

УДК 004.415.2:533.9

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Зимин Вячеслав Прокопьевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры прикладной математики
Института кибернетики ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: zimmin@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу и интерпретации модельных и экспериментальных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода и создания критериев (функционалов), которые позволяют получать количественные оценки при проведении вычислительного эксперимента верификации модели.

Цель работы: описание и обоснование концепции (алгоритма) обработки экспериментальных и вычисление неизмеряемых распределений параметров низкотемпературной плазмы и конструирование функционалов, позволяющих получать количественные оценки верификации модели.

Методы исследования: аппроксимация экспериментальных данных и их экстраполяция в приэлектродных областях межэлектродного зазора, где невозможно проводить измерения. Построение фазовых портретов модельных и экспериментальных распределений параметров плазмы.

Результаты: Сформулирована и проанализирована концепция построения и исследования фазовых портретов экспериментальных и модельных параметров низкотемпературной цезиевой плазмы в термоэмиссионном диоде на плоскостях плотность плазмы – плотность ионного тока, температура электронов – плотность энергии электронов и др. На основе анализа фазовых портретов параметров плазмы предложены функционалы, позволяющие оценить отклонение состояния токонесущей плазмы от состояния термодинамического равновесия. Для модельных распределений параметров плазмы проанализировано поведение этого функционала для плотности плазмы и температуры электронов. Показана возможность формулировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в плазме на основе анализа фазовых портретов параметров плазмы.

Ключевые слова:

Концепция, фазовый портрет, экспериментальные данные, аппроксимация функциями, функционал, низкотемпературная плазма, термоэмиссионный диод.

Введение

Верификация модели на основе сравнения распределения экспериментальных и модельных переменных является одним из важных этапов вычислительного эксперимента. Результатом этого этапа является проверка модели на адекватность, формулировка и проверка гипотез о механизмах физических процессов в плазме. Возможны два способа сравнения модельных и экспериментальных результатов: качественный и количественный. Первый способ основан на сравнении в основном формы и особенностей экспериментальных и модельных конфигураций параметров плазмы, а второй способ требует конструирования и использования некоторого функционала. Для сравнения параметров низкотемпературной цезиевой плазмы в термоэмиссионном диоде преимущественно использовался первый способ [1, 2].

Кратко перечислим подходы, применяемые для сравнения экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода. В работе [3] сравнивались экспериментальные распределения параметров дуговой плазмы (концентрация и температура электронов), полученные зондовым и спектроскопическим методами. Для спектроскопического метода распределение потенциала пространства, занятого плазмой, вычислялось по известной формуле. Если нормированные на макси-

мальные значения распределения плотности плазмы были довольно близки, то максимальные значения плотности плазмы для разных методов измерения отличались в полтора-два раза. В [4] получено удовлетворительное согласие между суммарным значением расчетных составляющих электронного тока в различных сечениях межэлектродного промежутка с экспериментально измеренными величинами тока через термоэмиссионный диод и другими параметрами плазмы. В работах [5, 6] проводилось в основном качественное сравнение экспериментальных и теоретических пространственных распределений параметров плазмы. На основе экспериментальных параметров плазмы в приэмиттерной области вычислялось время ионизации в цезиевой плазме. В [7] на основе аппроксимации функций, являющейся решением модели с постоянной температурой электронов по зазору, экспериментальных распределений плотности плазмы в районе максимума определялась температура электронов. В работе [8] качественно сравнивались экспериментальные и модельные параметры плазмы: концентрация и потенциал пространства, занятого плазмой, и отмечалось качественное согласие.

Имеется несколько причин, требующих разработки новых методов исследования как экспериментальных параметров цезиевой плазмы, так и моделей процессов в такой плазме:

1. Трудности интерпретации особенностей экспериментальных распределений параметров цезиевой плазмы в межэлектродном зазоре термоэмиссионного диода, особенно температуры электронов в дуговом режиме [2].
2. Необходимость исследования поведения параметров плазмы в приэлектродных областях, где экспериментальные измерения параметров крайне затруднительны, а в большинстве случаев невозможны [1, 2].
3. Трудности сравнения большого количества моделей, описывающих процессы в объеме цезиевой плазмы и в приэлектродных областях, которые формулируются в виде нелинейных краевых задач.
4. Трудности сравнения модельных и экспериментальных распределений параметров низкотемпературной плазмы при недостаточном знании работ выхода электродов в рабочих режимах диода.
5. Необходимость исследования моделей нестационарных процессов в низкотемпературной плазме и динамических вольтамперных характеристик (ВАХ) диода [9], трудоемкость анализа которых существенно возрастает по сравнению со стационарными моделями.
6. Необходимость создания эффективных алгоритмов поиска решений стационарных и нестационарных нелинейных краевых задач.

В данной работе формулируется концепция построения и исследования фазовых портретов как экспериментальных, так и модельных параметров плазмы на основе ранее полученных результатов исследования краевых задач [10–14] на фазовых плоскостях плотность плазмы – ионный ток, плотность плазмы – плотность энергии электронного газа, температура электронов – плотность энергии электронного газа и др.

Концепция исследования фазовых портретов параметров плазмы и её анализ

Концепция (концептуальная модель) исследования экспериментальных и модельных распределений параметров цезиевой плазмы термоэмиссионного диода включает следующие этапы.

1. Аппроксимация экспериментальных распределений параметров плазмы и построение их фазовых портретов. Качественная и количественная оценка близости таблично заданных функций и аппроксимирующих функций. Построение функционала на основе фазовых портретов параметров плазмы для получения количественных оценок верификации модели.
2. Построение на основе функций аппроксимации экспериментальных данных фазовых портретов неизмеряемых переменных: вычисление плотности ионного тока $J_i = J_i(x)$ и плотности энергии электронного газа $q_e = q_e(x)$.
3. Вычисление интегральных и распределенных оценок характерных длин и характерных времен процессов в плазме на основе аппроксима-

ции экспериментальных распределений её параметров с целью выделения и анализа тех областей, где возможны исследования по разнообразным алгоритмам.

4. Диагностика параметров моделей и проверка гипотез о механизмах физических процессов в низкотемпературной цезиевой плазме термоэмиссионного диода на основе обработки выделенных участков фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы.
5. Сравнение фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы с фазовыми портретами модельных параметров и соответствующего им функционала, описывающего отклонение токонесущей от термодинамической равновесной (ТДР) плазмы.

В зависимости от полноты экспериментальных распределений параметров плазмы и модельных приближений реализуются все или только некоторые этапы указанной концепции. Проанализируем подробно постановки задач, решаемых в рамках приведенной выше концепции.

1. Аппроксимация экспериментальных распределений параметров плазмы и построение их фазовых портретов.

В зависимости от режима работы термоэмиссионного диода и методики экспериментальных измерений параметров плазмы могут быть сформированы несколько наборов таблично заданных функций.

В диффузионном режиме работы термоэмиссионного цезиевого диода с малым межэлектродным расстоянием (порядка миллиметра) применима только зондовая диагностика параметров плазмы [2]. При этом могут быть получены экспериментальные распределения (в виде таблично заданных функций) плотности плазмы $n_e = n_e(x)$; температуры электронов $T_{e0} = T_{e0}(x)$; потенциала пространства, занятого плазмой, $V_0 = V_0(x)$; значения приэлектродных скачков потенциала V_{E0} и V_{C0} , $0 < x_{E0} < x < x_{C0} < d$, x_{E0} , x_{C0} – границы интервала, в котором снимаются экспериментальные параметры плазмы, d – межэлектродное расстояние. Отметим, что определение температуры электронов во многих экспериментах было затруднено из-за большой эмиссии электронов с зонда, по сравнению с током ионов на зонд [2]. В распоряжении автора имеется один источник [4], в котором представлены измеренные распределения температуры электронов и других параметров плазмы. В большинстве случаев [2] в рабочей точке ВАХ диффузионного режима измерялись распределения концентрации плазмы и потенциала пространства, занятого плазмой.

В дуговом режиме для изучения параметров плотной плазмы использовалась как зондовая, так и спектроскопическая методики [1–6]. С помощью зондовых характеристик, как и в диффузионном режиме, можно определить экспериментальные

распределения плотности плазмы $n_0=n_0(x)$, потенциала пространства, занятого плазмой, $V_0=V_0(x)$, значения приэлектродных скачков потенциала V_{E0} и V_{C0} . При некоторых параметрах диода определялись два распределения температуры электронов $T_{et0}=T_{et0}(x)$ и $T_{eg0}=T_{eg0}(x)$ [2, 4, 5]. С помощью спектроскопической методики [3–5] измерялись распределения плотности плазмы $n_0=n_0(x)$ и температура электронов $T_{et0}=T_{et0}(x)$. Причем из сравнения результатов обработки спектроскопических и зондовых данных [3] был сделан вывод, что получаемые распределения температуры электронов с помощью спектров близки к распределениям $T_{eg0}=T_{eg0}(x)$, получаемых с помощью зондов.

Для построения фазовых портретов параметров плазмы требуется знание пространственных производных этих параметров. Численное дифференцирование данных является некорректной задачей, т. к. из-за возможности потери значащих цифр отсутствует устойчивость её решения. Поэтому в предлагаемой концепции анализа данных требуется решать задачу аппроксимации функциями экспериментальных данных.

В общем случае постановка задачи аппроксимации функциями распределений параметров плазмы формулируется как задача нелинейной оптимизации функционала, зависящего от параметров этих функций. Если аппроксимирующая функция зависит линейным образом от искомых параметров, то в конечном итоге для их определения требуется решать систему линейных алгебраических уравнений. Для составления последней обычно применяется метод наименьших квадратов. Рассмотрим алгоритм построения фазовых портретов для плотности плазмы $n=n(x)$.

- 1) В точках $x_i, i=1,2,...,N$, принадлежащих интервалу $[x_{E0}, x_{C0}]$, $0 < x_{E0}, x_{C0} < d$ заданна функция $n_i=n(x_i)$.
- 2) Используя характерные особенности экспериментальных значений в виде таблично заданной функции, формируется набор $n_{ap,j}=n_{ap,j}(x, p_{1j}, p_{2j}, ..., p_{L_{nj}})$, $j=1,2,..., M_n, L_n$ – количество параметров для j -й функции аппроксимации, M_n – количество аппроксимирующих функций.
- 3) Для каждого из M_n типов функций решается задача аппроксимации и вычисляются параметры $p_{1j}, p_{2j}, ..., p_{L_{nj}}$ ($j=1,2,..., M_n$) этой функции.
- 4) Используя визуальное представление функций и количественные критерии близости функций, исследуется качество аппроксимации таблично заданной функции.

Качественная и количественная оценка близости таблично заданных функций и аппроксимирующих функций оценивается по нескольким критериям, в основу которых положена оценка невязки между этими функциями. Например, для плотности плазмы невязка записывается в виде

$$\delta = \sum_{k=1}^K w_k (n_0(x_k) - n_{ap,j}(x_k))^2,$$

где w_k – заданные веса в точках x_k . Веса связаны с точностью измерения параметров плазмы: чем ни-

же точность, тем больше отклонение (увеличение) весов от единицы.

- 1) Используя экстраполяцию аппроксимирующих функций на интервалах $[0; x_{E0}]$ и $[x_{C0}; d]$, определяется набор $n_{ap,j}=n_{ap,j}(x, p_{1j}, p_{2j}, ..., p_{L_{nj}})$, $j=1,2,..., M_n$ на интервале $[0; d]$.
- 2) Вычисляются пространственные производные от аппроксимирующих функций на интервале $[0; d]$ и строятся фазовые портреты для всех M_n функций аппроксимации.
- 3) На основании анализа физических ограничений, накладываемых на параметры плазмы, характерного поведения переменной плазмы и её производной в межэлектродном зазоре из M_n -набора аппроксимирующих функций и фазовых портретов отбираются те из них, которые пригодны для исследования на последующих этапах концепции.

Таким образом, на первом этапе будут построены в общем случае наборы фазовых портретов экспериментальных параметров плазмы $(n_{ap,j}, dn_{ap,j}/dx)$, $j=1,2,..., M_n, (T_{et}, dT_{et}/dx)$, $j=1,2,..., M_{T_{et}}, (T_{eg}, dT_{eg}/dx)$, $j=1,2,..., M_{T_{eg}}, (V, dV/dx)$, $j=1,2,..., M_V$.

Вычисления и анализ на всех шагах первого этапа обработки экспериментальных данных должны сопровождаться визуализацией в виде соответствующих графиков функций и фазовых портретов распределений параметров плазмы. Решение задачи аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функций, вычисление их производных реализовано во многих программах. Рекомендуется использовать, например, программу cftool математического пакета Matlab.

Распределение параметра плазмы можно рассматривать как некоторую структуру [12]. Поэтому нужно конструировать функционал, основанный не на сравнении фазовых портретов распределений параметров плазмы в одной или в нескольких точках, например в точке, где имеется максимум по одной из координат фазовой плоскости, а на структуре, как едином целом.

Один из простых функционалов для таких структур – это вычисление отклонения состояния токопроводящей плазмы от состояния плазмы изотермического диода, находящейся в ТДР. Этот функционал кроме количественных оценок отличия фазовых портретов параметров плазмы имеет физический смысл. В изотермическом диоде температуры и работы выхода эмиттера и коллектора равны между собой: $T_E=T_C, F_E=F_C$. ТДР-плазма такого диода для нулевого проходящего тока $J=0$ характеризуется однородным распределением плотности плазмы в зазоре диода, равным плотности Саха, и однородными распределениями температур частиц, равных температуре эмиттера. Распределения плотностей токов заряженных частиц и потоков энергии равны нулю. Так как производные от распределений параметров ТДР-плазмы равны нулю, то проекции объемного фазового портрета такой плазмы на фазовые плоскости представляют собой точки. Площадь фазового портрета

ТДР-плазмы как на отдельных плоскостях, так и в сумме на всех плоскостях равна нулю. Объем, занимаемый фазовым портретом этой плазмы в фазовом пространстве, также равен нулю.

Функционал для нормированных распределений токонесущей плазмы определяется как площадь, заключенная между кривой фазового портрета на фазовой плоскости и двумя отрезками прямых, соединяющими фазовый портрет ТДР-плазмы и точки фазового портрета изучаемого состояния плазмы, которые соответствуют значениям переменных при $x=0$ и $x=d$. Для нормирования фазовых переменных параметров плазмы и расстояния в межэлектродном зазоре используются параметры ТДР-плазмы изотермического диода.

Указанный выше функционал вводится для сравнения фазовых портретов параметров плазмы, полученных для одинаковых параметров диода. При сравнении фазовых портретов параметров плазмы, полученных для диодов с различными параметрами, используются характеристики ТДР-плазмы изотермического диода, параметры которого равны параметрам одного из диодов, либо берутся параметры базового изотермического диода, которые отличаются от параметров двух сравниваемых диодов. При этом можно использовать то обстоятельство, что характеристики ТДР-плазмы изотермического диода не зависят от межэлектродного расстояния.

Отметим, что прямые, ограничивающие площадь фазового портрета параметров плазмы, для случая параметров ТДР-плазмы, тождественно равных нулю, проходят через начало координат фазовых плоскостей, т. е. в этом случае вычисление функционала фактически основано на использовании эффективных граничных условий III рода [11]. Использование таких условий позволяет построить второй функционал для ненулевых параметров ТДР-плазмы.

2. Построение на основе функций аппроксимации экспериментальных данных фазовых портретов неизмеряемых переменных: вычисление плотности ионного тока $J_i = J_i(x)$ и плотности энергии электронного газа $q_e = q_e(x)$.

На основании полученных результатов на первом этапе вычисляются наборы модельных переменных $J_{ap,i} = J_{ap,i}(x)$, $q_{ap,e} = q_{ap,e}(x)$ в межэлектродном зазоре, $x \in [0; d]$, и строятся наборы фазовых портретов $(n_{ap,j}, J_{ap,i,j})$, $j=1, 2, \dots, M_n$, $(T_{ap,et,j}, q_{ap,e,j})$, $j=1, 2, \dots, M_{Tei}$, $(T_{ap,eg,j}, q_{ap,e,j})$, $j=1, 2, \dots, M_{Teg}$. При необходимости строятся фазовые портреты для других переменных, например $(n_{ap,j}, q_{ap,e,j})$, $j=1, 2, \dots, \min\{M_n, M_{Tei}, M_{Teg}\}$. При построении фазовых портретов неизмеряемых параметров плазмы требуется знание коэффициентов переноса: подвижности, диффузии, теплопроводности и др.

3. Вычисление интегральных и распределенных оценок характерных длин и характерных времен процессов в плазме на основе аппроксимации экспериментальных распределений её параметров с целью выделения и анализа тех областей, где воз-

можны исследования по разнообразным алгоритмам.

На третьем этапе вычисляются следующие характерные величины плазмы:

- 1) Длина (радиус) Дебая r_D у электродов и в межэлектродном зазоре для оценки расстояния, на котором в основном изменяется потенциал, и для оценки применимости плазменного приближения $n_e \approx n_i \approx n$.
 - 2) Ширина приэлектродного слоя $\sim (eV_E/kT_e)^{1/2} r_D$, V_E – величина приэлектродного скачка потенциала, где нарушается плазменное приближение $n_e \neq n_i \neq n$.
 - 3) Параметры равновесной плазмы изотермического диода: плотность плазмы Саха $n_{shT} = n_{sh}(T_e, n_{aE})$, $T_e = T_E$, где $n_{aE} = n_a(T_E)$ – плотность атомов цезия в зазоре; скачок потенциала у электродов для равновесной плазмы $V_{ET} = \mu(T_E, p_{cs}) - F_E$ для оценки отклонения параметров токонесущей плазмы от параметров плазмы, находящейся в ТДР.
 - 4) Длины свободного пробега при рассеянии электронов на атомах l_{ea} , электронов на ионах l_{ei} и при смешанном механизме рассеяния $l_e = (l_{ea}^{-1} + l_{ei}^{-1})^{-1}$ для оценки: применимости приближения диффузионной плазмы $l \ll d$, влияния столкновений на транспортные процессы в плазме, длины хаотизации направленной скорости пучка электронов с эмиттера.
 - 5) Длины свободного пробега ионов на атомах l_{ia} , ионов на электронах l_{ei} и при смешанном механизме рассеяния $l_i = (l_{ia}^{-1} + l_{ei}^{-1})^{-1}$ для оценки: применимости приближения диффузионной плазмы $l \ll d$, влияния на транспортные процессы в плазме столкновений, длины хаотизации направленной скорости пучка ионов и максвеллизации ионов.
 - 6) Длина релаксации возмущения функции распределения электронов по энергии, длина максвеллизации L_M , вызванной ускорением эмиттерных электронов эмиссии на приэмиттерном скачке потенциала [2].
 - 7) Длина релаксации приэлектродного возмущения L_{ME} функции распределения электронов [1], для оценки области неравновесной ионизации в межэлектродном зазоре.
 - 8) Плотность плазмы Саха $n_{sh} = n_{sh}(T_{eg}, n_a)$, $T_{eg} = T_{eg}(x)$, $n_a = n_a(x)$ и уравнение состояния (парциальные давления) для оценки влияния рекомбинации в межэлектродном зазоре (малое влияние рекомбинации при $n \ll n_{sh}$).
 - 9) Вычисление градиента температуры электронов dT_{et}/dx в межэлектродном зазоре для оценки влияния термодиффузионного члена на транспортные процессы в межэлектродном зазоре.
4. Диагностика параметров моделей и проверка гипотез о механизмах физических процессов в низкотемпературной цезиевой плазме термоэмиссионного диода на основе обработки выделенных участков фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы.

На данном этапе формулируются и решаются разнообразные задачи, устанавливающие связи между экспериментальными и модельными данными.

Например, отдельно выделяется рассмотрение поведения параметров плазмы в приэлектродных областях термоэмиссионного диода. При этом проверяется как обоснованность экстраполяции, так и описание параметров плазмы в приэлектродных областях [13, 14].

Для исследования и решения проблемы двух температур электронов в дуговом режиме работы диода [2, 4, 5, 10–12] необходимо выделять в межэлектродном зазоре слой плазмы с малым влиянием на процессы переноса кулоновских столкновений и малым влиянием рекомбинации на процессы ионообразования.

5. Сравнение фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы с фазовыми портретами модельных параметров и соответствующих им функционалов, описывающих различие между токонесущей и ТДР-плазмой.

На основании численного решения моделей (краевых задач) низкотемпературной плазмы [1, 2, 5, 6, 8, 10] строятся фазовые портреты на плоскостях (n, J) , (T_{e1}, q_e) , (T_{e2}, q_e) , (V, E) и др. Проводится сравнение с фазовыми портретами экспериментальных распределений параметров плазмы, и при необходимости корректируются модели процессов в плазме.

Проиллюстрируем выше приведенные рассуждения о построении фазовых портретов и функционалов на примере модельных параметров плазмы и ВАХ термоэмиссионного диода. Расчеты были выполнены в помощь, по-видимому, наиболее полной на настоящее время модели процессов в плазме диода [8]. При расчетах использованы следующие значения параметров: $T_E=1800$ К, $T_C=1000$ К, давление насыщенных паров Cs $p_{Cs}=1$ мм рт. ст., $d=0,04$ см, плотность тока с эмиттера $J_{Ee}^{(0)}=25$ А/см², плотность ТДР-плазмы $n_T=3,57 \cdot 10^{12}$ см⁻³, температура электронов ТДР-плазмы $T_{eT}=T_E$. На нелинейной ВАХ термоэмиссионного диода (рис. 1) в области $1,3 \leq J \leq 2,8$ А/см² имеется участок с отрицательным сопротивлением. Для трех точек ВАХ, указанных маркерами, рассчитаны распределения параметров плазмы на конфигурационных (рис. 2, а, рис. 3, а) и фазовых (рис. 2, б, рис. 3, б) плоскостях.

Приняты следующие обозначения: квадрату ($J_1=0$ А/см²) на рис. 1 соответствуют сплошные кривые на рис. 2, 3; пятиугольнику ($J_2=0,79$ А/см²) – пунктирные кривые, и шестиугольнику ($J_3=1,69$ А/см²) – штрихпунктирные. Штриховые кривые рис. 2, а и рис. 3, а соответствуют распределениям ТДР-плазмы. Центры кружков на рис. 2, б и рис. 3, б изображают нормированные фазовые портреты распределений ТДР-плазмы.

Опишем область на ВАХ, характерную для диффузионного режима и перехода из диффузион-

ного режима работы в дуговой ($J < 3$ А/см²). На конфигурационных плоскостях распределения параметров плазмы $n=n(x)$ и $T_e=T_e(x)$ представляют собой монотонно изменяющиеся зависимости (рис. 2, а, рис. 3, а). Нормированные фазовые портреты параметров плазмы также являются монотонными зависимостями (рис. 2, б, рис. 3, б), за исключением портрета для плотности плазмы при $J_3=1,69$ А/см² (рис. 2, б, штрихпунктир), относящегося к области отрицательного сопротивления на ВАХ (рис. 1). Немонотонное поведение данного фазового портрета обусловлено небольшими изменениями производной $dn'/d\xi$ у эмиттера.

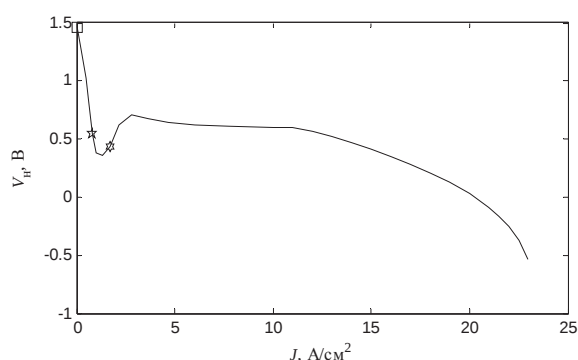


Рис. 1. Вольтамперная характеристика термоэмиссионного диода

Fig. 1. Current-voltage characteristic of a thermionic diode

В общем случае зависимости функционалов параметров плазмы от плотности тока диода имеют многоэкстремальный характер. Если значения разных типов функционалов S_{n1} , S_{n2} значительно отличаются только в области диффузионного режима и слабо развитой дуги $J \leq 7$ А/см², то значения функционалов S_{Te1} , S_{Te2} отличаются во всем расчетном диапазоне по J . В области дугового разряда $J \geq 3$ А/см² зависимость функционалов S_{n1} , S_{n2} имеет монотонный характер, в то время как для функционалов S_{Te1} , S_{Te2} зависимость немонотонная, с несколькими экстремумами. Функционалы для температуры электронов имеют глобальный максимум в области поджига разряда. При малых отклонениях от режима холостого хода $J \leq 0,2$ А/см² значения S_{n1} и S_{Te1} уменьшаются, а при приближении J к плотности тока квазинасыщения значения этих функционалов начинают увеличиваться. Кроме этого, на зависимости S_{n1} при $J_3=1,69$ А/см² имеется еще один локальный минимум, который объясняется наличием на нормированном фазовом портрете распределения плотности плазмы значительного линейного участка (рис. 2, б, штрихпунктир).

На примере анализа фазовых портретов плотности плазмы покажем возможность получения дополнительной информации и формулирования некоторых заключений о физических механизмах в плазме термоэмиссионного диода.

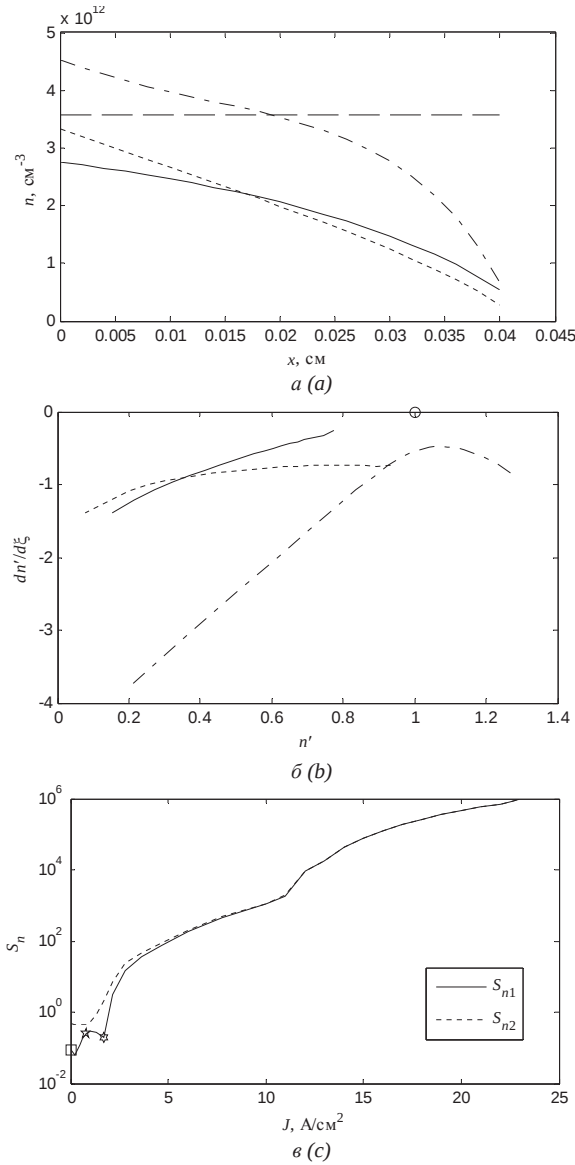


Рис. 2. Распределения плотности плазмы на плоскостях: конфигурационной (а) и фазовой (б); зависимости функционалов от плотности тока (в)

Fig. 2. Plasma density distribution on planes: a) configuration, b) phase; c) functional dependence on current density

Если распределение плотности плазмы или заметная его часть на фазовой плоскости представляет собой отрезок прямой линии, то последняя может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка

$$a \frac{dn'}{d\xi} + bn' + c = 0,$$

где a , b , c – параметры отрезка прямой нормированного фазового портрета на плоскости $(n', dn'/d\xi)$. Решение этого дифференциального уравнения записывается в виде

$$n' = -\frac{c}{b} + C_1 e^{-b\xi/a},$$

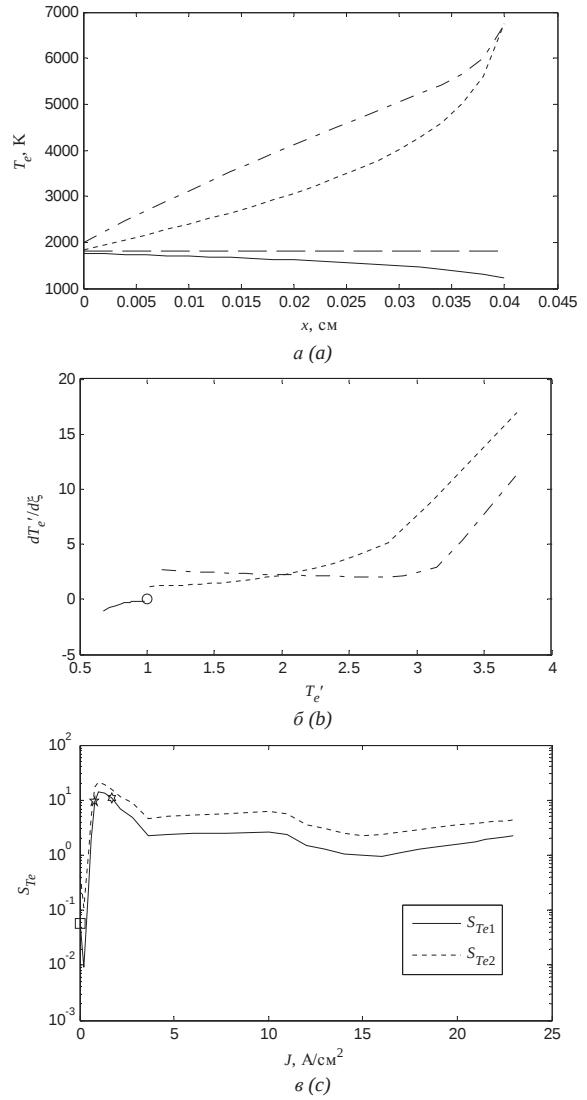


Рис. 3. Распределения температуры электронов на плоскостях: конфигурационной (а) и фазовой (б); зависимости функционалов от плотности тока (в)

Fig. 3. Electron temperature distribution on planes: a) configuration, b) phase; c) functional dependence on current density

где C_1 – произвольная постоянная. В зависимости от знака отношения b/a будут реализовываться на конфигурационной плоскости для $n'=n'(\xi)$ либо монотонно растущие, либо монотонно убывающие решения. Тогда решения для зависимости $S_{n1}=S_{n1}(J)$, когда отклонение от состояния ТДР-плазмы вычисляется от точки фазовой плоскости с координатами $(1, 0)$ и $b=1$, $c=-1$, имеют вид

$$n' = 1 + C_1 e^{-\xi/a},$$

а решения для $S_{n2}=S_{n2}(J)$ (от точки с координатами $(0, 0)$ и $b=1$, $c=0$)

$$n' = C_1 e^{-\xi/a}$$

будут приводить к локальным минимумам на данных функционалах (рис. 2, в).

Отметим особый случай $b=0$, когда фазовый портрет плотности плазмы расположен параллельно оси on' и решение записывается в виде

$$n' = -\frac{c}{a}\xi + C_1.$$

Это означает, что ионизационные процессы в объеме плазмы пренебрежительно малы.

Если нормированный фазовый портрет (или значительную его часть) плотности плазмы нельзя аппроксимировать отрезком прямой линии, то для описания её поведения необходимо повышать порядок дифференциального уравнения. При больших значениях плотности тока в дуговом режиме в межэлектродном зазоре возникает состояние локального термодинамического равновесия плазмы [1, 2]. Фазовый портрет плотности плазмы такого состояния стремится к точке [12], поэтому на зависимости $S_n = S_n(J)$ в режиме развитой дуги (сильноионизированная плазма) должен наблюдаться максимум.

Приведенный выше анализ на конфигурационных и фазовых плоскостях, а также анализ особенностей изменения функционалов S_{n1} и S_{n2} можно распространить и на другие плазменные перемен-

ные. Это позволяет формировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в межэлектродном зазоре плазменного термоэмиссионного диода.

Выводы

Предложена концепция построения фазовых портретов экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода, включающая конструирование функционалов для фазовых портретов, которые позволяют оценить отклонение параметров токонесущей плазмы от равновесной. В качестве примера построены и проанализированы модельные зависимости функционалов от плотности тока диода для плотности плазмы и температуры электронов. Все это вместе взятое позволяет:

1. Единообразно анализировать и обобщать экспериментальные и модельные распределения параметров плазмы термоэмиссионного диода, использовать для их сравнения адекватные качественные и количественные критерии.
2. Формировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в низкотемпературной плазме термоэмиссионного диода, как показано на примере анализа распределений плотности плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / И.П. Стаханов, В.П. Пашенко, А.С. Степанов и др. / под ред. И.П. Стаханова. – М.: Атомиздат, 1973. – 374 с.
2. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский и др. / под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. – М.: Наука, 1973. – 480 с.
3. Сравнение зондового и оптического методов измерения параметров низкотемпературной цезиевой плазмы / Г.А. Дюжев, В.Б. Каплан, Б.Я. Мойжес и др. // Журнал технической физики. – 1968. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 963–967.
4. Зондовые и спектральные исследования плотной плазмы ТЭП / Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский, Б.Я. Мойжес и др. // Термоэмиссионное преобразование энергии: сборник докладов советских ученых на II Международной конференции по термоэмиссионному преобразованию энергии. – Стреза, Италия, 27–31 мая 1968. – М.: ВНИИТ, 1969. – С. 111–122.
5. Низковольтная дуга в термоэмиссионных преобразователях. Сравнение теории с экспериментом / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, И.Л. Коробова и др. // Журнал технической физики. – 1968. – Т. 38. – Вып. 7. – С. 1075–1094.
6. Белоконов А.А., Сонин Э.Б. К теории низковольтной дуги в термоэмиссионном преобразователе // Журнал технической физики. – 1969. – Т. 39. – Вып. 11. – С. 2105–2118.
7. Кармазин В.П., Пашенко В.П., Стаханов И.П. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров дугового термоэмиссионного преобразователя // Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42. – Вып. 4. – С. 800–808.
8. Гуськов Ю.К., Ружников В.А., Сидельников В.Н. Расчетные вольт-амперные характеристики ТЭП. Ч. 1. Влияние величины межэлектродного зазора на ВАХ ТЭП. – Обнинск: Изд-во, 1984. – 18 с.
9. Дейнеженко А.Л., Зимин В.П. Численное моделирование нестационарных вольтамперных характеристик плазменного диода в дуговом режиме // Известия СО АН СССР. Сер. Технические наук. – 1987. – Вып. 6. – С. 84–87.
10. Зимин В.П. Алгоритм расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионного преобразователя с постоянной температурой электронов // Известия вузов. Физика. – 1984. – № 7. – 36 с. – Деп. в ВИНТИ 21.03.1984, № 1571–84.
11. Зимин В.П. Изображение и анализ граничных условий для уравнения теплопроводности на фазовых плоскостях // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 29–33.
12. Зимин В.П. Развитие метода фазовой плоскости для анализа решений краевых задач // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 17–21.
13. Зимин В.П. Исследование особенностей плазменных граничных уравнений у эмиттера термоэмиссионного диода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 11–15.
14. Зимин В.П. Исследование особенностей плазменных граничных уравнений у коллектора термоэмиссионного диода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 158–163.

Поступила 03.09.2013 г.

UDC 004.415.2:533.9

ANALYSIS OF THE CONCEPT OF CONSTRUCTING AND RESEARCHING PHASE PORTRAITS OF EXPERIMENTAL AND MODEL PARAMETER DISTRIBUTIONS OF LOW-TEMPERATURE PLASMA

Vyacheslav P. Zimin,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: zimin@tpu.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop new approaches to analysis and interpretation of model and experimental parameter distributions of low-temperature plasma of thermionic diode and to establish criteria (functionals) which allow obtaining quantitative estimates at model verification computer simulation.

The main aim of the study: description and justification of the concept (algorithm) for processing experimental and calculation non-measurable parameter distributions of low-temperature plasma and design of functionals, which allow obtaining quantitative estimates of model verification.

The methods used in the study: experimental data approximation and extrapolation in electrode sheath of a interelectrode gap, where it is impossible to carry out measurements; construction of phase portraits for model and experimental distributions of plasma parameters.

The results: The author has stated and analyzed the concept of constructing and studying phase portraits of experimental and model parameters of low-temperature cesium plasma in thermionic diode on the planes plasma density – ion current density, electron temperature – electron energy density etc. Based on the analysis of the phase portraits of the plasma parameters the functionals were proposed. They allow estimating deviation in current-carry plasma state from thermodynamic equilibrium state. The behavior of this functional for plasma density and electron temperature was analyzed for model distributions of plasma parameters. The paper demonstrates the possibility to state and to test hypotheses on mechanisms of physical processes in plasma based on the analysis of plasma parameter phase portraits.

Key words:

Concept, phase portrait, experimental data, function approximation, functional, low-temperature plasma, thermionic diode.

REFERENCES

1. Stakhanov I.P., Pashchenko V.P., Stepanov A.S. *Fizicheskie osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Physical basis of thermionic energy conversion]. Ed. by I.P. Stakhanov. Moscow, Atomizdat Publ., 1973. 374 p.
2. Baksht F.G., Dyuzhev G.A., Martsinkovsky A.M. *Termoemissionnye preobrazovateli i nizkotemperaturnaya plazma* [Thermionic converters and low-temperature plasma]. Eds. B.Ya. Moyzhes, G.E. Pikus. Moscow, Nauka Publ., 1973. 480 p.
3. Dyuzhev G.A., Kaplan V.B., Moyzhes B.Ya. *Sravnenie zondovogo i opticheskogo metodov izmereniya parametrov nizkotemperaturnoy tsezievoy plazmy* [Comparison of probe and optical measurement methods of low-temperature cesium plasma]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, no. 6, pp. 963–967.
4. Dyuzhev G.A., Martsinkovsky A.M., Moyzhes B.Ya. *Zondovye i spektralnye issledovaniya plotnoy plazmy TEP* [Probe and spectral studies of thick plasma TEC]. *Termoemissionnoe preobrazovanie energii: sbornik dokladov sovetskikh uchennykh na II Mezhdunarodnoy konferentsii po termoemissionnomu preobrazovaniyu energii* [Thermionic energy conversion. Collected papers of Soviet scientists at the II International conference in thermionic energy conversion]. Italy, Stresa, 27–31 May 1968. Moscow, VNIIT, 1969, pp. 111–122.
5. Baksht F.G., Dyuzhev G.A., Korobova I.L. *Nizkovoltnaya duga v termoemissionnykh preobrazovatelyakh. Sravnenie teorii s eksperimentom*. [Low-voltage arc in thermionic converters. Comparison of theory and experiment]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, no. 7, pp. 1075–1094.
6. Belokon A.A., Sonin E.B. *K teorii nizkovoltnoy dugi v termoemissionnom preobrazovatеле* [On the theory of low-voltage arc in thermionic converter]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1969, vol. 39, no. 11, pp. 2105–2118.
7. Karmazin V.P., Pashchenko V.P., Stakhanov I.P. *Sravnenie rezultatov teoreticheskikh i eksperimentalnykh issledovaniy parametrov dugovogo termoemissionnogo preobrazovatelya* [Comparison of the results of theoretical and experimental studies of arc thermionic converter parameters]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1972, vol. 42, no. 4, pp. 800–808.
8. Guskov Yu.K., Ruzhnikov V.A., Sidelnikov V.N. *Rashchetnye volt-ampernye kharakteristiki TEP. Chast 1. Vliyaniye velichiny mezhelektrodnogo zazora na VAK TEP* [Calculated current-voltage characteristics of the TEC. P. 1. The effect of the interelectrode gap in the VAC TEC]. Obninsk, Изд-во, 1984. 18 p.
9. Deynezhenko A.L., Zimin V.P. *Chislennoe modelirovaniye nestatsionarnykh voltampernykh kharakteristik plazmennogo dioda v dugovom rezhime* [Numerical simulation of unsteady plasma diode current-voltage characteristics in the arc mode]. *Izvestiya SO AN SSSR. Seriya Tekhnicheskikh nauk – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Ser. technical Sciences*, 1987, no. 6, pp. 84–87.
10. Zimin V.P. *Algoritm rascheta voltampernykh kharakteristik termoemissionnogo preobrazovatelya s postoyannoy temperaturoy elektronov* [Algorithm for calculating the current-voltage characteristics of the thermionic converter with constant temperature of electrons]. *Bulletin of Higher Education. Physics*, 1984, no. 7, 36 p. Dep. v VINITI 21.03.1984, no. 1571–84.
11. Zimin V.P. *Izobrazheniye i analiz granichnykh usloviy dlya uravneniya teploprovodnosti na fazovykh ploskostyakh* [Image analysis and boundary conditions for the heat equation on the phase planes]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, № 4, pp. 29–33.
12. Zimin V.P. *Razvitiye metoda fazovoy ploskosti dlya analiza resheniy kraevykh zadach* [Development of phase plane method for analyzing solutions of boundary value problems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, № 2, pp. 17–21.
13. Zimin V.P. *Issledovaniye osobennostey plazmennykh granichnykh uravneniy u emittera termoemissionnogo dioda* [Studying the features of plasma boundary equations for thermionic emitter diode]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, № 2, pp. 11–15.
14. Zimin V.P. *Issledovaniye osobennostey plazmennykh granichnykh uravneniy u kollektora termoemissionnogo dioda* [Studying the features of plasma boundary equations for thermionic diode collector]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, № 2, pp. 158–163.

Received: 03 September 2013.