

УДК 621.4

НОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Сайкин А. М., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
главный специалист Центра интеллектуальных систем
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена трудового Красного
Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»,
г. Москва, Россия
E-mail: a.saykin@nami.ru, ec02@bk.ru

Аннотация

Предлагаемое в настоящей статье новое устройство термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) в значительной степени лишено недостатков, присущих традиционным ТЭП, препятствующих достижению высоких надежности, КПД и усложняющих производство.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь, тепловая энергия, температура, теплоизоляция, тепловые потери

A NEW HEAT-TO-ELECTRICITY CONVERTER

Saykin A. M., doctor of technical sciences, senior researcher,
chief specialist of the Center for Intelligent Systems
Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Motor Institute of the Order
of the Labour Red Banner “NAMI”», Moscow, Russia
E-mail: a.saykin@nami.ru, ec02@bk.ru

Annotation

The new thermoemission converter (TEC) device proposed in this article is largely free of the disadvantages inherent for traditional TECs, which hinder the achievement of high reliability, efficiency, and also complicate production.

Keywords: thermoemission converter, thermal energy, temperature, thermal insulation, heat loss

Термоэмиссионные преобразователи тепловой энергии в электрическую являются, как известно [1], безмашинными электрогенераторами, не требующими для своего функционирования каких-либо движущихся макроскопических частей, что является их несомненным достоинством. Однако традиционные ТЭП обладают особенностями, препятствующими достижению высоких надежности, КПД и усложняющими производство. Так, в типичном традиционном ТЭП (рисунок 1), имеются две рабочие поверхности 3 и 5, расположенные на очень маленьком расстоянии $\delta \approx 0,05$ мм.

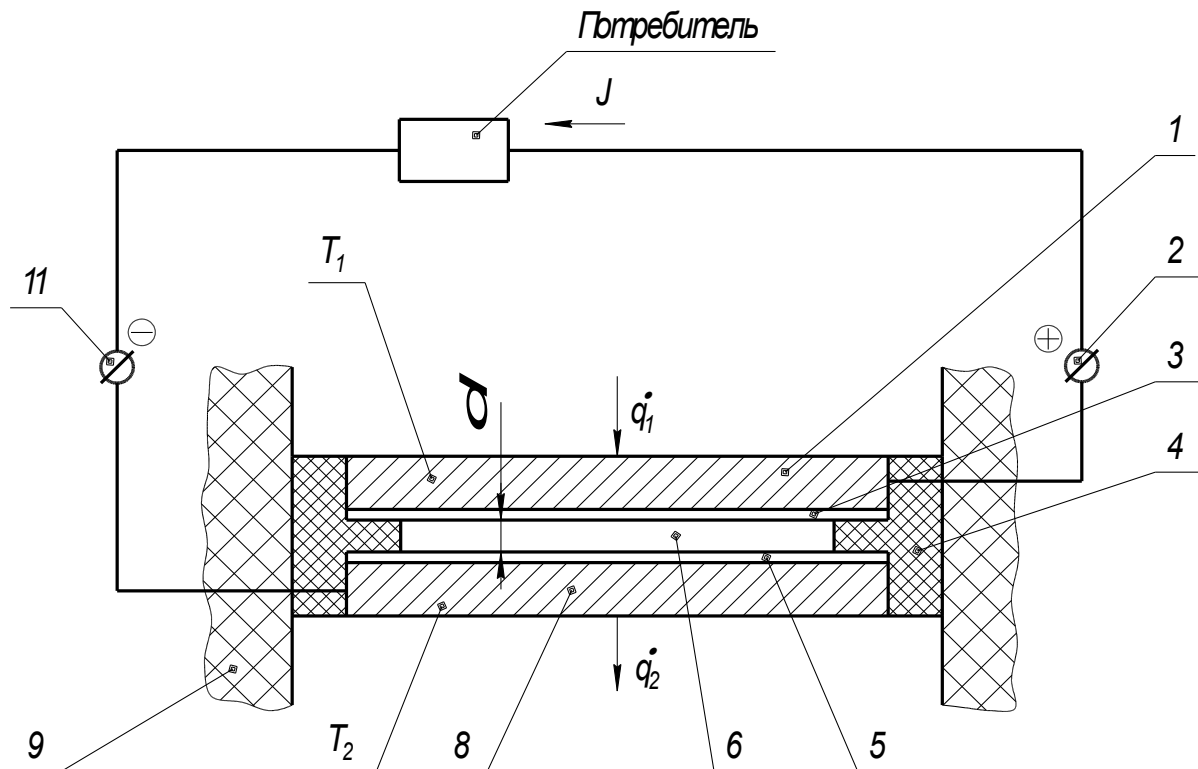


Рисунок 1. Схематичное изображение устройства традиционного ТЭП:

- 1 – стенка вакуумной камеры, воспринимающая тепловой поток $\dot{q}_1$ от высокотемпературного источника; 2, 11 – положительная и отрицательная выходная клемма, соответственно;
 3 – рабочая поверхность, эмитирующая электроны; 4 – электроизолятор, исполняющий роль дистанционирующего элемента, обеспечивающего малый зазор между рабочими поверхностями 3 и 5; 5 – коллектор, воспринимающий тепловые электроны, испущенные эмиттером 3; 6 – вакуум, заполненный парами легкоионизируемого газа;
 8 – теплоотдающая поверхность вакуумной камеры; 9 – теплоизолятор;
 T_1 , T_2 – температуры эмиттера и коллектора соответственно, причем $T_1 > T_2$; $\dot{q}_1$ и $\dot{q}_2$ – тепловые потоки к эмиттеру и от коллектора соответственно

Эти поверхности изготовлены из различных материалов и при нормальной работе ТЭП находятся при высоких и разных температурах. Например, поверхность 3, являющаяся эмиттером электронов, изготовлена из вольфрама и имеет температуру $T \approx 2000\text{ К}$, обеспечивающую достаточно большую эмиссию электронов, несмотря на большую работу выхода электрона. Поверхность 5, являющаяся коллектором, находится при температуре $T \approx 1000\text{ К}$ и изготовлена из оксида титана, имеющего существенно меньшую работу выхода электрона. Между рабочими поверхностями создан вакуум 6, заполненный достаточно разреженными парами цезия, ионизированными из поверхности вольфрама (основная цель заполнения вакуума ионами цезия – экранировка объемного заряда потока электронов). Сохранение вакуума и цезия в нем, малого зазора, неизменности химического состава и физических свойств рабочих поверхностей, причем при высоких и разных температурах, а также при вибрационных нагрузках, характерных для наземного автотранспорта, представляет собой весьма сложную инженерную задачу. Кроме того, столь высокие градиенты температуры и абсолютные значения температур приводят к уменьшению КПД, так как кроме тепловой энергии, полезно затрачиваемой испущенными эмиттером 3 тепловыми электронами на работу против сил электрического поля между поверхностями 3 и 5, имеются значительные

потери тепла, обусловленные теплопроводностью и излучением (типичные значения КПД составляют $\approx 10-15\%$).

Предлагаемое в настоящей статье нетрадиционное устройство ТЭП в значительной степени лишено указанных недостатков.

Предлагаемый ТЭП (рисунок 2) состоит из вакуумной камеры 3, в объеме которой 5 имеется стационарное магнитное поле $\vec{B}$, силовые линии которого 9 параллельны продольным осям эмиттеров 19, разделенных между собой вакуумными промежутками и нанесенных на подложку 21, имеющую высокое омическое сопротивление и хороший тепловой контакт со стенкой 22, воспринимающей тепловой поток от стороннего высокотемпературного источника тепла.

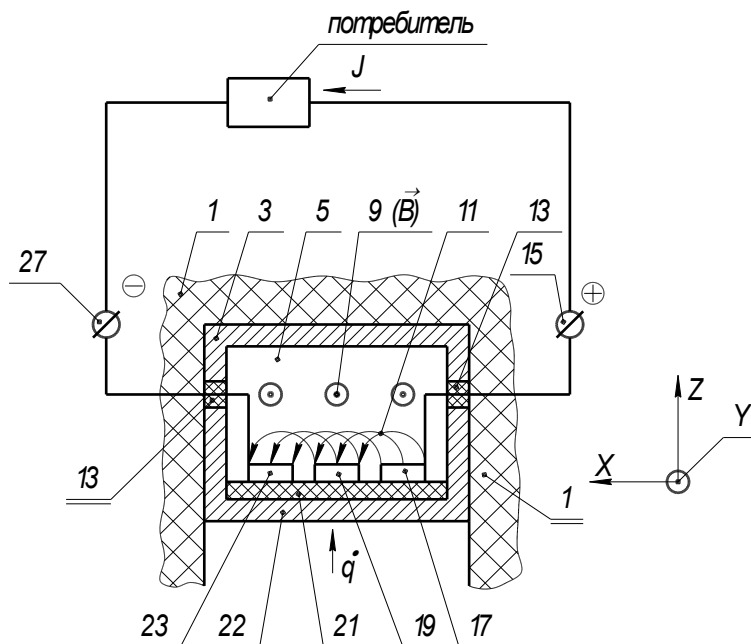


Рисунок 2. Схематическое изображение нетрадиционного устройства ТЭП:

- 1 – теплоизоляция; 3 – корпус вакуумной камеры; 5 – вакуумный объем;
 9 – силовые линии магнитного поля перпендикулярные плоскости рисунка (параллельные оси Y); 11 – усредненные траектории термоэлектронов, движение которых в вакууме частично упорядочено магнитным полем;
 13 – электроизоляторы для выводов; 15, 27 – положительная и отрицательная выходная клемма соответственно; 17 – один из крайних эмиттеров, являющийся коллектором электронов, поступающих в вакуумную камеру из внешней цепи; 19 – эмиттер термоэлектронов (всего показано три эмиттера – 17, 19, 23); 21 – подложка эмиттеров, имеющая высокое омическое сопротивление; 22 – стенка вакуумной камеры, воспринимающая тепловой поток $\dot{q}$ от стороннего высокотемпературного источника тепла;
 23 – точно такой же элемент, как и 17, но выполняющий роль коллектора электронов, покидающих вакуумную камеру и направляющихся во внешнюю цепь

От двух крайних эмиттеров 17 и 23, выполняющих функции коллекторов (входного и выходного соответственно), через изоляторы 13 из вакуумной камеры выведены электроды к выходным клеммам 15 и 27.

Стенки вакуумной камеры, за исключением стенки 22, воспринимающей сторонний тепловой поток, покрыты теплоизоляцией 1, исключаяющей утечки тепла (единственными потерями тепла являются тепловые потоки по электродам, соединяющим коллекторы 17 и 23 с клеммами 15 и 27, соответственно).

Рассмотрим работу ТЭП нетрадиционного устройства, исходя из широко известных в электронике законов, и не вдаваясь в подробности. Согласно скорректированному закону Ричардсона, максимально возможная плотность тока, создаваемая эмитируемыми тепловыми электронами, определяется равенством:

$$j_m = K_3 \cdot A_0 \cdot T_3^2 \cdot \exp\left[-\frac{e \cdot \Delta\phi}{k_B \cdot T_3}\right], \quad (1)$$

где $A_0 = 1,2 \cdot 10^6 \cdot \text{А}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^2)$ – постоянная Ричардсона, найденная теоретически;

K_3 – безразмерный коэффициент индивидуальный для каждого вещества, определяемый экспериментально (обычно $K_3 = 0,25 \dots 0,5$);

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Кл}$ – элементарный электрический заряд;

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \text{Дж/К}$ – постоянная Больцмана;

$e \cdot \Delta\phi$ – работа выхода электрона, индивидуальная для каждого вещества и технологии приготовления поверхности (типичные значения: $e \cdot \Delta\phi \approx (1 \dots 4,5) \cdot \text{эВ}$; где $1 \cdot \text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Дж}$);

T_3 – температура эмиттера (обычно: $T_3 = (1000 \div 2000) \cdot \text{К}$).

Наиболее энергичные тепловые электроны, покидая эмиттер и затрачивая часть своей потенциальной энергии на совершение работы выхода, вылетают в вакуум со средней скоростью, определяемой температурой эмиттера согласно равенству:

$$V_e = \sqrt{\frac{k_B \cdot T_3}{m_e} \cdot 3}, \quad (2)$$

где $m_e = 0,91 \cdot 10^{-30} \cdot \text{кг}$ – масса покоя электрона (мы пренебрегаем релятивистским изменением массы в силу его малости).

Заметим, что тепловые электроны, находящиеся внутри эмиттера, имеют среднюю скорость, не определяемую равенством (2), которое справедливо только если $e \cdot \Delta\phi \gg k_B \cdot T_3$, что практически выполняется всегда. Реальные плотности тока в ТЭП существенно меньше, чем максимально возможные по (1).

Электрон, двигаясь в вакууме, испытывает в общем случае силовое воздействие стороннего стационарного магнитного поля, а также силовое и энергетическое воздействие электростатического поля, образованного разностью потенциалов, между коллекторами 17 и 23 (влиянием других полей, наведенных электрическими микрочастицами, находящимися в вакууме, пренебрежем). Для простоты рассмотрим случай относительно малого силового влияния электростатического поля (этот случай реализуется при достаточно малом омическом сопротивлении потребителя и достаточно сильном магнитном поле) и, кроме того, рассмотрим только те электроны, которые эмитируются в плоскостях, близких к плоскости рисунка (т. е. перпендикулярно силовым линиям магнитного поля), и имеют скорости, близкие к среднему значению по (2).

Такие электроны, испытывая силу

$$F_{\text{л}} = e \cdot V_e \cdot B, \quad (3)$$

всегда перпендикулярную вектору скорости электрона и поэтому не совершающую над ним работу, движутся в плоскости рисунка по траекториям, являющимся частью окружности, имеющей радиус

$$r_{\text{Л}} = \frac{m \cdot V_e^2}{F_{\text{Л}}} = \frac{V_e \cdot m_e}{e \cdot B}. \quad (4)$$

Зависимость (4) найдена из равенства центростремительного ускорения тому ускорению, которое, согласно второму закону Ньютона, сообщает электрону сила Лоренца, т. е. из равенства:

$$\frac{V_e^2}{r_{\text{Л}}} = \frac{F_{\text{Л}}}{m_e}, \quad (5)$$

где $F_{\text{Л}}$ – сила Лоренца, [см. формулу (3)], Н;

B – индукция магнитного поля, Тл;

$r_{\text{Л}}$ – радиус ларморовской окружности, м.

Так как электрон движется по окружности, то он, возвращаясь, пересекает плоскость, в которой лежит поверхность, его испустившая, причем в точке, не совпадающей с точкой из которой вылетел. На рисунке 3 представлены траектории трех из рассматриваемых нами электронов, которые вылетели под различными углами α ($\alpha_1 = 45^\circ$; $\alpha_2 = 90^\circ$; $\alpha_3 = 135^\circ$) к эмитирующей поверхности.

Все электроны вернулись на плоскость «X-Y» левее той точки 0 ($x = 0$), из которой были испущены (траектории изображены с учетом направления действия силы Лоренца, определяемого «правилом левой руки»: отставленный большой палец открытой ладони левой руки указывает направление силы Лоренца, если четыре других сомкнутых пальца направлены против вектора скорости электрона, а линии магнитного поля «входят» в ладонь с лицевой стороны). Заметим, что на максимальное расстояние l_2 удалился электрон, покинувший эмитирующую поверхность под углом $\alpha_2 = 90^\circ$, т.е. в том направлении, в котором, согласно закону Ламберта, наблюдается максимальная плотность потока электронов. Мы убедились, что магнитное поле, не воздействуя на электроны энергетически, но воздействуя силой Лоренца, упорядочивает их движение в вакууме, придавая ему в среднем направление вдоль оси X. На основе приведенных зависимостей нетрудно согласовать величины T_e , B , определяющие ларморовский радиус «среднего» электрона с геометрическими размерами эмиттеров и промежутков между ними, чтобы добиться попадания этих электронов, вылетающих в основном перпендикулярно поверхности, на соседнюю рабочую поверхность.

A'', B'', E'' – центры ларморовских окружностей, частями которых являются траектории трех электронов. Центры ларморовских окружностей всех термоэлектронов, движущихся в плоскости рисунка, находятся на полуокружности K с центром в точке 0 и с ларморовским радиусом. Все траектории электронов (а не только три), испущенных в плоскости рисунка, заканчиваются левее точки 0 их выхода из эмиттера.

Допущения: а) влияние электростатического поля пренебрежимо мало из-за достаточно большой индукции $\vec{B}$ и, значит, малого ларморовского радиуса; б) скорости электронов равны. В этом случае траектории электронов условно изображены на рисунке 2 полуокружностями 11, переходящими с одной рабочей поверхности на соседнюю.

Такое направленное движение электронов представляет собой, по определению, электрический ток, текущий в обратном направлении от коллектора 23 к коллектору 17. Таким образом, сочетание вакуума, не способного поддерживать хаотичность движения и магнитного поля, частично упорядочивающего движение электронов, приводит к тому, что часть энергии хаотического теплового движения, которой электроны обладают, находясь внутри эмиттера, непосредственно преобразуется в электрическую энергию, причем не требуя перепада температур.

Еще раз отметим, что приведенное описание работы ТЭП тем точнее, чем меньше омическое сопротивление нагрузки. Если же это сопротивление велико, то траектории электронов весьма далеки от окружностей из-за значительного влияния электростатического поля.

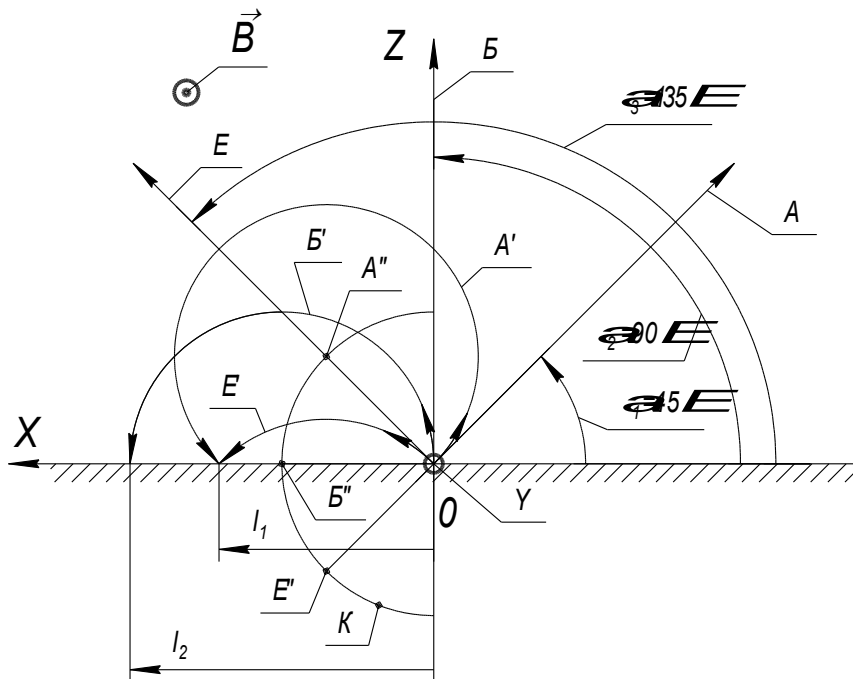


Рисунок 3. Траектории A' , B' , E' термоэлектронов, испущенных из точки O эмиттера в вакуумную камеру в плоскости рисунка, перпендикулярной вектору $\vec{B}$ магнитной индукции, и в трех различных направлениях A , B и E соответственно

В предельном случае, когда внешняя цепь разорвана (т. е. сопротивление нагрузки бесконечно) и установилось максимальное постоянное напряжение между коллекторами, электроны, покинувшие эмиттер, возвращаются на него не только под действием магнитного поля, но и под действием электрического поля, устраняющего их усредненное направленное движение (разумеется, если при этом бесконечно велико и омическое сопротивление между коллекторами 17 и 23 и потому отсутствует между ними паразитный переток зарядов).

Отметим основные недостатки и достоинства нетрадиционного ТЭП. К его недостатку можно отнести то, что большая часть электронов, испущенных эмиттером, не участвует в создании электрического тока, текущего поперек силовых магнитных линий, так как они испускаются эмиттером вдоль магнитных линий и попадают на тот же эмиттер, который их испустил.

К достоинствам ТЭП отнесем следующее. Во-первых, все рабочие поверхности 17, 19, 23 имеют одинаковый состав, нанесены на одну и ту же подложку 21 и не требуют специальных дистанционирующих элементов, что упрощает технологию изготовления, снижает производственные затраты и повышает надежность. Во-вторых, работа ТЭП, не требуя перепада температуры, происходит в изотермических условиях, что также повышает надежность и, что особенно важно, КПД.

Выяснить, преобладают ли достоинства предлагаемого ТЭП его недостатки, позволит опытная установка.

Выводы. 1. Предложено простое устройство ТЭП, существенно повышающее надежность, упрощающее технологию производства и уменьшающее затраты последнего.

2. На основании широко известных физических законов обоснована работа ТЭП в изотермических условиях, что предполагает значительное повышение КПД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кокорев Л. С., Харитонов В. В. Прямое преобразование энергии и термоядерные энергетические установки. Москва : Атомиздат, 1980. 216 с.
2. Лиханов В. А., Сайкин А. М. Снижение токсичности автотракторных дизелей. Москва : Агропромиздат, 1991. 208 с. ISBN 5-10-000789-3. EDN XAQVSV.
3. Гетманец Г. В., Лиханов В. А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта. Москва : ФГУП «Издательство «Наука», 1993. 330 с. EDN WLOBYH.