмосфере. На земле нашли лишь остатки бериллиевого отражателя и полупроводниковых батарей. Тем не менее радиоактивный космический мусор оказался разбросанным на северо-западе Канады на площади в несколько тысяч квадратных километров. СССР согласился выплатить Канаде 3 миллиона долларов, составивших 50% стоимости операции «Morning Light» по очистке района падения «Космоса-954».

28 декабря 1982 работавший с 30 августа «Космос-1402» не удалось перевести на орбиту захоронений и он начал неконтролируемое снижение. Конструктивные доработки после предыдущей аварии позволили отделить активную зону от термостойкого корпуса реактора и предотвратить компактное падение обломков. Активная зона вошла в атмосферу 7 февраля 1983 и радиоактивные продукты деления рассеялись над Южной Атлантикой.

В апреле 1988 была утеряна связь с «Космосом-1900», выведенным на орбиту в декабре 1987. В течение пяти месяцев спутник неконтролируемо снижался, и наземные службы не могли дать команду ни на увод реактора на высокую орбиту, ни на отделение активной зоны для более безопасного ее схода с орбиты. К счастью, за пять суток до ожидавшегося входа в атмосферу, 30 сентября 1988 сработала система автоматического увода реактора, включившаяся ввиду исчерпания запаса топлива в системе ориентации спутника.

Продолжением источников питания типа «Топаз» явилась термоэмиссионная ядерная энергетическая установка «Енисей-Топаз». Электрогенерирующий канал - одноэлементный. Мощность электрическая - 5 кВт, ресурс - до 3 лет.



Рис.10. ЯЭУ «Енисей»

Хотя само по себе происшествие не нанесло материального ущерба, его наложение на предшествовавшие катастрофы «Челленджера» и Чернобыльской АЭС привело к протестам против использования ядерных энергоустановок в космосе. Это обстоятельство стало дополнительным фактором, повлиявшим на прекращение полетов спутников с космическими локаторами в 1988. Впрочем, основной причиной отказа от космических локаторов с ядерным энергопитанием стали не призывы мировой общественности и уж тем более, не создаваемые реакторами помехи для гамма-астрономии, а низкие эксплуатационные характеристики.

7. Источники света

Смеси фосфоров с радиоактивными изотопами (обычно с α -излучателями, типа радий-226) давно и широко применяются для оформления контрольных приборов на борту самолёта, часов, елочных игрушек и т.п. – везде, где требуются краски постоянного свечения. Преимущество радия-226 – большой период полураспада (1620 лет), что обеспечивает «вечное» свечение изделия. Недостатки – образование при распаде радия многочисленных продуктов, многие из которых β - и γ -излучатели, что создаёт вокруг светящихся изделий, радиационное поле, иногда опасное для здоровья. Поэтому в последние годы предпринимаются усилия по замене радия на какие-то другие радионуклиды с менее жёстким излучением. Перспективным в этом отношении считается прометий-147, мягкий β -излучатель с периодом полураспада 2,64 года. К сожалению, цифры и стрелки часов с таким излучателем будут светиться не более двух лет. Зато они абсолютно безопасны для пользователя.

На базе смесей фосфоров с газообразными радионуклидами промышленность выпускает радиолуминесцентные источники света. Такие источники представляют собой стеклянные трубки

или шары с внутренней стороны покрытые фосфором и заполненные такими газами, как тритий (^3H , очень мягкий β -излучатель, период полураспада 12,26 лет) или криптон (^{85}Kr , $T=10,3$ лет). Такие светильники используются в качестве приводных фонарей полярных аэродромов, ламп бакенов и надписей навигационных знаков.

8. Перспективы развития ядерных энергетических установок

Табл. 7 Основные характеристики КЯЭУ «БУК» и «БУК-ТЭМ»

	«БУК»	«БУК-ТЭМ»
Тепловая мощность, кВт	100	4000
Планируемый ресурс, лет	3	50
Масса, т:	0,4	10
К-На теплоноситель	0,9	8
Li теплоноситель		6

Полная загрузка высокообогащенного урана в «Бук» 30 кг, теплоноситель - жидкий металл - эвтектический сплав натрия с калием. Источник электричества - полупроводниковый преобразователь. Электрическая мощность 5 кВт. В «Топазе» использовался тепловой реактор мощностью 150 кВт. Полная загрузка урана 12 кг. Основой реактора были тепловыделяющие элементы – «гирлянды», представляющие собой цепочку термоэлементов: катод – «наперсток» из вольфрама или молибдена, заполненный окисью урана, анод - тонкостенная трубка из ниобия, охлаждаемая жидким натрий-калием. Температура катода 1650°C, электрическая мощность установки 10 кВт.

С 1970 по 1988 год СССР(Россия) запустил в космос около 30 радиолокационных спутников с ядерно-энергетическими установками «Бук» с полупроводниковыми реакторами-преобразователями и два - с термоэмиссионными установками "Топаз".

В настоящее время к космическим ядерным энергетическим установкам (КЯЭУ) нового поколения предъявляются следующие требования: интеграция ядерной энергетической установки в космическом аппарате, выводимым современными ракетносителями (типа Протон, Протон-М, Ангара); ядерная и радиационная безопасность, в т.ч. при возможной аварии (на Землю падает «чистый» реактор); транспортный энергетический режим – на высотах выше радиационно-безопасной орбиты 800 км; подкритическое состояние реактора при всех видах аварий; отрицательный температурный коэффициент реактивности при рабочих параметрах; резервирование узлов, подверженных ресурсной деградации; комбинация различных систем преобразования энергии; преимущественная отработка элементов и узлов во вне реакторных условиях; возможность продолжительного нахождения в космосе до начала работы ЯЭУ; выходная электрическая мощность 50÷400 кВтЭЛ (при 115÷120 В), ресурс 7-10 (до 20) лет.

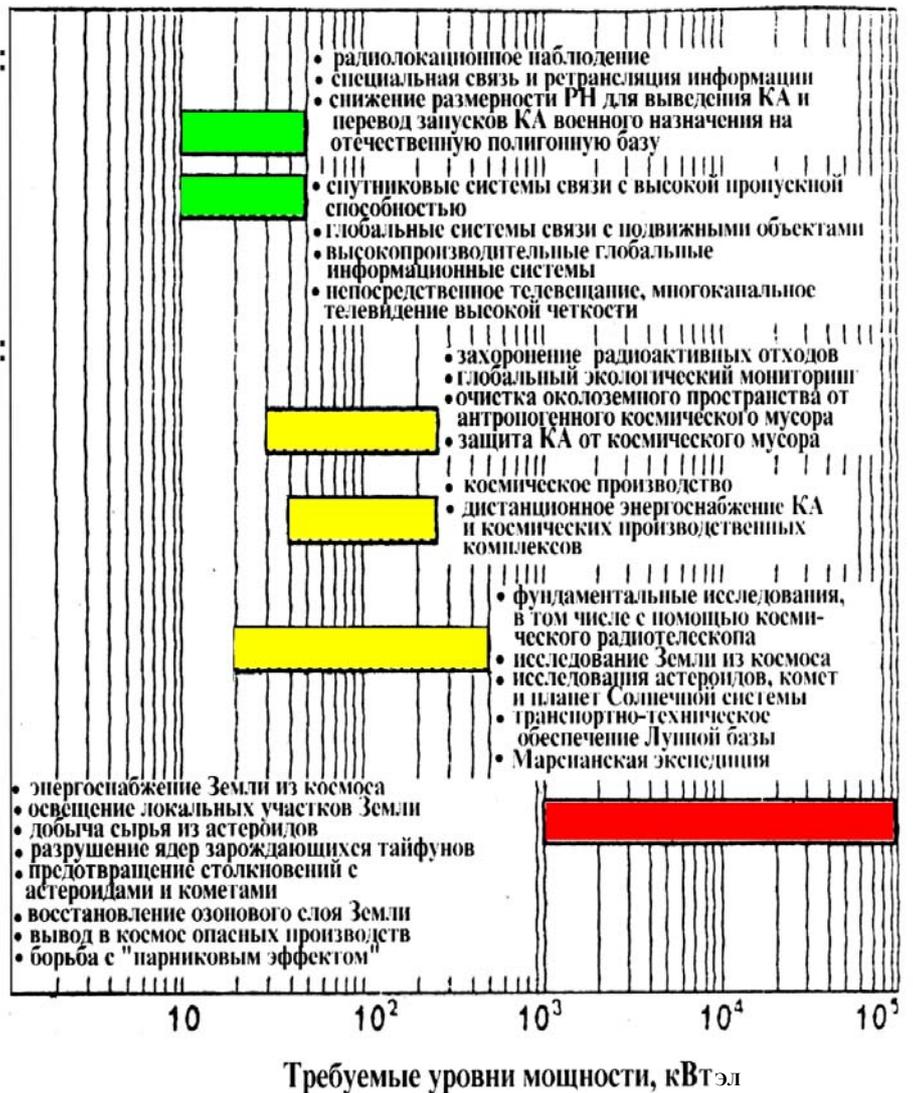
Табл. 8 Основные задачи в космосе в ближне- и долгосрочной перспективе.

КОСМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ БЛИЖАЙШЕЙ ПЕРСПЕКТИВЫ:

- ✓ ЗАДАЧИ ОБОРОНЫ
- ✓ СВЯЗЬ И ТЕЛЕВЕЩАНИЕ

КОСМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОТДАЛЕННОЙ ПЕРСПЕКТИВЫ:

- ✓ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИИ
- ✓ ЭНЕРГЕТИКА И
ПРОИЗВОДСТВО В КОСМОСЕ
- ✓ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ
- ✓ ГЛОБАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ
ЗАДАЧИ



В области термоэлектрических устройств в настоящее время в России подготовлен проект перехода от ядерной энергетической установки типа «Бук» к более совершенной «БУК-ТЭМ» (Табл.7).

Опыт работ, проведенных в области термоэлектричества для КЯЭУ позволяет сделать вывод о практической возможности создания ТЭГ на основе Si-Ge ТБ/ТМ радиально-кольцевой геометрии в составе либо чисто термоэлектрических ЯЭУ, либо комбинированных ЯЭУ (термоэмиссия + термоэлектричество) с выходной электрической мощностью теплоэнергогенератора 10-100 кВт_{эл} для космических миссий 21-го века.

Основные направления работ в термоэмиссии после завершения работ по программам создания КЯЭУ «ТОПАЗ» и ЯЭУ «Енисей» связаны с необходимостью радикального увеличения к.п.д. с уровня ~10% до 20-30%, ресурса работы электрогенерирующих каналов (ЭГК) и систем в составе ЯЭУ – с 1-2 лет до 10-20 лет при существенном ограничении массогабаритных характеристик. Выбор концепции термоэмиссионного ЭГК и ЯЭУ определяется требованиями решаемой задачи, из которых важнейшими являются ресурс, энергонапряженность, в том числе одно- или двухрежимность (с форсированием электрической мощности), величина выходного напряжения электрического тока, необходимость вне реакторного подтверждения ресурса и проверки основных технических решений на стендах с имитационным электронагревом и т.п.

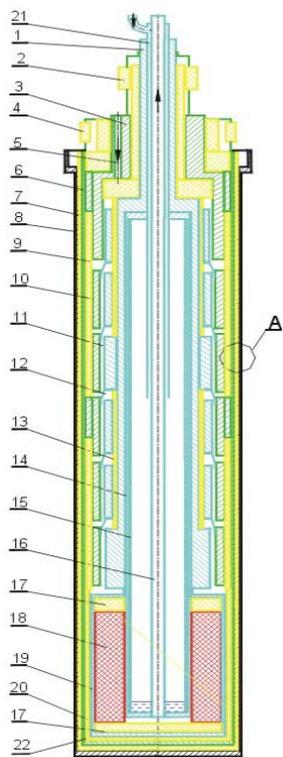
В **Табл.9** приведены основные расчетные технические характеристики КЯЭУ «Эльбрус-400/200» в сравнении с хорошо известными характеристиками реактора «ТОПАЗ».

Табл.9 Основные характеристики ЯЭУ «ТОПАЗ» и «ЭЛЬБРУС-400/200»

	ТОПАЗ	ЭЛЬБРУС-400/200
Тепловая/электрическая мощность, кВт: в транспортном режиме с ЭРДУ	—	~4000/400
в номинальном режиме электропитания модуля полезной нагрузки	150/6	~2000/200
Планируемый ресурс (с 2-кратным резервированием термоэмиссионной системы), лет	1 (без резервир.)	20
Масса, т	~1,2	7

На **Рис.10** приведен пример возможной схемы многоэлементного электрогенерирующего канала, вынесенного из активной зоны ЯЭУ и размещенного на газорегулируемой тепловой трубе в виде термоэмиссионного электрогенерирующего модуля, допускающего одно- или двукратное резервирование электрогенерирующих систем.

Сегодня понятно, что термоэмиссия и термоэлектричество как в термоэмиссионных и термоэлектрических установках, так и при их комбинировании (термоэлектричество + термоэмиссия) в КЯЭУ нового поколения имеют несомненную перспективу использования. При этом термоэмиссия имеет несомненные преимущества перед другими статическими преобразователями и известными динамическими преобразователями. Подобные установки могут быть эффективно использованы для решения различных задач в космических миссиях 21-го века, которые приведены в **Табл.8**.



- 1 – анодный токовывод 2 – гермоввод
 3 – катодный токовывод 4 – гермоввод 5 –
 подача цезия 6 – охранный электрод 7 – сухая изоляция 8 – корпус 9 – мокрая изоляция 10 –
 коллектор 11 – эмиттер 12 – коммутация 13 – катодная изоляция 14 – тепловая труба 15 –
 капиллярно-пористая структура 16 – тракт вывода осколков 17 – отражатель 18 – топливо 19 – корпус ТВЭла 20 – экранно-вакуумная изоляция 21 – тракт подачи газа 22 – мокрая изоляция

Рис.10 Схема термоэмиссионного электрогенерирующего модуля с двукратным резервированием термоэмиссионных преобразователей