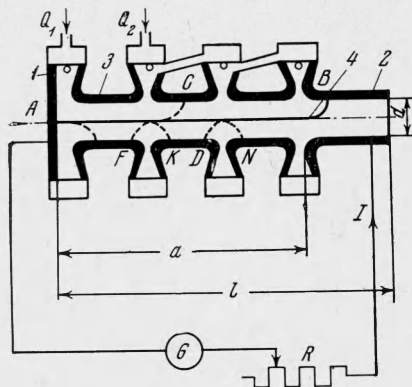


ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНА С МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ ВСТАВКОЙ

Г. Ю. Даутов, Ю. С. Дудников, М. Ф. Жуков, Г. М. Мустафин,
М. И. Сазонов
(Новосибирск)

В статье приводятся вольт-амперные и тепловые характеристики плазмотрона с секционированной межэлектродной вставкой, осциллограммы пульсаций напряжения дуги и яркости струи нагретого газа. Характеристики сравниваются с аналогичными характеристиками однокамерного плазмотрона. Вольт-амперные характеристики плазмотрона с межэлектродной вставкой имеют U-образный характер. На восходящей ветви характеристики напряжение больше, чем в однокамерном плазмотроне. Пульсации напряжения и яркости в исследованном плазмотроне значительно ниже, чем в однокамерном.

1. Некоторые особенности горения дуги в секционированном канале. Горение стабилизированной дуги в канале плазмотрона сопровождается взаимодействием ее с потоком нагреваемого газа и стенкой канала. Оно носит как тепловой, так и электрический характер и в значительной мере определяется свойствами газового потока и стенки канала. Обычно в ламинарных и цилиндрических дугах нагретый до высокой температуры газ полностью заполняет канал, дуга стабилизируется стенкой и непосредственно с ней взаимодействует. Известен способ увеличения длины и напряжения таких дуг, заключающийся в применении изолированных от электродов и друг от друга секций небольшой длины [1]. Для нормального горения дуги по оси канала в этом случае требуется, чтобы на длине одной секции падение напряжения на дуге не превышало суммы катодного и анодного падений потенциала, характерных для дугового разряда в данных условиях. Весьма интенсивное охлаждение стенок является непременным условием их длительной работы, а состояние поверхности сильно влияет на характер электрических процессов вблизи стенки [2]. Такие устройства реализуются при малых расходах газа, имеют очень низкий тепловой к. п. д. и используются в основном в исследовательских целях.



Фиг. 1. Схема дуговой камеры. 1 — катод, 2 — анод, 3 — секции МЭВ, 4 — дуга, G_1 , G_2 — подача воздуха, Г — генератор, R — сопротивление

С увеличением расхода роль газового потока в процессах взаимодействия возрастает. При помощи его оказывается возможным стабилизировать дугу по оси канала (вихревая стабилизация) и значительно увеличить ее длину, напряжение, мощность, а также повысить к. п. д. плазмотрона. Однако, как следует из работ [3-6], увеличение длины дуги и мощности ее при этом имеет предел, определяемый шунтированием дуги на стенку токопроводящего канала электродами. В этом случае на характеристики дуги и плазмотрона можно воздействовать [7,8] при помощи межэлектродной вставки (сокращенно МЭВ). В работах [5,7-9] межэлектродная вставка была односекционной. Анализ работы такой МЭВ показал, что ее целесообразно делать многосекционной с подачей холодного газа в зазоры между секциями [9].

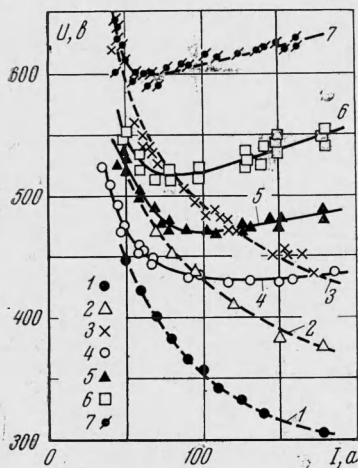
Принципиальное отличие в механизмах работы таких секций МЭВ и секций канала ламинарных и цилиндрических дуг заключается в том, что в первом случае возможность образования дуг типа FK и DN (фиг. 1) между соседними секциями определяется потенциалом дугового пробоя между столбом дуги и секциями, а также потенциалом пробоя в межсекционном зазоре. Эти потенциалы могут быть значительно больше суммы анодного и катодного падений, вследствие чего при нормальном положении дуги на оси канала отдельные секции могут иметь значительно большую длину, чем во втором случае. Подача газа в зазоры между секциями создает возможность управления потенциалами пробоя и предотвращает образование коротких дуг в зазорах. Несмотря на то, что по мере движения вдоль канала основной поток газа нагревается, создание пристеночной завесы из холодного газа позволяет сохранить это отличие при достаточных больших токах и длинах канала.

Эксперименты [10] показали, что секции МЭВ заряжаются до потенциала некоторой точки положительного столба внутри секции из-за наличия несамостоятельного разряда между столбом и стенкой секции. Поэтому максимальная разность потенциалов между дугой и секцией становится значительно меньшей, чем в случае несекционированной МЭВ при одинаковых их длинах. В мощных плазмотронах с водяным охлаждением секций возможна утечка тока от секции из-за электропроводности воды.

Если, кроме того, слой холодного газа между столбом и стенкой секции велик, токи несамостоятельного разряда, выравнивающие потенциал секции и столба, малы [9]. Вследствие этого возможна ситуация, когда разность потенциалов столба и секции окажется большой и достаточной для пробоя. В этом случае выравнивание потенциалов можно осуществить путем подключения секции к источнику потенциала нужной величины.

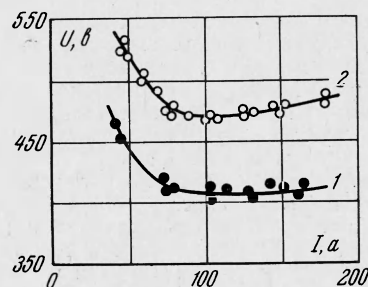
Как показано в работе [10], на напряженность электрического поля в дуге с вихревой стабилизацией расход газа оказывает незначительное влияние. На этом основании

можно было ожидать, что использование секционированной МЭВ в сочетании с распределенной подачей газа позволит увеличить не только длину, но и напряжение горения дуги при высоком значении к. п. д. и сравнительно длинных секциях МЭВ. Данная работа посвящена исследованию характеристик такого плазматрона простейшей схемы.



Фиг. 2

Фиг. 2. $U - I$ — характеристики, $d = 1$ см, $p = 10$ н. см⁻². 1 — $G = 6$ г сек⁻¹, $n = 6$, $l = 17.7$ см, секции электрически соединены с анодом; 2 — однокамерный плазматрон, $G = 6$, $l = 30$; 3 — однокамерный плазматрон, $G = 8$, $l = 30$; 4 — $G = 6$, $n = 6$, $a = 12.6$ см, $l = 17.7$; 5 — $G = 8$, $n = 6$, $a = 12.6$, $l = 17.7$; 6 — $G = 8$, $n = 7$, $a = 14.7$, $l = 19.8$; 7 — $G = 8$, $n = 8$, $a = 16.9$, $l = 22$



Фиг. 3

Фиг. 3. $U - I$ — характеристики плазматрона с МЭВ, $d = 1$ см, $p = 10$ н. см⁻², $n = 6$, $a = 12.6$, $l = 17.7$ см. 1 — $G = 5$, 2 — $G = 8$

Поскольку в двухкамерном плазматроне и плазматроне с двусторонним истечением процессы взаимодействия в пристеночной области электродов также играют большую роль, можно надеяться, что приводимые ниже результаты удастся использовать для улучшения характеристик и таких плазматронов.

2. Описание экспериментальной установки. Принципиальная схема плазматрона показана на фиг. 1. Медные охлаждаемые водой катод 1, анод 2 и изолированные между собой и от анода секции 3 образуют дуговую камеру плазматрона. Количество секций n длиной 2 см каждая изменялось от пяти до восьми, межэлектродное расстояние a соответственно — от 10.5 до 16.9 см, а длина дуговой камеры l (расстояние от торца катода до выходного среза анода) менялась от 15.5 до 22 см. Анод 2 имел постоянную длину $l_a = 5$ см.

Воздух с расходом G_1 подавался в зазор величиной 3.5 мм между катодом и первой секцией через четыре тангенциальных отверстия диаметром 3 мм на расстоянии 2.5 см от оси плазматрона. Расход G_2 поступал в межсекционные пространства также с закруткой и распределялся через межсекционные зазоры величиной 1 мм вдоль дуговой камеры, как показано на схеме. Общий расход воздуха $G = G_1 + G_2$ изменялся от 5 до 8 г сек⁻¹. Запуск плазматрона с МЭВ осуществлялся описанным в [9] способом. После поджига дуга занимала положение AB . Эксперименты проводились при $g = 0.58$ ($g = G_2 / G$) на плазматроне с внутренним диаметром электрода $d = 1$ см. Выхлоп газа осуществлялся в атмосферу ($p = 10$ н. см⁻²). Температура охлаждающей воды измерялась ртутными термометрами с ценой деления 0.5° С. Расходы воды и воздуха определялись ротаметрами РС-5 и РС-7. Напряжение U и ток дуги I регистрировались соответственно приборами Э59 и ЛМ-1 класса точности 0.5.

3. Вольт-амперные характеристики. На фиг. 2 и 3 приведены полученные $U - I$ — характеристики. Видно, что секционированная МЭВ в сочетании с распределенной по длине подачей газа существенно повышает напряжение горения дуги, и, начиная с некоторого значения тока, характеристики становятся восходящими. Например, кривые 3 и 7 (фиг. 2) показывают, что при $I = 150$ а, $n = 8$, $G = 8$ г сек⁻¹ превышение напряжения по сравнению с однокамерным плазматроном (сплошной анод) составляет приблизительно 40%.

Если секции 3 электрически соединить с анодом 2, то секции 3 и анод 2 в целом работают как секционированный анод с распределенной подачей газа. На фиг. 2 кривая 1 соответствует этому случаю. Сравнение кривых 1 и 2 (сплошной анод) показывает, что при одинаковых расходах секционированный анод с распределенной подачей газа приводит к меньшим напряжениям, чем в однокамерном плазмотроне со сплошным анодом и подачей полного расхода газа через единственную камеру закрутки. Например, в данном случае при $I = 150$ а, $G = 6$ г сек⁻¹ напряжение на 20% ниже, чем в однокамерном плазмотроне. При больших I этот факт можно объяснить тем, что в случае секционированного анода с распределенной подачей дуга занимает положение AC (фиг. 1) и часть газа поступает через зазоры, расположенные ниже по потоку от точки C, т. е. не участвует в обдуве дуги. Однако при малых токах, когда дуга занимает положение AB и весь поступающий газ принимает участие в обдуве дуги, напряжение ее по сравнению остается меньшим, чем в случае однокамерного плазмотрона.

Таким образом, кроме вышеуказанной причины должны быть и другие, приводящие к понижению напряжения. Одной из таких причин могут быть возмущения полей скоростей (следовательно, и температур) из-за наличия кольцевых расходных щелей в электроде, что влияет на процессы взаимодействия в пристеночной области, приводит к более раннему сунтированию и, следовательно, — более коротким дугам. Этот эффект при малых токах может иметь место и тогда, когда секции служат межэлектродной вставкой, т. е. изолированы от анода. Но в данном случае U понижается не так сильно за счет невозможности сунтирования на участке МЭВ (кривые 2 и 4) и вынужденного уменьшения по этой причине его размаха. С ростом I и a такое понижение U быстро исчезает. При больших I дуга в плазмотроне с МЭВ превосходит по длине дугу в однокамерном плазмотроне со сплошным анодом, вследствие чего U для плазмотрона с МЭВ оказывается выше, а $U-I$ -характеристика становится восходящей. Прирост напряжения тем больше, чем длиннее МЭВ, что видно из сравнения кривых 5, 6 и 7 на фиг. 2.

Следует подчеркнуть различие в причинах формирования восходящих $U-I$ -характеристик цилиндрических дуг и дуг в плазмотронах с МЭВ. В первом случае восходящий участок характеристики не может наступить до почти полного заполнения сечения канала дугой [11]. После заполнения канала полная электропроводность шнура растет при увеличении тока только за счет повышения температуры. Этот рост отстает от роста тока, что и является в данном случае причиной формирования восходящей ветви $U-I$ -характеристики. В плазмотронах же с МЭВ восходящий участок начинается еще задолго до полного заполнения канала дугой. При этом имеется значительная прослойка вихревого газового потока с сравнительно низкой температурой между дугой и стенкой канала. Причиной, определяющей появление восходящей ветви $U-I$ -характеристики, является U-образный характер $E-I$ -характеристики (E — напряженность электрического поля) столба в таких условиях [10]. В этом заключается еще одно принципиальное отличие работы МЭВ плазмотрона от работы секционированного канала цилиндрических и ламинарных дуг. Можно ожидать, что при больших токах и малых диаметрах канала секционированная МЭВ с распределенной подачей газа будет влиять на $U-I$ -характеристики также и путем обжатия дуги.

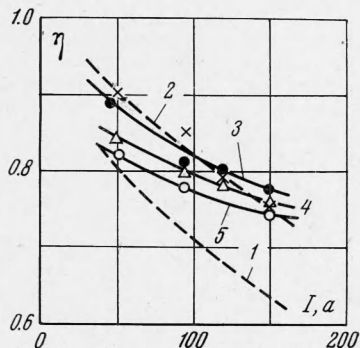
Показанная возможность получения восходящих $U-I$ -характеристик имеет большое значение с точки зрения повышения общего к. п. д. установки плазмотрона путем исключения стабилизирующего балластного сопротивления при питании от источника с жесткой или слабопадающей внешней характеристикой. Кроме того, при заданной мощности повышение напряжения дуги позволяет работать на меньших токах, что обычно приводит к увеличению ресурса плазмотрона.

4. Тепловые характеристики. Большая стабильность длины дуги в плазмотроне с МЭВ, а также экранирующее воздействие пристеночной завесы дают несколько отличные зависимости теплового к. п. д. от I по сравнению с однокамерным плазмотроном. На фиг. 4 сплошными линиями нанесены полученные экспериментально зависимости теплового к. п. д. плазмотрона с МЭВ от силы тока для трех длин МЭВ. Для сравнения пунктиром изображены аналогичные зависимости для однокамерного плазмотрона. Кривая 2 получена экспериментально при $l = 18$ см, кривая 1 рассчитана для $l = 30$ см по приведенному в [12] уравнению

$$\eta = -1 + \frac{2.52}{(pd)^{0.05}} - 0.17 \lg \frac{I^2}{Gd}$$

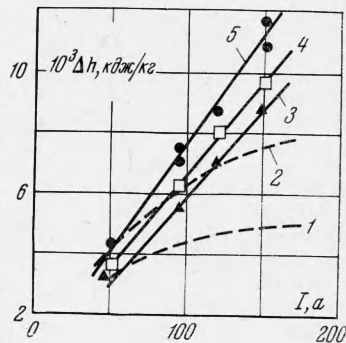
Максимальная длина дуги l_g (длина в осевом направлении) в плазмотронах без МЭВ сильно зависит от тока и поэтому оптимальный, с точки зрения к. п. д., плазмотрон должен иметь переменную длину $l = l_g$. Если $l > l_g$, то участок дуговой камеры $l_1 = l - l_g$ служит только источником потерь. Кривые 1 и 2 получены при постоянных l . В экспериментах с однокамерным плазмотроном при малых токах и $l = 18$ см часть дуги выходила из анода. По этой причине кривая 2 при малых токах дает завышенные значения по сравнению с максимально возможными значениями к. п. д. η_{\max} . Кривая 1

во всем диапазоне изменения тока соответствует условию $l > l_g$ и дает значения к. п. д., всюду меньшие η_{\max} . При малых I зависимость $\eta_{\max} = f_1(I)$ для однокамерного плазмотрона должна располагаться между кривыми 1 и 2, а с ростом тока — приближаться к кривой 1. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что потери на участке l_1 значительны.



Фиг. 4

Фиг. 4. Зависимость к. п. д. от тока, $G = 6 \text{ г сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$, $p = 10 \text{ н. см}^{-2}$. 1 — сплошной анод $l = 30 \text{ см}$ (расчетная кривая), 2 — сплошной анод, $l = 17.7$, 3 — $n = 6$, $a = 12.6$, $l = 17.7$, 4 — $n = 7$, $a = 14.7$, $l = 19.8$, 5 — $n = 8$, $a = 16.9$, $l = 22$.



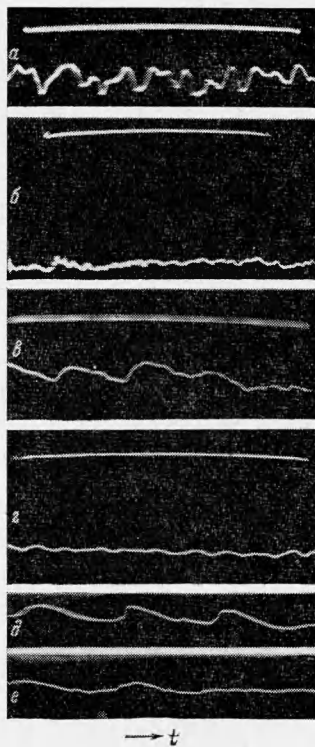
Фиг. 5

Фиг. 5. Прирост энтальпии торможения воздуха в плазмотроне, $G = 6 \text{ г сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$, $p = 10 \text{ н. см}^{-2}$. 1 — сплошной анод, $l = 30$, 2 — сплошной анод, $l = 17.7$, 3 — $n = 6$, $a = 12.6$, $l = 17.7$, 4 — $n = 7$, $a = 14.7$, $l = 19.8$; 5 — $n = 8$, $a = 16.9$, $l = 22$.

В случае плазмотрона с МЭВ длина анода l_a при больших токах оказалась чрезмерной и имелся участок потерь l_1 , из-за чего кривые 3, 4, 5 также не являются оптимальными. Поэтому зависимости $\eta_{\max} = f_2(I)$ в этом случае должны располагаться несколько выше приведенных.

Сравнение кривых на фиг. 4 показывает, что при больших токах тепловой к. п. д. плазмотрона с МЭВ превышает к. п. д. однокамерного плазмотрона со сплошным электродом фиксированной длины. Это объясняется экранирующим влиянием распределенной подачи газа и различием в величинах l_1 . Если учесть, что плазмотрон с МЭВ при этих токах может работать без балластного сопротивления, то общий к. п. д. установки будет значительно больше, чем в случае однокамерного плазмотрона.

Наиболее четко разница в тепловых характеристиках плазмотрона с МЭВ и однокамерного видна из сравнения зависимостей прироста энтальпии торможения газа от тока, приведенных на фиг. 5. Ход кривых 1 и 2 (однокамерный плазмотрон) показывает, что при фиксированной l из-за роста l_1 существует достижимый предел прироста энтальпии при увеличении тока дуги. Такой предел наступает при равенстве прироста мощности, подводимой к газу на участке дуги, и прироста мощности, теряемой на



Фиг. 6. Осциллограммы напряжения и яркости, $I = 150 \text{ а}$, $p = 10 \text{ н. см}^{-2}$. Яркость: а) сплошной анод, $G = 6.1 \text{ г сек}^{-1}$, $U = 336 \text{ в}$, длительность развертки $\tau = 4.2 \text{ мсек}$, б) $n = 7$, $a = 14.7 \text{ см}$, $G = 6$, $U = 505 \text{ в}$, $\tau = 4.6 \text{ мсек}$. Напряжение: в) сплошной анод, $G = 6$, $U = 360 \text{ в}$, $\tau = 1.3 \text{ мсек}$; г) $n = 7$, $a = 14.7$, $G = 5.9$; $U = 505 \text{ в}$, $\tau = 1.3 \text{ мсек}$; д) $n = 7$, $a = 14.7$, $G = 5.9$; $U = 510 \text{ в}$, $\tau = 2.6 \text{ мсек}$; е) $n = 8$, $a = 16.9$, $G = 5.8$, $U = 585 \text{ в}$, $\tau = 2.8 \text{ мсек}$.

участке I_1 . Сравнение кривых показывает, что с удлинением электрода этот предел быстро понижается. В то же время в плазмотроне с МЭВ при токах до 150 а такой предел не обнаруживается, прирост энтальпии нагретого газа возрастает линейно с током, а с ростом длины МЭВ также увеличивается. Так, например, при $I = 150 \text{ а}$, $C = 6 \text{ г сек}^{-1}$, $a = 16.9 \text{ см}$ прирост энтальпии в плазмотроне с МЭВ превышает приблизительно на 45 и 100% прирост энтальпии в однокамерном плазмотроне с длинами анода соответственно 18 и 30 см.

Таким образом, плазмотрон с МЭВ позволяет не только реализовать перечисленные выше (п. 3) преимущества его по сравнению с однокамерным плазмотроном, но и создает возможность одновременно получать более высокие температуры нагрева газа при одинаковых токах.

5. Пульсации. Известно, что шунтирование дуги приводит к пульсациям напряжения, мощности дуги и температуры нагреваемого газа. В ряде технических случаев применения плазмотронов пульсации параметров струи нагретого газа нежелательны [13]. Можно было ожидать, что в плазмотроне с МЭВ восходящие вольт-амперные характеристики будут сопровождаться значительным уменьшением размаха и увеличением частоты шунтирования. Это следует из невозможности шунтирования в области МЭВ и наличия повышенной температуры в зоне существования прианодного участка дуги.

Были сняты осциллограммы U и яркости потока на расстоянии от 8 до 9 мм от среза анода однокамерного плазмотрона и плазмотрона с МЭВ. Для этого использовались осциллографы ЭНО-1, ОК-17М и фотоумножитель ФЭУ-19. На фиг. 6 приведены полученные осциллограммы, где верхние линии соответствуют нулю сигнала (верхние линии искривлены при фотографировании выпуклого экрана ЭНО-1). Кривые $b \text{ г}$ и $b \text{ е}$ представляют собой осциллограммы переменной составляющей напряжения и сняты ОК-17 М.

Видно, что в случае однокамерного плазмотрона размах колебаний напряжения доходит до 40% от его среднего значения, а яркости — до 50%. Обработка большого количества аналогичных осциллограмм показала, что частота пульсаций составляет несколько кГц . В плазмотроне с МЭВ размах колебаний напряжения и яркости составляет величину порядка 8%, частота пульсаций имеет порядок 10^5 Гц .

Таким образом, плазмотрон с МЭВ может работать без крупномасштабных пульсаций напряжения и температур потока, связанных с шунтированием. С ростом тока и длины МЭВ, т. е. с ростом температуры в зоне шунтирования, пульсации становятся более плавными (фиг. 6 е). По-видимому, в таких условиях обычное понятие крупномасштабного шунтирования теряет смысл.

Поступила 29 XII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Маескер Н. Messung und Auswertung von Bogencharacteristiken (Ar, N₂). Z. Phys., 1960, Н. 4, В. 158.
2. Мскее Н. В. Dean R. C., Рутте А. On cooled anodes in contact with a laminar arc — heated flow. IEEE Trans. nucl. sci., 1964, VNS — 11, No. 1.
3. Харвей, Симкенс, Эдкок. Неустойчивость дуговых столбов. Ракетная техника и космонавтика, 1963, т. 1, № 3.
4. Татено Н., Сaito К. Anodic Phenomena in Nitrogen Plasma Jet. Japan. J. Appl. Phys., 1963, vol. 2, No. 3.
5. Даутов Г. Ю., Жуков, М. Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг. ПМТФ, 1965, № 2.
6. Смоляков В. Я. О некоторых особенностях горения электрической дуги в плазмотроне постоянного тока. ПМТФ, 1963, № 6.
7. Николаев А. В., Кулагин И. Д. Дуговая плазменная горелка и ее применение. Вопр. электр., 1960, вып. 9, сер. 1.
8. Neuman W. Charakteristiken von Argon — Plasmastrahlerzeugern fur Unterschallgeschwindigkeit. Exp. Techn. Phys., 1962, Н. 2.
9. Даутов Г. Ю., Дудников Ю. С., Сазонов М. И. Исследование плазмотрона с межэлектродной вставкой. Изв. СО АН СССР, Сер. техн. наук, 1965, вып. 3, № 10.
10. Даутов Г. Ю., Дудников Ю. С., Жуков М. Ф., Сазонов М. И. Распределение потенциала вдоль дуги в плазмотроне вихревой схемы. ПМТФ, 1965, № 5.
11. Тиходеев Г. М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. Изд., АН СССР, 1961.
12. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф. Критериальные обобщения характеристик плазмотронов вихревой схемы. ПМТФ, 1965, № 6.
13. Герман В. О., Морозов М. Г. Плазмотрон постоянного тока и некоторые результаты исследования его работы. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 2, № 5.