

УДК 537.523 (575.2) (04)

## К ТЕСТИРОВАНИЮ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В МНОГОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ

*Р.М. Урусов* – докт. физ.-мат. наук

*Т.Э. Урусова* – канд. физ.-мат. наук

*И.Э. Нам* – соискатель

Calculations of the electric arc accompanied by a cone and molten surface of cathode are given. Boundary conditions influencing characteristics of the electric arc are considered.

В работе [1] в рамках двухмерной математической модели проведена апробация метода фиктивных областей (МФО) для численного расчета электрической дуги в многосвязной области, включающей столб дуги и электроды различной геометрии. В частности, рассмотрена дуга с конусным катодом. Выполнено сравнение с экспериментом и расчетными данными, полученными без применения МФО.

Установлено, что результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [2, 3], однако заметно отличаются от расчетов [3, 4].

В [3, 4] рассчитывалась стационарная дуга в аргоне атмосферного давления, горящая между конусным катодом "-" и плоским анодом "+" (рис. 1а). Угол заточки конуса  $\alpha = 60^\circ$ , сила тока  $I = 200\text{А}$ , межэлектродное расстояние  $L = 10\text{ мм}$ . В качестве входных параметров для постановки граничных условий привлекались радиальные распределения температуры газа  $T(r)$  (модель ЛТР [3]) либо электронов  $T_e(r)$  (модель ЧЛТР [4]) вблизи анода; радиус  $r_k$  токопроводящей зоны конусного катода и радиус проводимости  $R_\sigma$  дуги у вершины конусного катода (рис. 1а), а также максимальная плотность электрического тока  $j_k^{\max}$  на вершине конусного катода. Указанные параметры

определялись по результатам эксперимента [3]. Величина  $j_k^{\max}$  вычислялась следующим образом. В процессе горения дуги происходит оплавление конусного катода, и он принимает форму полусферы радиусом  $r_k \approx 0.51\text{ мм}$ , на поверхности которой осуществляется привязка дуги (рис. 1б). По формуле  $j_k^{\max} = I/S$ , где  $S = 2\pi r_k^2$  – площадь оплавленной поверхности, вычисляется среднее значение  $j_k^{\max}$ . Далее  $j_k^{\max}$  используется для постановки граничного условия в сечении  $AB$  (см. рис. 1а) для потенциала электрического поля  $\phi$ , с помощью которого решается электромагнитная часть задачи. Более входной параметр  $r_k$  уже не используется.

Отметим, что в модели [1] в качестве входного параметра задавался только  $r_k$ , а величина  $j_k^{\max}$  определялась в процессе численного решения.

Проведенное в [1] сравнение расчетных значений с результатами [3, 4] показало существенное различие (в 1.5–3 раза) для  $j_k^{\max}$ , максимальной скорости  $U^{\max}$  плазмы, "избыточному" давлению в центре катода  $P_k$  и анода  $P_a$  (см. таблицу п. 1, 2).

Было предположено, что различие результатов обусловлено заниженным значением  $j_k^{\max}$  в [3, 4], "усредненным" по всей оплавленной поверхности полусферы.

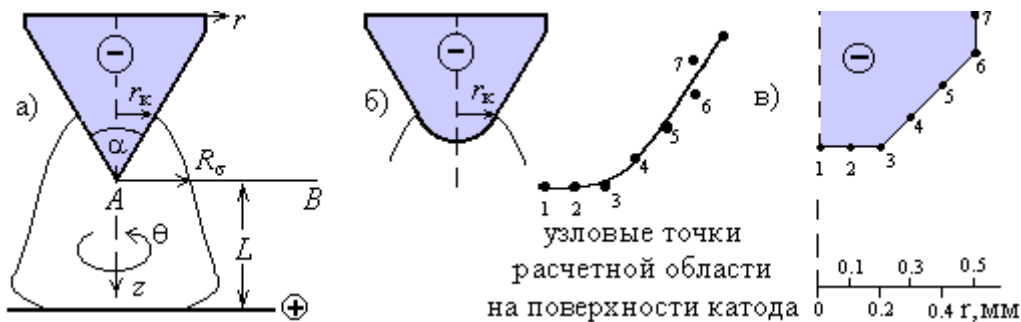


Рис.1. Схемы катодов: а) – конусная поверхность; б) – оплавленная поверхность; в) – аппроксимация криволинейной границы катода «ступенчатым» образом.

Сравнение результатов расчета

Пункт	Катод	$T$ , кК у анода	$r_k$ , мм	$R_{\sigma}$ , мм	$j_k^{\max}$ , $10^6 \text{ A}/\text{M}^2$	$U^{\max}$ , м/с	$P_k$ , $\text{H}/\text{M}^2$	$P_a$ , $\text{H}/\text{M}^2$
1	Конусный [1]	12.9	0.5*	3.1	215	525	1370	1090
2	Конусный [3,4]	14*	0.51*	3*	120*	294	842	394

Данная работа

3	Оплавленный	12.9	0.5*	2.9	225	505	1560	1130
4	Оплавленный	12.9	1.1*	3.5	130	290	780	430
5	Конусный	12.9	1.2*	3.8	145	320	720	425

\* Задавались как входные параметры.

Представляет интерес проверить справедливость этого предположения. Можно ожидать, что в случае использования входных данных, близких к [3, 4], будет наблюдаться удовлетворительное согласие результатов расчета. С этой целью в рамках модели [1] проведены следующие тестовые расчеты.

Во-первых, выполнен расчет дуги с катодом, имеющем оплавленную вершину в форме полусферы радиусом  $r_k = 0.5$  мм. Аппроксимация криволинейных границ электродов в цилиндрической системе координат  $(z, r, \theta)$  осуществляется "ступенчатым" образом (см. рис. 1в). Следует сказать, что в [3, 4] не уточняется, какая форма катода была использована непосредственно в расчетной схеме: конусная или оплавленная. Это несколько затрудняет сопоставление численных результатов.

Во-вторых, выполнены расчеты дуги с конусным и оплавленным катодами при значениях  $j_k^{\max}$ , близким к [3, 4]. Как отмечалось выше, в модели [1] величина  $j_k^{\max}$  определяет-

ся в процессе численного решения. Поэтому «подгонка» итогового расчетного значения  $j_k^{\max}$  к входному параметру  $j_k^{\max}$  [3, 4] осуществлялась путем соответствующего подбора величины входного параметра  $r_k$ . Очевидно, что при заданной силе тока  $I$  увеличение  $r_k$  приведет к уменьшению  $j_k^{\max}$ .

После серии тестовых расчетов было установлено следующее. При  $r_k = 0.5$  мм учет только лишь формы оплавленной вершины конусного катода не обеспечивает удовлетворительного согласия расчетных значений с результатами [3, 4]. По-прежнему наблюдается существенное различие для  $j_k^{\max}$ ,  $U^{\max}$ ,  $P_k$  и  $P_a$  (см. таблицу, п.2, 3).

Более эффективной оказалась «подгонка» итогового расчетного значения  $j_k^{\max}$  к входному параметру  $j_k^{\max}$  [3,4]. Для катодов с оплавленной либо конусной вершиной значения  $j_k^{\max}$ , близкие к [3, 4], наблюдаются при  $r_k = 1.1$  мм (оплавленная вершина) и при  $r_k = 1.2$  мм (конусная вершина) (см. таблицу, п. 2, 4, 5).

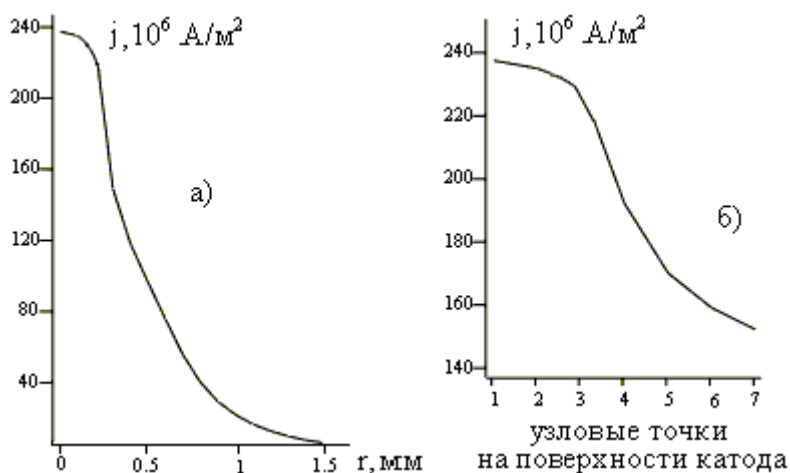


Рис.2. Распределение плотности электрического тока:  
 а – радиальное распределение  $j$  в сечении  $AB$ ;  
 б – на активной поверхности оплавленного катода (см. рис. 1в);  $r_k = 0.5$  мм.

Причем в обоих случаях значения  $U^{\max}$ ,  $P_k$  и  $P_a$  достаточно близки к расчетным данным [3, 4]. Например, для катода с оплавленной вершиной различие результатов не превышает 5–10%.

Необходимо отметить следующее. На первый взгляд, может показаться, что удовлетворительное согласие расчетных значений по одним характеристикам ( $j_k^{\max}$ ,  $U^{\max}$ ,  $P_k$  и  $P_a$ ) достигается ценой значительного расхождения, по другим, а именно – радиусу  $r_k$  токопроводящей зоны катода. По нашему мнению, это не так. Ведь параметр  $r_k$ , как отмечалось выше, используется в [3, 4] только «один раз» для вычисления  $j_k^{\max}$ , после чего в расчетах более не участвует. В этом случае расхождения в величине  $r_k$  уже не существенны, поскольку определяющим параметром остается  $j_k^{\max}$ .

Несмотря на эти доводы, может последовать замечание по поводу не вполне корректного сравнения. И для большей ясности целесообразно также выполнить тестовый расчет с таким же, как в [3, 4] значением  $r_k$ , при этом как-то ограничивая «сверху» и «удерживая» в процессе численного расчета значение  $j_k^{\max}$  на уровне [3, 4]. Подчеркнем, что в этом случае также необходимо в сечении  $AB$  ограничивать «сверху» и «удерживать» в процессе расчета весь радиальный профиль плотности тока  $j(r)$ .

Однако подобные вычислительные эксперименты в данном случае излишни. В этой связи представляется вполне правдоподобным следующее. Если в моделях [3,4] при величине  $r_k = 0.5$  мм задать значение  $j_k^{\max}$ , близкое к расчетному значению [1] (см. таблицу, п.1, 3), то будет наблюдаться удовлетворительное согласие для характеристик потока плазмы  $U^{\max}$ ,  $P_k$  и  $P_a$ .

Представляет интерес рассмотреть распределение плотности электрического тока  $j = \sqrt{j_z^2 + j_r^2}$  в радиальном сечении  $AB$ , а также непосредственно на активной поверхности оплавленного катода. Видно (рис. 2), что распределение  $j$  в обоих случаях весьма неравномерное. Принимая во внимание также (см., например, [5, 6]), что площадь привязки дуги может быть меньше площади оплавленной поверхности  $S$ , пользоваться «усреднением»  $j$  по формуле  $j_k^{\max} = I/S$  следует достаточно осторожно.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. Различие результатов расчетов работ [1] и [3, 4] обусловлено различием входных данных, привлекаемых в [1] для решения задачи. Использование «усредненной» формулы  $j_k^{\max} = I/S$  обуславливает заниженное ( $\sim 2$  раза) значение  $j_k^{\max}$ .

**Литература**

1. *Урусов Р.М., Урусова Т.Э.* Применение метода фиктивных областей для расчета характеристик электрической дуги // ТВТ. – 2004. – Т. 42. – № 3. – С. 374.
2. *Шоек П.* Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. – М.: Энергия, 1966. – С. 10.
3. *Hsu K.S., Etemadi K., Pfender E.* Study of the Free-Burning High-Intensity Argon Arc / Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – № 3. – P. 1293.
4. *Hsu K.C., Pfender E.* Two-Temperature Modeling of the Free-Burning, High-Intensity Arcs / J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54. – № 8. – P. 4359.
5. *Пустогаров А.В.* Экспериментальные исследования тугоплавких катодов плазмотронов // Экспериментальные исследования плазмотронов. – Новосибирск: Наука, 1977. – С.315.
6. *Стенин В.В.* Особенности эрозии термоэмиссионного катода // ТВТ. – 1985. – Т. 23. – № 5. – С. 858.