

Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи

Н. Н. Пономарев-Степной

Физические принципы методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую известны давно. Однако внимание к этой области физики и техники усилилось только в последнее время в связи с развитием ядерной энергетики. Это объясняется большим сходством ядерных источников тепла и элементов непосредственного преобразования.

Отсутствие движущихся механизмов в системах непосредственного преобразования позволяет рассчитывать на возможность создания надежных установок с длительным ресурсом работы; компактность преобразователей может обеспечить высокие удельные (весовые и объемные) мощности энергетических установок, особенно в случае совмещения источников тепла с элементами преобразования.

Особенности ядерных источников тепла (высокие энергоемкость и удельная мощность) удачно сочетаются с особенностями систем прямого преобразования. Сочетание этих свойств делает перспективным использование ядерных энергетических установок с непосредственным преобразованием тепловой энергии в электрическую там, где необходимы автономные, надежные, компактные источники электроэнергии с большим ресурсом работы.

Высокотемпературный характер систем непосредственного преобразования, особенно термоэмиссионных и магнетогидродинамических, открывает перспективу повышения к. п. д. энергетической установки, в частности при использовании элементов непосредственного преобразования в виде высокотемпературной ступени в сочетании с машинным преобразователем. Ядерные источники могут обеспечить необходимые для систем прямого преобразования высокие температуры, открывая перспективы применения в будущем стационарных ядерных установок с прямым преобразованием.

На Третьей женеvской конференции вопросам прямого преобразования было посвящено специальное секционное заседание, на котором с большим интересом были рассмотрены доклады*, посвященные работам в области термоэлектрических, термоэмиссионных и магнетогидродинамических преобразователей.

Термоэлектрические системы

(217, 218, 318, 873)**

Термоэлектрический эффект долгое время не признавался пригодным для энергетических целей в связи

* Перечень докладов советских ученых опубликован в «Атомной энергии», 17, вып. 3, 235 (1964), а список докладов зарубежных ученых — в «Атомной технике за рубежом», № 9, 27 (1964).

** В круглых скобках указаны номера докладов.

с низким значением к. п. д. преобразования тепловой энергии в электрическую, обусловленным малой величиной коэффициента добротности $Z = \frac{\alpha^2}{S\lambda}$ металлических термопар (α — коэффициент термо-э. д. с., S — электропроводность, λ — теплопроводность).

Разработка полупроводниковых элементов, таких, как Bi_2Te_3 , $PbTe$, $SiGe$ и других, позволила повысить добротность материала в десятки раз, что приводит к приемлемым значениям к. п. д. преобразования. Зависимости безразмерного параметра ZT полупроводниковых материалов с n - и p -проводимостью от температуры приведены на рис. 1 и 2 (217). Термоэлектрические материалы по рабочим температурам можно

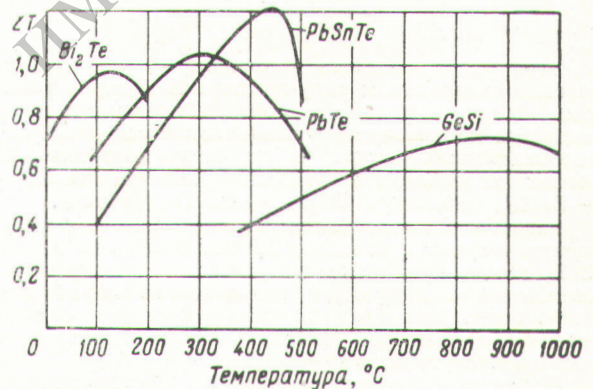


Рис. 1. Характеристики термоэлектрического материала n -типа.

отнести к трем группам: низкотемпературные на основе Bi , материалы для средней области температур на основе Pb и высокотемпературные материалы типа сплава $SiGe$. Материал на основе сплава $SiGe$ благодаря тому, что он имеет рабочую температуру выше $1000^\circ C$, низкое давление паров при этой температуре, хорошие механические свойства и обеспечивает возможность создания электрической коммутации термоэлементов металлургическим путем, перспективен как термоэлектрический материал для высокотемпературных установок, в том числе для космических систем (218.)

Изотопные источники тока. К настоящему времени разработано и действует несколько электрогенераторов с термоэлектрическими преобразователями, источником тепла в которых служат радиоактивные изотопы. О двух источниках такого типа доложено

советскими учеными (318). В одном из них используется Po^{210} ; источник тепла — плоский контейнер ($60 \times 60 \times 13$ мм) с пятью капсулами Po^{210} активностью по 1000—2000 кюри окружен батареей термопреобразователей из сплава SiGe. Генератор успешно испытан в течение нескольких тысяч часов. Мощность его составила ~ 6 вт при к. п. д. $\sim 2,4\%$. Температура на горячей поверхности преобразователя $760^\circ C$, а температура радиатора $230^\circ C$. В генераторе второго типа используется Ce^{144} , обеспечивающий электроэнергией автоматическую радиометеорологическую станцию.

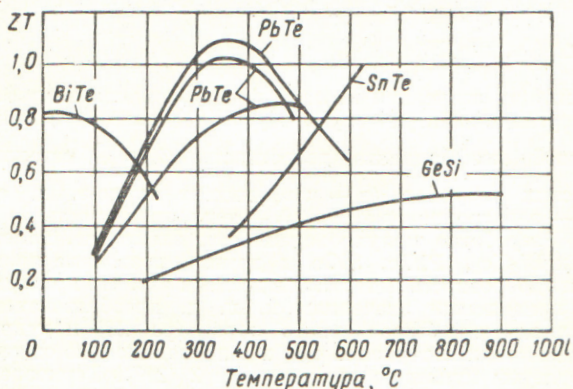


Рис. 2. Характеристики термоэлектрического материала p -типа.

Электрическая мощность установки ~ 5 вт. Использование специальной аккумуляторной батареи позволяет поднять мощность до 150 вт. Изменение тепловой мощности компенсируется специальной системой регулирования температуры. В генераторе для термоэлементов используются твердые растворы $Bi_2Te_3 + Bi_2Se_3$ (n -тип) и $Bi_2Te_3 + Sb_2Te_3$ (p -тип).

Разработки изотопных источников энергии с термоэлектрическими преобразователями проведены в США (217). Созданы и работают установки электрической мощностью от 2 до 60 вт; используются изотопы Sr^{90} , Pu^{238} , Po^{210} . Они предназначены для снабжения электроэнергией метеорологических станций, навигационных буев, спутников.

Проверка изотопных генераторов в эксплуатационных условиях как в Советском Союзе, так и в США показывает, что благодаря компактности, надежности, автономности и длительности работы изотопные генераторы перспективны в качестве маломощных источников электроэнергии для труднодоступных районов на земле и в космосе.

Реакторные схемы. Получение больших электрических мощностей в установках с термоэлектрическими генераторами возможно при использовании в качестве источника тепла ядерного реактора. Первой действующей установкой такого типа является высокотемпературный реактор-преобразователь Ромашка (873*), давший электрический ток 14 августа 1964 г. Для этой установки характерно полное отсутствие движущихся элементов или механизмов, участвующих в процессе преобразования энергии. Тепло, выделяющееся в твэлах из дикарида урана, распространяется за счет

теплопроводности и, проходя через отражатель из бериллия, попадает на термоэлектрический преобразователь. Преобразователь из кремний-германиевых термоэлементов примыкает к наружной поверхности радиального отражателя. Тепло в элементах преобразователя частично превращается в электричество. Неиспользованная часть тепла отводится излучением в окружающее пространство.

Несколько отличен принцип действия ядерной энергетической установки с термоэлектрическим преобразователем SNAP-10A, разрабатываемой в США (218). Эта установка находится в стадии пуско-наладочных работ. В установке SNAP-10A используется гомогенный ядерный реактор на тепловых нейтронах. Замедлителем служит гидрид циркония, содержащий около 10 вес. % U^{235} . Тепло из реактора переносится с помощью жидкометаллического теплоносителя (эвтектический сплав NaK) к термоэлектрическому генератору и с холодных спаев термоэлементов отводится излучением в окружающее пространство. Из двух возможных материалов $PbTe$ и $SiGe$ предпочтение отдано сплаву SiGe, так как он может работать в условиях глубокого вакуума, в то время как использование $PbTe$ требует специальной очехловки термоэлементов для подавления сублимации.

Преобразователь системы, рассчитанный на 500 вт, разделен на 120 модулей. Тепло из реактора передается теплоносителем в трубчатую часть модуля. По длине каждой трубки расположено 24 цилиндрических термоэлемента, которые электрически изолированы от трубки тонкими дисками из окиси алюминия. С горячей стороны элементы последовательно соединены медными шинами, с холодной стороны — алюминиевыми излучающими пластинами. Все поверхности раздела от трубки до алюминиевой пластины соединены металлургически. Конструкция элементов обеспечивает невысокое тепловое и электрическое сопротивление и позволяет уменьшить паразитные перетечки тепла. В преобразователе каждые три модуля соединены последовательно в секцию. Сорок секций монтируется на поверхности усеченного конуса, образуя параллельные контуры теплоносителя между входным и выходным коллекторами. Вес 120 модулей 60 кг, поверхность излучения $5,8$ м². Секции преобразователя соединены электрически в последовательно-параллельную цепь, что обеспечивает лучшую надежность работы преобразователя.

В установке SNAP-10A кроме основного преобразователя используется вспомогательный термоэлектрический преобразователь, применяемый для питания электромагнитного насоса постоянного тока. Две параллельные термодары из $PbTe$, соединенные накоротко через рабочий участок насоса, дают 700 ампер постоянного тока. Тепло поступает к термодарам через стенки трубопровода теплоносителя, неиспользованное тепло сбрасывается излучающими ребрами из алюминия. Магнитное поле 2400 гс создается постоянным магнитом. Общий к. п. д. насоса по создаваемому напору равен 1%.

Предполагается, что после отработки установка SNAP-10A будет запущена в космическое пространство, где обеспечит мощность 500 вт в течение около года.

Термоэмиссионные преобразователи

(44, 132, 219, 317)

Физические основы процесса термоэлектронной эмиссии обуславливают высокий уровень рабочих температур термоэмиссионных преобразователей. Выход-

* Доклад опубликован в журнале «Атомная энергия», 17, 329 (1964).

ная мощность преобразователя резко увеличивается с ростом температуры (рис. 3) (219). Начиная с температуры 1500° К удельная мощность термоэмиссионного преобразователя становится выше 1 *вт/см²*, что делает его перспективным для использования совместно с ядерными источниками энергии.

Ранние работы по термоэлектронной эмиссии были посвящены изучению вакуумного режима работы преобразователя. Использование этого режима приводило к серьезным конструктивным и технологическим трудностям, так как требовало для устранения пространственного заряда электронов уменьшения расстояния между элект-

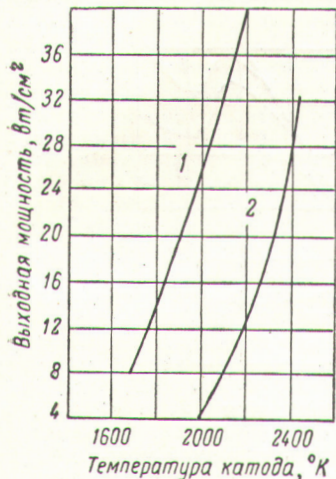


Рис. 3. Зависимость выходной мощности преобразователя от температуры катода (давление цезия и температура анода оптимальны): 1 — вольфрамовый катод, никелевый анод 0,13 мм; 2 — катод из UC + ZrC, зазор 1,0 мм.

тродами до 10 мк. Применение паров цезия для компенсации пространственного заряда позволяет разрабатывать элементы с разумным межэлектродным расстоянием. Зависимость выходной мощности преобразователя от расстояния между электродами при температуре катода 2100° К и оптимальном давлении паров цезия приведена на рис. 4 (219).

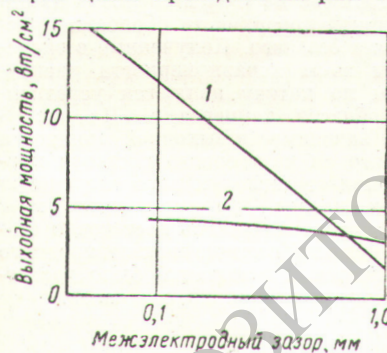


Рис. 4. Выходная мощность преобразователя в зависимости от межэлектродного зазора при температуре катода 2100° К и оптимальном давлении паров цезия: 1 — вольфрамовый катод; 2 — катод из монокарбида урана.

Наличие цезия в межэлектродном зазоре сказывается также на уменьшении работы выхода катода и анода, улучшая тем самым характеристики преобразователя. Действие цезия на работу выхода разных материалов, определенное теоретически и экспериментально, показано на рис. 5, где графически изображено сравнение эффективной работы выхода в парах цезия с работой выхода в вакууме для некоторых материалов (219). Кривые построены для двух значений паров цезия при постоянной температуре излучателя. Более высокое значение работы выхода в вакууме обеспечивает более низкую эффективную работу выхода в парах цезия. Количественные данные могут существенно изменяться для конкретных материалов из-за

влияния на эти параметры структуры поверхности, ориентации кристаллов, введения примесей в пары цезия и т. д. Так, например, работа выхода молибдена в парах цезия с присадкой фтора составляет 1,36 эв в сравнении с величиной 1,68 эв для чистого цезия.

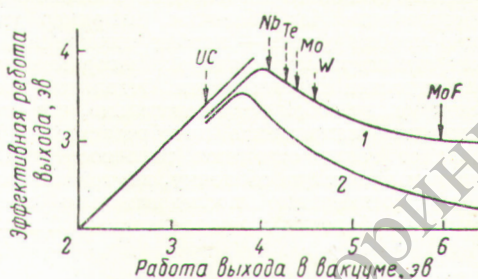


Рис. 5. Сравнение эффективной работы выхода в парах цезия с работой выхода в вакууме при температуре катода 1700° К: 1 — давление паров цезия 8 · 10⁻² торр; 2 — давление паров цезия 0,8 торр.

Анализируются режимы работы преобразователя в зависимости от величины давления паров цезия и дается теоретическое описание диффузионного режима (317). На рис. 6 по экспериментальным данным обозначены границы режимов работы преобразователя с молибденовым катодом.

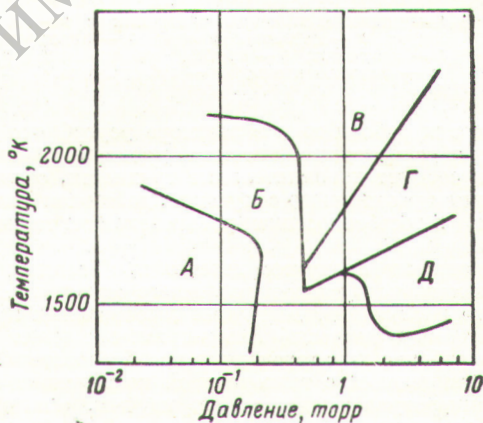


Рис. 6. Экспериментальные границы режимов работы преобразователя с молибденовым катодом (зазор 0,5 мм): А — квазивакуумный режим; Б — диффузионный режим; В, Г, Д — дуговые режимы.

Разработка термоэмиссионных элементов наряду с физическими исследованиями требует преодоления ряда трудностей технического характера. В частности, жесткие требования предъявляются к изоляционным соединениям, которые должны при температурах до 1000° К обеспечивать вакуумную плотность соединений и высокую (до 1000 *в/см*) электрическую прочность. Хорошие характеристики до 900° К показала окись алюминия в соединении (с помощью медного припоя) с ниобием. Более высокие температуры до 1400° К требуют применения припоя на основе вана-

дия или диффузионных соединений (219). Термоэмиссионный преобразователь (тэп), объединенный с твэллом (электрогенерирующим элементом реактора-преобразователя), схематически изображен на рис. 7. Он состоит из катода с заключенным в него тепловыделяющим сердечником (в некоторых случаях возможно применение сердечника без оболочки, например твердого раствора карбид урана — карбид циркония). Катод окружен цилиндрическим анодом, зазор между электродами заполнен парами цезия. Отдельные элементы соединены между собой последовательно, что увеличивает выходное напряжение преобразователя. Непреобразованное тепло отводится теплоносителем, омывающим металлическую оболочку, внутри которой расположены соединенные последовательно элементы, отделенные от оболочки слоем электрической изоляции.

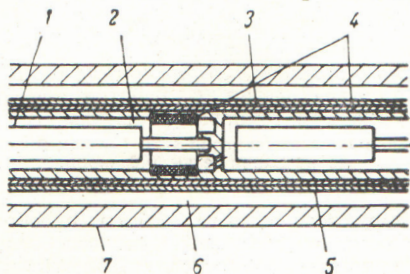


Рис. 7. Схема электрогенерирующего элемента реактора-преобразователя:

1 — тепловыделяющий сердечник с катодом; 2 — цезиевый зазор; 3 — анод; 4 — изоляция; 5 — трубки из ниобия; 6 — теплоноситель; 7 — замедлитель.

Условия работы тэпа в реакторе усугубляют трудности, обусловленные высоким уровнем температур тэпа, и создают дополнительные трудности, связанные с наличием реакторного облучения, действием осколков деления и особенностями распределения тепловыделения.

Накопление продуктов деления при больших выгораниях материала тепловыделяющего сердечника вызывает его распухание. Диффузия газообразных продуктов деления в цезиевый промежуток оказывает влияние на рабочие характеристики преобразователя. Так, продукты деления с температурой конденсации выше, чем температура анода, оседая на нем, влияют как на работу выхода анода, так и на его излучательную способность.

Быстрые реакторы

О. Д. Казачковский

Физике и технике быстрых реакторов было посвящено одно заседание конференции, на котором было заслушано 17 докладов*. Кроме того, некоторые вопросы, относящиеся к проблемам быстрых реакторов, рассматривались на других секциях (ядерное

* Перечень докладов советских ученых опубликован в «Атомной энергии», 17, вып. 3, 235 (1964), а список докладов зарубежных ученых в «Атомной технике за рубежом», № 9, 27 (1964).

Резкая зависимость электрических характеристик тэпа от температуры приводит к необходимости выравнивания тепловыделения в реакторе-преобразователе перераспределением концентрации горючего или замедлителя.

Важные результаты для разработки электрогенерирующих элементов реактора получены при исследовании образцов тэпа в реакторе (317). Испытывались преобразователи с различными вариантами катода:

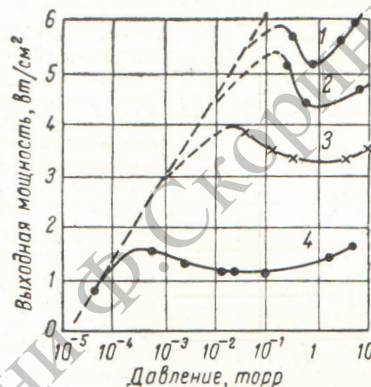


Рис. 8. Зависимость выходной мощности преобразователя из твердого раствора карбида урана и карбида циркония от давления паров цезия при температуре:

1 — 1600°С; 2 — 1550°С; 3 — 1500°С; 4 — 1250°С.

в виде стержня из твердого раствора $UC + ZrC$ без оболочки и в виде стержней из UO_2 в оболочке из Mo с нанесением на внешней поверхности оболочки эмиссионного покрытия или без него. Полученные в экспериментах результаты из-за неравномерности распределения температуры по катоду являются усредненными в некоторой области температур. На рис. 8 приведены типичные зависимости выходной мощности преобразователя с катодом из твердого раствора карбидов урана и циркония от давления паров цезия при разных температурах катода. Характеристики тэпа при испытаниях в реакторе оказались достаточно стабильными при периодической откачке межэлектродного зазора. В процессе петлевых испытаний было достигнуто время работы тэпа в несколько сот часов.

горючее и его химическая переработка, кинетика реакторов, экономика). Интересные сведения о работах по быстрым реакторам были представлены несколькими странами на научно-технической выставке (прежде всего Великобританией, СССР и США).

Физика быстрых реакторов

На конференции в отличие от двух предыдущих вопросы методики измерений (а также теории) ядерно-физических параметров, применяемых для расчета