

# Краткие сообщения

04;12

## Исследование тепловых и электрических характеристик ТЭП при комбинированном нагреве электродов

© Ю.И. Дударев, Б.И. Ермилов

Сухумский физико-технический институт АН Республики Абхазия,  
384914 Сухуми, Республика Абхазия

(Поступило в Редакцию 1 июля 2003 г.)

Предложена методика экспериментальных исследований тепловых и электрических характеристик одноэлементного термоэмиссионного преобразователя при комбинированном нагреве электродов (сочетание прямого нагрева тепловым излучением от электрического нагревателя с нагревом эмиттера обратными токами с коллектора) и исследованы его вольт-амперные характеристики в различных режимах работы и при разной величине длительности импульса обратного нагрева электродов.

### Введение

Источниками тепла установок прямого преобразования тепловой энергии в электрическую служат ядерный реактор, радиоактивные изотопы, химическая и солнечная энергия [1]. Перечисленные источники тепла в силу своей дороговизны и сложности в обращении не всегда приемлемы при экспериментальных исследованиях физических, электрических, тепловых характеристик преобразователей. Вследствие этого отработку конструкций, если это возможно, осуществляют имитаторами источников тепла.

Основными методами подачи тепла на эмиттер термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП) являются радиационный, обратными токами с коллектора на эмиттер, и комбинированный (радиационный совместно с электронной бомбардировкой). При испытаниях лабораторных ТЭП широко применяется метод комбинированного нагрева, который позволяет при всех прочих равных условиях значительно уменьшить температуру нагревательного элемента и, следовательно, увеличить ресурс его службы.

### Экспериментальный прибор

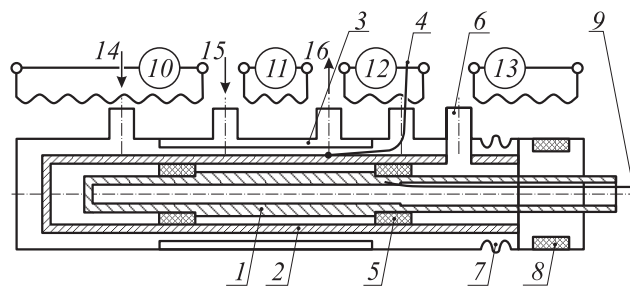
В качестве объекта испытаний был использован модельный одноэлементный ТЭП, схема которого представлена на рис. 1. Экспериментальный прибор содержит: эмиттерный, коллекторный, сильфонно-гермовводный узлы, теплообменник и термопарный колодец. Эмиттерный узел представляет собой цилиндрическую трубу, изготовленную из тугоплавкого материала, на наружную поверхность которой нанесен тонкий слой вольфрама. В теле эмиттера с торца просверлены три отверстия разной глубины с углом смещения  $120^\circ$  для установки вольфрам-ренийевых термопар с  $d = 0.2 \text{ mm}$  в чехле из окиси бериллия. Эмиссионная поверхность кол-

лектора также изготовлена из вольфрама. На наружной поверхности коллектора крепятся хромель-алюмелевые термопары, которые вводятся через термопарный колодец. Эмиссионная площадь эмиттера  $10.4 \text{ cm}^2$ , межэлектродный зазор (МЭЗ)  $0.25 \text{ mm}$ . Теплообменник выполнен в виде газовой рубашки охлаждения. Газовый зазор составляет  $0.4 \text{ mm}$ .

Для нагрева эмиттера в полость вставляется главный электрический нагреватель (ГЭН) стержневого типа. Для обеспечения необходимого теплового режима прибора на теплообменнике и сильфонно-гермовводном узле устанавливаются электрические нагреватели из нихромовой проволоки.

### Методика и результаты эксперимента

Исследование характеристик одноэлементного ТЭП производилось с помощью комбинированного нагрева, который включал в себя два различных метода нагрева электродов преобразователя: а) метод прямого нагрева эмиттера тепловым излучением на основе использова-



**Рис. 1.** Схема прибора: 1 — эмиттер, 2 — коллектор, 3 — водяная рубашка, 4 — термопара коллектора, 5 — дистанционаторы, 6 — откачка МЭЗ, 7 — сильфонный узел, 8 — изолятор, 9 — термопара эмиттера, 10–13 — нагреватели, 14 — ввод газа, 15, 16 — ввод и вывод воды.

ния электронагревателя сопротивления, помещаемого во внутреннюю полость эмиттера; б) метод обратного нагрева на основе использования обратных токов с коллектора, нагретого с помощью внешнего нагревателя. В этом случае нагрев эмиттера происходит за счет кинетической энергии потока электронов из плазмы дугового разряда.

Исследование электрических характеристик ТЭП при комбинированном нагреве эмиттера, так же как и для сравнения снятых характеристик при чисто прямом нагреве, осуществлялось с помощью аппаратуры для нагрева и диагностики ТЭП методом обратных токов [2]. Процесс подготовки ТЭП к испытаниям заключался в обезгаживании вакуумно-цезиевой системы (ВЦС) и дегазации электродов с помощью внутреннего стержневого нагревателя (ГЭН). Обезгаживание ВЦС проводилось при температуре тракта 700–750 К до установления динамического вакуума  $P_1 = 1 \cdot 10^{-4}$  Па, при этом в газовой полости  $P_1 = 4-6 \cdot 10^{-3}$  Па.

Обезгаживание прибора проводилось в два этапа. На первом этапе обезгаживание коллектора проводилось по следующему режиму: на коллекторе с помощью ГЭН была поднята температура до 1100 К со скоростью, ограниченной вакуумом в МЭЗ, не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$  Па, в газовой полости —  $5-6 \cdot 10^{-3}$  Па. Этот режим выдерживался до получения в МЭЗ  $P_2 = 1 \cdot 10^{-4}$  Па в течение 1 ч. По окончании обезгаживания коллектора при выключенном ГЭН газовая полость ТЭП заполнялась гелием до давления 100–260 Па. На втором этапе проводилось обезгаживание эмиттера с помощью ГЭН при температуре 1900 К и вакууме в МЭЗ  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  Па. Этот режим выдерживался до получения  $P_2 \approx 1 \cdot 10^{-4}$  Па в течение 1 ч. При нагреве электродов прибора с помощью ГЭН до  $T_e \approx 1400-1900$  К и  $T_k \approx 950-1100$  К в диапазоне температур рабочего тела (цезия) 520–620 К снимались реперные вольт-амперные характеристики (прямой нагрев электродов).

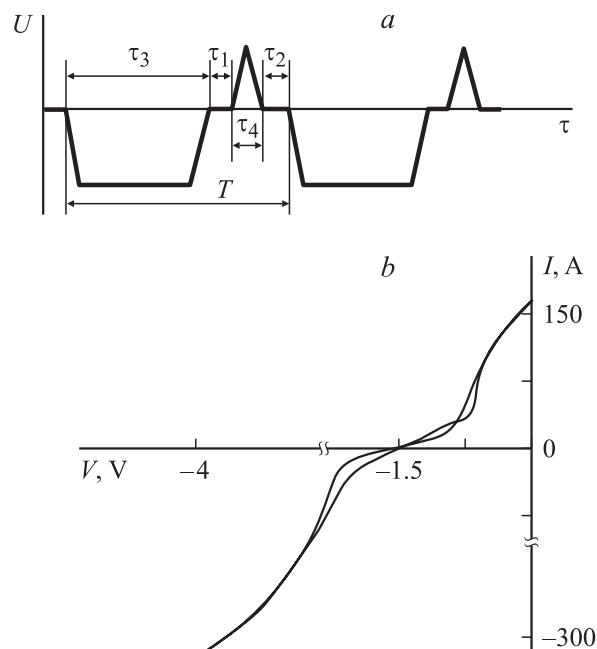
При переходе на комбинированный нагрев прибора водяная рубашка теплообменника соединялась с системой напуска воздуха, который циркулировал через нее под давлением 110–150 кПа, а в газовый зазор подавался гелий при давлении  $2-5 \cdot 10^3$  Па. С помощью секций внешнего нагревателя температура коллектора достигала значений 770–870 К. К токовыводам прибора прикладывалось ускоряющее постоянное напряжение 6–12 В плюсом на эмиттерный вывод.

Экспериментальная аппаратура нагрева обеспечивала стабилизацию тока разряда (диапазон регулирования 0–300 А), поэтому по мере разогрева электродов происходило уменьшение ускоряющего напряжения. При подъеме температуры цезиевого термостата до 570–620 К МЭЗ заполнялся паром цезия. Высокая температура термостата была выбрана для того, чтобы избежать возможных паразитных пробоев между соседними элементами, расстояния между которыми больше межэлектродного зазора.

Для получения информации о работе ТЭП в виде ВАХ нагрев обратными токами проводился в импульсном режиме. Паузы между импульсами нагрева используются для измерения ВАХ.

На рис. 2 показаны временная диаграмма нагревательных и диагностирующих импульсов, а также осциллограмма реперной ВАХ одноэлементного ТЭП при обратном нагреве. ВАХ обратного нагрева имеет вид кривой с характерным для дугового разряда гистерезисом. Это свидетельствует о зажигании и гашении дугового разряда между эмиттером и коллектором за время действия импульсов нагрева. Различие тепловых режимов электродов (прямой, обратный нагрев и сочетание их — комбинированный) обуславливает различие температурных профилей как коллектора, так и эмиттера. При изменении температурного профиля коллектора с помощью секционных нагревателей теплообменника и стабилизации электрического тока через ТЭП при обратном нагреве происходит перераспределение плотности электрического тока с поверхности коллектора, которое приводит к изменению температуры эмиттера на соответствующем участке.

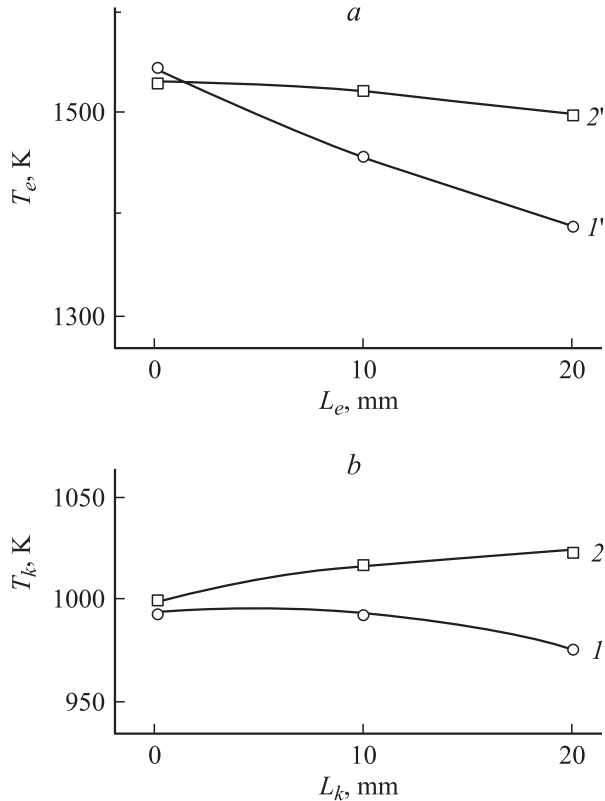
На рис. 3 кривой  $I$  показано распределение температуры по длине коллектора ТЭП при  $P_{cs} = 4.5$  ГПа и одинаковой величине мощностей на обеих секциях нагревателей теплообменника. При увеличении мощности правой секции нагревателя и соответствующего увеличения температуры коллектора в этой области



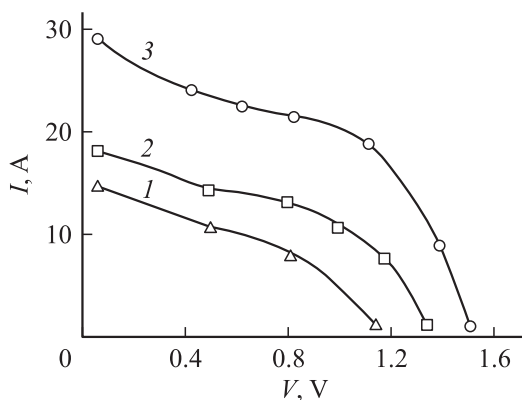
**Рис. 2.** Временная диаграмма импульсов (а) и осциллограмма ВАХ обратного нагрева (б) одноэлементного ТЭП.  $\tau_3$  — длительность импульса нагрева;  $\tau_4$  — длительность измерительного импульса;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  — время задержки;  $T$  — период повторения импульсов.

на 40 К (кривая 2) изменение температуры эмиттера на соответствующем участке составило  $\sim 100$  К.

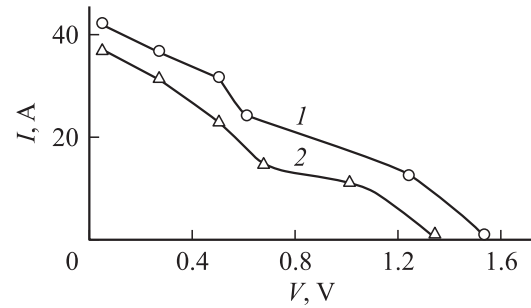
Экспериментальная проверка подтвердила возможность контролируемой привязки места поджига дугового разряда обратного нагрева путем создания неизотермического профиля коллектора. Это позволяет осуществлять профилирование температуры эмиттера при



**Рис. 3.** Распределение температуры по длине эмиттера (a) и коллектора (b) ТЭП при обратном нагреве. 1, 1' — температуры электродов при равной мощности секций внешнего нагревателя; 2, 2' — температуры электродов при увеличении мощности правой секции внешнего нагревателя.



**Рис. 4.** ВАХ ТЭП при различных способах нагрева  $T_e = 1720$  К,  $T_k = 1030$  К,  $P_{cs} = 0.9$  ГПа. 1 — прямой нагрев:  $W_1 = 834$  Вт; 2 — комбинированный:  $W_1 = 670$  Вт,  $W_2 = 212$  Вт; 3 — комбинированный:  $W_1 = 350$  Вт,  $W_2 = 528$  Вт.



**Рис. 5.** ВАХ ТЭП при различных длительностях импульса нагрева  $\tau_3$  и  $P_{cs} = 1.9$  ГПа. 1 —  $\tau_3 = 46$  мс,  $\tau_1 = 18$  мс,  $\tau_4 = 10$  мс,  $T = 104$  мс; 2 —  $\tau_3 = 18$  мс,  $\tau_1 = 40$  мс,  $\tau_2 = 26$  мс,  $\tau_4 = 10$  мс,  $T = 100$  мс. Комбинированный нагрев: 1 —  $W_1 = 865$  Вт,  $W_2 = 278$  Вт,  $T_e = 1820$  К,  $T_k = 1110$  К; 2 —  $W_1 = 997$  Вт,  $W_2 = 264$  Вт,  $T_e = 1820$  К,  $T_k = 1110$  К.

комбинированном и обратном нагреве и, в частности, имитировать при внереакторных испытаниях характер тепловыделения на электродах ЭГК (электрогенерирующий канал).

Проведено исследование электрических характеристик ТЭП при различных режимах нагрева электродов. На рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики, снятые при прямом и комбинированном нагреве и при одинаковых температурах электродов  $T_e \approx 1720$  К,  $T_k \approx 1030$  К и  $P_{cs} = 0.9$  ГПа. Анализ характеристик показывает, что при комбинированном нагреве по мере увеличения составляющей теплового баланса обратного нагрева ВАХ смещается в область более высоких напряжений примерно на 0.45 В и выходная мощность преобразователя существенно увеличивается (в 2–3 раза). Эти результаты, по-видимому, следует связать с переходом разряда с распределенной термоэлектронной эмиссией эмиттера в разряд с катодным пятном [3], несмотря на малую протяженность электродов ( $L = 20$  мм). Аналогичные результаты были получены, при исследовании характеристик снятых при тех же тепловых режимах, но при более высоких давлениях паров цезия.

В ходе испытаний ТЭП с комбинированным нагревом электродов было изучено влияние длительности импульса нагрева ( $\tau_3$ ) на выходные параметры преобразователя. На рис. 5 приведены ВАХ ТЭП при различных величинах длительности импульса нагрева  $\tau_3$ . Из рисунка видно, что выходные параметры ТЭП, снятые при  $\tau_3 = 46$  мс, почти в 1.5 раза превышают выходные параметры преобразователя, снятые при  $\tau_3 = 18$  мс, при этом значение эдс выше примерно на 0.2 В.

## Выводы

1. Приведена методика тепловых испытаний одноэлементного цилиндрического ТЭП при прямом и комбинированном нагреве электродов.

2. Анализ тепловых характеристик преобразователя показал возможность контролируемой привязки места поджига дугового разряда обратного нагрева путем создания неизотермического профиля коллектора.

3. Исследование электрических характеристик ТЭП показало, что при комбинированном нагреве по мере увеличения составляющей теплового баланса обратного нагрева выходные параметры преобразователя существенно увеличиваются.

4. Установлено, что величина длительности импульса нагрева, равная  $\tau_3 = 46 \text{ ms}$ , является наиболее оптимальной при комбинированном нагреве электродов этой геометрии.

## Список литературы

- [1] *Бакит Ф.Г., Дюжнев Г.А., Марциновский А.М.* и др. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
- [2] *Игумнов Б.Н., Евиллин В.П.* // Электричество. 1976. № 4. С. 80.
- [3] *Дюжнев Г.А., Каплан В.Б., Мойжес Б.Я.* и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 453–457.