

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ДУГИ В КАНАЛЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ГАЗА

Г. М. Мустафин

(Новосибирск)

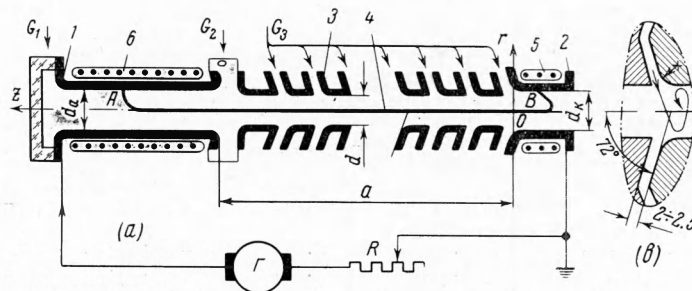
Исследуются характеристики электрической дуги в секционированном канале с распределенной подачей газа. Перспективность применения таких каналов в плазмотронах в качестве межэлектродной вставки показана в работах [1,2].

Получены вольт-амперные и тепловые характеристики дуги в более широком диапазоне изменения длины вставки, исследованы распределения потенциала и напряженности электрического поля дуги в зоне вставки. Показана возможность увеличения при помощи вставки напряжения дуги и среднемассовой энтальпии торможения нагреваемого газа в два-три раза по сравнению со случаем двухкамерного плазмотрона обычной схемы.

Обозначения

$U, в$ — напряжение дуги; $I, а$ — ток дуги; $V, в$ — потенциал дуги; $a, см$ — длина вставки; $E, в см^{-1}$ — продольная составляющая напряженности электрического поля в дуге; $\langle E \rangle, в см^{-1}$ — среднее значение E в зоне вставки; $G, г \cdot сек^{-1}$ — расход воздуха через дуговую камеру; $d_a, d, d_k, см$ — соответственно, внутренние диаметры анода, вставки и катода; $r, z, см$ — цилиндрические координаты; $Q_1, Q_2, Q_3, кет$ — соответственно, количества тепла, отводимые от внутреннего электрод, вставки и выходного электрода в 1 сек; η — тепловой к.п.д. плазмотрона; η_1, η_2, η_3 — величины Q_1, Q_2, Q_3 в % к мощности дуги; $T, ^\circ K$ — среднемассовая температура торможения потока газа на выходе из плазмотрона; $\Delta h, кдж / кг$ — среднемассовая энтальпия торможения потока газа в тех же условиях.

1. Экспериментальная установка. Для исследования дуги использовался плазмотрон, принципиальная схема которого показана на фиг. 1,а. Медный охлаждаемый водой электрод 1, выходной электрод 2 и изолированные между собой и от электродов секции вставки 3 образуют дуговую камеру плазмотрона. Полярность подключения электродов была обратной, т. е. выходной электрод служил катодом. Истечение газа осуществлялось в атмосферу, при этом давление в дуговой камере в области между анодом и первой секцией вставки изменялось в диапазоне 2—4 *атм* в зависимости от параметров плазмотрона.



Фиг. 1. Схема плазмотрона

Эксперименты проводились при $d_k = 1.4 см$, $d = 1 см$, $d_a = 1.2 см$. Длины внутреннего и выходного электродов соответственно равнялись 17.2 и 6 см. Для сравнения характеристик также были проведены эксперименты на двухкамерном плазмотроне с гладким выходным электродом. В этом случае длина выходного электрода равнялась 30 см. Длина вставки изменялась от 18 до 43 см. Секции вставки имели разную толщину и располагались по длине вставки группами в порядке убывания их толщины в направлении течения газа. Это диктовалось уменьшением потенциала пробоя между столбом дуги и секцией в направлении потока из-за уменьшения толщины слоя холодного газа в пробойном промежутке. В экспериментах использовались секции толщиной в 2, 1.5 и 1 см.

Воздух с расходом G_1 подавался во внутренний электрод через два тангенциальных отверстия диаметром 1.2 мм на расстоянии 2.5 см от оси плазмотрона. Расход G_2 поступал в дуговую камеру через четыре тангенциальных отверстия диаметром 1.5 мм на расстоянии 4.5 см от оси плазмотрона. Расход G_3 поступал в межсекционные пространства также через завихрительные кольца и распределялся через межсекционные зазоры величиной 2—2.5 мм вдоль дуговой камеры, как показано на фиг. 1,а, в.

Межсекционные завихрительные кольца имели по два тангенциальных отверстия диаметром 0,8 мм на расстоянии 2,0 см от оси плазматрона.

Общий расход воздуха $G = G_1 + G_2 + G_3$ изменялся от 10 до 20 гсек⁻¹. При этом отношение расходов $G_1 : G_2 : G_3$ равнялось 1 : 4,1 : 7,4.

Запуск плазматрона осуществлялся при помощи проволоки. После поджига дуга 4 занимала положение АВ. Движение дуговых пятен А и В по внутренним цилиндрическим поверхностям анода 1 и катода 2 обеспечивалось как вихревым движением газа вдоль камеры, так и магнитными полями соленоидов 5 и 6.

Температура охлаждающей воды измерялась ртутными термометрами с ценой деления 0,5° С. Расходы воды и воздуха определялись ротаметрами РС-5, РС-7 и РЭД модели № 3101. Напряжение и ток дуги регистрировались соответственно вольтметром М 366 класса точности 1,0 и прибором ЛМ-1 класса точности 0,5. Потенциалы изолированных секций относительно катода 2 измерялись при помощи электростатических вольтметров С-50 (шкала 1 и 3 кВ) класса точности 1,0 и С-95 (шкала 1,5 кВ) класса точности 1,5.

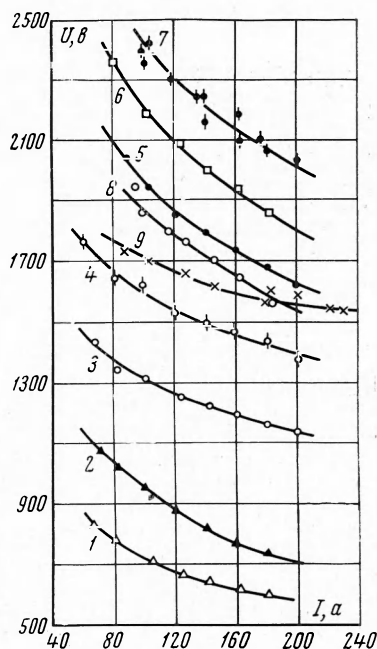
Эксперименты показали, что на стабилизацию дуги и пробойное напряжение между дугой и стенкой секции вставки оказывает существенное влияние аэродинамика потока газа, поступающего в межсекционные зазоры. В работе [1] межсекционные зазоры располагались перпендикулярно к оси плазматрона. В данной работе зазор между секциями располагался под углом 72° к оси, причем выход из зазора в канал делался плавным в направлении потока (фиг. 1, в). Это обеспечивало более плавное смещение потоков, привело к стабильной работе плазматрона и позволило провести исследование дуги в существенно большем диапазоне изменения ее длины. Кроме того, межсекционные изоляторы защищались от излучения. Замена внутреннего торцового электрода, использованного в [1], на полый цилиндрический и наложение магнитных полей на концевые участки дуги позволили длительно работать при незначительной эрозии электродов.

2. Вольт-амперные и тепловые характеристики. На фиг. 2 приведены характеристики $U-I$, полученные при изменении длины вставки от 18 до 43 см (кривые 3—9). Для сравнения там же нанесены характеристики $U-I$ двухкамерного плазматрона с гладким выходным электродом (кривые 1, 2). Кривые 1 и 8 соответствуют $G = 10$ гсек⁻¹, остальные $G = 15$ гсек⁻¹. Из фигур видно, что, увеличивая длину вставки при распределенной подаче газа в межсекционные зазоры, можно значительно повысить напряжение дуги. Так, например, кривые 2 и 7 фиг. 2 показывают, что при $I = 180$ а, напряжение дуги в плазматроне со вставкой примерно в 2,8 раза превышает напряжение дуги в плазматроне без вставки.

Как видно, в отличие от данных работы [1] характеристики $U-I$ падающие. Одной из возможных причин формирования падающих характеристик $U-I$ является шунтирование дуги во внутреннем электроде. Для выявления роли шунтирования был проведен эксперимент с торцовым внутренним электродом (кривая 9, фиг. 2). Сравнение кривых 5 и 9 показывает, что в последнем случае напряжение дуги и крутизна характеристики $U-I$ несколько уменьшаются, однако характеристика остается падающей. Причина формирования характеристики такого вида будет рассмотрена ниже.

Как видно из фиг. 2, напряжение дуги существенно зависит от расхода газа через дуговой канал. Например, сравнение кривых 7 и 8 показывает, что для тока $I = 180$ а при увеличении расхода в 1,5 раза (с 10 до 15 гсек⁻¹) напряжение дуги в плазматроне со вставкой возрастает на 490 в, в то время как для двухкамерного плазматрона с гладким выходным электродом (кривые 1 и 2) при тех же условиях увеличение напряжения составляет всего 135 в.

Как известно, в обычном плазматроне с самоустанавливающейся дугой с ростом расхода газа растет как длина дуги, так и напряженность электрического поля участка столба, расположенного по оси канала. Оба эти факта способствуют росту напряжения дуги. В плазматроне же со вставкой длина дуги от расхода газа почти не зависит, следовательно, рост U с ростом G обусловлен ростом напряженности электрического поля дуги. Поскольку в плазматроне со вставкой дуга длиннее, чем в обычном плазматроне,



Фиг. 2. Характеристики $U-I$ дуги; 3 — $a = 18,8$ см; 4 — $a = 23,2$ см; 5 и 9 — $a = 33$ см; 6 — $a = 38$ см; 7 и 8 — $a = 43$ см

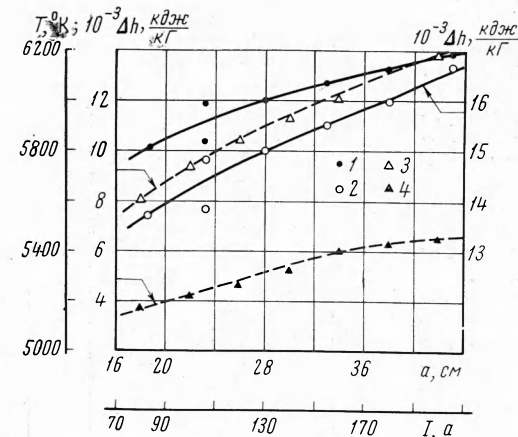
то даже небольшой рост напряженности электрического поля приводит к большому увеличению U дуги. Кроме того, в выходном конце дуги, как это будет показано ниже, напряженность электрического поля довольно большая и существенно зависит от расхода газа.

Дуга в обычном плазмотроне относительно короткая и в исследованном диапазоне параметров высокотемпературная дуговая плазма занимает лишь небольшую зону у оси канала, а основная часть G проходит мимо дуги, не нагреваясь до высокой температуры.

Этим, в частности, объясняется сравнительно малый прирост напряжения самоустанавливающейся дуги с увеличением расхода газа. В плазмотроне же со вставкой высокотемпературная часть потока занимает большую зону, т. е. большая часть G взаимодействует с дугой. Всем вышперечисленным объясняется столь значительный рост U с ростом G в плазмотроне со вставкой.

При $a \geq 33$ см характеристики $U-I$ были сняты также и для прямой полярности. В пределах погрешности измерений при токах 100—200 а они совпали с $U-I$ -характеристиками дуги при обратной полярности, что является существенным свойством характеристик $U-I$ дуги в плазмотроне со вставкой и говорит о том, что при длинных вставках и больших токах дуга почти фиксирована по длине.

Зависимость среднемассовой температуры торможения нагреваемого газа на выходе из плазмотрона от длины вставки представлена на фиг. 3 (кривая 1). Из нее видно, что



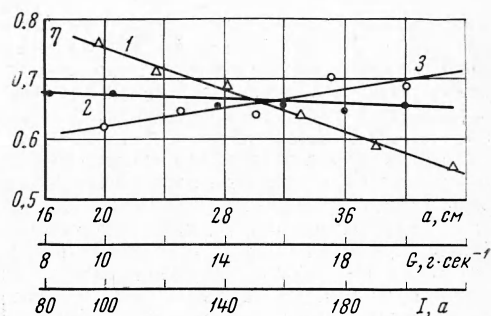
Фиг. 3. Зависимости температуры торможения и среднемассовой энтальпии от I, a ; стрелки указывают, какой ординате соответствует данная кривая; точки 1 и 2 при $I = 180, G = 10$, точки 3 при $a = 33, G = 16$, точки 4 при $G = 15$

для данного значения тока по мере увеличения длины вставки скорость возрастания среднемассовой температуры выходящего газа уменьшается. Полученная зависимость $T(a)$ определяется интегральным энергетическим балансом плазмотрона и характером зависимости энтальпии газа от его температуры.

Зависимость прироста среднемассовой энтальпии торможения от длины вставки представлена кривой 2. Как видно, даже при больших длинах вставки Δh продолжает расти. Это говорит об эффективности использования вставки, как средства получения газового потока с высокой энтальпией. Замедление роста температуры, видное из фиг. 3, связано с известной характерной зависимостью энтальпии воздуха от его температуры.

Кривые 3 и 4 фиг. 3 представляют зависимости $\Delta h(I)$ соответственно для плазмотронов со вставкой и обычного двухкамерного с гладким выходным электродом. Как видно, в исследованном диапазоне изменения I прирост Δh с ростом тока более значителен в плазмотроне со вставкой, чем в плазмотроне обычной схемы, а абсолютное значение ее лежит выше. Так, например, кривые 3 и 4 фиг. 3 показывают, что при $I = 200$ а Δh для плазмотрона со вставкой более чем в два раза превышает Δh для плазмотрона без вставки.

На фиг. 4 представлены зависимости к.п.д. двухкамерного плазмотрона со вставкой от длины последней, тока дуги и общего расхода воздуха. Как и следовало ожидать, к.п.д. с ростом длины вставки падает, с ростом расхода возрас-



Фиг. 4. Зависимости к. п. д. плазмотрона от длины вставки (кривая 1 при $I = 180, G = 15$), тока дуги (кривые 2 при $a = 33, G = 15$) и расхода воздуха (кривая 3 при $I = 180, a = 33$)

тает. Особенностью данного плазмотрона является то, что в исследованном диапазоне изменения параметров к.п.д. его не зависит от тока.

Можно предположить, что на формирование полученной зависимости $\eta(I)$ существенно влияет характер течения газа в пристеночной зоне канала исследованного плазмотрона.

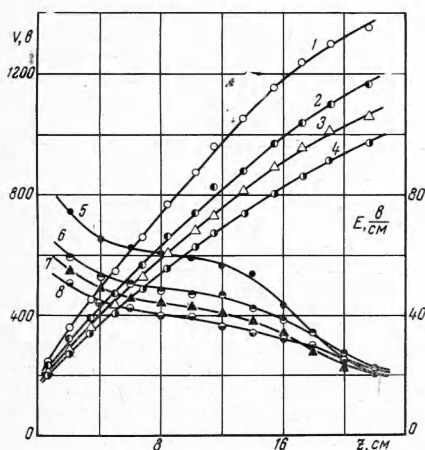
Анализ характеристик $U-I$ и полученные зависимости $\eta(I)$ показывают, что дальнейшее увеличение T возможно как за счет увеличения тока дуги, так и увеличения длины вставки.

Следует отметить, что значения к.п.д., представленные на фиг. 4, несколько занижены по сравнению с его максимально возможным значением из-за лишней длины выходного электрода [1].

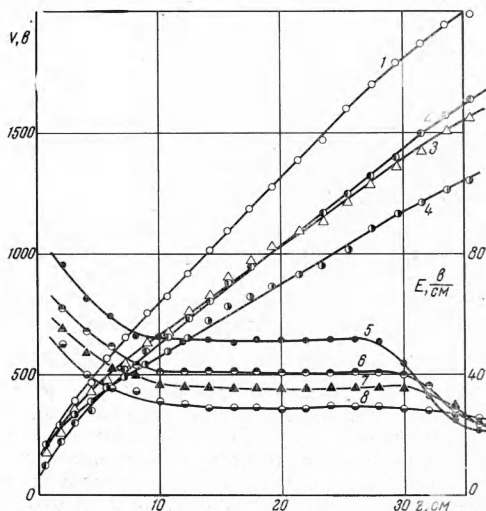
В таблице для различных значений a приведены тепловые потери через отдельные элементы плазмотрона при $I = 180$ а, $G = 10$ г·сек⁻¹. Из нее видно, что за счет укорачивания выходного электрода в два раза к.п.д. плазмотрона можно повысить еще примерно на 4%. Видно также, что с ростом длины вставки потеря тепла через нее возрастает и к.п.д. плазмотрона главным образом определяется этой потерей.

a , см	U , в	Q_1 , кет	Q_2 , кет	Q_3 , кет	η_1 , %	η_2 , %	η_3 , %
18.8	975	5.57	27.27	15.22	3.15	15.43	8.61
23	1230	5.06	50.36	20.09	2.27	22.63	9.03
33	1365	5.09	69.05	20.57	2.06	27.96	8.33
38	1530	5.64	91.27	22.75	2.04	32.98	8.22

3. Распределения потенциала и напряженности электрического поля. Определенные распределения потенциала производилось путем измерения потенциалов изолированных секций вставки, приобретающих потенциал дуги за счет несамостоятельного разряда между дугой и стенкой секций вставки через слой относительно холодного газа. Методика таких измерений подробно описана в [3,4].



Фиг. 5



Фиг. 6

Фиг. 5. Распределения V (кривые 1, 2, 3, 4) и E (кривые 5, 6, 7, 8) в зоне вставки, $a = 23.2$ см; при этом $I = 100$ а для кривых 1, 5, 3, 7; $I = 180$ а для кривых 2, 6, 4, 8; $G = 15$ для кривых 1, 5, 2, 6; $G = 10$ для кривых 3, 7, 4, 8

Фиг. 6. Распределения V (кривые 1, 2, 3, 4) и E (кривые 5, 6, 7, 8) в зоне вставки, $a = 38$ см; параметры кривых те же, что и на фиг. 5

На фиг. 5 и 6 приведены результаты измерений на плазмотроне схемы фиг. 1, а. По оси z отложено расстояние от внутреннего торца катода 2 до рассматриваемого сечения вдоль оси канала (фиг. 1, а). Потенциал катода принят за нуль.

В [4] при небольших z была получена линейная зависимость V от z . В данной работе исследовано распределение в более широком диапазоне изменения z и в отличие от результатов [4], имеются существенно нелинейные участки. Нелинейность особенно хорошо заметна вблизи катода и на некотором расстоянии от анода. На этих же фигурах приведены распределения осевой составляющей напряженности электрического поля в дуге в зоне вставки. Распределения E получены путем дифференцирования кривой $V(z)$ по z . Из полученных данных видно, что с ростом расхода E растет.

На фиг. 7 представлено распределение E для дуги в плазмотроне с торцовым внутренним электродом. Хорошо видно, что имеются четыре характерные области изменения E по z .

Область I. Эта область была исследована в работе [4]. Там же приведена формула для расчета напряженности

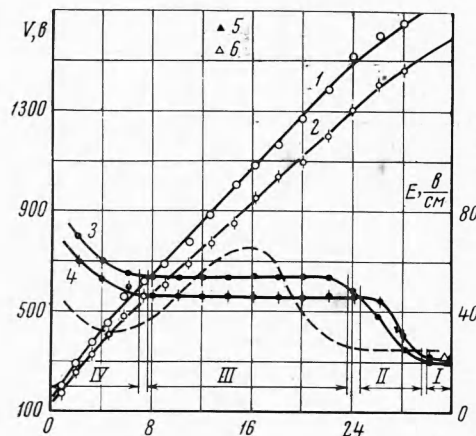
$$E = -G^{0.15} (5160 - 14.8 + 0.073z^2) \quad (3.1)$$

Здесь

$$[E] = \text{вм}^{-1}, \quad [G] = \text{кг} \cdot \text{сек}^{-1}, \quad d = 0.01 \text{ м}$$

Характерной чертой этой области является независимость E от z . Приведенные точки 5 и 6 определены по формуле (3.1). Как видно, формула (3.1) хорошо согласуется с полученными здесь значениями E .

Сравнение данных [4] фиг. 7 показывает, что наличие распределенной подачи газа значительно сокращает протяженность области I. По-видимому, это объясняется дополнительной турбулизацией течения в канале потоками газа, поступающими через зазоры между секциями и наличием кольцевых щелей. Если эта гипотеза в дальнейшем подтвердится, то появляется новая возможность управления свойствами дуги путем искусственного изменения турбулентности потока газа.



Фиг. 7. Распределения V (кривые 1, 2) и E (кривые 3, 4) в зоне вставки, $a = 33$ см; $G = 15 \text{ г} \cdot \text{сек}^{-1}$; при этом $I = 100 \text{ а}$ для кривых 1, 3 и точки 5; $I = 170 \text{ а}$ для кривых 2, 4 и точки 6

Область II. Характерной чертой этой области является рост напряженности электрического поля в направлении течения газа. По гипотезе Даутова Г. Ю. и Сазонова М. И. такой рост $E(z)$ объясняется характерным распределением коэффициентов турбулентного переноса по радиусу канала электрода и увеличением радиуса дуги вниз по потоку. Кроме того, в данном случае рост $E(z)$ объясняется и увеличением расхода воздуха в направлении его течения. Следует отметить, что в областях I и II при $I > 100 \text{ а}$ $E(z)$ растет с ростом I .

Область III. Характерной чертой этой области является независимость E от z . Такое постоянство имеет место при постепенном росте расхода газа в направлении его течения. В отсутствие распределенной подачи в этой области следует ожидать уменьшения E в направлении течения газа. В отличие от областей I и II в диапазоне тока 80—200 а E уменьшается с ростом I .

В длинных дугах участок дуги, соответствующий области III фиг. 7, имеет наибольшую протяженность. При этом, очевидно, что основные характеристики дуги будут определяться падающими характеристиками $E-I$ дуги в области III.

Область IV. Характерной чертой этой области является рост E в направлении течения газа. Большое значение E в этой области было объяснено в работе [5] влиянием собственного магнитного поля и вращением конца дуги.

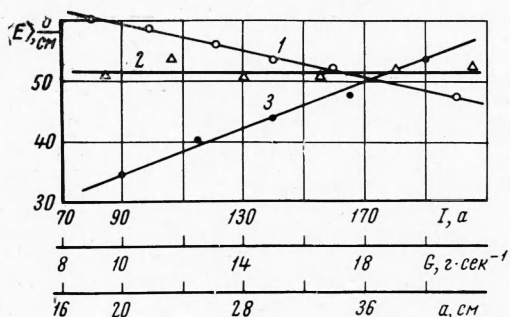
Однако в данном случае имеется дополнительное влияние внешнего магнитного поля, создаваемого соленоидом 5 (фиг. 1, а).

Эти же характерные области присущи распределениям E , приведенным на фиг. 5 и 6 для плазмотрона с полым внутренним электродом. Небольшое отличие заключается лишь в том, что область I практически находится внутри анода и поэтому мало отражена в приведенных графиках.

Как видно из приведенных графиков, с уменьшением длины вставки уменьшается протяженность области III, тогда как протяженности остальных областей остаются практически без изменений. При коротких вставках область III отсутствует, а области II и IV перекрываются (фиг. 5).

Исходя из вышеприведенных результатов, можно предположить следующую качественную картину изменения $E(z)$ в направлении течения газа для случая постоянного расхода газа вдоль канала. На начальном участке E постоянна, далее растет в направлении течения газа, достигает максимума, после этого уменьшается, а затем в области, подверженной действию вращающегося конца дуги, снова возрастает (пунктирная линия на фиг. 7)

Фиг. 8. Зависимости средней напряженности дуги в зоне вставки от тока (кривая 1 при $a = 33$, $G = 16$), длины вставки (кривая 2 при $I = 100$, $G = 15$) и от расхода воздуха (кривая 3 при $I = 180$, $a = 33$)



Следует отметить еще одно характерное свойство дуги в исследованном плазмотроне со вставкой. Оно заключается в том, что средняя напряженность дуги в зоне вставки не зависит от длины последней, растет с ростом расхода и уменьшается с ростом тока в диапазоне 80—200 а (фиг. 8). В исследованном диапазоне изменения параметров средняя напряженность составляла 30—60 в·см⁻¹, что значительно превышает приведенные в [4] значения напряженности для короткой дуги в канале без распределенной подачи газа.

Автор благодарен Г. Ю. Даутову, М. Ф. Жукову и Ю. С. Дудникову за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе.

Поступила 26 I 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Даутов Г. Ю., Дудников Ю. С., Жуков М. Ф., Мустафин Г. М., Сазонов М. И. Характеристики плазмотрона с межэлектродной вставкой. ПМТФ, 1967, № 1.
2. Da utov G. Ju., Dudnikov Ju. S., Zhukov M. F., Mustafin G. M. Investigation of stabilized arc in the gas flow channel. Eighth International conference on phenomena in ionized gases. Vienna, 1967.
3. Даутов Г. Ю., Дудников Ю. С., Сазонов М. И. Исследование плазмотрона с межэлектродной вставкой. Изв. СО АН СССР, 1965, № 10, вып. 3.
4. Даутов Г. Ю., Дудников Ю. С., Сазонов М. И., Жуков М. Ф. Распределение потенциала вдоль дуги в плазмотроне вихревой схемы. ПМТФ, 1965, № 5.
5. А нь ша ков А. С., Даутов Г. Ю., Мустафин Г. М., Петров А. П. Исследование пульсаций в плазмотроне с самоустанавливающейся дугой. ПМТФ, 1967, № 1.