

УДК.537.523.5

РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПАРОВИХРЕВЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ. АВТОПЛАЗМОТРОНЫ

Б.И. МИХАЙЛОВ

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск*

Обсуждается возможность регенерации тепла в паровихревых электродуговых плазмотронах. Вводится понятие степени регенерации для этих устройств. Представлены полученные зависимости прироста коэффициента полезного действия от полноты регенерации тепла, теплового совершенства плазмотрона и энтальпии пара на входе в него. Рассмотрены различные схемы водопитания автоплазмотронов. Показано, что при генерировании высокоэнтальпийной плазмы следует использовать неполную регенерацию тепла. Приводятся экспериментальные результаты, полученные на разработанных автором автоплазмотронах. Статья является обобщением работ по данной проблеме.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность электродугового генератора плазмы как и любого теплоэнергетического аппарата характеризуется тепловым коэффициентом полезного действия. В зависимости от режима работы (величины тока, расхода плазмообразующего тела, конструктивных особенностей и др.) его величина колеблется в очень широких пределах — от нуля (для безрасходных физических устройств) и до величин, близких к единице (в наиболее совершенных плазмотронах). Но если говорить о расчетных режимах работы технологических плазмотронов, то этот интервал сужается до значений $0,7 \div 0,9$.

Отличие теплового КПД от единицы объясняется тем, что не вся энергия электрической дуги идет на нагрев плазмообразующего тела и превращение его в плазму. Часть ее передается стенке камеры и выводится из системы с охлаждающей водой. В подавляющем большинстве случаев эти потери тепла совершенно оправданы, т. к. не будь охлаждения, стенки электродуговой камеры просто бы расплавились.

Некоторые технические приемы в плазмотронной практике позволяют существенно снизить тепловые потери. К ним в первую очередь следует отнести метод газовой пристенной завесы с помощью межсекционного вдува в плазмотронах с межэлектродными вставками [1]. При этом происходит непрерывное оттеснение прогреваемого пограничного слоя от стенки внутрь потока и замена его новым, что сопровождается существенным уменьшением потока тепла в стенку. То есть происходит как бы частичная регенерация тепла в пространстве, занятом пограничным слоем.

Другой разновидностью регенеративного цикла является регенерация тепла с помощью пористого вдува [2]. Для этого часть стенки камеры выполняется из пористого материала, через поры которого плазмообразующее тело вводится непосредственно в электродуговую камеру, отбирая тепло от стенки, нагретой за счет

лучистого и конвективного теплообмена с дугой. Это дает определенный прирост КПД. Несмотря на некоторые недостатки (заплавление пор, сложность поджига дуги и др.) способ находит некоторое применение.

Весьма интересным способом регенерации тепловых потерь в стенке дуговой камеры является использование их для предварительного подогрева рабочего тела перед впуском его в плазмотрон. При этом вместо равномерно распределенного по длине пористой втулки радиального вдува плазмообразующей среды осуществляется подача ее в плазмотрон с закруткой. Это позволяет сохранить все достоинства плазмотронов линейной схемы, а именно высокую эффективность осевой стабилизации дуги, долговечность стенок начального участка, простоту поджига дуги и др., и добавить к ним ощутимый прирост теплового коэффициента полезного действия. Этот способ годится для всех применяемых в качестве плазмообразующих сред, но наиболее эффективным он оказывается при использовании в качестве последней — воды. Вода в силу ее аномально больших значений удельной теплоемкости и скрытой теплоты парообразования позволяет регенерировать небольшим ее расходом практически все тепло, поглощаемое стенкой электродуговой камеры плазмотрона. Это значительно повышает тепловой КПД плазмотрона.

1. СЕМЕЙСТВО ПАРОВИХРЕВЫХ АВТОПЛАЗМОТРОНОВ

Паровихревой плазмотрон со встроенным в стенку парогенератором, который за счет тепловых потерь вырабатывает для данного плазмотрона плазмообразующий водяной пар, называется автоплазмотроном [3]. Создание автоплазмотрона — это естественное развитие семейства паровихревых плазмотронов с внешним паробеспечением.

Паровихревые плазмтроны первого поколения требуют для своей работы внешнего источника сухого перегретого водяного пара — парогенератора. Существование на некоторых предприятиях централизованной системы паробеспечения упрощает задачу, сводя ее к необходимому перегреву пара и точному дозированию его при подаче в плазмотрон. Отсутствие же такой централизованной системы требует индивидуального парогенератора. Это несколько усложняет эксплуатацию плазмотронов и сдерживает их более широкое использование. Поэтому разработка электродуговых генераторов пароводяной плазмы регенеративного типа (автоплазмотронов) целесообразна и актуальна.

Автономная система парогенерации автоплазмотронов замещает собой сразу две системы жизнеобеспечения обычных паровихревых плазмотронов — систему охлаждения и внешнюю систему паробеспечения. Она включает в себя систему регулируемой подачи дистиллированной или химически очищенной воды и систему контроля температуры образующегося пара на входе в плазмотрон.

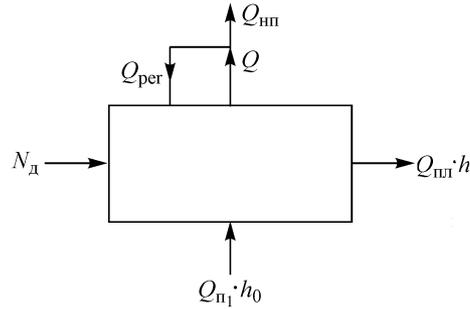
В соответствии с традиционными представлениями о парогенераторах, парогенератор, встроенный в конструкцию автоплазмотрона можно представить состоящим из трех последовательных участков: экономайзерного, испарительного и пароперегревательного. Протяженности каждого из них определяются с помощью уравнения баланса энергии.

Представим пароводяной плазмотрон в виде черного ящика (рис. 1) и запишем для него баланс энергии в виде

$$N_{\text{д}} + G_{\text{п1}}h_0 + G_{\text{п2}}h_0 = G_{\text{пл}}h + (1 - \eta)(N_{\text{д}} + G_{\text{п1}}h_0), \quad (1)$$

где $N_{\text{д}}$ — мощность дуги, $G_{\text{п1}}$, $G_{\text{п2}}$, $G_{\text{п}}$ — секундные расходы пара, поступающие в паровихревой плазмотрон от внешнего парогенератора и от внутреннего регенеративного соответственно; $G_{\text{пл}}$ — плазмопроизводительность плазмотрона

Рис. 1. Схема энергопотоков через плазмотрон ($Q_{\text{нп}}$ — невосполнимые потери тепла, $Q_{\text{нп}} = Q - Q_{\text{рег}}$, $Q = (1 - \eta)(N_{\text{д}} + G_{\text{п1}} \cdot h_0)$, $Q_{\text{рег}} = G_{\text{п2}} \cdot h_0$).



$G_{\text{п1}} \cdot h = Q_{\text{п1}}$ — тепловая мощность струи плазмы; h_0, h — энтальпия пара на входе в плазмотрон и плазмы на выходе из него соответственно; η — КПД паровихревого плазмотрона без регенерации тепла, который может быть рассчитан по формуле из работы [4]:

$$\bar{\eta} = \frac{1-\eta}{\eta} = 3,02 \cdot 10^{-6} \left(\frac{I^2}{GD} \right)^{0,32} \left(\frac{G}{D} \right)^{-0,57} (pD)^{0,40} (1 + 1,2K_y) \left(1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\bar{l}}{\bar{L}} \right)^{0,5}.$$

При регенерации невосполнимые потери тепла снижаются до величины $Q_{\text{нп}} = (1 - \eta_A)(N_{\text{д}} + G_{\text{п1}} h_0)$, где η_A — КПД плазмотрона с регенерацией тепла, определяемый по формуле

$$\eta_A = 1 - \frac{(1 - \eta)(N_{\text{д}} + G_{\text{п1}} h_0) - G_{\text{п2}} h_0}{N_{\text{д}} + G_{\text{п1}} h_0}. \quad (2)$$

Для оценки полноты регенерации тепла в паровихревом автоплазмотроне целесообразно ввести коэффициент регенерации β , определяемый в виде отношения мощности, расходуемой на генерацию необходимого для работы плазмотрона количества водяного пара $G_{\text{п}}$, к мощности всех тепловых потерь:

$$\beta = \frac{G_{\text{п}} h_0}{(1 - \eta)(N_{\text{д}} + G_{\text{п1}} h_0)}. \quad (3)$$

В зависимости от величины коэффициента регенерации β можно все паровихревые плазмотроны подразделить на:

- автоплазмотроны с полной регенерацией тепла, когда $\beta \cong 1$;
- автоплазмотроны с неполной регенерацией тепла, когда $\beta < 1$;
- плазмотроны без регенерации, если $\beta = 0$.

Режим работы автоплазмотрона характеризуется следующими параметрами:

$$G_{\text{п1}} = 0, G_{\text{п2}} = G_{\text{п1}}, 0 < \beta \leq 1.$$

В этих условиях уравнения (1, 2 и 3) переписутся в следующем виде:

$$N_{\text{д}} + G_{\text{п}} h_0 = G_{\text{п1}} h_0 + (1 - \eta) N_{\text{д}}, \quad (1^*)$$

$$\eta_A = 1 - \frac{(1 - \eta) N_{\text{д}} - G_{\text{п}} h_0}{N_{\text{д}}}, \quad (2^*)$$

$$\beta = \frac{G_{\text{п}} h_0}{(1 - \eta) N_{\text{д}}}. \quad (3^*)$$

Из уравнения баланса энергии (1*) с учетом (3*) можно найти безразмерную энтальпию $\bar{h} = \frac{h}{h_0}$ пароводяной плазмы в виде

$$\bar{h} = 1 + \frac{\eta}{(1-\eta)\beta}. \quad (4)$$

Для случая полной регенерации тепла при $(1-\eta)N_d = G_n h_0$, т. е. когда $\beta = 1$, безразмерная энтальпия плазмы оказывается равной

$$\bar{h} = \frac{1}{1-\eta}. \quad (4^*)$$

Выражение (2*) с помощью (3*) приводится к виду

$$\eta_A = \eta + (1-\eta)\beta. \quad (5)$$

Если $\beta \cong 1$, то $\eta_A \approx 1$. Но этот результат практически недостижим, т. к. какие-то потери тепла в окружающую среду обязательно имеют место.

Таким образом, при работе с коэффициентом регенерации β КПД автоплазмотрона увеличивается на величину

$$\Delta\eta = (1-\eta)\beta \quad (6)$$

по сравнению с КПД плазмотрона без регенерации.

Естественно, что прирост $\Delta\eta$ возрастает пропорционально коэффициенту β , т. к. при увеличении β доля регенерации потерь растет. С увеличением η прирост его от регенерации снижается, т. к. сами потери тем меньше, чем КПД η выше (рис. 2).

При этом энтальпия согласно уравнению (4) ведет себя противоположным образом по сравнению с приростом КПД. Так, при $\eta = \text{idem}$ она тем больше, чем меньше β , и ее минимальное значение, равное $\bar{h} = \frac{1}{1-\eta}$, достигается при полной регенерации.

Достижимые значения приведенной энтальпии пароводяной плазмы \bar{h} в автоплазмотронах с разными η и при различных коэффициентах регенерации β , рассчитанные по формуле (4), представлены в таблице. Из нее следует, что с рос-

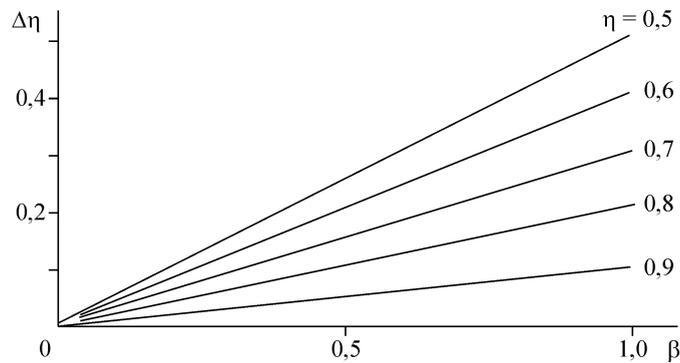


Рис. 2. Зависимость выигрыша в КПД от коэффициента регенерации тепла β и теплового КПД плазмотрона η .

η	Коэффициент регенерации, β					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,5	11,00	6,00	3,50	2,67	2,25	2,00
0,6	16,00	8,50	4,75	3,50	2,88	2,50
0,7	24,30	12,67	6,83	4,89	3,92	3,33
0,8	41,00	21,00	11,00	7,67	6,00	5,00
0,9	91,00	46,00	23,50	16,00	12,25	10,00
0,95	191,00	96,00	48,50	32,67	24,75	20,00

том η энтальпия \bar{h} плазменной струи на выходе из плазмотрона повышается. Уменьшение при этом коэффициента регенерации β делает этот процесс еще более ощутимым.

С ростом β энтальпия плазмы на выходе из плазмотрона уменьшается (рис. 3). Это происходит потому, что снижается избыток мощности плазмотрона, идущий на дальнейший перегрев плазмы. И, наоборот, при уменьшении β энтальпия растет, т. к. мощность на перегрев того же количества пара возрастает.

Влияние теплового совершенства плазмотрона, т. е. коэффициента полезного действия η , на энтальпию очевидно. С его ростом энтальпия плазмы увеличивается, т. к. энергия электрической дуги используется лучше.

Для большинства химических технологий водяной пар должен быть полностью диссоциирован и частично ионизован, т. е. его температура и энтальпия должны быть соответственно равными 4000 К и 50 кДж/г.

Оценки показывают, что для автоплазмотрона в реальных условиях ($\eta \approx 0,7$, $h_0 \approx 3$ кДж/г) в случае полной регенерации тепла, т. е. с $\beta \approx 1$ эти параметры недостижимы. Необходимо переходить на режим работы с $\beta < 1$. Разрешая уравнение (4) относительно β , получим необходимое значение β :

$$\beta = \frac{\eta}{(1 - \eta)(\bar{h} - 1)}. \quad (7)$$

Расчет по этой формуле показывает, что для $\eta \approx 0,7$ и $\bar{h} = \frac{50}{3} = 16,7$ значение коэффициента регенерации должно составлять $\beta = 0,15$. При $\beta \approx 1$ выходная энтальпия составила бы всего 10 кДж/г, что соответствует (рис. 4) температуре 2700 К, и этого явно недостаточно для технологического процесса.

Удельная мощность автоплазмотрона, определенная с помощью формулы (3), для генерирования плазмы при $\beta = 0,15$ равна

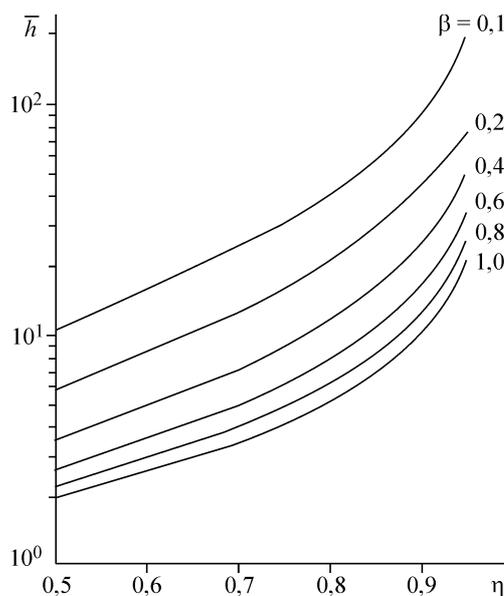


Рис. 3. Зависимость приведенной энтальпии пароводяной плазмы от теплового совершенства плазмотрона и степени регенерации тепла.

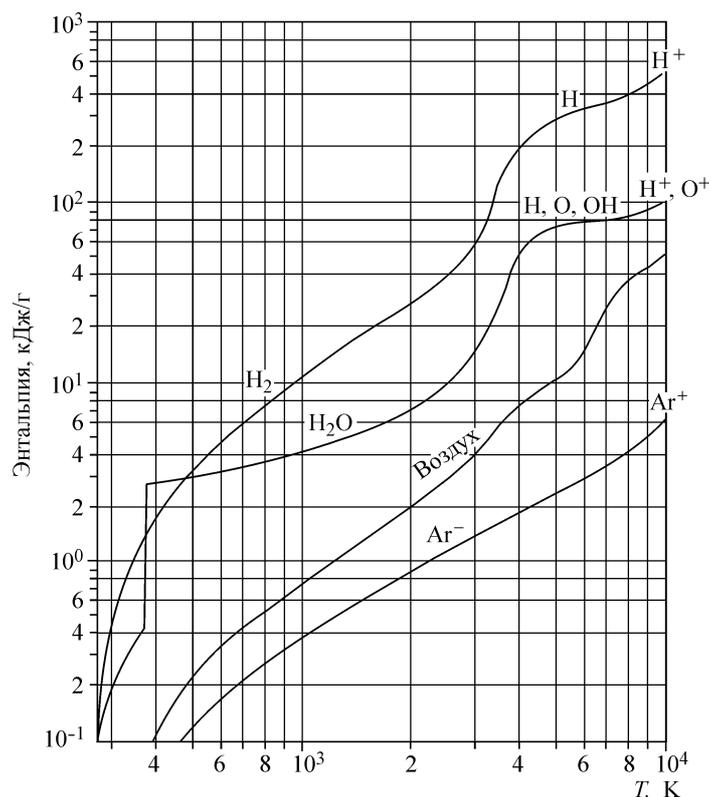


Рис. 4. Энтальпия некоторых сортов плазмы в зависимости от температуры при атмосферном давлении.

$$N_{д, уд} = \frac{N_{д}}{G_{п}} = \frac{h_0}{(1 - \eta)\beta} = \frac{3}{(1 - 0,7) \cdot 0,15} = 66,7 \text{ кДж/г.}$$

Его КПД при этом равен $\eta_A = \frac{h}{N_{д, уд}} = \frac{50}{66,7} \cong 0,745$, что на величину регенерационного прироста $\Delta\eta = (1 - \eta)\beta = (1 - 0,7) \cdot 0,15 = 0,045$ больше, чем без регенерации.

Таким образом, рассмотренный автоплазмотрон помимо обеспечения самого себя водяным паром экономически оказывается эффективнее плазмотрона без регенерации.

На практике такие автоплазмотроны конструктивно имеют внутренний парогенератор, встроенный в стенку начального участка дуговой камеры. В нем регенерирует $G_{п} \cdot h_0$ количества тепла.

Наиболее теплонапряженная часть камеры выходной электрод — интенсивно охлаждается водой, что обеспечивает надежную работу плазмотрона в целом. Здесь происходит догрев водяного пара, полученного в зоне регенерации, до нужной температуры.

2. СХЕМЫ ВОДОПИТАНИЯ АВТОПЛАЗМОТРОНОВ

В зависимости от режима работы автоплазмотрона и степени регенерации тепла в нем возможно использование нескольких схем водопитания.

Стехиометрическая схема водопитания

Согласно этой схеме количество подаваемой в рубашку охлаждения автоплазмотрона воды в точности равняется количеству образующейся пароводяной плазмы (рис. 5, а). При такой схеме питания тепловой КПД автоплазмотрона может составлять 90–95 %.

Количество тепловой энергии дуги, поглощаемое стенкой, реализуется для парогенерации плазмообразующей среды:

$$(1 - \eta) N_d = h_0 \cdot G_{\text{п}}.$$

Отсюда $h = \frac{h_0}{(1 - \eta)}$ и $N_d = \frac{h_0}{1 - \eta} G_{\text{п}}$, поскольку $G_{\text{пара}} = G_{\text{пл}} = G_{\text{п}}$.

Таким образом, при полной регенерации тепла в паровихревых плазмотронах энтальпия генерируемой пароводяной плазмы находится в пределах

$$h = h_1 \div h_2.$$

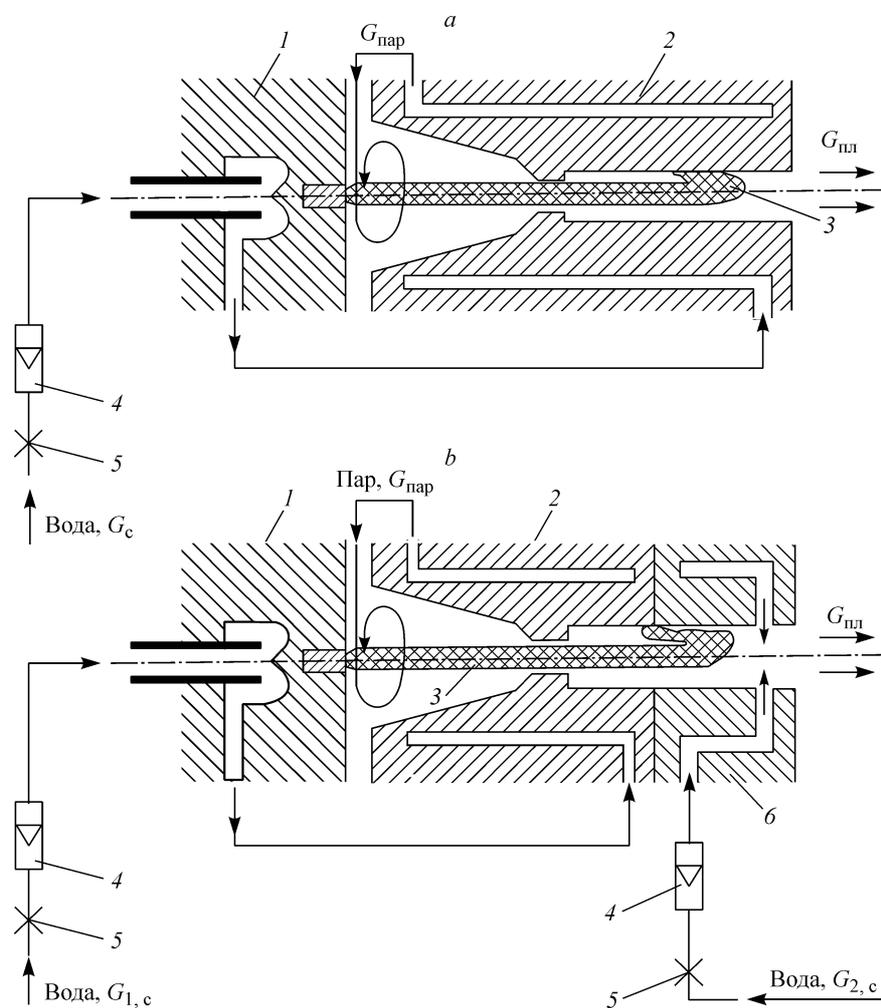


Рис. 5. Стехиометрическая схема водопитания автоплазмотрона с полной регенерацией тепла.

а — $G_c = G_{\text{пар}} = G_{\text{пл}}$, б — $G_{\text{пар}} = G_{1,c} < G_{\text{пл}}$, $G_{1,c} + G_{2,c} = G_{\text{пл}}$, 1 — катод, 2 — парогенерирующий анод, 3 — дуга, 4 — ротаметр, 5 — вентиль, 6 — сопловая часть анода).

Здесь

$$h_1 = \frac{h_{0,\min}}{(1-\eta)}, \quad h_2 = \frac{h_{0,\max}}{(1-\eta)}, \quad (8)$$

а требуемая мощность плазмотрона находится соответственно в пределах

$$N = N_1 \div N_2,$$

$$\text{где } N_1 = \frac{h_{0,\min}}{(1-\eta)} G_{\text{п}}, \quad N_2 = \frac{h_{0,\max}}{(1-\eta)} G_{\text{п}}.$$

Из (8) следует, что энтальпия пароводяной плазмы на выходе из плазмотрона прямо пропорциональна начальной энтальпии пара h_0 на входе в автоплазмотрон и обратно пропорциональна относительным потерям тепла в стенку. Величина η очень сильно влияет на достижимое значение энтальпии.

Для заданного значения η диапазон достижимых значений энтальпии h при полной регенерации тепла в автоплазмотронах сравнительно неширок. Это является следствием ограничений, накладываемых на величину энтальпии пара, поступающего в плазмотрон:

$$h_{0,\min} < h_0 < h_{0,\max}.$$

Снизу величина h_0 ограничена значением $h_{0,\min}$, которое определяется по минимальной температуре пара, близкой к порогу конденсации, принимаемой нами равной 150 °С. При этом $h_{0,\min} = 2696$ Дж/г. Максимальное значение $h_{0,\max}$ вычисляется из соображений жаростойкости конструкции парогенераторного участка, завихрительного устройства и межэлектродного изолятора.

Показателем, отражающим диапазон режимов автоплазмотрона, является энтальпийный коэффициент равный отношению $\alpha \equiv h_{\max}/h_{\min}$. Из формулы (8) и при пренебрежении разницей в η следует, что

$$\alpha \equiv h_{\max}/h_{\min}.$$

Следовательно, если жаростойкость автоплазмотрона определяет максимальную температуру пара на входе в 400 °С, то $\alpha \equiv 1,186$. При $T_{n,\max} = 800$ °С коэффициент широты диапазона α становится равным 1,48, т. е. повышение жаропрочности конструкции плазмотрона существенно расширяет его выходные характеристики, а значит, и технологические возможности.

Энтальпийный диапазон $\alpha = h_2/h_1$ автоплазмотрона можно немного расширить за счет уменьшения h_1 . Причем снижение минимальной энтальпии осуществляется при $\beta = 1$, т. е. в режиме полной регенерации тепла. Для этого количество подаваемой в автоплазмотрон воды превышает ее количество, необходимое для производства пара $G_{\text{пар}}$. Согласно этой схеме водопитания (рис. 5, *b*), лишь часть охлаждающей воды $G_{1,c}$ поступает в парогенераторный каскад и затем в виде сухого перегретого пара, в закруточное устройство для последующего ввода в рядную камеру плазмотрона. Другая часть воды $G_{2,c}$ вводится в рубашку охлаждения и затем впрыскивается перед срезом сопла в поток пароводяной плазмы. При этом степень регенерации тепла β и, соответственно, тепловой КПД η_A близки к единице.

В этом случае автоплазмотрон становится электродуговым парогенератором.

Водопитание автоплазмотрона с неполной регенерацией тепла ($\beta < 1$)

Предложенная схема автономного парообеспечения позволяет генерировать пароводяную плазму с высокими значениями энтальпии. Здесь количество воды, подаваемое в рубашку охлаждения автоплазмотрона, может намного превышать его плазмopоизводительность и осуществлять надежное охлаждение плазмотрона. При этом мощность плазмотрона также может быть намного больше, чем при стехиометрическом режиме.

На рис. 6 представлена схема избыточного водопитания автоплазмотрона. Его гидрообвязка выполнена следующим образом. Дистиллированная вода поступает на охлаждение катодного узла, затем — на парогенераторный отсек. Пройдя его вода превращается в сухой перегретый пар, который вводится через завихритель в разрядную камеру плазмотрона. Вторая часть воды $G_{2,c}$, охладив выходную часть анода, идет на сброс и утилизируется.

Использование избыточного водопитания снимает ограничения, связанные с перегревом конструкции.

Для получения пароводяной плазмы с большим удельным теплосодержанием — высокой энтальпией, необходимо переходить к плазмотронам с большими КПД η , либо увеличивать при той же плазмopоизводительности мощность дуги. В последнем случае избыточная, против потребной для собственной парогенерации, мощность тепловых потерь, выделяемая в стенке разрядной камеры, снимается охлаждающей водой, либо расходуется для производства пара на сторону, например для работы обычных паровихревых плазмотронов и т. д. При этом полной регенерации тепла нет и прирост теплового КПД автоплазмотрона η_A уменьшается (см. рис. 2).

При неполной регенерации тепло, потребляемое стенкой разрядной камеры плазмотрона, лишь частично регенерируется, обеспечивая процесс внутренней парогенерации, а остальная часть тепловых потерь снимается дополнительной охлаждающей водой.

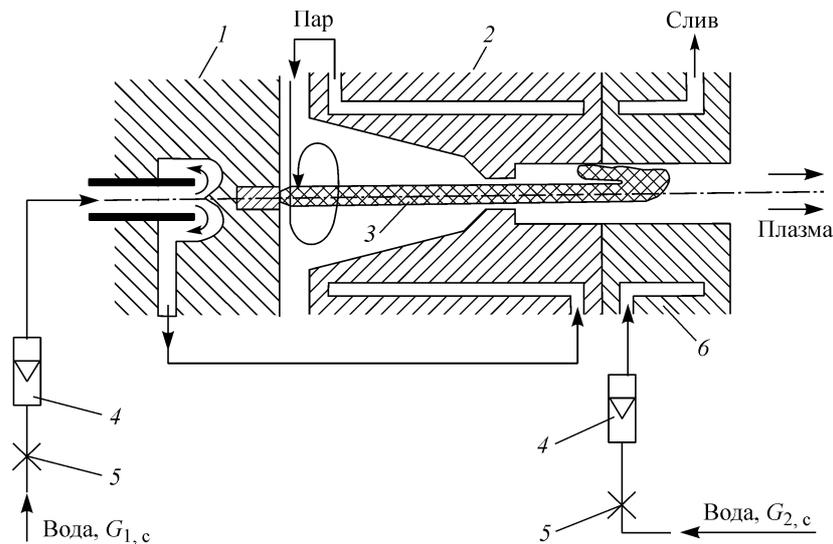


Рис. 6. Схема водопитания автоплазмотрона с неполной регенерацией тепла.
1 — катод, 2 — парогенерирующая часть анода, 3 — дуга, 4 — ротаметр, 5 — вентиль, 6 — выходная водоохлаждаемая часть анода.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОПЛАЗМОТРОНА

Практически все линейные паровихревые плазмотроны, к которым по существующей терминологии относятся одно-, двух- и трехкамерные плазмотроны, могут быть преобразованы в автоплазмотроны.

На рис. 5 и 6 представлены схемы однокамерных автоплазмотронов с полной и частичной регенерацией тепла [5, 6]. Характерным для обеих схем является наличие испарительного и пароперегревательного участков.

Ввиду малого количества парогенераторной воды необходимо принимать специальные меры для эффективного нагрева и испарения воды в испарителе. При этом во избежание перегрева его внутренней поверхности необходимо, чтобы температурный напор на стенке испарителя был заведомо меньше предельного значения, равного $(T_{пл} - T_f)$, где $T_{пл}$, T_f — температура плавления стенки и среднemasсовая температура воды соответственно. Это возможно при отсутствии кризиса кипения на охлаждаемой поверхности испарителя, т. е. при удовлетворении условия надежного охлаждения [7]

$$q_{кр} \gg q_w,$$

где $q_{кр} = q_{в0} (1 + B \cdot \Delta \hat{O}_H) \left(\frac{v_B}{v_{в0}} \right)^{0,5}$ — критическая плотность теплового потока, q_w —

действительная плотность теплового потока.

Оценки показывают, что из-за малого расхода парогенераторной воды G_H величина проходного сечения оказывается также мала. Малое проходное сечение при одновременном требовании сохранения в прежних пределах величины теплообменной поверхности приводит к необходимости введения твердотельных наполнителей в парогенерирующие каналы [5, 6]. Это приводит к образованию капиллярной структуры, что интенсифицирует теплообмен, по-видимому, за счет перевода поверхностного нагрева воды в объемный.

Наряду с усилением теплообменных функций переход на малые проходные сечения снижает интенсивность гидродинамических пульсаций [8] в парогенерирующих каналах, которые вредны для работы плазмотрона [9].

На рис. 7 представлено семейство вольт-амперных характеристик автоплазмотрона ЭДП-198 с неполной регенерацией тепла [10].

Каждому значению расхода воды соответствуют две граничные точки на каждой вольт-амперной характеристике: справа — точка максимума температуры пара, а слева — точка минимума. Совокупность одноименных граничных точек на

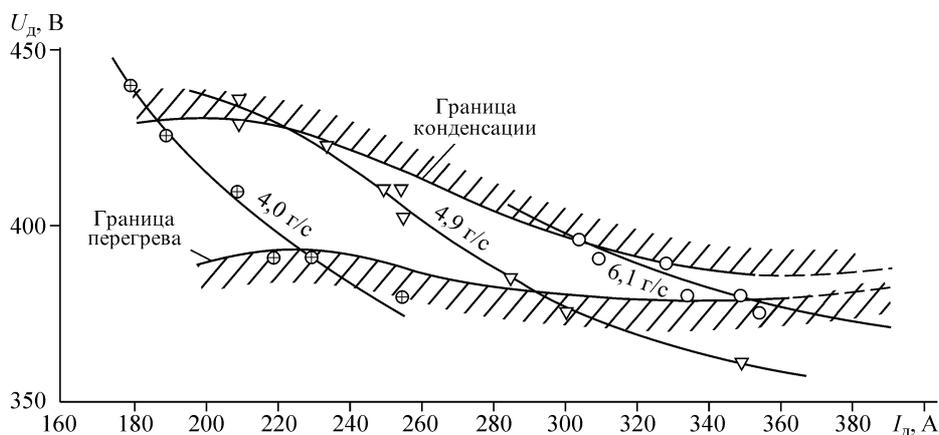


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики автоплазмотрона ЭДП-198.

семействе вольт-амперных характеристик автоплазмотрона, полученных при разных расходах пара (парогенераторной воды), образуют верхнюю пограничную кривую — границу конденсации (T_{\min}), и нижнюю — границу перегрева (T_{\max}). Между этими границами расположена область рабочих режимов.

При переходе нижней границы возникает опасность перегрева конструкции автоплазмотрона, при переходе верхней появляется опасность конденсации пара в разрядной камере, грозящая срывом режима. Сравнительно узкий диапазон рабочих токов дуги в автоплазмотроне объясняется малым интервалом допустимых значений начальной энтальпии h_0 водяного пара на входе в плазмотрон.

Уравнение баланса энергии для случая полной регенерации тепла ($\beta = 1$) может быть записано в виде

$$G_{\text{п}} h_0 = (1 - \eta) N_{\text{д}},$$

где $N_{\text{д}} = IU_{\text{д}}$, откуда

$$I_{\min} = \frac{G_{\text{п}}}{(1 - \eta)U_{\text{д}}} h_{0,\min} \quad \text{и} \quad I_{\max} = \frac{G_{\text{п}}}{(1 - \eta)U_{\text{д}}} h_{0,\max}. \quad (9)$$

Для заданного расхода плазмообразующей среды (водяного пара) $G_{\text{п}}$ и сравнительно небольшого интервала тока дуги можно положить η , $U_{\text{д}} = \text{idem}$ и тогда из (9) получить:

$$\Delta = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{h_{0,\max}}{h_{0,\min}} = \alpha. \quad (10)$$

Положив для $h_{0,\min}$ значение энтальпии пара при 150 °С, равное $h_0 = 2694$ Дж/г, по формуле (10) можно вычислить величину Δ , определяющую собой рабочий размах тока автоплазмотрона, в зависимости от параметров пара на входе в разрядную камеру. В качестве примера эти результаты для двух начальных состояний пара представлены ниже:

$T_{\text{п}}, \text{ }^\circ\text{C}$	400	800
$h_{0,\max}, \text{ Дж/г}$	3194	3994
Δ	1,186	1,48

С увеличением расхода пара рабочий ток дуги в автоплазмотроне возрастает в соответствии с формулой (9), оставаясь внутри коридора рабочих режимов, ограниченных сверху и снизу. В предположении η , $U_{\text{д}} = \text{const}$ и $\beta = 1$ зависимость тока дуги от расхода пара линейная,

$$I_{\max} = k_1 G_{\text{п}}, \quad I_{\min} = k_2 G_{\text{п}}, \quad (11)$$

где

$$k_1 = \frac{h_{0,\min}}{(1 - \eta)U_{\text{д}}}, \quad k_2 = \frac{h_{0,\max}}{(1 - \eta)U_{\text{д}}} \quad (12)$$

— угловые коэффициенты в зависимостях $I_i = f_i(G_{\text{п}})$. Из опыта известно, что с ростом тока напряжение на дуге $U_{\text{д}}$ уменьшается, а относительные потери тепла $(1 - \eta)$ увеличиваются. С увеличением же расхода плазмообразующего газа напряжение на дуге $U_{\text{д}}$ увеличивается, а потери тепла $(1 - \eta)$ уменьшаются. Эти факторы, оказывая противоположное воздействие на величину k_1 , дают взаимоисключающий

результат, что подтверждает справедливость существования зависимостей (12). Поскольку $k_1 > k_2$, с ростом расхода $G_{\text{п}}$ величина размаха тока в коридоре рабочих режимов увеличивается.

При неполной регенерации тепла, т. е. при $\beta < 1$, формулы (9), (11) и (12) записываются в виде

$$I_{\min, \beta} = \frac{G_{\text{п}} h_{0, \min}}{(1 - \eta) \beta U_{\text{д}}}, \quad I_{\max, \beta} = \frac{G_{\text{п}} h_{0, \max}}{(1 - \eta) \beta U_{\text{д}}}, \quad (9^*)$$

$$I_{\min, \beta} = k_{1, \beta} \cdot G_{\text{п}}, \quad I_{\max, \beta} = k_{2, \beta} \cdot G_{\text{п}}, \quad (11^*)$$

$$k_{1, \beta} = \frac{h_{0, \min}}{(1 - \eta) \beta U_{\text{д}}}, \quad k_{2, \beta} = \frac{h_{0, \max}}{(1 - \eta) \beta U_{\text{д}}}, \quad (12^*)$$

т. е. с введением $\beta < 1$ значения всех этих величин несколько возрастают, однако величина $\Delta = \Delta_{\beta} = \alpha$ остается неизменной.

На рис. 8 представлена экспериментально найденная область допустимых значений тока дуги от расхода пара. Этот результат получен на автоплазматроне ЭДП-203 при коэффициенте регенерации $\beta = 0,5$. Верхняя линия – это граница перегрева, при переходе через которую происходит перегрев конструкции плазматрона выше допустимого. Нижняя граница является границей конденсации.

Тепловой КПД автоплазматрона, работающего со степенью регенерации β , всегда превышает КПД паровихревого плазматрона с идентичной проточной частью, но без регенерации тепла [3, 8] на величину $\Delta\eta = (1 - \eta)\beta$.

На рис. 9 представлены экспериментальные данные по тепловому КПД автоплазматрона с коэффициентом регенерации $\beta = 0,5$.

К характерным особенностям автоплазматрона следует отнести его запуск. Пусковой график плазматрона ЭДП-203 изображен на рис. 10. Первые 30–45 секунд после осцилляторного поджига дуги плазматрон работает на воздухе. Его расход составляет 6–7 г/с без подачи воды на парогенерацию. Затем начинается подача воды с плавным увеличением от нуля до 5 г/с за время 1,5–2 минуты. Такой график запуска обеспечивает разогрев конструкции и подачу в разрядную камеру плазматрона сухого перегретого пара без опасности конденсации его на стенках

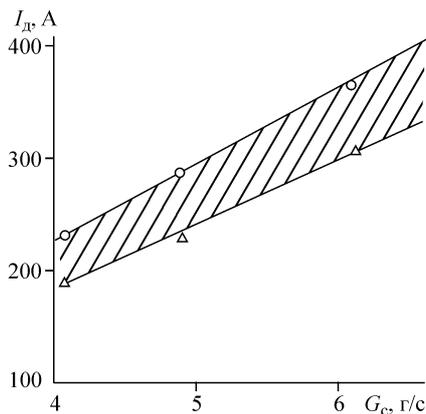


Рис. 8. Коридор рабочих режимов автоплазматрона ЭДП-203.

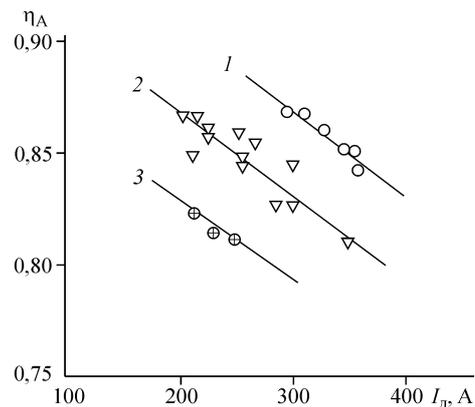


Рис. 9. Тепловой КПД автоплазматрона ЭДП-203 в зависимости от тока дуги.

Рис. 10. Пусковой график автоплазмотрона ЭДП-203.

дуговой камеры. После выхода на расход воды 5 г/с подача воздуха прекращается и устанавливается требуемый пароводяной режим работы автоплазмотрона.

Отсутствие расходных пульсаций при работе автоплазмотрона объясняется капиллярным строением парогенераторного участка его конструкции.

Большое значение имеет вопрос о потенциальных возможностях автоплазмотронов в части увеличения их мощности. Естественно, что с ростом мощности плазмотрона расход парогенераторной воды увеличивается (рис. 11) [11], что упрощает решение технической задачи охлаждения элементов конструкции автоплазмотрона, позволяя реализовать турбулентный режим в каналах рубашки охлаждения, а значит, и эффективную турбулентную теплопередачу. Реально такой режим возможно осуществить при мощности плазмотрона порядка одного мегаватта и выше.

При меньшей мощности расход воды через плазмотрон с полной регенерацией тепла также невелик и возникают проблемы с его охлаждением. Поэтому здесь целесообразно наиболее теплонапряженные элементы плазмотрона, например участки электродов, к которым осуществляется привязка дуги, подвергать дополнительному внешнему охлаждению. Надежность автоплазмотрона от этого увеличивается. Однако полной регенерации тепла здесь уже нет, тепловой КПД уменьшается на величину $Q_{\text{доп}}/N_{\text{д}}$, оставаясь все равно выше, чем у паровихревого плазмотрона без регенерации.

В области низких мощностей, когда опасность перегрева электродов в местах привязки дуги снижается за счет кондуктивного рассеяния тепла по всей конструкции плазмотрона, опять возможен отказ от дополнительного внешнего охлаждения.

Таким образом, вся плоскость “ $N - G_{\text{п}}$ ” (см. рис. 11), оказывается состоящей из четырех областей:

- области I — мощных (более 1 мВт) автоплазмотронов с полной или частичной регенерацией тепла: $\beta \leq 1, \eta \leq 1$;
- области II — автоплазмотронов средней мощности от

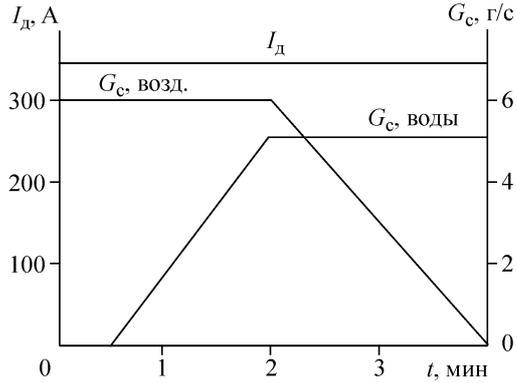
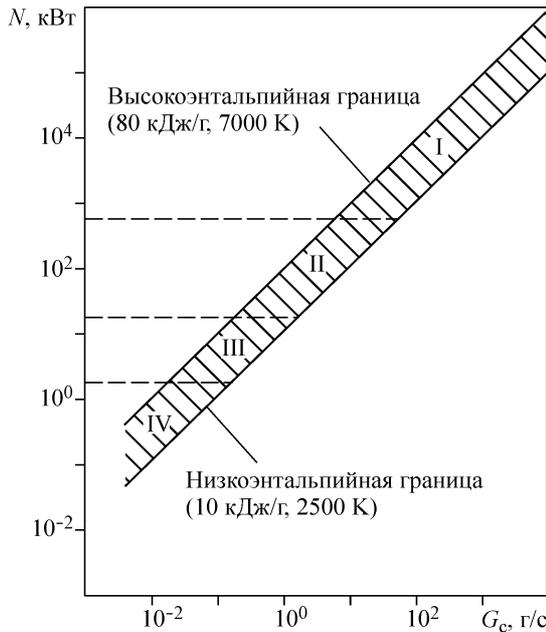


Рис. 11. Расходно-мощностная характеристика электродуговых генераторов пароводяной плазмы.

Области действия: I — мощных плазмотронов, II — средних, III — слабomощных, IV — микроплазмотронов).

нескольких десятков до нескольких сот киловатт с неполной регенерацией тепла: $\beta < 1, \eta < 1$;

– области III — автоплазмотронов малой мощности порядка $1 \div 10$ кВт с коэффициентами: $\beta \leq 1, \eta \leq 1$;

– области IV — автомикроплазмотронов мощностью от нескольких сот ватт до 1 кВт: $\beta = 1, \eta < 1$.

ВЫВОДЫ

1. Использование регенерации тепла в плазмотронах наиболее эффективно, когда в качестве исходной плазмообразующей среды используется вода, т. к. она обладает аномально высокой теплоемкостью и большой скрытой теплотой парообразования.

2. Наиболее ярким эффектом от регенерации тепла в паровихревых плазмотронах является прирост коэффициента полезного действия, который тем больше, чем выше степень регенерации тепловых потерь.

3. Перевод паровихревых плазмотронов на регенерационный режим работы, т. е. превращение их в автоплазмотроны, позволяет отказаться от внешнего парогенератора и частично или полностью — от системы внешнего охлаждения плазмотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электродуговые** генераторы с межэлектродными вставками / М.Ф. Жуков, А.С. Аньшаков, И.М. Засыпкин и др. — Новосибирск: Наука, 1981. — 222 с.
2. **Курочкин Ю.В., Пустогаров А.В.** Исследование плазмотрона с подачей рабочего тела через пористую межэлектродную вставку / Под ред. М.Ф. Жукова. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. — С. 82–104.
3. **Михайлов Б.И.** Возможность регенерации тепла в электродуговых паровихревых плазмотронах // IX Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. — Фрунзе, 1983. — С. 336–337.
4. **Михайлов Б.И.** Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 4. — С. 637–657.
5. **А.с. 1620032** СССР, МКИ Н 05 В 7/22. Электродуговой плазмотрон с пароводяной стабилизацией дуги / Б.И. Михайлов, Я.Б. Иохимович, А.В. Балудин, А.П. Морозов. Заявлено 20.07.89, Опубл. 20.11.95 // Б.И. — 1995. — № 32. — С. 284.
6. **А.с. 1503673** СССР, МКИ Н 01 С 10/02. Установка для электродугового подогрева газа / Б.И. Михайлов, Я.Б. Иохимович, А.В. Балудин, Заявлено 29.02.83, Опубл. 27.12.95 // Б.И. — 1995. — № 36.
7. **Основы** расчета плазмотронов линейной схемы / М.Ф. Жуков, А.С. Аньшаков, Б.И. Михайлов и др. — Новосибирск: Изд. ин-та теплофизики СО АН СССР, 1979. — 156 с.
8. **Михайлов Б.И.** Исследование пульсаций в парогенерирующих трубах // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1985. — № 10, вып. 2. — С. 43–47.
9. **Михайлов Б.И.** Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 1 // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 4. — С. 597–612.
10. **Михайлов Б.И., Иохимович Я.Б.** Энергетические характеристики автоплазмотрона // XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Ч. 1. — Новосибирск, 1989. — С. 34–35.
11. **Mikhailov B.I.** Generation of electric — arc water — steam micro-plasma // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt III. — Novosibirsk, 2004. — P. 128–130.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2004 г.