

ТЕРМОЭМИССИЯ¹ В КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

В.З. КАЙБЫШЕВ
(НИЦ “Курчатовский институт”)

I. ИСТОРИЯ ВОПРОСА И ФИЗИКА ПРОЦЕССА

Эффект появления тока в цепи, содержащей вакуумный диод с разогретым катодом без внешнего источника напряжения, был открыт Эдисоном в 1885 г., а в 1915 г. Шлихтер предложил использовать этот эффект для преобразования тепловой энергии в электрическую. Но только с начала 60-х гг. многие научные коллективы в нашей стране, США и других странах начали обстоятельно исследовать новый метод прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, названный **термоэмиссионным**.

Толчком послужили первые успехи Советского Союза и США в освоении космического пространства и новые программы по освоению ближнего космоса как в военных, так и в народнохозяйственных целях. Например, навигация, радиолокация, глобальная космическая связь и др., требуют вывода космического аппарата с энергоустановкой большой мощности для питания полезной нагрузки и электрореактивных двигателей в течение длительного времени.

Для получения электрической мощности в несколько десятков кВт и выше из возможных в космосе источников энергии, таких как солнечная и ядерная, преимущество за последней. А с учётом недостаточной плотности солнечной энергии целесообразность применения ядерных установок проявляется при значительно меньших мощностях.

Благодаря высокой температуре термодинамического цикла, отсутствию движу-

щихся частей, удачной компоновке электрогенерирующих элементов в составе ядерного реактора термоэмиссионный метод позволяет разработать энергоустановку с удовлетворительными массогабаритными характеристиками. Малые габариты и низкая масса холодильника-излучателя обеспечивают преимущество термоэмиссионного метода по сравнению с термоэлектрическим или машинным способами преобразования энергии в космосе при средней мощности.

Термоэмиссия в квантовом представлении

Распределение электронов по энергии внутри металла определяется квантовой статистикой Ферми-Дирака, в соответствии с которой в каждой энергетической ячейке может быть не более одной частицы (принцип исключения Паули). Электронный газ, подчиняющийся статистике Ферми-Дирака, называется **вырожденным**. В отдельном атоме в соответствии с этим принципом каждое квантовое состояние, характеризуемое комбинацией квантовых чисел и значением энергии, может быть занято только одним электроном. Полная энергия электрона – потенциальная плюс кинетическая, ниже его потенциальной энергии вне атома. Этим объясняется стабильность атома. Чтобы превратить атом в ион, электрону нужно передать дополнительную энергию (**энергию ионизации**), минимальное значение которой равно произведению заряда электрона на первый потенциал ионизации.

При объединении атомов в кристаллическую структуру твёрдого тела в соот-

¹ *Термоэлектронной эмиссией* называется испускание электронов нагретым телом.

ветствии с принципом Паули происходит расщепление отдельных энергетических уровней. С присоединением к решётке кристалла каждого дополнительного атома появляется дополнительный энергетический уровень. В результате вместо каждого уровня в изолированном атоме образуется зона разрешённых состояний. Количество их в каждой зоне равно количеству объединившихся в твёрдом теле атомов. Например, в 1 мг металлического образца содержится около 10^{19} атомов. Столько же разрешённых уровней будет в зоне, полученной в результате образования такого количества вещества. Расстояние между отдельными уровнями энергии порядка 10^{-19} электронвольт, то есть в пределах каждой зоны имеется практически непрерывное распределение разрешённых уровней. Ширина зоны наибольшая для наружных электронных оболочек. В результате образования разрешённых зон увеличивается суммарная кинетическая энергия электронов в твёрдом теле. Но это увеличение в избытке компенсируется уменьшением потенциальной энергии из-за сближения электронов и положительного ядра, что обеспечивает в конечном итоге энергию связи атомов в кристалле.

Отличительной особенностью металлов является наличие частично заполненной зоны валентных электронов, называемой **зоной проводимости**. Под воздействием приложенного к металлу

электрического поля электрон в частично заполненной зоне, приобретая дополнительную энергию, может занять один из свободных уровней. Этим объясняется высокая электропроводность металлов. Электроны, занимающие энергетические уровни в зоне проводимости, не привязаны к конкретным атомам. В отличие от электронов, занимающих энергетические состояния в расположенных ниже по энергии зонах, электроны проводимости могут перемещаться по всему кристаллу, образуя своего рода электронный газ, удерживаемый положительно заряженным остовом кристаллической решётки.

Образование энергетических зон приводит к появлению уровней, занятых электронами с более высокой кинетической энергией, чем в изолированном атоме, хотя полная энергия всех электронов в кристалле ниже за счет уменьшения их потенциальной энергии. Поэтому для удаления электрона из металла требуется меньшая энергия, чем для ионизации отдельного атома. Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из металла, называется работой выхода и она ниже энергии ионизации отдельного атома.

Чем выше температура твёрдого тела, тем чаще появляются электроны с достаточной для выхода за пределы металла энергией.

Посмотрим на энергетическую диаграмму электрона вблизи поверхности металла (рис. 1). Здесь за ноль принята энергия покоящегося внутри тела электрона. В этом случае работа выхода будет равна $e\Phi = E_a - E_0$, где E_a – энергия вышедшего за пределы металла электрона, E_0 – уровень электрохимического потенциала. Граница металла 1 проходит через центры последнего ряда ядер. На расстоянии порядка постоянной решётки в сторону металла условия те же, что в его объёме. Потенциальная энергия электронов проводимости имеет

Рис. 1.
Энергетическая диаграмма электронов вблизи поверхности металла.
1 – поверхность металла;
2 – условная граница металла.

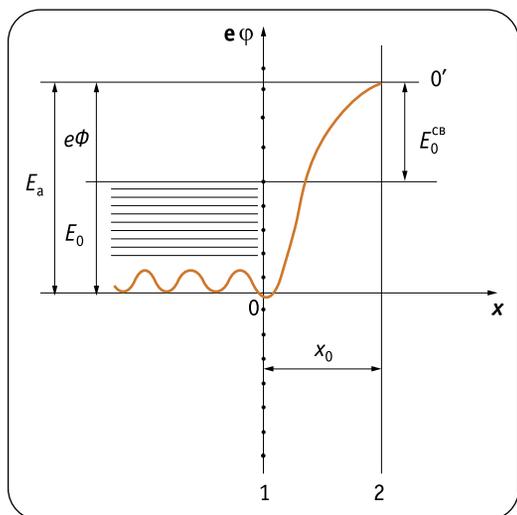
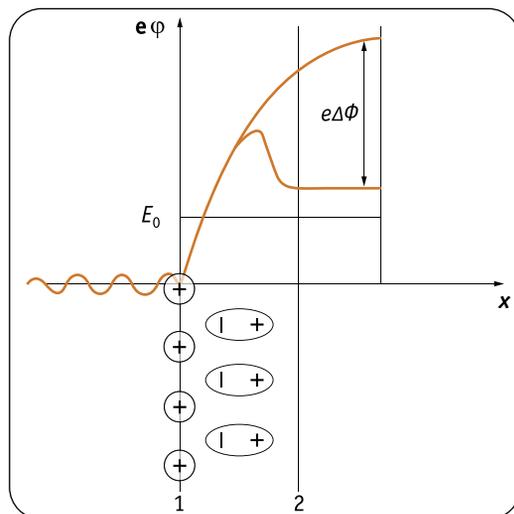


Рис. 2.
Влияние дипольного момента $e\Delta\Phi$
адсорбированных атомов на высоту
потенциального барьера.

периодическую зависимость от координаты, так как заряд ядер скомпенсирован электронами внутренних оболочек не полностью. Наружу от границы потенциальная энергия электрона резко возрастает за счёт преодоления электростатических сил притяжения. На расстоянии $x_0 \sim 500 \text{ \AA}$ эти силы уже малы по сравнению с электростатической силой объёмного заряда свободных электронов за пределами металла. Это место условной границы металла, за ней начинается область свободных электронов, которые можно рассматривать как классический идеальный газ.

В условиях взаимного равновесия электронного газа внутри и вне металла электрохимический потенциал электронов проводимости E_0 , отсчитанный от уровня нулевой кинетической энергии внутри металла, находится на одном уровне с электрохимическим потенциалом свободных электронов E_0^{cs} , отсчитанным от уровня нулевой кинетической энергии электрона вне металла.

Гораздо сильнее, чем от температуры, работа выхода эмиттера зависит от структуры поверхности и наличия на ней посторонних атомов. Поэтому работа выхода может быть однозначной характеристикой только чистой и однородной поверхности определённой кристаллографической ориентации. Источником чужеродных атомов на поверхности может служить как объём самого эмиттера, содержащий различные примеси, так и межэлектродный промежуток. Атомы удерживаются на поверхности за счёт взаимодействия электронов наружных оболочек с ионным остовом атомов поверхности. Сила этого взаимодействия определяет энергию десорбции. В зависимости от соотношения между работой выхода поверхности и потенциалом ионизации адсорбированного атома последний может существовать на поверхности в виде иона или поляризованного атома. В обоих случаях на поверхности



образуется электрический диполь, поле которого искажает потенциальный барьер на границе металла. В зависимости от полярности диполя высота барьера может увеличиваться либо уменьшаться. На рис. 2 показано влияние адсорбции электроположительных атомов, для которых энергия ионизации ниже работы выхода поверхности и которые отдают валентный электрон адсорбату. Они существуют на поверхности в виде полностью или частично поляризованного диполя с положительным полюсом, удалённым от поверхности. В результате работа выхода поверхности уменьшается на величину $e\Delta\Phi$. Наиболее важным адсорбентом для термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) является щелочной металл цезий, имеющий самый низкий потенциал ионизации $U_i = 3.89 \text{ В}$. **Его вводят в межэлектродный промежуток специально для понижения работы выхода электродов; одновременно он является источником положительных ионов, нейтрализующих отрицательный объёмный заряд электронов.** Цезий присутствует в межэлектродном промежутке в виде пара, давление которого определяется температурой термостата с жидкой фазой цезия, сообщаемого с межэлектродным промежутком. Можно с уверенностью сказать, не будь в природе такого элемента как цезий, вряд ли можно было бы говорить

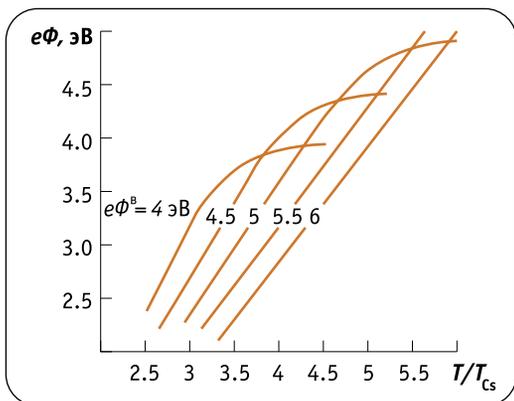


Рис. 3.
Зависимость работы выхода поверхности металла $e\Phi$ в атмосфере пара цезия от отношения T/T_{Cs} для разных значений вакуумных работ выхода $e\Phi^B$.

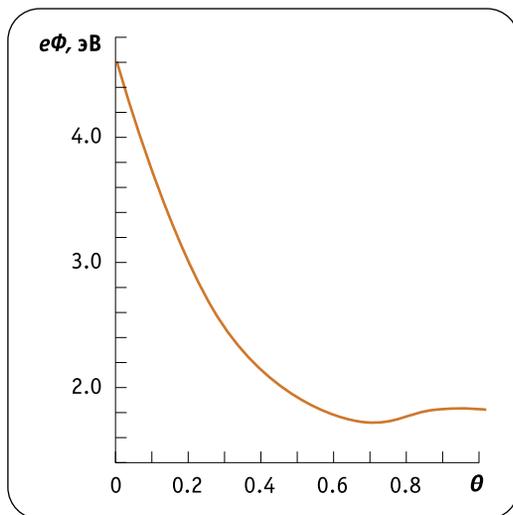
о реальном использовании термоэмиссионного метода преобразования энергии. В 30-х гг. прошлого столетия после работ Ленгмюра по адсорбции цезия на вольфраме появилась реальная база для экспериментальных исследований этого метода. На рис. 3 показаны расчётные зависимости работы выхода поверхности в атмосфере цезия от отношения температуры этой поверхности к температуре термостата с цезием T/T_{Cs} для металлов, имеющих разную, так называемую **вакуумную** работу выхода в отсутствие цезия $e\Phi^B$. Эмиттеры с более высокой вакуумной работой выхода $e\Phi^B$, начиная с определённого значения отношения T/T_{Cs} , имеют более низкое её значение в атмосфере цезия. На рис. 4 показана зависимость работы выхода поликристаллического вольфрама, измеренная ещё Ленгмюром в 1933 г. При оптимальной степени покрытия поверхности атомами цезия работа выхода принимает минимальное значение, которое даже меньше работы выхода чистого цезия.

В противоположность электроположительным элементам адсорбция электроотрицательных атомов, таких как кислород и фтор, увеличивает работу выхода металлической подложки. Забирая электрон металла на свою внешнюю оболочку, атом приобретает дипольный

момент противоположного знака. При этом образуется двойной электрический слой, повышающий высоту барьера для электронов эмиссии. О влиянии совместной адсорбции кислорода и цезия на эффективность ТЭП² среди специалистов до сих пор отсутствует единое мнение. С одной стороны, добавки кислорода заметно изменяют эмиссионные свойства эмиттера и коллектора. Кислород увеличивает энергию десорбции цезия с поверхности электродов. В результате для получения оптимальной степени покрытия атомами цезия поверхности требуется более низкое давление его пара, в результате чего уменьшаются потери напряжения в межэлектродном зазоре, связанные с рассеянием электронов на атомах цезия на пути от эмиттера к коллектору. Кроме того, по неизвестным пока причинам, увеличивается дипольный момент адсорбированных на поверхности атомов цезия и уменьшается минимальное значение работы выхода при оптимальном его покрытии. Минимальная работа выхода в цезии при наличии кислорода примерно на

² ТЭП – термоэмиссионный преобразователь.

Рис. 4.
Работа выхода поверхности поликристаллического вольфрама в атмосфере пара цезия (θ – степень покрытия поверхности атомами цезия).



0.1–0.2 эВ ниже, чем в чистом цезии. Это особенно важно для коллектора, так как от его работы выхода напрямую зависит полезное напряжение. С другой стороны, о чём свидетельствуют экспериментальные данные, совместная адсорбция цезия и кислорода увеличивает квантово-механический коэффициент отражения электронов от поверхности до 0.4–0.6 по сравнению со значением 0.2–0.3 – при адсорбции только цезия и примерно 0.1 – для чистой поверхности монокристалла. Как показали расчёты, это приводит к увеличению концентрации плазмы вблизи коллектора, росту падения напряжения в межэлектродном промежутке и уменьшению полезного напряжения.

Адсорбция других элементов также влияет на эмиссионные свойства поверхности тугоплавких металлов. Из них для ТЭП также интересен щёлочноземельный металл барий, обладающий большей энергией десорбции на поверхности тугоплавких металлов. Высокая степень покрытия получается при достаточно малых его потоках на поверхность, то есть при низких, по сравнению с цезием, давлениях его пара. В результате заметное понижение работы выхода эмиттера получается при достаточно низких давлениях пара бария, при которых рассеяние электронов на его атомах пренебрежимо мало. Но минимальное значение работы выхода коллектора при совместной адсорбции бария и цезия (2.2–2.3) эВ примерно на 0.7 эВ выше, чем при адсорбции чистого цезия. Настолько ниже будет и полезное напряжение. Этот эффект характерен не только для бария, но и для многих других элементов. В отличие от бария, сами они мало изменяют работу выхода поверхности эмиттера, однако существенно ослабляют влияние цезия.

Контактная разность потенциалов

Каждый металл характеризуется определённой плотностью атомов, электронов проводимости и величиной электрохимического потенциала. При наличии электрического контакта между двумя разнородными металлами электроны перетекают из одного металла в другой, занимая свободные более низкие

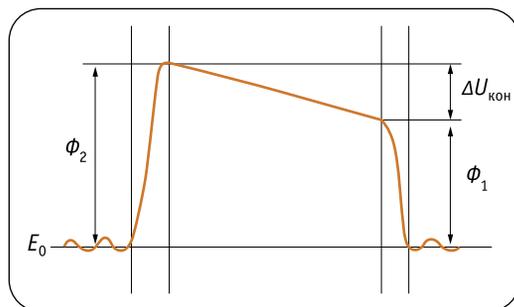


Рис. 5.
Изменение потенциала между поверхностями разнородных металлов, имеющих между собой электрический контакт.

энергетические уровни. Этот процесс продолжается до выравнивания их электрохимических потенциалов, что означает равновесие в самом низком энергетическом состоянии. Электроны перетекают из металла с меньшей работой выхода в металл с большей работой выхода. В результате на поверхности последнего образуется избыточный отрицательный заряд, а на поверхности металла с меньшей работой выхода – избыточный положительный заряд. Между поверхностями разнородных металлов, имеющих электрический контакт, возникает разность потенциалов, которая называется **контактной разностью потенциалов** (рис. 5). Она равна разности их работ выхода: $\Delta U_{\text{кон}} = \Phi_2 - \Phi_1$. Контактная разность потенциалов является основным источником напряжения в ТЭП.

Поверхностная ионизация

Адсорбированный на поверхности атом составляет с ней единую электронную систему. Так же, как у атомов подложки, у адсорбированного атома происходит расщепление энергетических уровней электронов. Каждый из них превращается в разрешённую зону. При испарении адсорбированного атома с поверхности зона разрешённых состояний его валентного электрона стягивается в один уровень, соответствующий энергии ионизации атома. Когда энергия ионизации меньше работы выхода подложки, заполнение уровней таково, что вероятность нахождения электро-

на в адатоме меньше единицы, и заряд атома будет положительным. Если этот уровень у адсорбированного атома не был заполнен, то он останется пустым и в процессе десорбции, а атом уходит с поверхности в виде положительного иона. Если энергия ионизации адатома больше работы выхода подложки, то заполненными оказываются и более высокие уровни адатома, и суммарный заряд его будет отрицательным.

Для испарения адатомов с поверхности необходимо преодолеть сопротивление адсорбционных сил. На это способны только те частицы, энергия которых превышает энергию десорбции. Цезий имеет самый низкий потенциал ионизации, поэтому наиболее эффективен для получения положительных ионов для нейтрализации объёмного заряда электронов в межэлектродном промежутке. Одновременно он используется для управления эмиссионными свойствами обоих электродов.

Режимы работы термоэмиссионного преобразователя

Основные физические процессы, обуславливающие работоспособность термоэмиссионного преобразователя – это термоэлектронная эмиссия с эмиттера (источник тока) и контактная разность потенциалов между эмиттером и коллектором (основной источник напряжения). Эффективность его работы, в зависимости от выбранного режима, определяется рассмотренными нами физическими процессами.

В реальном ТЭП имеется ряд потерь, которые значительно понижают КПД. Один из основных видов потерь – поток тепла излучением с эмиттера на коллектор. Он не является принципиально неизбежным и может быть уменьшен за счёт понижения излучательной способности электродов или использования соответствующей конструкции ТЭП, но, тем не менее, значительно уменьшает реальный КПД, особенно при малой полезной мощности.

Помимо этого, имеется ещё одна серьёзная проблема. Нужны электроды с низкой работой выхода. Эмиттер должен обеспечить высокую эмиссию в те-

чение длительного ресурса, а работа выхода коллектора должна быть достаточно низкой, чтобы минимизировать потери полезного напряжения в оптимальном по работе выхода коллектора режиме. Высокие рабочие температуры электродов обуславливают использование тугоплавких металлов, имеющих наименьшую скорость испарения. Но работа выхода их достаточно высока и не удовлетворяет требованиям как со стороны эмиттера, так и, особенно, со стороны коллектора.

Обе упомянутые проблемы были решены введением в межэлектродный зазор пара цезия, имеющего наименьший потенциал ионизации – 3.89 В. Адсорбированные на поверхности электродов атомы цезия существенно понижают работу выхода поверхности. Притом, на более холодном коллекторе работа выхода получается ниже из-за большего количества адсорбированных атомов. Постоянно возобновляемая плёнка цезия обеспечивает практически неограниченный ресурс электродов. Помимо этого, с горячей поверхности эмиттера часть атомов цезия за счёт поверхностной ионизации испаряется в виде ионов, компенсируя объёмный заряд электронов. В межэлектродном зазоре образуется плазма, а области с объёмным зарядом протяженностью порядка длины Дебая³ оказываются сосредоточенными непосредственно вблизи поверхности электродов.

Повышение работы выхода эмиттера увеличивает скорость поверхностной ионизации, но уменьшает электронную эмиссию. Вблизи эмиттера образуется положительный объёмный заряд. Понижение работы выхода эмиттера приводит к обратной картине. Вблизи эмиттера образуется отрицательный объёмный заряд, ограничивающий электронный ток. Имеется оптимальное значение работы выхода эмиттера, при которой для

³ Длина Дебая (дебаевский радиус) – расстояние, на которое распространяется действие электрического поля отдельного заряда в нейтральной среде, состоящей из положительно и отрицательно заряженных частиц (плазма, электролиты). Вне сферы дебаевского радиуса электрическое поле экранируется в результате поляризации окружающей среды.

заданного давления пара цезия P_{Cs} и температуры эмиттера T_3 реализуются условия "нейтральной" эмиссии и снимается максимальная полезная мощность.

Режим с поверхностной ионизацией при низких давлениях пара цезия позволяет реализовать параметры идеального ТЭП при межэлектродных зазорах, значительно более высоких, чем в вакуумном режиме. Но, тем не менее, они достаточно малы, примерно 0.1 мм, и при этом накладываются определённые требования на так называемую "вакуумную" работу выхода эмиттера, то есть работу выхода в вакууме без цезия. При большей величине зазора или материале с низкой вакуумной работой выхода обеспечить условие нейтральной эмиссии можно только за счёт повышения давления цезия, увеличения рассеяния и потерь полезной мощности. Рассеянием электронов можно ещё пренебречь, если межэлектродный зазор d не превышает средней длины свободного пробега электрона. Для цезия это условие выполняется при $P_{Cs} d \leq 4 \text{ Па} \cdot \text{мм}$ ($3 \cdot 10^{-2} \text{ торр} \cdot \text{мм}$)⁴. Например, при зазоре 30 мк (0.03 мм), максимальное давление пара цезия, при котором ещё можно пренебречь рассеянием, $P_{Cs} = 133.3 \text{ Па}$. При $T_3 = 2000 \text{ К}$ работа выхода для нейтральной эмиссии $e\Phi_3 = 3 \text{ эВ}$. Она обеспечит плотность тока эмиссии $j_{o3} = 13 \text{ А/см}^2$. Чтобы иметь работу выхода 3 эВ при данных T_3 и P_{Cs} , нужен материал эмиттера с вакуумной работой выхода 5.2 эВ. Этому условию удовлетворяет плотноупакованная грань монокристалла вольфрама (110). Но при зазоре 100 мк (0.1 мм) P_{Cs} ограничено значением 40 Па. При этом давлении для нейтральной эмиссии необходима работа выхода $e\Phi_3 = 3.1 \text{ эВ}$ ($j_{o3} \approx 7.5 \text{ А/см}^2$). Для этого нужен эмиттер с вакуумной работой выхода 5.5 эВ. Только монокристаллические поверхности иридия с ориентацией (111) или рения (1000) удовлетворяют этому требованию.

Увеличить зазор без роста потерь на рассеяние можно, если цезий использовать только в качестве источника положительных ионов. Для понижения работы выхода электродов можно использовать пар бария, энергия десорбции которого

значительно выше, чем у цезия, и необходимое давление его пара настолько мало, что рассеянием электронов на его атомах можно пренебречь. Но с увеличением зазора уменьшается предельное давление пара цезия, при котором ещё можно пренебречь рассеянием электронов на атомах цезия. Это приводит к уменьшению скорости поверхностной ионизации и, в конечном итоге, к падению плотности тока. Так, при зазоре 0.3 мм и $T_3 = 2000 \text{ К}$ для обеспечения нейтральной эмиссии при $P_{Cs} d \leq 3.10^{-2} \text{ торр} \cdot \text{мм}$ необходима работа выхода эмиттера 3.19 эВ, что уменьшает плотность тока эмиссии до $j_{o3} = 4.4 \text{ А/см}^2$.

Решая проблему оптимальной работы выхода эмиттера, добавка бария приводит к нежелательному эффекту. Минимальная работа выхода поверхности с плёнкой бария (2.2–2.3) эВ на (0.7–0.8) эВ выше, чем для плёнки цезия. Поэтому полезное напряжение при отсутствии эмиссии с коллектора настолько же будет ниже. В результате при зазоре 0.3 мм полезная мощность будет всего 4.8 Вт/см². Этот недостаток бария не проявляется только при высоких температурах коллектора, когда ток эмиссии с него соизмерим с проходящим током, и понижение работы выхода не приведёт к росту напряжения. Например, для разобранного выше примера с $d = 0.1 \text{ мм}$ и $j_{o3} = 7.5 \text{ А/см}^2$ значение работы выхода 2.1 эВ будет оптимальным при $T_k \approx 1400\text{--}1500 \text{ К}$. Хотя увеличение T_k приводит к понижению полезной мощности, оно позволяет сбрасывать более высокотемпературное тепло. В ряде применений, например, в двухкаскадной схеме в комбинации с другими методами преобразования энергии или в космической энергоустановке высокой мощности, где повышение температуры коллектора приводит к существенному уменьшению веса холодильника-излучателя, это может оказаться выгодным.

Рассмотрим экспериментальные вольт-амперные характеристики ТЭП в режиме с поверхностной ионизацией с добавкой бария при низком давлении пара цезия, когда рассеяние несущественно (рис. 6). Эмиттер и коллектор выполнены из поликристаллического молибдена. Каждой характеристике

⁴ 1 торр = 1 мм рт. ст.

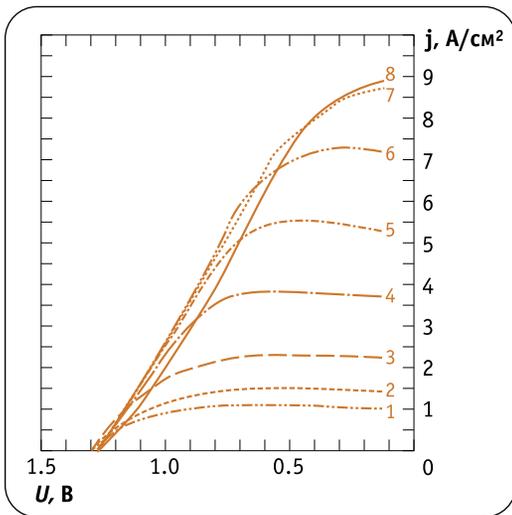


Рис. 6. Экспериментальные вольтамперные характеристики (ВАХ) ТЭП в режиме с поверхностной ионизацией цезия, измеренные в смеси паров цезия и бария, при температуре эмиттера $T_3 = 1993$ К, температуре коллектора $T_k = 1223$ К, давлении пара цезия 0.044 торр (5.86 Па), межэлектродном зазоре 0.4 мм и разных температурах термостата с барием: 1–914 К, 2–924 К, 3–935 К, 4–945 К, 5–956, 6–966 К, 7–977 К, 8–988 К.

соответствует своё давление пара бария, определяемое температурой его твёрдой фазы. С ростом её температуры повышается давление и уменьшается работа выхода эмиттера. Нейтральной эмиссии соответствует характеристика, обозначенная цифрой 7. Несмотря на то, что в качестве эмиттера был использован обычный поликристаллический молибден с вакуумной работой выход ~ 4.3 эВ, благодаря высокой энергии десорбции бария нейтральная эмиссия получена при зазоре 0.4 мм без увеличения рассеяния электронов в зазоре.

С ростом давления пара цезия увеличивается число столкновений электронов с атомами. Это приводит к росту падения напряжения в межэлектродном промежутке и к уменьшению тока из-за обратного потока электронов из плазмы на эмиттер. Падение напряжения в зазоре приводит к росту температуры электронов в плазме, и при определённой её

величине, зависящей от $P_{Cs}d$, загорается низковольтный разряд. Появляется новый источник положительных ионов. За счёт роста тока полезная мощность увеличивается, несмотря на некоторое уменьшение полезного напряжения. В оптимальном по значению $P_{Cs}d$ дуговом режиме ($P_{Cs}d \approx 0.4\text{--}0.7$ торр · мм) падение напряжения в дуге составляет всего ($0.3\text{--}0.35$) В.

В современных энергонапряжённых ТЭП используются эмиттеры, поверхность которых имеет высокую вакуумную работу выхода и обладает наибольшей адсорбционной способностью к атомам цезия. Наиболее высокой вакуумной работой выхода обладают плотноупакованные грани монокристаллов тугоплавких металлов: молибдена(110), вольфрама(110), иридия (111), рения (1000). Из соображений стоимости, технологичности, прочности и др. в настоящее время нашли применение монокристаллы вольфрама и монокристаллические сплавы на его основе или ориентированные покрытия вольфрама на монокристалл молибдена.

Разность между полезным напряжением идеального и реального ТЭП при одних и тех же температурах эмиттера T_3 , коллектора T_k и плотности тока j характеризует эффективность процесса преобразования энергии. Для оптимизированного дугового режима при $T_3 \approx 1600$ К эта разность равна ≈ 0.43 В, при $T_3 \approx 2000$ К эта разность равна ≈ 0.35 В. Экспериментальные характеристики, измеренные при разных давлениях пара цезия в дуговом режиме, показаны на рис. 7. Эмиттер изготовлен из монокристалла вольфрама, коллектор — из молибденового сплава.

Дуговой режим является наиболее перспективным в большинстве применений ТЭП. Несмотря на то, что часть полезного напряжения тратится на поддержание низковольтного разряда, высокие плотности тока позволяют при умеренных температурах эмиттера ($1600\text{--}1900$) К и достаточно больших зазорах ($0.4\text{--}0.3$) мм получить высокие удельные мощности ($5\text{--}10$) Вт/см² в течение длительного ресурса. В ряде космических применений в мощных энергоустановках для снижения веса хо

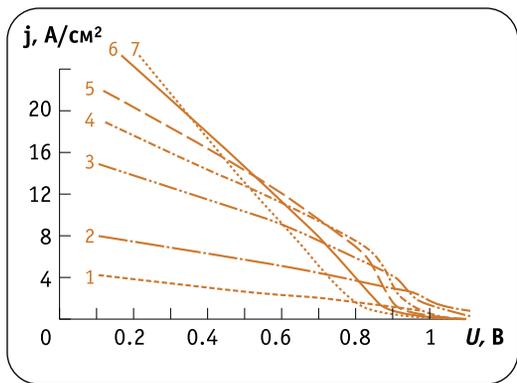


Рис. 7.
Экспериментальные ВАХ ТЭП, измеренные в режиме низковольтной дуги в цезии при $T_s = 1863$ К, $T_k = 985$ К, межэлектродном промежутке 0.4 мм и разных давлениях пара цезия: 1–0.4 торр (мм рт. ст.), 2–0.67 торр, 3–1.0 торр, 4–1.9 торр, 5–2.3, 6–3.0, 7–4.0 торр. Эмиттер – вольфрам, коллектор – молибден.

лодильника – излучателя может найти применение режим с поверхностной ионизацией с добавкой бария, позволяющей повысить межэлектродный зазор до (0.2–0.3) мм и реализовать эффективное преобразование энергии при высоких температурах эмиттера (≥ 2000 К) и коллектора (1300–1400) К.

Электронный КПД в режиме с поверхностной ионизацией приближается к КПД цикла Карно, но в реальной энергоустановке имеются дополнительные потери, которые принципиально можно уменьшить и оптимизировать, но полностью исключить невозможно. К ним относится, в первую очередь, перенос тепла излучением с эмиттера на коллектор.

Специфика работы термоэмиссионного преобразователя в ядерном реакторе

В реальной энергоустановке с ядерным реактором отдельные электрогенерирующие элементы (ЭГЭ), как правило, соединяются последовательно, образуя электрогенерирующие каналы (ЭГК), которые размещаются в активной зоне. К переносу тепла излучением с эмиттера на коллектор добавляются утечки тепла по ком-

мутационным переключкам, токоотводам и другим конструкционным элементам. Помимо этого, электрическая мощность уменьшается из-за омических потерь на электродах, коммутации и токоотводах. Из-за утечек тепла по коммутационным переключкам в пределах отдельного ЭГЭ, а также неоднородности тепловыделения по высоте активной зоны локальные температуры эмиттера сильно различаются. Для каждой температуры эмиттера имеется свое оптимальное давление пара цезия и положение рабочей точки на локальной ВАХ. Из-за невозможности обеспечить оптимальный режим работы по напряжению и давлению пара цезия на всех локальных участках поверхности эмиттера заметно недобирается электрическая мощность. Помимо этого, неоднородность температуры вдоль эмиттера и ограничение его максимальной температуры значительно уменьшает эффективность низкотемпературных участков. В результате реальный КПД значительно ниже КПД Карно. Особенно заметно это проявляется при низкой полезной мощности. В дуговом режиме электронный КПД ниже из-за потерь на ионизацию и рассеяние в зазоре. Но из-за высоких плотностей тока и, как результат, большей удельной мощности полный КПД при средних температурах эмиттера (1600–1900) К в дуговом режиме выше.

Для обеспечения длительного ресурса энергоустановки необходимо выполнить два основных условия: обеспечить стабильность геометрических размеров эмиттера (для предотвращения короткого замыкания электродов) и стабильность эмиссионных свойств электродов. Выполнение первого требования связано с необходимостью вывода газообразных продуктов деления из топливной полости в эмиттере и с использованием упрочнённых тугоплавких сплавов для его оболочки. Второе требование может быть выполнено путём защиты поверхности электродов от конденсирующихся продуктов деления и продуктов их радиоактивного распада, которые при попадании в межэлектродный зазор могут влиять на эмиссионные свойства электродов в худшую сторону.

(Продолжение в следующем номере)