

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
СЕРИЯСЫ**



СЕРИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



**PHYSICO-MATHEMATICAL
SERIES**

6 (304)

**ҚАРАША – ЖЕЛТОҚСАН 2015 ж.
НОЯБРЬ – ДЕКАБРЬ 2015 г.
NOVEMBER – DECEMBER 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

Мұтанов Г. М.

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байгүнчеков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

Г. М. Мутанов

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

G. M. Mutanov,
academician of NAS RK

Editorial board:

A.A. Ashimov, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

I.N. Vishnievski, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.
ISSN 1991-346X

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 304 (2015), 71 – 77

**SIMULATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS
OF LOW-VOLTAGE ARC THERMIONIC ENERGY CONVERTERS****K. K. Makesheva, A. K. Kanatchinov**

Kazakh National Research Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: mami_yep@yahoo.com

Keywords: thermionic energy converters, low-voltage arc, diffusion and arc modes of thermionic converter of thermal energy.

Abstract. In this paper conditions that exist in the thermionic converters of thermal energy into electrical (TEP) are considered. The aim is to study the effect of Coulomb collisions on the characteristics and low-temperature properties of weakly ionized plasma arc. The theoretical analysis of different modes of TEP on the basis of the equations of motion of electrons and ions in the plasma arc allowed to retrieve the model of low-voltage current-voltage characteristics of the arc with Coulomb collisions of plasma particles. Comparison of current-voltage characteristics with experiment shows that Coulomb collisions of particles are responsible for the linear growth of the arc current. The results allow to clarify the conditions of the TEP arc ignition and can be used in the correct physical interpretation of the processes in the low-voltage arc in a reactor endurance test of TEP.

УДК 621.039

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НИЗКОВОЛЬТНОЙ ДУГИ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ****К. К. Макешева, А. К. Канатчинов**Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева,
Алматы, Казахстан

Ключевые слова: термоэмиссионные преобразователи энергии, низковольтная дуга, диффузионный и дуговой режимы работы термоэмиссионных преобразователей тепловой энергии.

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются условия, которые существуют в термоэмиссионных преобразователях тепловой энергии в электрическую (ТЭП). Целью работы является изучение влияния кулоновских столкновений на характеристики и свойства низкотемпературной слабоионизованной плазмы дугового разряда ТЭП. Теоретический анализ различных режимов работы ТЭП на основе уравнения движения электронов и ионов в плазме дуги позволил получить модельные вольтамперные характеристики низковольтной дуги с учетом кулоновских столкновений частиц плазмы. Сравнение вольтамперных характеристик с экспериментом показывает, что кулоновские столкновения частиц ответственны за линейный рост тока дуги. Полученные результаты позволяют уточнить условия поджига дуги ТЭП и могут быть использованы в правильной физической интерпретации процессов в низковольтной дуге в условиях реакторных ресурсных испытаний ТЭП.

Интерес к исследованию физических процессов в низкотемпературной слабоионизованной плазме значительно возрос прежде всего для получения электрической энергии. В низкотемпературной плазме существенную роль играет диссипация за счет столкновений. В настоящей

работе рассматриваются условия, которые существуют в термоэмиссионных преобразователях энергии.

В отличие от обычных энергетических установок в термоэмиссионных преобразователях полностью отсутствуют механические движения (турбины, генераторы). Важное преимущество - это возможность работы при высоких температурах коллектора (анода), что важно для космоса, где сброс тепла затруднен, так как сброс происходит в основном излучением $\sim T^4$ (T – температура анода). Быстрое развитие работ по ТЭП было связано с космическими задачами. Непереработанное тепло сбрасывается в космосе тепловым излучением [1]. Темпы развития космонавтики ставят задачу обеспечения космических аппаратов энергетической мощностью в сотни киловатт. Солнечные батареи при указанных мощностях – дорогостоящие конструкции. Ядерная энергетическая установка с применением ТЭП тепловой энергии в электрическую обладает большими преимуществами: простота конструкции, относительная легкость сброса тепла из них в космическое пространство вследствие высокой температуры $\sim 1000-1400$ °K холодильника (анода). В работе [2] обсуждается возможность использования ТЭП в системе, предназначенной для экспедиции человека на Марс. ТЭП хорошо согласуется с дуговым плазменным двигателем.

Физические основы действия ТЭП можно объяснить следующим образом: электронный газ эмитирует из нагретого электрода (катода) и попадает в «холодный» электрод (анод). Теплота Пельтье, поглощаемая электронами при эмиссии, в условиях высокой температуры (~ 2000 °K) больше выделяемой при конденсации на холодном электроде. В результате электронный газ в аноде обладает избыточной энергией, которую можно использовать при движении его от анода к катоду по внешней цепи. Поскольку эмиссия аналогична испарению, а теплота Пельтье - теплоте парообразования, то термоэмиссионный преобразователь есть обычная тепловая машина с электронным газом в качестве рабочего тела.

Основная часть энергии, которую забирает электрон при выходе из электрода или затрачивает на нагревание при входе в него равна работе выхода эмиттера (катода). Поэтому разность потенциалов на концах внешней цепи преобразователя оказывается порядка разности работ выхода катода и анода, т.е. около 1 В. Появление электрического тока вследствие нагревания электрода в вакууме впервые наблюдалось в 1915 году Шлихтером. В 1949 году А.Ф. Иоффе предложил проект вакуумного ТЭП, в основе которого лежит идея использования разности работ выхода катода и анода для получения электрической энергии [3]. Таким образом, вместо пара рабочим телом здесь служит электронный газ. Электронный газ, попадая на анод, выделяет меньше тепла, чем получил при выходе из катода. Избыточная энергия расходуется во внешней цепи, создавая в ней электрический ток.

Основное внимание теоретических и экспериментальных исследований направлено на изучение вольтамперных характеристик (ВАХ). Вольтамперные характеристики - единственный источник информации о процессах, происходящих в ТЭП. Основные режимы работы ТЭП: диффузионный, переходной и дуговой.

Диффузионный режим. Вследствие высокой плотности атомов цезия (Cs) движение электронов носит диффузионный характер. Рассеяние электронов происходит на атомах (нейтралях). Образование ионов идет за счет поверхностной ионизации на горячем катоде. Диффузионный ток был определен в работе [4]:

$$J_0 = 2Dn_0/L, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; n_0 – равновесная концентрация электронов; L – толщина зазора.

В ТЭП имеется плоский плазменный слой толщиной 1 мм. Плотность заряженных частиц $10^{12} - 10^{13}$ см⁻³, давление нейтрального газа ~ 1 мм рт. ст., степень ионизации $\sim 0,1 \div 1\%$, температура электронов $(1 \div 2) \cdot 10^3$ K. При зажигании дугового разряда возникают неустойчивости, приводящие к развитию турбулентности, которая исчезает в развитой дуге. Возникают спонтанные колебания тока определенной частоты. В работе [5] были получены ВАХ низковольтного дугового разряда без учета кулоновских столкновений, выяснены причины появления отрицательного участка. При определенных условиях $T_k > 2000$ °K плотность плазмы может расти до 10^{14} см⁻³, что приводит к линейному росту тока при увеличении напряжения и отсутствии тока насыщения ($I < < 1$).

В работе [6] была получена обобщенная ВАХ:

$$\left(U - \ln \frac{I}{1-I} - \frac{I}{v_0}\right) \left(U - \frac{a}{I}\right) = \varepsilon, \quad (2)$$

где $a = 2 \left(1 - \frac{T_k}{T_e}\right)$, $\varepsilon = 4 \frac{E_i D a}{T_e D_e} \ln \left(\frac{4}{\pi \delta}\right)$, T_k – температура катода; E_i – энергия ионизации цезия; U – полное падение потенциала в единицах $\frac{T_e}{e}$, $I = \frac{J}{J_r}$, J_r – ток Ричардсона.

Уравнение (2) есть вольтамперная характеристика низковольтной дуги с учетом кулоновских столкновений. Отрицательная ветвь сохранилась, а вся характеристика сдвинулась вправо в сторону увеличения падения напряжения плазмы [7].

Итак, при $I \ll 1$ получим:

$$\left(U - \frac{I}{v_0}\right) \left(U - \frac{a}{I}\right) = \varepsilon, \quad (3)$$

Уравнение энергетического баланса определяет плотность плазмы у катода:

$$v = \frac{UI - a}{\varepsilon}, \quad (4)$$

ВАХ в этом случае не имеет отрицательной ветви, нижняя граница кулоновского режима определяется уравнением:

$$v = 0, \quad (5)$$

Уравнение (3) дает связь между током и напряжением в дуговом разряде, и таким образом, оно представляет искомую вольтамперную характеристику дуги. Обычно $\varepsilon \ll 1$. Действительно, хотя $\frac{E_i}{T_e} \gg 1$ и оказывается около $10 \div 20$, а $\ln \frac{4}{\pi \delta} = 2 \div 4$, но $\frac{D a}{D_e} \sim \sqrt{\frac{m}{M}} \approx \frac{1}{500}$ (для Cs) и, таким образом $\varepsilon \approx 0,1$.

Это позволяет в первом приближении приравнять нулю каждый сомножитель, тогда получим:

$$U = \frac{a}{I}, \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{v_0} I, \quad (7)$$

где v_0 – безразмерная проводимость плазмы.

Первое выражение (6) аппроксимирует ветвь ВАХ с отрицательным сопротивлением, второе (7) кулоновскую ветвь.

Истинные ВАХ для $\varepsilon \neq 0$ асимптотически стремятся к (6) и (7) при больших U . Участок отрицательного сопротивления появляется при низкой плотности плазмы, когда потерями на ионизацию можно пренебречь. По мере увеличения плотности плазмы роль кулоновских столкновений растет и ВАХ приобретает нормальный вид.

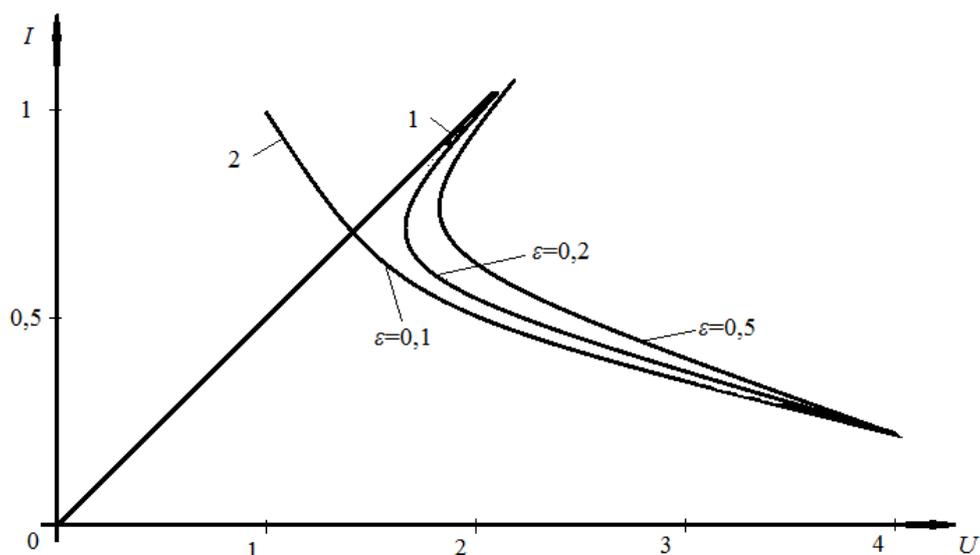
На рисунке приведены ВАХ для $a=1, \varepsilon=0,1; 0,2; 0,5$, а также графики асимптотических характеристик (6 и 7).

Возрастание плотности плазмы по мере развития дугового разряда приводит к росту кулоновских столкновений.

Полученные экспериментальные реакторные ресурсные испытания показывают, что линейный рост тока в ТЭП не может быть объяснен эффектом Шоттки, так как при $T_k \geq 2000$ °K пленка цезия на катоде испаряется [8].

Введение Cs приводит к существенному изменению работы выхода (φ) электродов. Плотность тока термоэлектронной эмиссии резко возрастает в присутствии паров Cs (Ленгмюр), что объясняется сильным снижением φ вследствие образования тонкого слоя адсорбированного цезия на поверхности электрода. Работа выхода таких катодов при полном залипании поверхности может снизиться до $1,5 \div 2$ эВ вместо $4 \div 5$ эВ на чистой поверхности металла.

С повышением температуры поверхность частично освобождается от пленки и φ постепенно возрастает. При $T_k \geq 2000$ °K ток линейно растет с напряжением.



Расчетные вольт-амперные характеристики низковольтной дуги ТЭП:
1 – соответствует выражению (7); 2 – соответствует выражению (6)

Мы предлагаем альтернативную интерпретацию. При больших $T_k \geq 2000 \text{ }^0\text{K}$ в объеме плазмы идет интенсивная ионизация. Растет плотность плазмы, которая является проводником тока. Вступают в действие кулоновские силы. Они достигают больших величин при малых отклонениях от условия нейтральности и благодаря своему медленному спаданию с расстоянием могут действовать сразу на большое количество частиц плазмы.

Итак, если при низких температурах катода $T_k \leq 2000 \text{ }^0\text{K}$ играют роль процессы на катоде (эффект Шоттки), то при высоких температурах $T_k \geq 2000 \text{ }^0\text{K}$ основную роль играет высокая плотность плазмы $n \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ вследствие объемной ионизации и возрастает роль кулоновского взаимодействия электронов и ионов.

Резюмируя вышеуказанное можно сказать: мы получили истинные ВАХ низковольтной дуги ТЭП с учетом кулоновских взаимодействий, которые учитывают участок отрицательного сопротивления (характеристика 2) и при $T > T_k$, когда возрастает плотность плазмы и роль столкновений растет, ток становится пропорционален напряжению (характеристика 1).

Достоинства термоэмиссионных преобразователей проявляются при их расположении в активной зоне ядерного реактора. При этом термоэмиссионный преобразователь объединен с тепловыделяющим элементом. Такое устройство называется электрогенерирующий элемент (ЭГЭ), в котором ядерное топливо - диоксид урана, обогащенный по изотопу урана - 235, заключено в сердечник с оболочкой из тугоплавкого металла, цилиндрическая часть служит эмиттером электронов. Последовательное соединение ЭГЭ образует термоэмиссионную электрогенерирующую сборку (ЭГС). Активная зона, собранная из такой ЭГС, с регулированием системы теплосброса, подачи цезия и вывода электрической энергии образует термоэмиссионный реактор-преобразователь.

Одним из важнейших параметров термоэмиссионного преобразователя, определяющим его электрические характеристики, является вакуумная работа выхода электродов [8]. Результаты лабораторных исследований показали, что применение эмиттеров с высокой исходной работой выхода заметно улучшает коэффициент полезного действия преобразователя. При этом генерируемая мощность ТЭП достигается на более низком уровне температуры эмиттера, что увеличивает ресурс работы ТЭП.

Однако испытания ЭГЭ показали, что использование эмиттеров с высокой вакуумной работой выхода не привело к ожидаемому росту генерируемой мощности ЭГС. Отсюда следует искать причину в особенностях условий работы ЭГЭ в реакторе, которые существенно отличаются от работы лабораторных ТЭП. Эмиттерная оболочка ЭГЭ в реакторе подвергается интенсивному облучению нейтронами и γ -лучами, которые могут вызвать в ней нарушения кристаллической

решетки, что приводит к радиационному легированию, разбуханию топлива от накопления в нем осколков деления и другим дефектам.

Все это приводит в рабочих условиях на поверхности оболочки ЭГЭ к наложению ряда факторов, которые приводят к изменению исходной работы выхода.

Определение вклада ионизирующего излучения реактора, влияние двуокиси урана на работу выхода эмиттерной оболочки в составе ЭГЭ в процессе реакторного облучения при рабочих температурах в вакуумной среде, корректная интерпретация экспериментальных данных представляет как научный, так и практический интерес.

Результаты измерения работы выхода φ и термоэлектронных постоянных A тугоплавких металлов в лаборатории представлены в таблице 1, где φ определяется из формулы Ричардсона:

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{T}\right), \quad (8)$$

Таблица 1 – Термоэлектронные постоянные, полученные методом задержки

Материал	φ , эВ	Термоэлектронная постоянная, А/см ² ·град ²	Интервал температур, К
Mo(111)	4,3±0,03	68±15	1600–1900
Mo(110)	4,96±0,03	143±30	1650–1900
W(110)	5,26±0,03	140±30	1800–2300

Результаты измерения работы выхода φ и термоэлектронных постоянных A тугоплавких металлов при облучении в реакторе представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Величины φ и T монокристаллов, определенные при облучении в реакторе

Образец	φ , эВ	T , К	Постоянная, А/см ² ·град ²
Mo(111)	4,33±0,03	1700	120,4
Mo(111)	4,36±0,03	1850	120,4
Mo(110)	4,97±0,03	1870	120,4
W(110)	5,25±0,03	2100	120,4

Внутриреакторные исследования работы выхода эмиттерных материалов ЭГЭ в вакууме при нейтронном и гамма потоках в реальных температурных условиях и реакторных испытаниях ЭГС не выявили заметного влияния ионизирующего излучения реактора на работу выхода молибдена и вольфрама в течение 1000 часов. Из этого следует, что на поверхности не происходит заметного накопления дефектов, которые могут вызвать изменение работы выхода.

Из-за высокой температуры эмиттера возникающие дефекты отжигаются как в объеме, так и на поверхности образца. Таким образом, при высоких температурах при облучении ионизирующим излучением реактора в течение 1000 часов исключена вероятность накопления радиационных дефектов на поверхности или в приповерхностном слое образцов вследствие высокотемпературного отжига.

Резюме: Итак, мы имеем конкуренцию двух факторов: излучение реактора и температура эмиттера. Или на языке термодинамики конкуренция между энергией и энтропией. При низких температурах перевес на стороне реакторного излучения (энергия) и мы наблюдаем образование упорядоченных (с малой энтропией) низкоэнергетических структур, таких как дефекты. При высоких температурах эмиттера доминирует энтропия и в системе возрастает относительное движение, структурированность (система дефектов) разрушается и по мере увеличения температуры вероятность накопления радиационных дефектов уменьшается - наступает процесс отжига.

Итак, если приписать энтропию S_1 состоянию с большим количеством дефектов при температуре T_1 , а S_2 - с меньшим количеством дефектов при T_2 , то согласно принципу Больцмана:

$$S_1 - S_2 = k \cdot \ln \frac{w_1}{w_2}, \quad (9)$$

где w_1, w_2 – вероятности состояний 1 и 2; k – постоянная Больцмана.

Отсюда вытекает, что вероятность состояния больше для состояний, где больше энтропия, или состояние с работой выхода после отжига более вероятнее (более устойчиво), чем состояние с работой выхода до отжига, но в поле облучения.

Важным случаем неравновесных процессов являются необратимые стационарные процессы, при которых граничные условия, наложенные на систему, не позволяют ей достичь равновесного состояния. В ТЭП благодаря внешним воздействиям поддерживается постоянный перепад разности потенциалов. В таких стационарных состояниях производство энтропии, в противоположность равновесным состояниям, не исчезает [9].

Для ТЭП источник энтропии или производство энтропии описывается формулой термодинамики необратимых процессов:

$$\frac{ds}{dt} = IU, \quad (10)$$

где $S \rightarrow \frac{S}{k}$, $T \rightarrow \frac{t}{\tau}$, τ – время релаксации; k – постоянная Больцмана; I – термодинамический поток (ток) – скорость необратимых процессов; U – термодинамическая сила – напряжение.

В диффузионном режиме ток постоянен (формула 1) и не зависит от напряжения:

$$\frac{ds}{dt} = \text{const}U, \quad (11)$$

В переходном режиме от диффузионного к дуговому режиму:

$$\frac{ds}{dt} = IU = 2 \left(1 - \frac{Te}{Tk} \right), \quad (12)$$

В дуговом (кулоновском) режиме:

$$\frac{ds}{dt} = IU = \nu_0 U^2, \quad (13)$$

Резюме: Минимальное производство энтропии имеет место при диффузионном и дуговом режиме, там, где имеет место отклонение от равновесного состояния, т.е. имеет место линейная слабо неравновесная термодинамика. Кулоновские столкновения приводят к затуханию флуктуаций [6].

Переходный режим от диффузионного к дуговому (выражение 6) есть область далекая от равновесия, где основную роль играют нелинейные уравнения. По мере удаления от равновесного состояния ТЭП теряет устойчивость. Малые флуктуации приводят к новым пространственным и временным структурам. Развивается турбулентность, появляются спонтанные колебания тока разряда определенной частоты, возникают сгустки плазмы – новые структуры.

Таким образом, в стационарном состоянии производство энтропии достигает минимального возможного значения. Эта область линейных процессов, где справедлива теорема Пригожина [10].

По другому обстоит дело в нелинейных неравновесных системах. Здесь не существует функций состояния, которые имели бы экстремум в стационарном состоянии; производство энтропии не должно быть минимальным. Изменение производства энтропии, обусловленное изменением напряжения, может быть как положительным, так и отрицательным.

Теоретические и экспериментальные исследования режимов работы ТЭП, правильная физическая интерпретация процессов в низковольтной дуге позволяют уточнить условия поджига дуги, выяснить влияние различных факторов на устойчивость характеристик дугового разряда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стаханов И.П. и др. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. – М.: Атомиздат, 1973. – 374 с.
 [2] Ставиский У.А. Ядерная энергия для космических полетов // Успехи физических наук. – 2007. – т. 177. – № 11. – С. 50-60.
 [3] Иоффе А.Ф. Полупроводниковые элементы. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 93 с.
 [4] Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. – М.: Изд. Наука, 1973. – 480 с.

- [5] Стаханов И.П., Касиков И.И. Вольтамперные характеристики низковольтного дугового разряда // Журнал технической физики. – 1969. – вып. 8. – С. 1130-1135.
- [6] Канатчинов А.К., Стаханов И.П. Вольтамперные характеристики низковольтного дугового разряда с учетом кулоновских соударений // Известия АН СССР, серия: физ.-мат. – 1972. – № 6. – С. 64-66.
- [7] Макешева К.К. Канатчинов А.К. Производство энтропии в термоэмиссионных преобразователях тепловой энергии в электрическую // Труды межд. конф. «Информационные и телекоммуникационные технологии: образование, наука, практика». – Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2012. – том 2. – С. 541-547
- [8] Бекмухамбетов Е.С. Экспериментальная база ИЯФ НЯЦ РК для исследования электрогенерирующих сборок термоэмиссионного реактора-преобразователя и результаты работ за период 1969-1991 гг. – Алматы: Изд. ИЯФ НЯЦ РК, 2009. – 294 с.
- [9] Денбиг К. Термодинамика стационарных необратимых процессов. – М.: Иностранная литература, 1954. – 170 с.
- [10] Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: Иностранная литература, 1960. – 200 с.

REFERENCES

- [1] Stakhanov IP and others. Physical basis of thermionic energy conversion. M.: Atomizdat, 1973, 374 p. (in Russ.)
- [2] Stavisky U.A. Nuclear energy for space missions. Successes of physical sciences. 2007 t. 177. № 11, 50-60 p. (in Russ.)
- [3] Ioffe A.F. Semiconductor components. M.: Publishing House. Academy of Sciences of the USSR, 1960, 93 p. (in Russ.)
- [4] Moizes B.J., Picos G.E. Thermionic converter and low-temperature plasma. M.: Science Publishing House, 1973, 480 p. (in Russ.)
- [5] Stakhanov I.P., Kasikov I.I. The current-voltage characteristics of the low-voltage arc discharge. Journal of technical physics. 1969, Vol. 8, 1130-1135 p. (in Russ.)
- [6] Kanatchinov A.K., Stakhanov I.P. The current-voltage characteristics of the low-voltage arc discharge with Coulomb collisions. Bulletin of the USSR Academy of Sciences, phys.-mat. series. 1972, № 6, 64-66 p. (in Russ.)
- [7] Makesheva K.K., Kanatchinov A.K. Entropy production in the thermionic converter of thermal energy into electrical. Proceedings of the Int. Conf. "Information and communication technologies: education, science and practice." - Almaty: KazNTU after K.I. Satpayev, 2012. Volume 2, 541-547 p. (in Russ.)
- [8] Bekmukhambetov E.C. Experimental base IYF NYZ RK for the study of electricity assemblies thermionic converter reactor and the results of work for the period 1969-1991. Almaty, IYF NYZ RK Publishing House, 2009, 294 p. (in Russ.)
- [9] Denbigh K. Thermodynamics stationary irreversible processes. M.: Foreign literature, 1954, 170 p. (in Russ.)
- [10] Prigogin I. Introduction to the thermodynamics of irreversible processes. M.: Foreign literature, 1960, 200p. (in Russ.)

ТЕРМОЭМИССИОНДЫ ЭНЕРГИЯ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРІНІҢ ТӨМЕНГІ ВОЛЬТТЫ ДОҒАСЫНЫҢ ВОЛЬТ АМПЕРМЕТРЛІК СИПАТТАМАСЫН МОДЕЛЬДЕУ

К. К. Макешева, А. К. Канатчинов

Қ. И. Сәтбаев атындағы қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: термоэмиссионды энергия түрлендіргіштері, төменгі вольтты доға, жылу энергиясының термоэмиссионды түрлендіргіштерінің диффузионды және доғалық жұмыс режимі.

Аннотация. Мақалада термоэмиссионды жылу энергиясын электр энергиясына түрлендіргіштерінің (ТЭТ) шарттары қарастырылады. Жұмыстың мақсаты ретінде ТЭТ температурасының төменгі ионизациялық плазманың доғалық разрядының қасиеттерін және кулондық соқтығысулардың әсерін ұғыну. ТЭТ әр түрлі жұмыс режиміндегі теориялық анализ электрондардың қозғалу жылдамдығымен және плазма доғасының ионының модельдік төменгі вольтты плазма бөлшегінің кулондық соқтығысуын ескере отырып вольтамперметрлік сипаттамасын алуға мүмкіндік берді. Тәжірибе жүзіндегі вольтамперметрлік сипаттамасы, бөлшектердегі кулондық соқтығысулар доғадағы токтың сызықты өсуіне тікелей тәуелді. Алынған нәтижелер ТЭТ доғасын поджиг шартын нақтылауға және төменгі вольтты доғадағы реакторлық ресурс үрдістерінің дұрыс физикалық интерпретациясына қолданылады.

Поступила 03.11.2015 г.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 10.11.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
10,2 п.л. Тираж 300. Заказ 6.