

Испытания многоэлементных термоэмиссионных экспериментальных сборок

В. И. БЕРЖАТЫЙ, Н. А. ГРИБОЕДОВ, В. П. ГРИЦАЕНКО, Ю. И. ДАНИЛОВ, А. С. КАРНАУХОВ, В. Б. КЛИМЕНТОВ, М. Н. КРАСИК, В. П. КИРИЕНКО, О. И. ЛЮБИМЦЕВ, В. А. МАЕВСКИЙ, М. В. МЕЛЬНИКОВ, В. К. МОРОЗОВ, Н. Н. ПЕТРОВ, А. И. ПИСКАРЕВ, И. И. РАЙКОВ, В. В. СНИЯВСКИЙ, А. И. ЯКУНИН

УДК 621.362:621.039.577

Важнейший элемент термоэмиссионного реактора-генератора — электрогенерирующий канал. При разработке этого нового источника электроэнергии без ядерного реактора практически невозможно создать условия, близкие к рабочим. Поэтому испытания экспериментальных сборок с электрогенерирующим каналом в исследовательских реакторах являются определяющим этапом при создании реактора-генератора.

Ниже описаны конструкции экспериментальных сборок, методики реакторных испытаний электрогенерирующего канала и основные результаты испытаний двух экспериментальных сборок (ЭС-6-1 и ЭС-6-2), цель которых — реализация термоэмиссионного преобразователя с относительно высокой удельной мощностью (до 10 вт/см^2). Проверка длительной работы сборок не предусматривалась.

Экспериментальная сборка состоит из ампулы и штанги (рис. 1). Ампула включает следующие узлы и системы:

термоэмиссионный электрогенерирующий канал — объект испытаний;

автономную малогабаритную систему откачки межэлектродного зазора электрогенерирующего канала — геттеро-ионный насос, который через клапан связан с выносной системой откачки газообразных продуктов деления универсальной петлевой установки;

вакуумный тракт и систему подачи паров цезия;

систему электронагревателей и средства измерения и контроля параметров электрогенерирующего канала и отдельных узлов экспериментальной сборки.

Все эти узлы и системы расположены в герметичной газовакуумной полости, образуемой кожухом ампулы.

Электрогенерирующий канал собран из шести последовательно соединенных электрогенерирующих элементов. Цилиндрические эмиттеры из сплава вольфрама с 27% рения заполнены таблетками из металлокерамики $W + UO_2$ (обогащение по U^{235} 90%).

Анодный пакет электрогенерирующего канала состоит из ниобиевых коллекторов, изоля-

ции из окиси алюминия и несущей трубки из ниобия. Между коллекторами устанавливаются дистанционирующие втулки из окиси алюминия. Нижний коллектор электрогенерирующего канала замкнут электрически с несущей трубкой, которая соединяется с коллекторным токо-

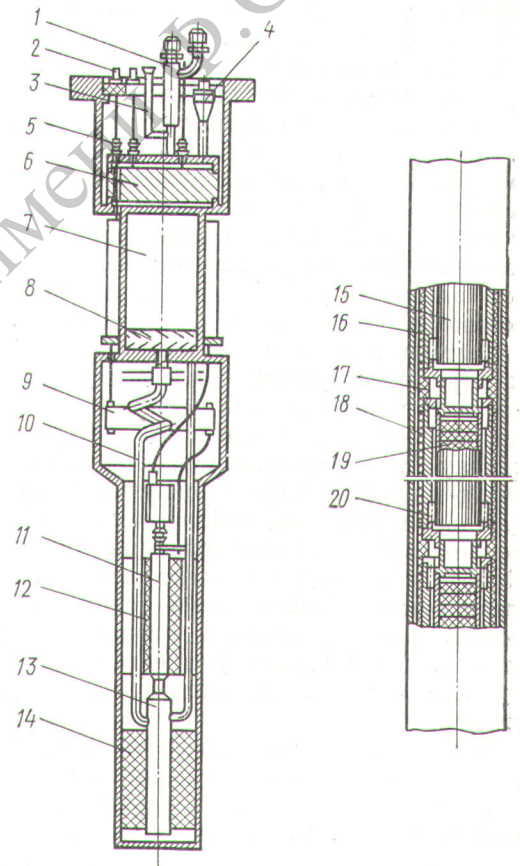


Рис. 1. Конструкция экспериментальной сборки:

1 — клапан насоса; 2 — электрический разъем; 3 — датчик измерения вакуума; 4 — штепсельный разъем; 5 — гермоввод; 6 — биологическая защита; 7 — геттеро-ионный насос; 8 — цезиевая ловушка; 9 — шунт; 10 — откачная трубка; 11 — электрогенерирующий канал; 12 — электронагреватель коллектора; 13 — термостат цезия; 14 — электронагреватель цезиевого термостата; 15 — эмиттер; 16 — коллектор; 17 — дистанционирующее кольцо; 18 — изоляция; 19 — таблетка горючего; 20 — дистанционатор.

водом; верхний эмиттер соединяется с изолированным тоководом. Для предотвращения замыкания эмиттера с коллектором в каждом электрогенерирующем элементе предусмотрены дистанционаторы из окиси бериллия в виде цилиндров диаметром 0,7 мм. Межэлектродный зазор равен 0,25 мм.

Вакуумный тракт представляет собой трубопровод из нержавеющей стали, соединяющий полости межэлектродного зазора электрогенерирующего канала и цезиевого термостата с насосом. Подача паров цезия осуществляется из цезиевого термостата, смонтированного в общем корпусе с клапаном термостата. При открытом клапане полости межэлектродного зазора и цезиевого термостата сообщаются с полостью геттеро-ионного насоса.

Теплоотвод с коллекторов электрогенерирующего элемента осуществляется через анодную изоляцию, несущую трубку, графитовую втулку, газовакуумный зазор (0,3—0,5 мм) и корпус ампулы к воде, охлаждающей реактор. Температура коллектора электрогенерирующего элемента регулируется изменением давления гелия от 10^{-2} до 1200 мм рт. ст. в газовакуумном зазоре и увеличением или уменьшением мощности коллекторных нагревателей.

Система измерений и контроля параметров электрогенерирующего канала и узлов ампулы позволяет проводить измерения температуры, тепловыделения, распределения потенциалов по каналу и тоководам, вакуума в насосе и снимать вольт-амперные характеристики. Температура отдельных узлов экспериментальной сборки измеряется хромель-алюмелевыми термопарами. Контроль за удельным тепловыделением осуществляется блоком дифференциальных термопар, установленным в анодной графитовой втулке. Блок термопар предварительно тарируется по тепловому потоку на специальном стенде.

В штатге экспериментальной сборки располагаются биологическая защита, вакуумные и газовые трубопроводы, термопарные и электрические кабели. Эти магистрали соединяют ампулу с соответствующими системами универсальной петлевой установки.

Реакторные испытания. Испытания ЭС-6-1 и ЭС-6-2 были проведены на универсальной петлевой установке водо-водяного реактора. Установка обеспечивала регистрацию параметров электрогенерирующего элемента, управление системами отвода тепла с коллекторов и поддержание необходимого температурного режима. Предусмотрены откачка продуктов деления и де-

сорбированных газов из электрогенерирующих каналов и удаление их в систему вентиляции реактора после соответствующей выдержки и дозиметрического контроля.

Вслед за установкой экспериментальной сборки в отражатель реактора вакуумными насосами установки производилась откачка полости электрогенерирующего канала и газовакуумного зазора ампулы. При достижении в полости канала вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. реактор выводился на промежуточную мощность, при которой проводилось обезгаживание электродов электрогенерирующего элемента. Максимальная температура эмиттеров в режиме работы без отбора мощности равнялась 2000°C . После обезгаживания дистанционно вскрывалась ампула с цезием и реактор выводился на мощность, соответствующую номинальной удельной электрической мощности элемента $5-10$ вт/см².

Первая сборка ЭС-6-1 проработала 75 ч и вышла из строя из-за появления течи в оболочке канала, в результате чего гелий из газовакуумного зазора проник в полость межэлектродного зазора электрогенерирующего элемента. При испытании ЭС-6-1 была достигнута средняя удельная электрическая мощность с поверхности эмиттеров 6 вт/см².

Сборка ЭС-6-2 была выведена на удельную мощность 10 вт/см² и проработала 220 ч, после чего реактор был остановлен. Перед плановой остановкой реактора зафиксирована небольшая течь между внутренней полостью электрогенерирующего канала и газовакуумным зазором ампулы. Во время испытаний параметры сборок оставались стабильными, колебания электрической мощности канала составляли 5—7%.

Результаты испытаний. Задачи испытаний — отработка всех систем петлевой установки и проверка работоспособности шестиземельных сборок в условиях реактора при средней удельной мощности 5—10 вт/см². В связи с этим при испытаниях ЭС-6-1 и ЭС-6-2 детальные исследования характеристик сборок не проводились. Однако полученные результаты позволили выявить некоторые особенности характеристик сборок и сделать ряд выводов.

На каждом уровне мощности реактора снижалась одна или несколько статических вольт-амперных характеристик при постоянной тепловой мощности, подводимой к эмиттеру. Характеристики сборки ЭС-6-1, полученные на пяти уровнях мощности реактора, приведены на рис. 2. Подобные характеристики получены

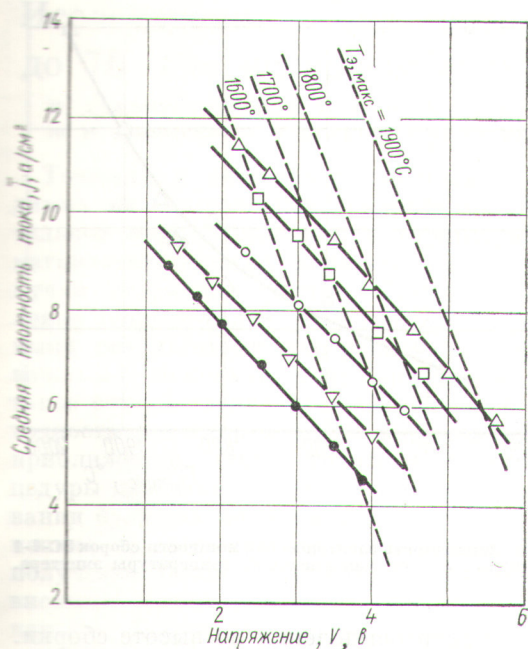


Рис. 2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики сборки ЭС-6-1 с сеткой расчетных изотерм (в расчетных изотермах учтена неравномерность тепловыделения по высоте сборки).

Значения плотности теплового потока на эмиттер q_F в $вт/см^2$: ● — 28; ▽ — 31; ○ — 34,5; □ — 49; △ — 53. Значения T_{Cs} в $°C$: ● — 330; ▽ — 350; ○ — 370; □ — 350; △ — 380.

и при испытаниях ЭС-6-2. Все характеристики в рабочей области линейны и относятся к дуговому режиму работы преобразователей. Соответствующая зависимость средней по поверхности шести эмиттеров удельной мощности, взятой в оптимальных точках характеристик, от средней величины теплового потока с эмиттера приведена на рис. 3.

Полученные при постоянной тепловой мощности экспериментальные характеристики, так же как и изотермические характеристики лабораторных термоэмиссионных преобразователей, очень чувствительны к давлению паров цезия. Для удельных мощностей 5–6 $вт/см^2$ оптимальное давление паров цезия соответствует температуре цезиевого термостата $T_{Cs} = 355 \div 360^\circ C$ (~8 мм рт. ст.) — кривая 3, рис. 4. Наблюдается некоторая инерционность электрических параметров сборки при изменении температуры термостата. Кривые 1 и 2 рис. 4 демонстрируют зависимость $\bar{W}_{уд}(T_{Cs})$ при ступенчатых подъеме и понижении T_{Cs} соответственно.

При реакторных испытаниях статистические характеристики, полученные при дискретном

изменении нагрузочного сопротивления, являются характеристиками постоянной тепловой мощности. В связи с этим температурное поле эмиттера $T_{э}(z)$ будет различным в каждой точке такой характеристики. Учитывая, что эмиттеры испытываемых элементов являются неизотермичными, для безопасной эксплуатации канала необходимо знать максимальную температуру эмиттера $T_{э, макс}$.

Для определения температуры эмиттеров использовались два косвенных метода: метод теплового баланса и метод сравнения вольт-амперных характеристик, полученных расчетным и экспериментальным путями. По первому методу $T_{э, макс}$ определяется из решения уравнения теплового баланса эмиттера с учетом тепла, отводимого излучением, электронным током, теплопроводностью через цезиевый пар, и неравномерности распределения плотности тока вдоль эмиттера. Следует, однако, отметить, что $T_{э, макс}$ этим методом определяется с достаточно большой погрешностью (до 10–15%) вследствие неточности определения теплового потока, приведенной степени черноты электродов и коэффициента неравномерности плотности тока.

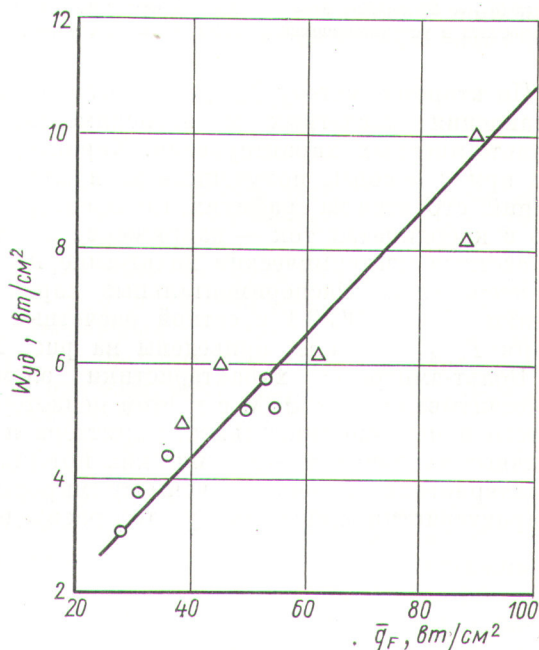
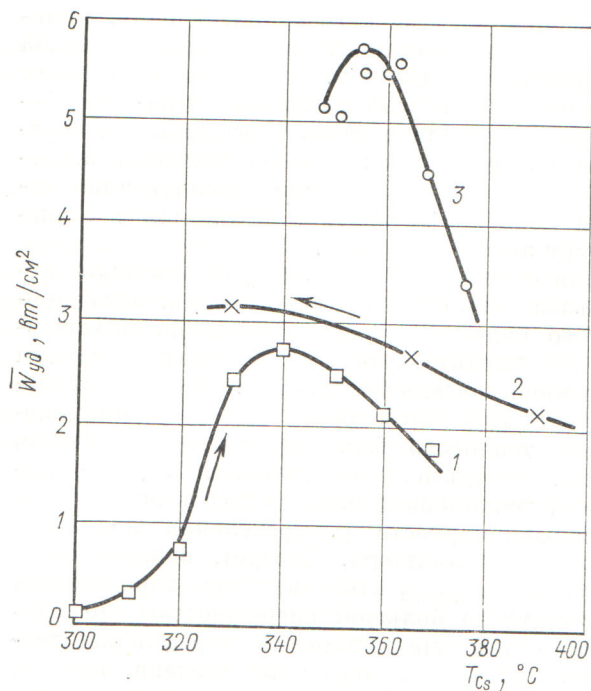


Рис. 3. Зависимость генерируемой электрической мощности $\bar{W}_{уд}$ сборки ЭС-6-1 (○) и ЭС-6-2 (△) от средней плотности теплового потока на эмиттер \bar{q}_F .

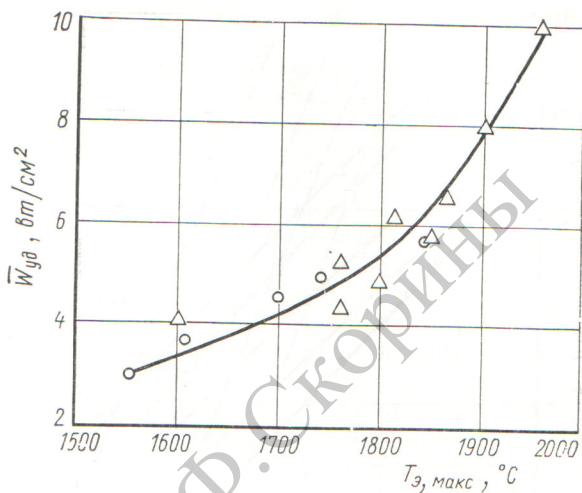


Р и с. 4. Влияние давления паров цезия:

1 — первый подъем температуры цезиевого термостата ($q_F = 30 \text{ Вт/см}^2$); 2 — понижение температуры цезиевого термостата ($q_F = 30 \text{ Вт/см}^2$); 3 — влияние температуры цезиевого термостата в установившемся режиме ($q_F = 53 \text{ Вт/см}^2$).

По второму методу $T_{э, \text{макс}}$ определяется из сравнения расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик. Характеристики при $q = \text{const}$, полученные во время испытаний, строятся на графиках, где предварительно в координатах ток — напряжение нанесены расчетные изотермические вольт-амперные характеристики. Экспериментальные характеристики сборки ЭС-6-1 с сеткой расчетных изотерм $T_{э, \text{макс}} = \text{const}$ приведены на рис. 2.

Вольт-амперные характеристики элемента рассчитывались на ЭВМ с учетом неизотермичности и неизопотенциальности эмиттера и различных тепловых и электрических потерь. Характеристики сборки получены суммированием характеристик элементов с учетом распределен-



Р и с. 5. Зависимость электрической мощности сборок ЭС-6-1 (○) и ЭС-6-2 (△) от максимальной температуры эмиттера.

ности поля энергоснабжения по высоте сборки. К достоинству последнего метода следует отнести практическую независимость определения $T_{э, \text{макс}}$ от точности определения тепловыделения и степени черноты, обычно известных с большой погрешностью.

Полученная при испытаниях зависимость электрической мощности сборок от $T_{э, \text{макс}}$ приведена на рис. 5. Удельная мощность сборок $5-10 \text{ Вт/см}^2$ достигается при $T_{э, \text{макс}} = 1750-1950^\circ \text{C}$. При этом неизотермичность отдельных элементов $T_{э, \text{макс}} - T_{э, \text{мин}}$ составляет $150-250^\circ \text{C}$, а отличие в $T_{э, \text{макс}}$ центральных и периферийных элементов за счет неравномерности тепловыделения по высоте сборки — $\sim 100^\circ \text{C}$.

При испытаниях на удельных мощностях $5-10 \text{ Вт/см}^2$ к. п. д. составил $10-14\%$. Следует отметить, что погрешность определения к. п. д. вследствие погрешности тарировки и установки датчика теплового потока может достигать $10-20\%$.

Поступила в Редакцию 2/XI 1970 г.
В окончательной редакции 23/IV 1971 г.