

## Испытания двух сборок термоэмиссионных преобразователей в реакторе ВВР

А. А. БАТАЛОВ, В. М. ЗАЙЦЕВ, Н. В. ЗВОНОВ, И. В. КАЗИН, В. Ф. КОНДРАТЬЕВ, В. Н. КУЗНЕЦОВ,  
А. П. РОДНИКОВ, С. В. РЯБИКОВ, В. Ф. ТИХОНОВ, Н. А. ШАПКИН

УДК 621.039.578:537.58

В последние годы в научно-технической литературе все чаще обсуждается возможность создания реакторов с прямым преобразованием тепловой атомной энергии в электрическую на основе термоэмиссионного метода [1, 2]. Одним из вариантов такого рода реактора — термоэмиссионного преобразователя — является аппарат, в котором твэлы служат одновременно и электрогенерирующими элементами (ЭГЭ), что позволяет получать электроэнергию непосредственно в активной зоне реактора.

Смещение в одном элементе функций обеспечения протекания ядерного процесса и генерации тока приводит к определенному усложнению конструкции твэла и, в свою очередь, требует тщательной и всесторонней отработки единичного канала-преобразователя. Окончательной стадией такой отработки являются реакторные испытания сборок ЭГЭ, в которых производится комплексная проверка физических идей и технологических принципов, заложенных в испытываемую конструкцию.

В настоящей статье приводятся некоторые данные по петлевым испытаниям двух сборок реакторных термоэмиссионных преобразователей (ТЭП), проведенным на реакторе ВВР [3].

Известно, что существуют две концепции ЭГЭ при создании реакторов — термоэмиссионных преобразователей встроенного типа [4]. Первая заключается в том, что электрогенерирующий канал, длина которого равна высоте активной зоны, содержит несколько ЭГЭ, соединенных между собой внутри канала последовательно (гирляндная схема). В этом случае выходное напряжение на канале суммируется, и благодаря небольшой длине отдельного модуля относительные электрические потери будут невелики. Существенными недостатками этого варианта являются наличие межмодульных коммутационных соединений в активной зоне реактора, необходимость электрического согласования элементов, работающих в различных тепловых режимах и общее значительное усложнение конструкции.

Вторая концепция состоит в том, что по высоте активной зоны располагается один длинный элемент (однотвальный вариант) и токосъем осуществляется по его торцам, расположенным вне

активной зоны, что значительно упрощает конструкцию и технологию ее изготовления. Характерной особенностью работы цилиндрического однотвального ТЭП является существенное влияние омических потерь на величину выходной электрической мощности. Эти потери приводят к тому, что с увеличением длины ЭГЭ  $L$  при фиксированных прочих элементах его конструкции развиваемая им мощность  $W$  не пропорциональна  $L$ , а стремится при  $L \rightarrow \infty$  к некоторому предельному значению  $W_{\text{пред}}$ . Для упрощенной модели изотермического электрогенерирующего элемента при оптимальных значениях полезной нагрузки эта зависимость может быть представлена в виде

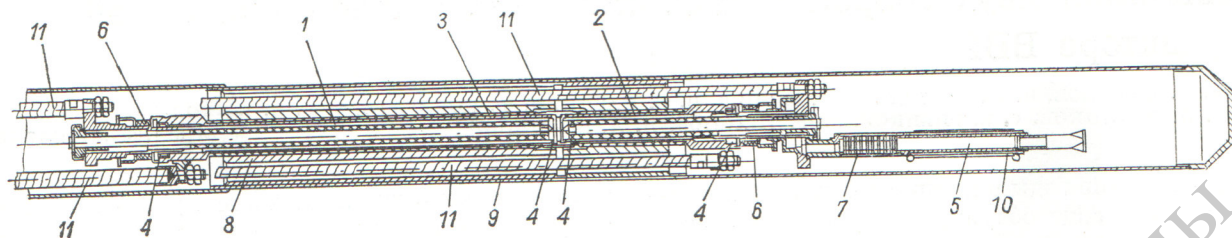
$$W = W_{\text{пред}} thk,$$

где  $k = L \left[ \frac{j_0}{E - V_0} \left( \frac{\rho_K}{\delta_K} + \frac{\rho_A}{\delta_A} \right) \right]^{1/2}$ ;  $j_0$ ,  $V_0$  — плотность тока и напряжение при оптимальной нагрузке;  $E$  — напряжение холостого хода;  $\rho_K$ ,  $\rho_A$ ,  $\delta_K$ ,  $\delta_A$  — удельное электрическое сопротивление и толщина электродов ТЭП соответственно.

Из этого соотношения следует, что существует некоторая «критическая» длина  $L_{\text{кр}}$ , превышение которой не является энергетически оправданным из-за значительного увеличения омических потерь на электродах, причем  $L_{\text{кр}}$  тем меньше, чем больше удельный токосъем  $j_0$ . Таким образом, для однотвального варианта ЭГЭ требование относительно небольших потерь при разумном размере активной зоны реактора ограничивает область материалов и температур эмитирующей оболочки катода.

Поскольку для реальных геометрических размеров однотвального ЭГЭ область приемлемых удельных электрических мощностей лежит в пределах  $2-5 \text{ вт/см}^2$ , целесообразно использовать в качестве материала эмиттера молибден, термоэмиссионные характеристики которого достаточно хорошо изучены. В этом случае однотвальный вариант может по удельным показателям успешно конкурировать с гирляндным вариантом, выгодно отличаясь от последнего простотой и надежностью конструкции.

Цель настоящих испытаний — проверка работоспособности отдельных узлов и сборок



Р и с. 1. Электрогенерирующая часть сборки.

с одновальными преобразователями в поле излучения реактора, выявление распределений температуры и исследование выходных параметров преобразователей подобного типа. Весьма важным конструкционным и технологическим вопросом при разработке одновальных ЭГЭ является проблема устойчивости величины межэлектродного зазора при рабочих температурах и больших сроках службы. Поскольку предварительные экспериментальные и расчетные данные свидетельствовали о возможности создания ЭГЭ при наличии лишь торцовых фиксаторов, одним из важных пунктов программы испытаний было подтверждение работоспособности катодов в течение длительного времени при отсутствии промежуточных фиксирующих элементов в системе катод — анод.

В связи с тем, что высота активной зоны реактора ВВР составляет 50 см, а ЭГЭ по току симметричен относительно центральной плоскости, испытаниям подвергался только один полуэлемент одновального ЭГЭ, т. е. использовалась область со сравнительно малыми изменениями нейтронного потока. В то же время для имитации температурных условий в центральной плоскости испытываемые сборки содержали также укороченный вспомогательный ЭГЭ, играющий роль дополнительного источника нейтронного и теплового потоков для основного полуэлемента и снабженный собственными токовыми и потенциальными выводами.

Электрогенерирующая часть канала представлена на рис. 1. Основной 1 и вспомогательный 2 катоды ТЭП диаметром 14 мм помещены коаксиально в общий анод 3 с межэлектродным расстоянием 0,5 мм. Длина рабочей части катодов составляет 200 и 80 мм соответственно. Внутри катодных оболочек из поликристалла (ТЭП-I) и монокристалла (ТЭП-II) молибдена толщиной 1 мм размещаются втулки из двуокиси урана в матрице из молибдена. Центральное отверстие в горючем служит для удаления

осколков деления и расположения вольфрамовых термопар. Одновременно эти полости могут быть использованы для размещения нагревателей при предварительном обезгаживании сборки. Межэлектродный зазор фиксируется специальными металлокерамическими элементами 4, расположенными по концам катодов, и образует общую полость с источником паров цезия 5, помещенным в нижней части сборки. Электрически катоды отделены от анода герметичными керамическими изоляторами 6. Анод изготовлен из ниобиевой трубки толщиной 1,5 мм. Для поддержания температуры при охлаждении канала водой на его наружную поверхность нанесен алунд в виде дискретных продольных полос таким образом, чтобы обеспечивать необходимый температурный перепад при заданном тепловом потоке с катода. Для поглощения остаточных газов, выделяющихся в межэлектродное пространство в процессе работы, в нижней части сборки установлены титановые геттеры 7. Генерирующая часть сборки окружается вытеснителем 8 из алюминиевого сплава и помещается в несущий наружный чехол из нержавеющей стали 9. Рабочая температура цезиевого резервуара поддерживается с помощью специальной электропечи 10.

Сборка снабжена 13 термопарами, позволяющими контролировать температуру катода, анода, цезиевого резервуара и других узлов. Основной и вспомогательный ЭГЭ имеют собственные отдельные токовые 11 и потенциальные выводы.

В целом сборка с помощью наружного чехла приваривается к каналу, имеющему в верхней части головку с герметичными электроразъемами и запорным вакуумным клапаном. После монтажа ЭГЭ проходили лабораторные испытания с электроимитатором ядерного горючего в течение 200 ч, генерируя при этом электрическую мощность. Перед установкой в реактор канал подвергался окончательной вакуумной

тренировке и контролю на специальном стенде.<sup>1</sup>

Экспериментальная установка имеет в своем составе стенд для вакуумирования полости канала, систему ресиверов для сброса и выдержки радиоактивных газов, электросиловой и контрольно-измерительный пульты. Снятие вольт-амперных характеристик производилось как компенсационным, так и осциллографическим методом.

Сборки рассматриваемой серии ТЭП-I и ТЭП-II проработали в реакторе на мощности 1000 квт и более (температура катода не менее 1480° С) в течение 900 и 1440 ч соответственно. В эксперименте уровень мощности реактора поддерживался постоянным в течение определенного времени и изменялся в процессе испытаний от 1000 до 2000 квт ступенями по 250 квт. При этом непрерывно производилась регистрация температур катода, анода, цезиевого резервуара и отдельных узлов конструкции, а также периодически снимались вольт-амперные характеристики преобразователя и проводилась корректировка температуры резервуара с цезием до величины, соответствующей максимальной электрической мощности ТЭП на данном режиме.

Температура анода в зависимости от мощности аппарата не регулировалась, и при изме-

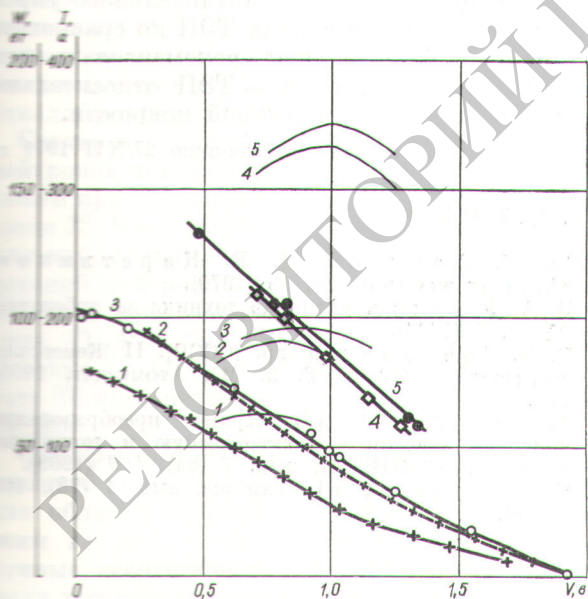


Рис. 2. Вольт-амперные и мощностные характеристики ТЭП-I:  
1 — 1000 квт, 12,8 вт/см<sup>2</sup>; 2 — 1250 квт, 16 вт/см<sup>2</sup>; 3 — 1500 квт, 19,2 вт/см<sup>2</sup>; 4 — 1750 квт, 22,4 вт/см<sup>2</sup>; 5 — 2000 квт, 26 вт/см<sup>2</sup>.

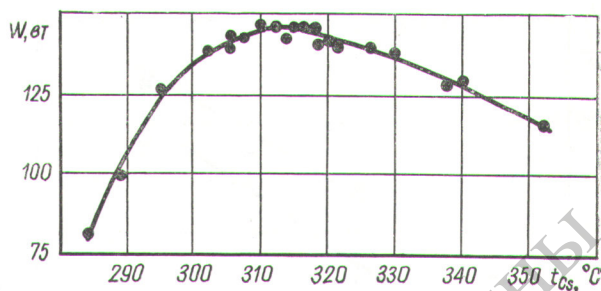


Рис. 3. Типичная зависимость мощности ТЭП-I от давления паров цезия ( $N = 1500$  квт).

нении мощности от 1000 до 2000 квт она возрастала от 450 до 750° С.

В связи с тем, что температура катода измерялась термопарами, расположенными в центральной полости твэла, при определении температуры рабочей поверхности катода вносилась расчетная поправка.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены типичные вольт-амперные характеристики сборки ТЭП-I, полученные для различных уровней энерговыделения на поверхности катода от 12,8 до 26 вт/см<sup>2</sup>, чему соответствуют уровни мощности реактора от 1000 до 2000 квт. Для каждого уровня энерговыделения давление паров цезия было постоянным и обеспечивало получение к. п. д., близкого к оптимальному. На этом рисунке представлены также мощностные характеристики ТЭП в области оптимального напряжения для тех же режимов (тонкие линии). При всех уровнях энерговыделения преобразователи работали в дуговом режиме, о чем свидетельствует почти линейная зависимость тока от напряжения. Напряжение холостого хода для всех характеристик, представленных на рис. 2, составляет 1,8—2 в. Оптимальное выходное напряжение возрастает с ростом энерговыделения от 0,7 до 1,0 в.

На рис. 3 приведена типичная зависимость электрической мощности ТЭП-I, выделяемой на постоянной нагрузке, от температуры цезиевого резервуара  $t_{Cs}$ . Оптимальные значения  $t_{Cs}$  для большинства исследованных режимов лежали в пределах 305—325° С.

На рис. 4 показана зависимость максимальной удельной электрической мощности ТЭП от мощности реактора и температуры катода для обеихборок, полученная в режимах, близких к оптимальным. Некоторое различие в величине удельной электрической мощностиборок, по-видимому, объясняется тем, что в

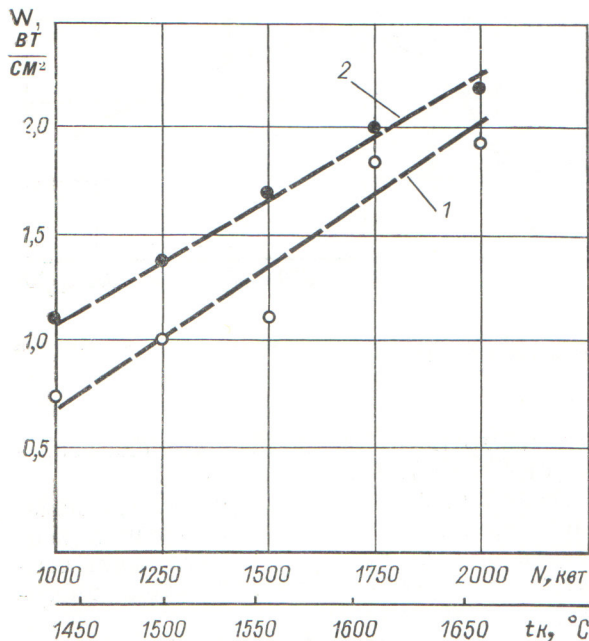


Рис. 4. Зависимость максимальной удельности мощности ТЭП от мощности реактора и температуры катода (1 — для ТЭП-I, 2 — для ТЭП-II).

ТЭП-I оболочка катода изготовлялась из поликристаллического молибдена, а в ТЭП-II — из монокристалла. Как видно из рис. 4, в области температур катода 1550—1650° С реализуется плотность электрической мощности 1,5—2  $вт/см^2$ .

Используя данные температурных измерений и определяя тепловой баланс преобразователя, можно оценить величину удельного теплового потока. Она составляет  $\sim 16$   $вт/см^2$  при мощности 1250  $квт$  и изменяется пропорционально мощности. Величина к. п. д. в различных режимах работы сборок менялась от 6 до 9%.

При испытании сборок по истечении нескольких сотен часов работы наблюдалось некоторое скачкообразное снижение их выходных параметров, что было вызвано, как показал последующий анализ, неудачной конструкцией нижнего фиксатора, вызвавшей его разрушение вследствие термического удлинения катода. В процессе дальнейшей работы эти сниженные параметры устойчиво поддерживались, что сви-

детельствовало о сохранившейся работоспособности остальных узлов конструкции.

Вспомогательные ЭГЭ стабильно генерировали электроэнергию в течение всего времени испытания обоих каналов. Однако в связи с тем, что они размещались существенно ниже центра активной зоны реактора, их удельная электрическая мощности при максимальной мощности реактора не превышала 1—1,5  $вт/см^2$ .

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработан и изготовлен реакторный термоэмиссионный электрогенерирующий элемент одновального типа.

2. Проведены петлевые испытания каналов со сборками ТЭП. Реакторные эксперименты показали правильность выбранных конструктивно-технологических основ и принципиальную работоспособность испытывавшихся ЭГЭ.

3. Была получена плотность электрической мощности 2  $вт/см^2$ , суммарная мощность 180  $вт$  и к. п. д. 8—9% при температуре катода 1650° С и стабильных во времени вольт-амперных характеристиках.

4. Длительность испытаний при температурах катодов не менее 1480° С составила для двух ЭГЭ 900 и 1440 ч соответственно, не считая времени работы ЭГЭ при предварительных лабораторных испытаниях (200 ч).

5. Полученные значения удельной электрической мощности с учетом значительного упрощения конструкции канала ТЭП по сравнению с гирляндной позволяют рекомендовать его применение в реакторах — ТЭП относительно небольшой объемной удельной мощности.

Поступила в Редакцию 27/XII 1971 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Данилов, Д. В. Каретников. «Атомная энергия», 28, 33 (1970).
2. Б. А. Ушаков. «Атомная техника за рубежом», № 11, 7 (1969).
3. В. В. Гончаров и др. (СССР). II Женевская конференция (1959). Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 243.
4. A. Schöck et al. «Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы» (ВИНИТИ), вып. 7 (84), 169 (1969).
5. G. Sawyer et al. Там же, вып. 1 (78), 169 (1969).