

Физико-технические проблемы создания термоэмиссионного выпрямителя для гальванического производства

© В.И. Ярыгин,¹ И.И. Касиков,¹ В.С. Миронов,¹ Г.Э. Лазаренко,¹ С.М. Тулин,¹ А.М. Марциновский,²
В.Б. Каплан,² И.И. Столяров,² В.С. Васильковский,³ Н.М. Афанасьев³

¹ Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 48439 Обнинск, Россия

e-mail: ecs@ippe.ru

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: istc_2306@mail.ru

³ Федеральное государственное унитарное предприятие „Красная Звезда“

115230 Москва, Россия

e-mail: serbin@dol.ru

(Поступило в Редакцию 1 октября 2007 г. В окончательной редакции 31 марта 2008 г.)

Рассматривается возможность использования термоэмиссионного преобразователя тепловой энергии в электрическую в качестве выпрямителя переменного тока промышленной частоты в постоянный ток. Описана конструкция выпрямительного модуля с сильноточным преобразователем, эмиттер которого нагревается газовой горелкой до температуры ~ 1400 К. Измерены основные рабочие характеристики модуля. Обсуждается привлекательность использования разработанного модуля для гальванического производства.

PACS: 84.60.-h

Введение

Работы по созданию термоэмиссионных преобразователей тепловой энергии (ТЭП) в электрическую ведутся уже более полувека. В основных чертах ясны физические процессы, происходящие в них, и накоплен большой опыт инженерной реализации этих устройств, ориентированных на использование тепловой энергии ядерных реакторов в условиях космоса [1]. Были также разработаны опытные образцы индивидуальных бойлерных установок с генерацией электроэнергии, работающие на природном газе [2,3]. Невысокий КПД ($\sim 10\%$) и низкое выходное напряжение (~ 1 В) при значительной величине постоянного тока (~ 10 А/см²) являются характерными особенностями ТЭП, сужающими область их использования в качестве генераторов электроэнергии.

Однако ТЭП можно использовать не только как генератор, но и как выпрямитель переменного электрического тока [4,5]. Наиболее привлекательно его применение в этом качестве в условиях гальванического производства, потребляющего значительные мощности постоянного тока при низком напряжении ($\lesssim 10$ В). Кроме того, эти производства нуждаются в большом количестве тепла. Использование для этих целей преобразованного тепла ТЭП повышает экономическую эффективность использования термоэмиссионных преобразователей и делает их конкурентоспособными по отношению к твердотельным выпрямителям, имеющим прямые потери напряжения 1–2 В, что ограничивает КПД преобразования значением 90–80%. ТЭП-выпрямитель за счет дополнительного преобразования тепла в электроэнергию может отдавать в нагрузку больше энергии, чем получает с переменным током. При определенных

условиях и масштабах гальванического производства отводимое от ТЭП тепло может быть полностью использовано в производстве.

Ниже приводятся результаты работы по созданию низковольтного сильноточного модуля ТЭП-выпрямителя, нагреваемого газовой горелкой.

Основные элементы выпрямительного модуля

На рис. 1 представлена схема газоплазменного ТЭП, используемого в качестве ТЭП-выпрямителя. Эмиттер представляет собой сферическую часть цельноштампованной молибденовой оболочки толщиной 0.8 мм. Внутренняя (рабочая) поверхность эмиттера покрыта слоем платины толщиной 2–3 мкм. Величина эмиссионной поверхности составляет 40 см². На внешнюю поверхность оболочки, находящуюся в контакте с продуктами сгорания и окружающей атмосферой, нанесено жаростойкое SiC-покрытие. Коллекторный узел представляет собой калиевую тепловую трубу, к нижней части которой припаян анод из меди, на эмиссионную поверхность которого нанесено никелевое покрытие толщиной ~ 3 мкм. Между эмиттером и коллектором установлены керамические дистанционаторы из Al₂O₃, величина межэлектродного зазора не превышает 2 мм. Для отвода тепла из зоны конденсации коллекторной тепловой трубы используется водяной теплообменник типа „воздух-вода“.

Преобразователь рассчитан на тепловую мощность ≤ 800 Вт, температуру эмиттера $T_E \leq 1650$ К, температуру коллектора $T_C \leq 850$ К.

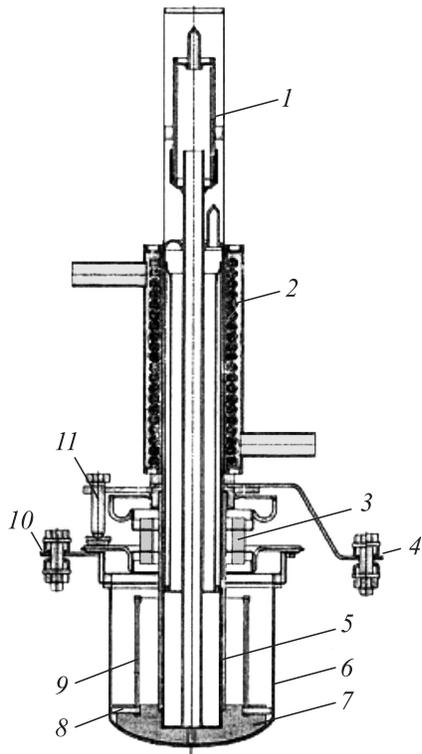


Рис. 1. Конструктивная схема полномасштабного газоплазменного ТЭП для модуля ТЭП-выпрямителя: 1 — цезиевый термостат, 2 — водяной теплообменник, 3 — металлокерамический узел, 4 — токовывод коллектора, 5 — тепловая труба коллектора, 6 — эмиттер, 7 — коллектор, 8 — керамический дистанционатор, 9 — тепловые экраны, 10 — токовывод эмиттера, 11 — система регулирования межэлектродного зазора.

Для нагрева эмиттера была разработана эффективная рекуперативная горелка, работающая на природном газе. В горелке был применен комбинированный способ нагрева оболочки эмиттера ТЭП — конвективный (продуктами сгорания газа) и радиационный (излучением нагретой крупнопористой керамической вставки), что обеспечило высокий КПД нагрева (более 40%) и стабильную температуру эмиттера ТЭП до 1550 К. Контроль горения осуществлялся визуально через специальные лейкокапфировые окна; через них пирометром измерялась и температура оболочки эмиттера. Измерение среднего уровня температуры в горелке осуществлялось Pt-PtRh-термопарами. В собранном виде ТЭП и горелка представляют собой единый модуль.

Экспериментальные результаты

По сравнению с измерениями на обычных ТЭП с электронагревом исследование газоплазменного ТЭП имеет ряд существенных особенностей, связанных прежде всего с инерционностью всей системы и трудностью регулировки и стабилизации параметров ТЭП (температуры эмиттера и коллектора T_E и T_C и давления паров

цезия P_{Cs}). Это хорошо видно из рис. 2, где приведено изменение основных параметров модуля ТЭП в процессе испытаний. Это определило специфические требования к методу регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Характеристики измерялись импульсным методом из любой рабочей точки ВАХ. В качестве электросилового устройства использовалась транзисторная сборка, обеспечивающая развертку в диапазоне изменения тока ± 1000 А; погрешность измерения не превышала 1.5%. В процессе испытаний модуля в режиме выпрямления в качестве нагрузки использовалась также и гальвани-

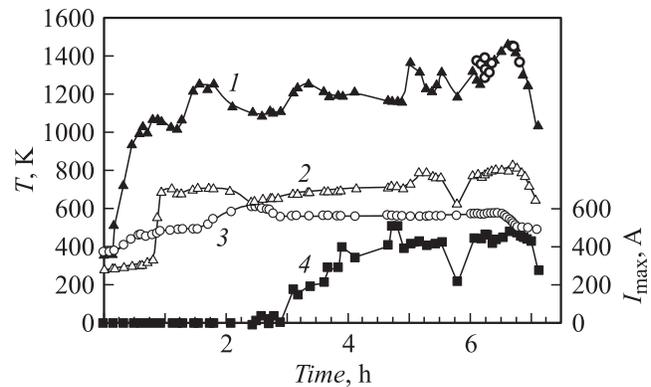


Рис. 2. Экспериментальные значения основных параметров модуля ТЭП-выпрямителя с газоплазменным нагревом в процессе испытаний. 1 — температура топочной камеры (треугольники) и температура горячей оболочки по данным пирометрических измерений (кружки); 2 — температура коллектора; 3 — температура резервуара с цезием; 4 — максимальная величина электрического тока в цепи.

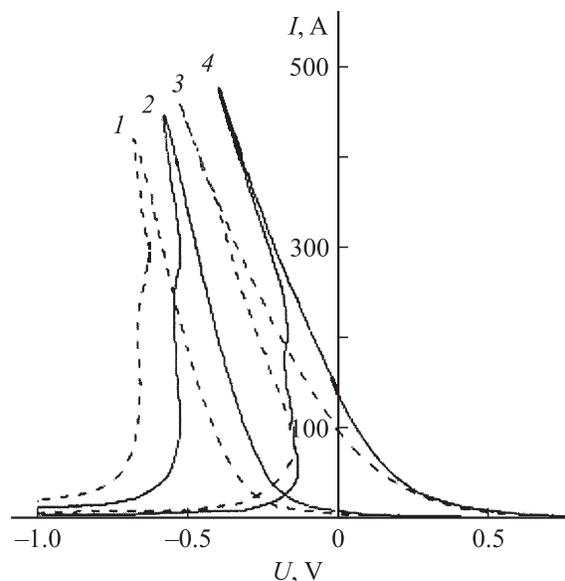


Рис. 3. Экспериментальная ВАХ полномасштабного модуля ТЭП-выпрямителя с газоплазменным нагревом. 1 — $T_E = 1170$, $T_C = 800$, $P_{Cs} = 2.22$; 2 — 1230, 800, 2.44; 3 — 1360, 800, 2.18; 4 — 1400 К, 810 К, 1.04 Торр.

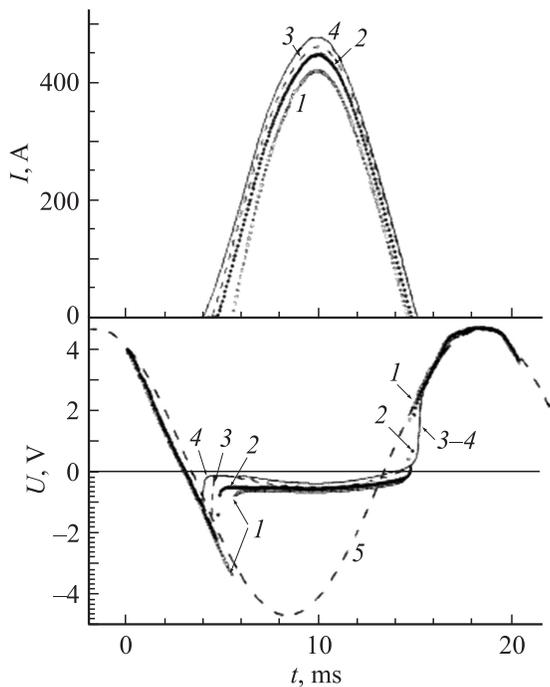


Рис. 4. Экспериментальные изменения во времени электрического тока и напряжения полномасштабного модуля ТЭП-выпрямителя (1–4) и напряжения в сети (кривая 5). Частота внешнего напряжения 50 Hz, амплитуда напряжения $U_0 = 4.66$ V. Нумерация кривых 1–4 соответствует рис. 3.

ческая ванна с площадью электродов 0.45 m^2 (при этом проводилось нанесение медного покрытия на никелевые пластины). Кроме того, в выпрямительных режимах ВАХ можно построить по зависимости напряжения и силы тока от времени, которые синхронно регистрировались по обоим каналам (напряжение и ток) через каждые $73 \mu\text{s}$ в течение всего периода переменного тока ($20 \mu\text{s}$).

На рис. 3 приведено типичное семейство построенных таким образом ВАХ, на рис. 4 — соответствующие им временные характеристики; штриховой линией 5 показана осциллограмма входного (сетового) напряжения. Эти характеристики зарегистрированы в условиях 6–7 часовой работы горелки (см. рис. 2).

После смены полярности входного напряжения в преобразователе развивается низковольтная дуга. В зависимости от выбранных режимов работы ТЭП-выпрямителя происходит это через $5 \pm 1 \text{ ms}$ после начала увеличения входного напряжения. Обратный ход ВАХ во второй половине периода ($t > 14 \text{ ms}$) не совпадает с прямым ходом (гистерезисная дуга) — при тех же уровнях токов напряжение на ТЭП-выпрямителе выше. Здесь появляется заметная область генерации. Так, например, для температуры горячей оболочки $T_E = 1400 \text{ K}$ ВАХ (кривая 4 на рис. 3) при токах ниже 150 А лежит в генерирующем квадранте. Время нахождения в этой области для кривой 4 небольшое и составляет около 1.2 ms (6% времени от периода $T = 20 \text{ ms}$).

Интересной особенностью этих ВАХ, проявившейся при работе с большими токами, является сильно выраженный гистерезисный характер — прямой и обратный ход различаются довольно сильно и совпадают только для небольшого участка хорошо развитого разряда при высоких температурах катода. Это связано с реактивностью внешней цепи с нагрузкой (гальваническая ванна и соединительные провода). В условиях наших экспериментов индуктивный сдвиг фаз составляет 26–30% и соответствует той величине индуктивности, которая была найдена специальными измерениями параметров нагрузки без ТЭП-выпрямителя.

Отметим, что после завершения испытаний выпрямительный модуль остался в рабочем состоянии.

Обсуждение результатов

Термоэмиссионный преобразователь имеет существенно нелинейную характеристику, что позволяет применить его в качестве выпрямителя переменного тока.

На рис. 5 показана принципиальная электрическая схема выпрямления переменного тока с использованием ТЭП.

На рис. 6 представлена идеализированная ВАХ ТЭП (ломаная 1-1), моделирующая характеристики рис. 3.

Для простоты будем полагать, что входное переменное напряжение $U(t)$ кусочно-постоянно и его зависимость от времени представляется меандром. Суммарная ВАХ преобразователя и источника переменного напряжения имеет вид 5 или 6 и представляет собой ВАХ

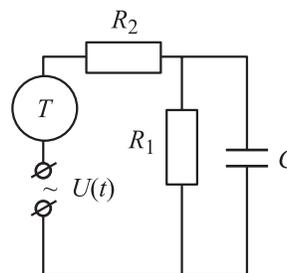


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема ТЭП-выпрямителя. T — ТЭП, R_2 — сопротивление коммутационных проводов; R_1, C — сопротивление и емкость потребителя выпрямленного тока.

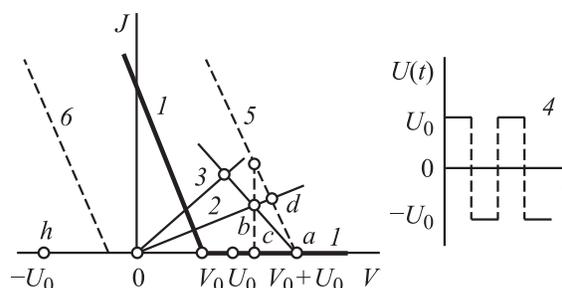


Рис. 6. Идеализированные ВАХ ТЭП (1) и форма переменного напряжения (4).

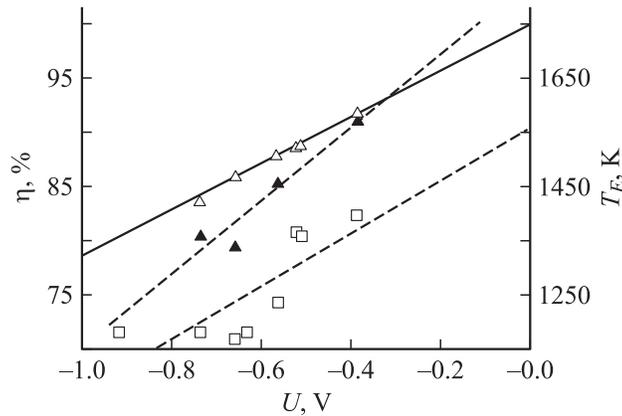


Рис. 7. Зависимость кпд электрического преобразования от напряжения при максимальном токе на ТЭП: □ — напряжение при максимальном токе на ТЭП в зависимости от температуры эмиттера; ▲ — кпд — расчет по формуле (1) и линейная аппроксимация; △ — кпд — расчет из тех же экспериментальных данных по формуле (2); сплошная прямая — расчет по формуле (2) с $U_0 = 4.66$ В.

ТЭП, сдвинутую на $\pm U_0$. Будем полагать, что $U_0 > V_0$. В этих случаях происходит периодический разрыв электрической цепи независимо от соотношений между величинами нагрузочных параметров R_1 , C и R_2 — внутреннего сопротивления ТЭП.

При достаточно большой электрической емкости, такой, что $R_1 C \omega \gg 1$ и $R_2 C \omega \gg 1$, колебаниями тока в нагрузке в течение цикла и изменениями тока в ТЭП в течение положительного полупериода времени можно пренебречь. В этих условиях напряжение на нагрузке определяется пересечением нагрузочной прямой (например, 2) с медианой « ab ». Действительно, в положительный полупериод в цепи ТЭП протекают равные токи через нагрузку и в электрическую емкость, в следующий полупериод емкость разряжается через нагрузку, поддерживая в ней постоянный ток. В этот полупериод ток через ТЭП равен нулю, и к нему приложено запирающее напряжение, равное разности потенциалов между точками c и h , т.е. ($V_C + U_0$).

Полный электрический заряд, протекающий за период через нагрузку и через источник переменного напряжения, одинаков, однако напряжение на них может быть различным. Если напряжение на нагрузке меньше U_0 , то в нагрузке выделяется энергии меньше, чем расходуется во внешнем источнике переменного напряжения. Если напряжение больше U_0 , то за счет дополнительного преобразования тепла в электроэнергию в нагрузке выделится энергии больше, чем будет поглощено во внешнем источнике (см. рис. 6, нагрузочные прямые 3 и 2 соответственно).

Если емкость отсутствует ($C = 0$), то через нагрузку в течение положительного полупериода течет ток, величина которого определяется пересечением нагрузочной прямой со сдвинутой характеристикой 5, например, в точке d .

Как и в предыдущем случае, эффективность выпрямления переменного тока определяется теми же соотношениями между напряжением на нагрузке и амплитудой переменного напряжения. Кпд электрического преобразования энергии переменного тока находится из следующего выражения:

$$\eta = \frac{\int I(t)(U(t) + V(t))dt}{\int I(t)U(t)dt}, \quad (1)$$

где $U(t) = U_0 \sin \omega t$ — входное переменное напряжение, $I(t)$, $V(t)$ — ток через ТЭП и напряжение на нем.

Для линейной ВАХ типа 1 (рис. 6) и кусочно-постоянного входного напряжения выражение для электрического кпд упрощается

$$\eta = 1 + \frac{V_m}{U_0}, \quad (2)$$

где $V_m = V(I_{\max})$, значения I_{\max} при $U_0 = 4.66$ В представлены кривой 4 на рис. 2.

Если максимальный ток больше, чем ток короткого замыкания, то $V_m < 0$ и кпд становится меньше единицы. Этой же формулой можно пользоваться для оценки значения кпд и при синусоидальном напряжении, полагая в качестве напряжения на преобразователе (V_m) напряжение при максимальном токе.

По точной (1) и приближенной (2) формулам был проведен расчет кпд для модуля ТЭП-выпрямителя с газопламенным нагревом. На рис. 7 показана зависимость электрического кпд преобразования от напряжения V_m (отрицательного), соответствующего максимальному току. Темные треугольники — эксперимент, обчисленный по (1) с использованием тех же данных, что и при построении рис. 3 и 4, а также дополнительных данных при различной амплитуде переменного напряжения $U_0 = 4.60-5.55$ В. Аппроксимирующая темные треугольники штриховая линия выражается уравнением $\eta = 33.7V_m + 104$, светлые треугольники — кпд, рассчитанные по тому же массиву экспериментальных данных по формуле (2).

Основные условия экспериментов представлены в таблице, здесь использованы следующие обозначения: $P_1 = \frac{1}{T} \int I(t)V(t)dt$ — величина электроэнергии, выработанной в ТЭП, $P_0 = \frac{1}{T} \int I(t)U_0 \sin(\omega t + \varphi_0)dt$ — величина энергии, подведенной от источника переменного тока.

Основные условия экспериментов с модулем ТЭП-выпрямителя при газопламенном нагреве и результаты расчетов

№	T_E , К	T_C , К	T_{Cs} , К	P_{Cs} , Torr	U_0 , В	P_0 , W	P_1	η , %
1	1170	800	575	2.22	4.68	397	-75	79
2	1230	800	578	2.44	4.69	451	-62	85
3	1360	800	574	2.18	4.61	487	-60	89
4	1400	810	548	1.04	4.63	517	-45	91

На рис. 7 также показана зависимость максимальной величины отрицательного напряжения на ВАХ ТЭП от температуры эмиттера (прямоугольники), аппроксимированная следующим соотношением: $V_m = 0.00114T_E - 2$. Можно ожидать, что КПД 100% будет достигнут при температуре эмиттера T_E несколько выше 1650 К.

Заключение

Разработаны основные физико-технические решения для создания экспериментального выпрямительного модуля с термоэмиссионным преобразователем в качестве ключевого элемента, эмиттер которого непосредственно нагревается газовой горелкой. Он был разработан, изготовлен и испытан при поддержке МНТЦ (проект № 2306).

Проведенные испытания подтвердили правильность конструкторско-технологических решений для достижения технических характеристик ТЭП-выпрямителя, привлекательных для внедрения модуля в гальваническое производство.

Испытания проводились при температуре эмиттера, не превышавшей 1400 К, и уже при этой температуре при среднем выходном напряжении 3 В был получен электрический КПД преобразования энергии переменного тока промышленной частоты в постоянный ток до 91%.

Для дальнейших исследовательских экспериментальных работ внедренческого характера необходимо усовершенствовать горелку для достижения большей равномерности нагрева эмиттерной оболочки и повышения температуры эмиттера до уровня ~ 1600 К увеличения электрического КПД преобразования энергии и соответственно экономической эффективности энергосберегающей когенерационной технологии для гальванического производства.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2306).

Список литературы

- [1] Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977. 284 с.
- [2] Вольф Л.Р., Ярыгин В.И. Конверсия космической термоэмиссионной технологии для наземного применения. Сб. тез. Междунар. конф. „Конверсия и сотрудничество“. М., 1992. с. 46.
- [3] Ярыгин В.И., Вольф А.В., Визгалов А.В., Ружников В.А. // Анализ характеристик термоэмиссионного бойлера ТЕСТЕМ для центрального отопления жилого дома. Тр. 2-й Междунар. конф. специалистов по ТЭП. Швеция, 1993. с. 175–182.
- [4] Марциновский А.М. Способ выпрямления переменного напряжения и выпрямитель тока. Патент РФ 2114484. 1994.
- [5] Касиков И.И., Миронов В.С., Ярыгин В.И. // Междунар. научн. технич. конф. „Ядерная энергетика в космосе-2005“. М.–Подольск, 2005. Т. 3. С. 518.