

УДК 533.9...15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ТРЕХФАЗНОМ ОДНОКАМЕРНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ С ТОРЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

© 2019 г. А. А. Сафронов¹, В. Б. Ковшечников¹, О. Б. Васильева¹,
Ю. Д. Дудник¹, *, В. Е. Кузнецов¹, В. Н. Ширяев¹

¹ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

После доработки 16.05.2019 г.

Принята к публикации 20.05.2019 г.

Представлены результаты исследования влияния расхода и давления плазмообразующего газа (азота) на потери энергии в виде излучения в камере трехфазного плазмотрона с тугоплавкими электродами. Показано увеличение потерь энергии за счет излучения по всей области спектра с повышением давления. Приведены зависимости ВАХ разряда, доли лучистых потерь и КПД плазмотрона от расхода азота и давления в камере.

DOI: 10.1134/S0040364419060139

ВВЕДЕНИЕ

Формирование направленного плазменного потока в дуговом плазмотроне при взаимодействии электрической дуги с газом сопровождается потерями энергии. Одним из видов этих потерь в сложном теплообмене потока со стенками камеры являются лучистые потери. Они преобладают на так называемом начальном участке течения газа, подаваемого в камеру плазмотрона. На нем тепловой слой дуги еще не взаимодействует с турбулентным пограничным слоем газа [1]. В отличие от электродуговых плазмотронов линейной схемы, в трехфазном однокамерном плазмотроне электроды, между которыми горят электрические дуги, расположены в плоскости. Поэтому, чтобы плазмотрон не был излишне вытянутым, газовый поток направляется ближе к горящим дугам и цилиндрическая часть камеры заменяется сужающейся конической. При этом данная часть плазмотрона может подвергаться как лучистому, так и дополнительно конвективному теплообмену.

Сокращение длины плазмотрона и уменьшение общей поверхности взаимодействия плазменного потока со стенками камеры позволяет добиться достаточно высокого КПД. Однако если при нормальном (атмосферном) давлении и не слишком больших токах лучистые потери составляют 5–10% от общей мощности и обычно не учитываются, то с повышением давления в камере они значительно возрастают [2].

Повышение давления в камере плазмотрона обеспечивает рост производительности процессов, будь то выход целевого продукта, скорость

обработки поверхности, нагрева рабочего тела и т.п. Однако возрастание лучистых потерь приводит к неоправданным затратам электроэнергии, что имеет существенное значение при создании и использовании крупнотоннажных производств. Компромисс между этими двумя факторами позволяет добиться оптимального решения.

В качестве плазмообразующего газа в данной работе рассмотрен азот, поскольку азотная плазма имеет широкую перспективу применения в крупнотоннажных производствах, например при получении связанного азота. В частности, рассматриваемый трехфазный плазмотрон разработан для быстрого нагрева азота, который является аккумулятором колебательной энергии, обеспечивающим работу газодинамического лазера. В таких процессах для снижения затрат повышение КПД установки имеет огромное значение.

Кроме того, вид соотношений для излучательной способности, лучистых потерь, КПД, полученные для азота как плазмообразующего газа, будут, по-видимому, справедливы и для других газов, применяемых в плазмохимии: воздуха, Ar, Ne, но, конечно, с другими численными значениями коэффициентов, поскольку при прочих равных условиях лучистые потери должны зависеть от рода газа, его атомно-молекулярной структуры.

Целью данной работы является экспериментальное исследование энергетических параметров трехфазного плазмотрона с торцевыми электродами в условиях повышенного давления и определение доли лучистых потерь в общем объеме тепловых потерь.

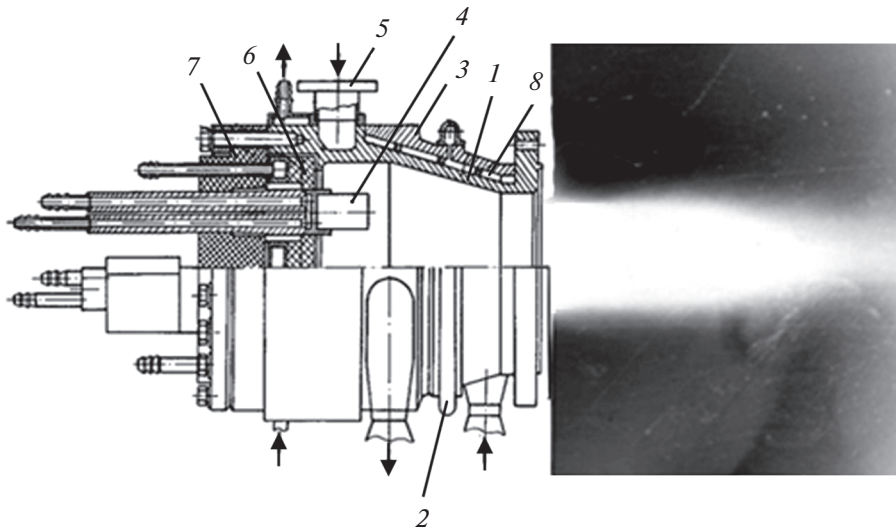


Рис. 1. Трехфазный плазмотрон с торцевыми электродами: 1 – корпус, 2 – гофра, 3 – рубашка охлаждения, 4 – электроды водоохлаждаемые, 5 – патрубок, 6 – электроизоляционная вставка, 7 – стеклотекстолитовая шайба, 8 – спиральные направляющие.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлен общий вид трехфазного плазмотрона переменного тока с торцевыми электродами. В камере плазмотрона длиной 0.14 м и радиусом $R = 0.07$ м на задней стенке, являющейся электродным блоком, симметрично относительно оси расположены на расстояниях $\alpha = 0.01$ м три цилиндрических электрода 4, выполненных из вольфрама.

Плазмообразующий газ подается в камеру с тангенциальной кривкой, создавая зону пониженного давления вблизи оси плазмотрона, где в основном сосредоточено горение дуг. Локализованная, таким образом, зона горения снижает вероятность замыкания (шунтирование) дуг на стенки камеры. Рабочим газом являлся азот. Конструктивные особенности подобного типа плазмотрона приведены в [3].

При выполнении экспериментов плазмотрон выходным фланцем с внутренним радиусом $r = 60$ мм соединялся с цилиндрической трубой, на выходе которой размещались сменные сопла с различными критическими сечениями. Это позволяло поддерживать различные давления в камере плазмотрона при постоянном расходе газа.

Условия для зажигания дуг создавал инжектор, обеспечивая концентрацию электронов в камере вблизи электродов порядка $10^{12} - 10^{14}$ см⁻³. После зажигания дуг он отключался. В дальнейшем между электродами плазмотрона наблюдался самостоятельный разряд. Разогретые поверхности электродов и высокотемпературный след от погасания дуг в моменты перехода тока через нуль способствовали их последующему зажиганию.

В систему электропитания плазмотрона входил силовой трехфазный трансформатор и реакторы, ограничивающие ток разряда. Падение напряжения на дуге и фазовые токи определялись с помощью датчиков тока и напряжения фирмы LEM. Мощность плазмотрона контролировалась с применением двух ваттметров. Во всех проводимых испытаниях напряжение холостого хода источника питания составляло 880 В.

Давление в камере плазмотрона и цилиндрической трубе измерялось с помощью индукционных датчиков типа ДДИ-20. При большой мощности разряда и особенно при большом давлении газа время измерения было ограничено несколькими секундами из опасения возможного разрушения конструкции плазмотрона, его электродного блока, на который воздействуют большие тепловые потоки.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

Для нахождения тепловых потоков и расчета КПД плазмотрона проводились калориметрические измерения. Они заключались в замере температуры воды на входе и выходе системы охлаждения электродного блока и цилиндрической, переходящей в конфузорную части камеры. По этим данным рассчитывались тепловые потоки в соответствующие части камеры и общий тепловой поток в виде их суммы. В качестве датчика температуры воды применялись медно-константановые термопары, заделанные в теплоизолированную от внешней среды латунную обойму. Чувствительность такого дифференциального датчика составляла 300 мкВ/градус.

Данные калориметрических измерений позволили получить зависимость теплотерь от давления и расхода азота. Диапазоны изменения величин: давление в камере $p = 0.1-5.7$ МПа, расход азота $G = (27-94) \times 10^{-3}$ кг/с. Во всех экспериментах действующее значение тока короткого замыкания источника было 330 А.

КПД плазматрона рассчитывалось как

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{п}}}{W_{\text{пл}}},$$

где $W_{\text{пл}}$ – усредненная по времени мощность плазматрона, $Q_{\text{п}}$ – суммарные потери энергии в камере плазматрона. К ним относятся потери за счет конвекции и излучения дуг, а также потери энергии через электродные пятна, шунтирование.

Для определения лучистых потерь использована следующая методика. Поверхность электродного блока со стороны камеры, взаимодействуя с холодным газом, подаваемым в плазматрон, воспринимает в основном лучистую энергию дуг, горящих в приосевой части камеры. При степени черноты стенки, близкой к единице, падающий и поглощенный потоки равны. Поэтому, определив тепловой поток в стенку электродного блока, при определенных условиях можно найти интегральный лучистый поток от горящих дуг и оценить общие лучистые потери. Теплообмен в цилиндрической части камеры и особенно в ее коническом выходном сечении может сопровождаться конвективными потерями, соизмеримыми с лучистыми. Величина конвективных потерь в этом случае оценивалась как разница между измеренными потерями в боковую стенку и вычисленными лучистыми. Полученные таким способом оценки конвективных потерь содержали также потери за счет шунтирования, утечку энергии через нагрев электродов, их эрозии, т.е. все потери, кроме лучистых.

Как показали эксперименты со скоростной киносъемкой в трехфазном плазматроне, так же как и в плазматроне линейной схемы, на начальном участке ствол дуги остается достаточно прямолинейным, поскольку на него еще не воздействует турбулентный пограничный слой поступающего газа. Замыкание дуг проходит вне камеры плазматрона. В усредненном по времени процессе можно считать, что вблизи оси трехфазного плазматрона горят три шнура дуги. В основу дальнейшего рассмотрения положена упрощенная схема процессов в разрядной камере на начальном участке [4]. Внутри разрядной камеры вблизи оси расположены плазменные шнуры, температура которых меняется только по радиусу. Каждая точка такого шнура является объемным изотропным излучателем, а лучистый поток на единицу длины начального участка вдоль оси

шнура мало меняется. В этом случае излучение, падающее на электродный блок, будет зависеть только от телесного угла, величина которого связана с продольной координатой z . Для данного плазматрона со стальными окисленными стенками канала интегральный коэффициент поглощения $\gamma \approx 0.8$ [5]. Таким образом, измерив тепловой поток в стенку электродного блока, можно оценить усредненный по времени лучистый поток на единицу длины дуги:

$$\epsilon_{\text{д}} = \frac{4\pi Q_{\text{л}}^{\text{эл}}}{L \int_{l_1}^L f(z, R, \alpha) dz}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{л}}^{\text{эл}}$ – усредненный по времени тепловой поток от дуги в стенку электродного блока с учетом коэффициента поглощения γ ; $f(z, R, \alpha)$ – функция изменения телесного угла в зависимости от расстояния; L – длина дуги, равная длине камеры, м; l_1 – длина электрода, м. Более точно нижний предел должен быть взят не от поверхности электрода, а от точки над его поверхностью, выше которой излучение попадает на электродный блок. В условиях проведенных экспериментов для не слишком длинных электродов (менее 20 мм) радиусом менее 4 мм ошибка не превышает 5%.

Функция изменения телесного угла была взята в следующем приближенном виде:

$$f(z, R, \alpha) \approx 2\pi \left\{ 1 - \left[0.5 + \frac{z/2}{\sqrt{z^2 + (R - \alpha)^2}} \right]^{0.5} \times \right. \\ \times \left[0.5 + \frac{z/2}{\sqrt{z^2 + (R + \alpha)^2}} \right]^{0.5} + \\ \left. + \left[0.5 - \frac{z/2}{\sqrt{z^2 + (R - \alpha)^2}} \right]^{0.5} \times \right. \\ \left. \times \left[0.5 - \frac{z/2}{\sqrt{z^2 + (R + \alpha)^2}} \right]^{0.5} \right\}.$$

При $\alpha = 0$ выражение для телесного угла становится точным. Это соответствует горению стабилизированной дуги по оси канала плазматрона линейной схемы на его начальном участке. Сравнение результатов расчетов, выполненных с использованием $f(z, R, \alpha)$, и точных решений, полученных в [6], показало, что при смещении ствола дуги от оси электродного блока на расстояние не более $0.27R$ и ее наклоном к оси камеры до 15° ошибка не превышает 6%. Для исследуемого плазматрона эти условия выполняются.

Зная $\epsilon_{\text{д}}$, мощность излучения на выходе из плазматрона можно найти по формуле

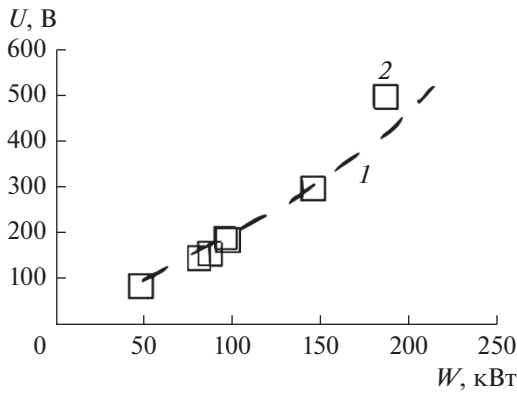


Рис. 2. Падение напряжения на дуге: 1 – расчет, 2 – экспериментальные данные.

$$Q_{л}^{в\text{ых}} \approx \frac{3}{4\pi} \int_{l_1}^L \epsilon_{д} f(z, R, \alpha) dz,$$

а на боковые стенки камеры:

$$Q_{л}^{бок} = 3\epsilon_{д} (L - l_1) - Q_{л}^{в\text{ых}} - Q_{л}^{эл}.$$

Относительная излучаемая мощность ϕ определялась соотношением

$$\phi = \frac{Q_{л}^{эл}}{W_{пл}} = \frac{(Q_{л}^{бок} + Q_{л}^{эл})\gamma}{W_{пл}},$$

а доля лучистых потерь – как их отношение к суммарным потерям:

$$\chi = \frac{Q_{л}}{Q_{п}}.$$

По данной методике усредненную по времени мощность излучения на единицу длины одного дугового канала рассматриваемого плазматрона можно оценить как (см. (1))

$$\epsilon_{л} \approx \frac{Q_{л}^{эл}}{6.6 \times 10^{-2}} \text{ [кВт/м]}.$$

С учетом зависимости $\epsilon_{л}$ от тока, приведенной в [5], была вычислена усредненная мощность излучения на единицу длины при нормальном давлении для синусоидального тока, отвечающего проводимым экспериментам. Сравнение вели-

чин показало, что, несмотря на расхождение в два–три раза, они близки по порядку величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одной из основных характеристик дугового разряда является его вольт-амперная характеристика (ВАХ). Для трехфазного плазматрона в предположении симметрии горения и независимости ВАХ дуги от полярности подключения электродов, что выполняется для диапазона изменения тока [1], рассмотрение можно ограничить одной характеристикой. Поскольку непосредственное измерение тока в дугах в трехфазном однокамерном плазматроне невозможно, то ВАХ рассчитывалась по методике, описанной в [7]. Задается вид ВАХ дугового разряда исходя из общих закономерностей, связанных с обтеканием дуги газом, а численные значения параметров определяются из условия минимума отклонения расчетного падения напряжения от его экспериментального значения. В результате получено следующее обобщенное выражение для ВАХ или сопротивления дуги:

$$\frac{U}{I} = 13.4 \left(\frac{G}{I}\right)^{0.505} p^{0.235} \text{ [Ом]}, \quad (2)$$

где I – ток, А; p – давление, Па; G – расход азота, кг/с.

На рис. 2 приведен график падения напряжения на дуге при различных мощностях плазматрона. Штриховая линия – расчет по (2).

Максимальное расхождение между измеренным и расчетным значениями падения напряжения достигало 16% при больших мощностях разряда. Тем не менее при вычислении мощности расхождение с экспериментом не превышало 10%. В таблице приведены расчетные и экспериментальные значения мощности для различных расходов азота и давления в камере. Во всех случаях ток короткого замыкания источника составлял 330 А.

Выражение (2) представлено в размерном виде, что из соображения удобства обработки экспериментальных данных является обычной практикой. Особенно при обработке данных, полученных при работе на одной и той же среде. Помимо основного критерия, связанного с конвективным теплообменом между дугой и газом, в (2) входит давление, значение которого обратно пропорционально длине пробега структурных частиц ионизированного газа. Из (2) видно, что падение напряжения на дуге слабо зависит от тока, т.е. после регулярно повторяющегося зажигания и погасания дуги (дуг) в этом промежутке времени напряженность поля сохраняет постоянное значение. А при отсутствии сколь-либо значительного взаимодействия на начальном участке с турбулентным потоком газа напряженность поля

Расчетные и экспериментальные значения мощности

№	p , МПа	G , кг/с	$W_{\text{экс}}$, кВт	$W_{\text{расч}}$, кВт	δW , %
1	0.1	0.020	47.0	48.9	4
2	0.1	0.065	90.3	85.5	5.4
3	1.6	0.065	145.0	156.0	7.5
4	4.5	0.082	186.0	201.0	8.1

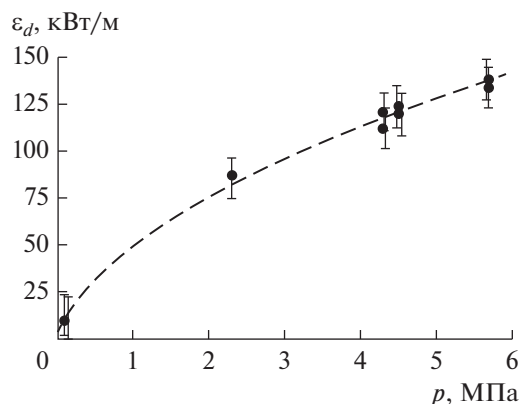


Рис. 3. Зависимость излучательной способности от давления.

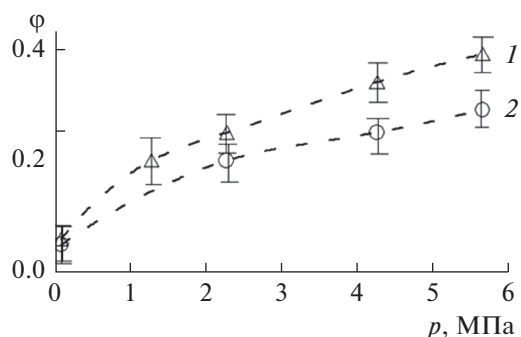


Рис. 5. Изменение относительной излучательной мощности ϕ от давления при расходах газа 0.03 (1) и 0.08 кг/с (2).

сохраняет постоянное значение и в пространстве, оправдывая предположение о приблизительно постоянном лучистом потоке единицы длины дугового шнура. Влияние давления на напряженность поля близко к значениям, полученным в [1, 3]. Там для однокамерного и двухкамерного плазматронов постоянного тока показатель степени равен 0.20–0.25.

На рис. 3 показана усредненная по времени излучательная способность единицы длины дуги в трехфазном плазматроне в зависимости от давления, которая является растущей функцией. В исследуемом диапазоне изменения параметров ее можно представить степенной зависимостью

$$\varepsilon_d = 50.78 p^{0.57} \text{ [кВт/м]},$$

где p – в МПа.

На рис. 4 и 5 показаны зависимости доли лучистых потерь χ и величины относительной излучаемой мощности ϕ от давления при различных расходах газа. Из рис. 4 видно, что с повышением давления доля лучистых потерь быстро нарастает. При давлениях в камере выше 1.0–1.5 МПа они

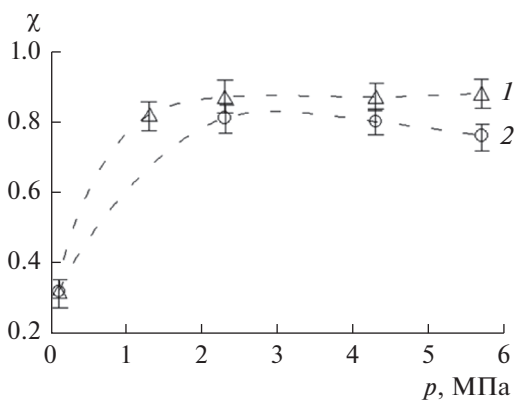


Рис. 4. Доля лучистых потерь χ в зависимости от давления при расходах газа 0.03 (1) и 0.08 кг/с (2).

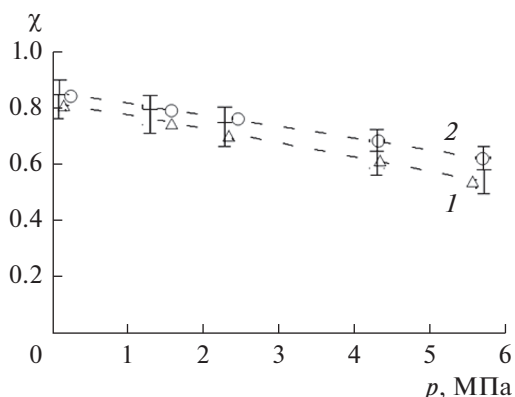


Рис. 6. Зависимость КПД от давления при расходах газа 0.03 (1) и 0.08 кг/с (2).

становятся определяющими, их доля составляет 75–85% суммарных потерь. При дальнейшем повышении давления она слабо меняется. Связано это, по всей вероятности, с тем, что увеличиваются также другие виды потерь, причем их зависимость от давления примерно такая же. К тому же с увеличением расхода возрастают конвективные потери, этим можно объяснить небольшое снижение доли лучистых потерь. Вообще влияние расхода на χ достаточно слабое, его увеличение почти в три раза вызывает изменение χ примерно на 10%.

При давлении, когда основными потерями становятся лучистые, наблюдается дальнейшее увеличение относительной излучаемой мощности ϕ . Это вызвано тем, что с повышением давления мощность плазматрона растет медленнее, чем излучательная способность дуг.

На рис. 6 приведена зависимость КПД от давления. С возрастанием давления КПД плазматрона падает и составляет примерно 0.55 при давлении 5.7 МПа. Увеличение расхода незначительно повышает его значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа трехфазного однокамерного плазмотрона при повышенном давлении в камере сопровождается значительными лучистыми потерями, которые достигают 85%. В указанном выше диапазоне изменения параметров доля потери энергии в общем балансе может составлять 45%.

Повысить КПД подобного типа плазмотронов за счет использования отражающих стенок малоэффективно из-за того, что значительная часть излучения остается запертой в камере плазмотрона. Наилучшим, по-видимому, в этом плане будет плазмотрон со слабо расходящимся конусом, позволяющим выходить излучению при сохранении направленности плазменного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 296 с.
2. Safronov A.A., Vasilieva O.B., Dudnik J.D., Kuznetsov V.E., Kuchina J.A., Shiryaev V.N., Pavlov A.V. Analysis of Physics Processes in the AC Plasma Torch Discharge under High Pressure // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 825. № 1. P. 012014.
3. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 45 с.
4. Теория термической электродуговой плазмы / Под ред. Жукова М.Ф. Ч. 2. Новосибирск: Наука, 1987. 286 с.
5. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Спр. / Под ред. Григорьева В.А., Зорина В.М. М.: Энергоиздат, 1982. 193 с.
6. Окунева В.В. Разработка способов улучшения технико-экономических показателей и методики выбора рациональных режимов плазменно-дуговых сталеплавильных печей. Дис. ... канд. техн. наук. Тверь: ГТУ, 2015. 153 с.
7. Ковшечников В.Б., Антонов Г.Г., Уфимцев А.А., Суоров А.В. Об определении токов в дугах трехфазных однокамерных плазмотронов // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 3 С. 694.