

Лекция № 4.

Общая тема: Основы физики плазменных аппаратов и технологий.

1. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЛАЗМОТРОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К электродуговым плазмотронам относятся устройства, в которых генерация плазмы происходит в зоне электродугового разряда, стабилизированного в канале с потоком газа. В настоящее время электродуговые плазмотроны являются практически единственными устройствами для стационарного нагрева потоков любого газа до высоких температур от 3 тыс. до 50 тыс. К. Разработаны и созданы электродуговые плазмотроны для нагрева инертных и химически агрессивных сред мощностью от десятка Вт до десятков МВт с ресурсом непрерывной работы до 100 часов и более [36, 38, 39]. Плазмотроны, используемые в технологических процессах в металлургии и химической промышленности, машиностроении и металлообработке, отличаются мощностью разряда и температурой потока плазмы, геометрией разрядной камеры, конструкциями катодного и анодного узлов, способами подачи и родом плазмообразующего газа, способами пространственной стабилизации дуги, схемой электрического питания и т.д. Несмотря на многообразие типов и конструкций ЭДП и их различия, в основе функционирования плазмотронов лежат общие закономерности и физические процессы, протекающие либо непосредственно в дуге, либо тесно связанные с ее свойствами в объеме разрядной камеры. В данном разделе не ставится задача изучения особенностей всего многообразия конструкций и схем плазмотронов. Мы рассмотрим и проанализируем лишь наиболее общие свойства и характеристики ЭДП и основные процессы, протекающие в электродуговых генераторах потоков плазмы.

2. Некоторые схемы электродуговых плазмотронов и особенности дуги постоянного тока в канале с потоком газа

Электрическая дуга относится к контрагированным разрядам с высокой плотностью тока. Например, в области ПС дуги плотность тока составляет $10\text{-}10^3$ А/см², на катоде $10^3\text{--}10^8$ А/см², а на аноде, соответственно, 10^4 А/см² [22]. Большая плотность тока и высокий уровень вводимой в разряд мощности позволяют разогревать потоки плазмы до температуры в несколько десятков тысяч градусов.

Рассмотрим некоторые особенности дуги в канале с потоком газа на примере однокамерного ЭДП с вихревой стабилизацией дуги (рис. 6.1а). Основными элементами конструкции ЭДП указанной схемы являются охлаждаемые катод 1, анод 3 и вихревая камера 2. Плазмообразующий газ поступает в канал через тангенциальные отверстия вихревой камеры, нагревается дугой до высоких температур и истекает через сопло анода в виде плазменной струи. Основная часть дуги стабилизируется на оси РК вихревым (закрученным) потоком газа, а радиальный прианодный участок вращается с большой скоростью по поверхности анода, что предотвращает его интенсивную эрозию. Закрученный поток газа стабилизирует положительный столб дуги вдоль оси канала за счет архимедовых сил, которые отжимают более холодные слои газа к стенкам канала, создавая некоторое разрежение на оси. Естественно, что интенсивность закрутки газа будет влиять некоторым образом на свойства дуги, а выделение джоулевого тепла в дуге — на свойства газового вихря. Наибольшее влияние интенсивность закрутки газа оказывает на состояние и ресурс работы электродов. В то же время интенсивность закрутки газа слабо влияет на характеристики плазмы в области ПС дуги. Объясняется это тем, что из-за высокой температуры на оси дуги плотность газа там мала и закрутка практически не влияет на кинетику процессов в плазме ПС [36, 37].

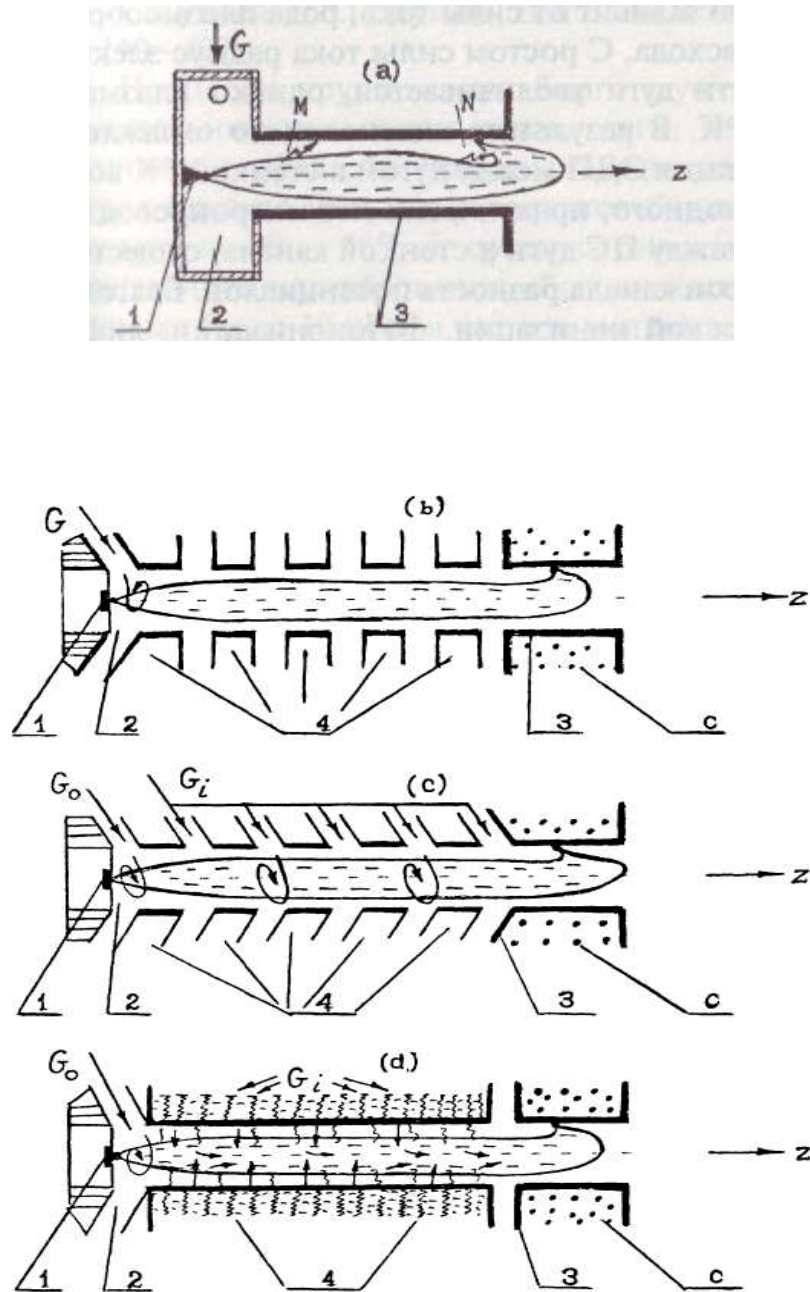


Рис. 6.1. Принципиальные схемы ЭДП: а) ЭДП с самоустанавливающейся длиной дуги; б) ЭДП с МЭВ; в) ЭДП с межсекционным вдувом газа; д) ЭДП с пористой стенкой РК; 1 — катод; 2 — вихревая камера; 3 — анод; 4 — секция МЭВ; с — соленоид.

Радиус ПС дуги зависит от силы тока, рода плазмообразующего газа и его расхода. С ростом силы тока радиус электропроводящей области дуги

увеличивается, однако плазма не достигает стенок РК. В результате интенсивного охлаждения элементов конструкции ЭДП между дугой и стенкой РК всегда находится слой холодного, практически неэлектропроводного газа. В этом слое, между ПС дуги и стенкой канала, существует переменная вдоль оси канала разность потенциалов. Благодаря процессам термической ионизации, фотоионизации, диффузии заряженных частиц холодный слой газа всегда содержит небольшую концентрацию носителей заряда. Вследствие этого снижается его электрическая прочность и создаются благоприятные условия для электрического пробоя промежутка ПС дуги — стенка РК. Из-за пробоя в некотором сечении РК (участок М рис. 6.1а) возникает новый укороченный проводящий участок дуги. Прежний электропроводный канал, имеющий большее электрическое сопротивление, угасает. Далее новое опорное пятно дуги сносится вниз потоком газа, дуга снова вытягивается вдоль РК до момента возникновения нового пробоя и процесс повторяется. Периодическое сокращение длины дуги благодаря электрическим пробоям в рассмотренной области канала называется **крупномасштабным шунтированием**. Шунтирование части положительного столба дуги в канале является одним из основных процессов, происходящих в дуговых плазматронах. Наряду с крупномасштабным шунтированием, в ЭДП имеет место и мелкомасштабное шунтирование петли дуги в прианодной области. Суть этого процесса заключается в том, что между частями ПС дуги всегда имеется разность потенциалов, которая способствует пробоям между прямолинейной (осевой) и искривленной (прианодной) частями ПС. Периодическое шунтирование этих участков ПС ведет к небольшому изменению длины дуги (участок N на рис. 6.1а). Как видно, в ЭДП указанной схемы, длина дуги в РК устанавливается произвольным образом, поэтому они называются **плазматронами с самоустанавливающейся длиной дуги**. Наиболее полно механизмы

шунтирования в ЭДП исследовались в работах М. Ф. Жукова, Г.Ю.Даутова, В.Я.Смолякова, А.С.Аныиакова и др. [40-42].

Процессы крупномасштабного шунтирования вызывают значительные пульсации длины дуги, напряжения горения, мощности разряда, тепловых и газодинамических параметров потока плазмы. Так, например, колебания напряжения могут достигать до 40 — 50% от среднего значения. Частота крупномасштабного шунтирования обычно лежит в пределах от нескольких Гц до 10 кГц, а частота мелкомасштабного шунтирования находится в области 100 кГц. При этом, амплитуды колебаний параметров ЭДП и плазменной струи достигают до 10% от средних значений. Значительное сокращение длины дуги из-за крупномасштабного шунтирования является основной причиной падения напряжения горения дуги с ростом тока. Этим обусловлено существенное ограничение мощности энергии электрического поля, вкладываемой в нагрев потока плазмы, а следовательно, и температуры истекающей плазменной струи в ЭДП с самоустанавливающейся длиной дуги.

Создание плазмотронов с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) позволило значительно улучшить технологические параметры ЭДП. Конструктивной особенностью таких плазмотронов является наличие между катодом и анодом длинной, электрически изолированной межэлектродной вставки, состоящей из изолированных друг от друга секций (колец). Схема плазмотрона с МЭВ приведена на рис. 6.1в. Использование МЭВ позволило избавиться от крупномасштабных пульсаций параметров дуги из-за шунтирования и добиться фиксирования длины дуги в ЭДП. Поэтому плазмотроны с МЭВ называют еще **плазмотронами с фиксированной длиной дуги**. Меняя количество секций МЭВ, можно создавать плазмотроны с различной длиной канала и дуги. Такие плазмотроны отличаются высокой стабильностью параметров разряда и потока генерируемой плазмы. Основными причинами колебаний параметров у них являются мелкомасштабное шунтирование дуги,

пространственные перемещения анодного и катодного пятен, пульсации тока и напряжения источника электропитания, колебания газодинамических параметров и пространственная неустойчивость вихревого потока газа, турбулентность и т.д. [43 и др.].

Дальнейшим развитием плазменного аппаратостроения явилось создание плазмотронов с подачей части плазмообразующего газа через зазоры между секциями МЭВ или через пористую стенку РК. Схемы ЭДП с распределенным вдувом газа приведены на рис. 6.1с, d. В таких ЭДП ПС дуги дополнительно стабилизируются на оси потоком газа с интенсивным радиальным течением. Многочисленные исследования показали, что распределенный вдоль РК вдув плазмообразующего газа позволяет значительно снизить тепловые потери через стенки канала и этим повысить тепловой КПД нагрева и напряжение горения дуги. Используя МЭВ из пористого материала, тепловые потери в стенку РК можно снизить практически до нуля, обеспечивая тепловой КПД, близкий к единице [44—47 и др.]. В ЭДП с распределенным вдувом газа интенсивность вращения анодного пятна по поверхности анода несколько замедляется. Для интенсификации закрутки анодного пятна дуги в этой области канала обычно используют соленоиды. Все эти приемы позволяют получать необходимые тепловые параметры плазменной струи при меньших значениях силы тока, что приводит к уменьшению эрозии электродов и существенному увеличению их ресурса работы.

Еще одним способом повышения эффективности работы плазмотронов является профилирование сечения РК. Исследования [48 и др.] показали, что применение РК с МЭВ диффузорного типа (расширяющегося вниз по потоку газа) совместно с распределенным по длине канала вдувом газа, приводит к повышению энтальпии потока плазмы и КПД установки за счет снижения тепловых потерь через стенки канала по сравнению с цилиндрическими РК.

Рассмотренные схемы ЭДП относятся к линейным плазмотронам с продольно обдуваемой дугой. Известны различные модификации описанных устройств, например, двухкамерные ЭДП и плазмотроны с вынесенной дугой [49]. Особо следует отметить перспективность плазмотронов с распределенным по длине канала током. Плазмотроны с распределенными расходом газа и током открывают перспективу оптимизации ЭДП по основным параметрам. Некоторые принципиальные схемы таких ЭДП приведены на рис. 6.2 и 6.3.

Здесь мы не рассматривали схемы ЭДП с поперечным обдувом дуги и ЭДП переменного тока, которые относятся к специальным группам электродуговых плазмотронов.

Существенное влияние на характеристики и ресурс работы ЭДП оказывает материал, из которого сделаны электроды, и условия их охлаждения. Наибольшее практическое применение получили термоэмиссионные стержневые катоды на основе вольфрама, обладающие высоким ресурсом работы при нагреве химически инертных газов — азота, водорода или их смесей.

При нагреве химически активных сред (кислород, воздух, водяной пар, углекислый газ, метан и др.) вольфрамовые катоды сгорают весьма быстро. В этих случаях в качестве катодов необходимо использовать металлы, которые, взаимодействуя с плазмообразующими газами, образуют на поверхности пленочные соединения, обладающие наряду с высокой термической устойчивостью высокими электроэмиссионными свойствами. Такие катоды называются *термохимическими*. Основными материалами для термохимических катодов являются цирконий, гафний, титан, тантал, ниобий, лантан, самарий и др. Следует отметить, что из-за малой теплопроводности катоды из циркония и гафния используют в технологических плазмотронах с токами до 300 А. В мощных промышленных плазмотронах с токами 1 кА и более используют вольфрамовые стержневые катоды, но катодные узлы представляют собой довольно сложные конструкции, обеспечивающие

химическую защиту вольфрамовых катодов газовой завесой из инертного газа [50, 51].

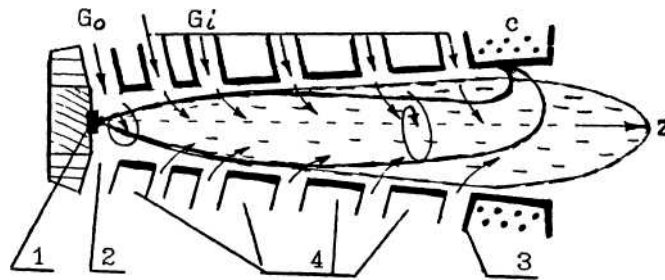


Рис. 6.2. Принципиальная схема ЭДП с разрядной камерой диффузного типа и распределенным вдувом газа: 1 — катод; 2 - вихревая камера; 3 — анод; 4 — секции МЭВ; G , - межсекционный вдув газа; с — соленоиды

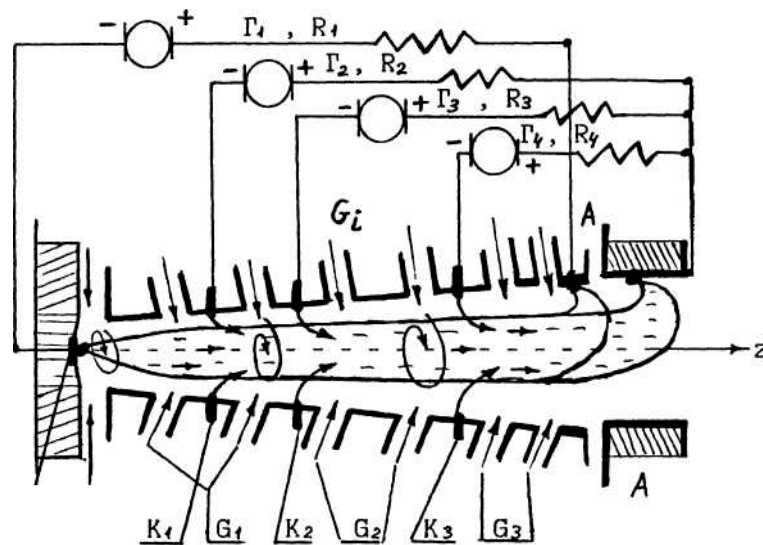


Рис. 6.3. Принципиальная схема ЭДП с изменяющимся по длине РК током и распределенным вдувом газа; К — катоды; А — анод; G , — распределенный вдув газа; R — балластные сопротивления; Г — генератор

3. Электрические и тепловые характеристики электродуговых плазмотронов постоянного тока

К макроскопическим электрическим характеристикам ЭДП относятся вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда, а также распределения потенциала и напряженности электрического поля в канале. Анализ большого количества экспериментальных данных показывает, что эти характеристики зависят от режима течения, давления и физических свойств плазмо-образующего газа, типа плазмотрона, размеров и геометрии РК, величины тока и ряда других факторов.

ВАХ плазмотронов является важнейшей интегральной, экспериментально определяемой, электрической характеристикой, позволяющей оценить энергетические возможности данного плазмотрона и параметров плазменной струи. Ввиду сильнонелинейной зависимости электропроводящих свойств плазмы от мощности разряда принято, что в ВАХ сила тока I выступает как аргумент, а напряжение разряда U является функцией. На рис. 6.4 приведены типичные ВАХ и их зависимости от расхода газа и геометрии РК плазмотронов с МЭВ.

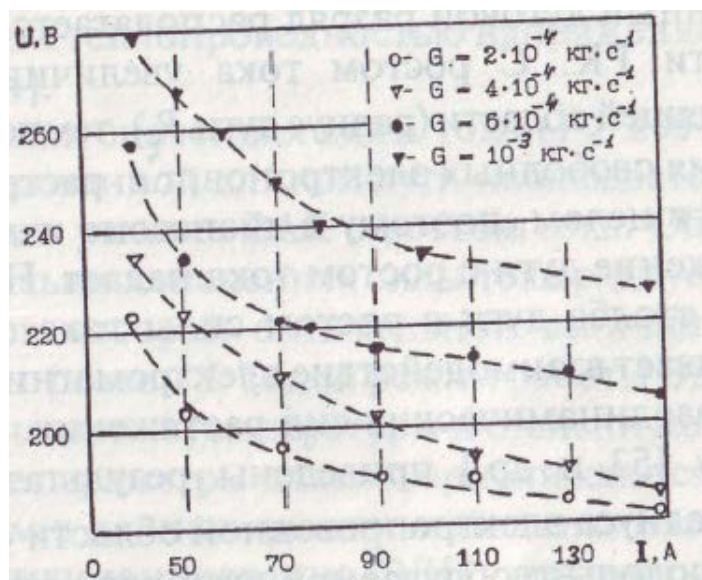


Рис. 6.4. Статические вольт-амперные характеристики ЭДП постоянного тока с МЭВ. Длина канала 13 см, радиус 0,5 см, плазмообразующий газ—воздух [52].

При ламинарном режиме течения газа в технологических плазмотронах малой и средней мощности ($N \approx 100$ кВт) ВАХ является падающей, т.е. с ростом

тока напряжение понижается. Легко видеть, что величина напряжения на плазмотроне при заданном токе разряда определяется характером распределения напряженности электрического поля в канале ЭДП, которая, в свою очередь, зависит от распределения локальных параметров плазмы в объеме РК. Многочисленные опыты показали, что повторяемость ВАХ в одном и том же плазмотроне при одинаковых внешних условиях (параметрах R, I, G, P) осуществляется с отклонениями $\pm 10\%$, что свидетельствует о высокой чувствительности дуговой плазмы и дуги в целом к различным внутренним возмущающим факторам [36, 38].

Рассмотрим причины формирования падающего участка ВАХ в плазмотронах. В соответствии с законом Ома для участка цепи падение U с ростом I связано с уменьшением электрического сопротивления дуги, что обусловлено процессами уменьшения длины дуги или ростом электропроводности дуги в целом. В плазмотронах с фиксированной длиной дуги определяющим механизмом падения U с ростом I является рост электропроводности дуги. Действительно, при малых токах контрагированный дуговой разряд располагается в узкой при-осевой области РК. С ростом тока увеличиваются радиус электропроводящей области (радиус дуги R_ξ), температура плазмы и концентрация свободных электронов, т.е. растет электропроводность дуги в целом, поэтому в диапазоне изменения параметров напряжение дуги с ростом тока падает. На формирование диаметра столба дуги с ростом силы тока определяющее влияние оказывает взаимодействие электромагнитных сил сжатия и термо-газодинамических сил растяжения.

В работах [53 и др.] приведены результаты измерений зависимости радиуса электропроводной области ξ от величины I свободной продольно обдуваемой дуги для различных давлений газа. Внешняя граница электропроводной

области дуги определялась слоем газа с температурой 4 тыс. К, а граница светящегося неэлектропроводного слоя газа определялась температурой 2,5 тыс. К. Это согласуется с выводами теории Г.Меккера, по которой тепловой радиус ПС дуги больше его электропроводного радиуса. Опыты показали, что при $I = const$ в длинных дугах ξ больше, чем в коротких, с ростом силы тока ξ нелинейно растет, а с увеличением давления падает. Результаты измерений зависят от материала электродов, рода обдуваемого газа и скорости потока и других внешних факторов, поэтому эти данные трудно систематизировать. Ориентировочно можно принять, что в диапазоне токов от 10 А до 300 А радиус ПС обдуваемой воздухом свободной длинной дуги лежит в пределах от 1,5 до 2,5 мм при давлении 1—2 атм.

Применяя эти результаты для дуги в РК плазмотрона с интенсивно охлаждаемыми стенками, можно предположить, что главным механизмом быстрого уменьшения электрического сопротивления дуги в области ПС с ростом силы тока будет рост степени ионизации плазмы из-за интенсификации процессов термической ионизации газа. Сравнение характеристик ЭДП в различных газах показывает, что напряжение дуги в молекулярных и инертных газах повышается с уменьшением молекулярной массы. Таким образом, для газов с большей теплоемкостью и теплопроводностью напряжение горения дуги будет выше [24].

При больших значениях силы тока ($I > 200$ А) в плазмотронах с фиксированной длиной дуги наблюдается формирование восходящего участка ВАХ с ростом тока. Объясняется это тем, что при больших значениях силы тока радиус дуги в данной РК достигает некоторой оптимальной величины и более не увеличивается с ростом I . Такой режим работы ЭДП отличается высокими значениями температуры и степени ионизации плазмы. Указанные параметры

плазмы приближаются к максимально допустимым в данных электрогазодинамических условиях и режимах функционирования ЭДП, поэтому интенсивность процессов термической ионизации частиц более не возрастает. Кроме того, в плотной плазме с ростом температуры увеличиваются сечения (e/i) и (e/a) столкновений и растет частота столкновений электронов, что ведет к уменьшению их длины свободного пробега и соответственно подвижности. В совокупности указанные процессы ведут либо к постоянству электропроводности дуги с дальнейшим ростом тока, либо даже к ее уменьшению. Следствием всего этого становится формирование восходящей ветви ВАХ плазмотрона.

Анализ зависимостей электрической мощности N , выделяемой в ЭДП, от силы тока для падающего участка ВАХ показывает, что в исследованном диапазоне параметров величина N с ростом увеличивается, несмотря даже на уменьшение напряжения дуги. Следовательно, в соответствии с законом Джоуля— Ленца уменьшение сопротивления дуги идет медленнее, чем рост квадрата силы тока. Это свидетельствует о том, что электрическая дуга в плазмотроне является сильнонелинейным элементом электрической цепи.

Измеренные значения распределения потенциала $\phi(z)$ и напряженности электрического поля $E(z)$ позволяют анализировать изменения локальных параметров плазмы в канале ЭДП. В опытах распределение потенциала в канале $\phi(z)$ определяют с помощью зонда или путем измерения разности потенциалов между электрически изолированными тонкими секциями МЭВ и анодом, потенциал которого обычно принимают за нуль. Распределение напряженности электрического поля $E(z)$ находят, вычисляя отношение $\Delta\phi/\Delta z$ вблизи окрестности сечения z . Типичные распределения $E(z)$ в линейных плазмотронах с МЭВ приведены на рис. 6.5. Как видно, величина E вниз по потоку газа вначале резко падает, затем ее падение замедляется и в пределе E от z не зависит. С ростом расхода газа значение E

увеличивается. При прочих равных условиях в плазмотронах с МЭВ и распределенным вдоль канала расходом газа напряженность поля выше, чем в плазмотронах с сосредоточенным вдувом в катодной области. Такое же повышение E наблюдается и при использовании РК диффузорного типа. В плазмотронах с расширяющимся каналом и распределенным вдувом газа существует восходящий участок зависимости $E(z)$ (кривая 2).

Проанализируем причины такого поведения напряженности электрического поля в канале ЭДП, используя формулу $E = j / \sigma$ и результаты измерений распределения тепловых потоков в стенки РК при установившихся значениях силы тока и расхода газа.

В плазмотронах не вся выделенная электрическая энергия передается нагреваемому газу. Часть энергии теряется через охлаждаемые элементы конструкции: катод, анод и стенки РК. На рис. 6.6 представлены распределения тепловых потоков q вдоль канала ЭДП, где координата z направлена вдоль оси канала, а сечение $z = 0$ соответствует катодному пятну. Как видно, по характеру изменения $q(z)$ можно выделить три участка. На начальном участке тепловой поток через стенку канала мал и с ростом z меняется слабо. Резкое возрастание q наблюдается на переходном участке. При дальнейшем увеличении z рост q замедляется. Участок дуги, где q от z зависит, называют **предельным участком**. Такой ход кривых распределения $E(z)$ и $q(z)$ связан с особенностями развития положительного столба дуги в канале и, в частности, с формированием его радиуса [55].

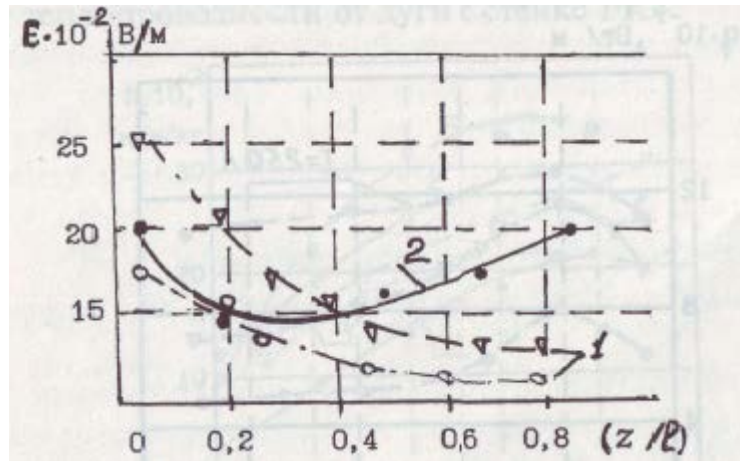


Рис. 6.5. Распределение напряженности электрического поля в канале ЭДП с МЭВ. Длина канала $l = 13$ см, радиус $R = 0,5$ см, плазмообразующий газ—воздух. 1 — $I = 50$ А, $o - G = 2 \cdot 10^{-4}$ кг \cdot с $^{-1}$, $v - G = 4 \cdot 10^{-4}$ кг \cdot с $^{-1}$, [52], 2 — для ЭДП с расширяющимся каналом и распределенным вдувом газа при $I = 150$ А, $G_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ кг \cdot с $^{-1}$, $C_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ кг \cdot с $^{-1}$, [48], Вт/м

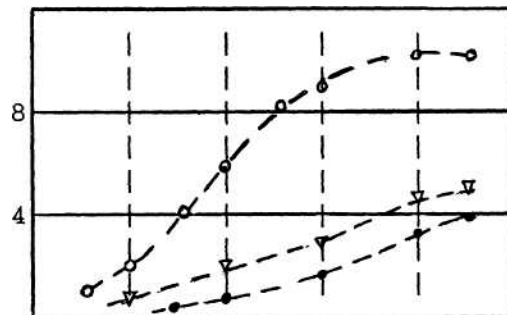


Рис. 6.6. Распределение тепловых потоков вдоль разрядной камеры ЭДП с МЭВ. Длина канала $l = 13$ см, радиус $R = 0,5$ см, сила тока $I = 60$ А, $o - G_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ кг \cdot с $^{-1}$, $д - G_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ кг/с, $\Delta - G_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ кг/с [54], Вт/м

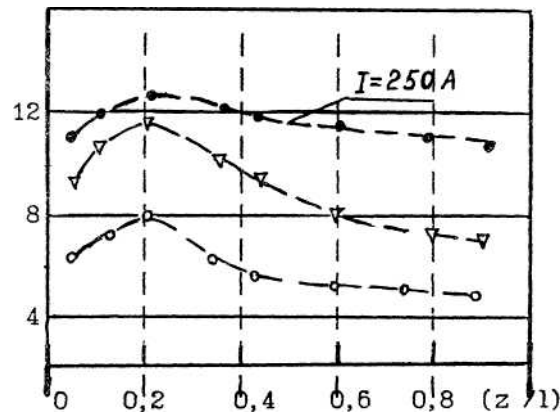


Рис. 6.7. Распределение тепловых потоков ЭДП с разрядной камерой переменного радиуса и распределенным вдувом воздуха. Длина канала $l = 16$ см, радиус выходного сечения $R = 0,75$ см, $o - I = 150$ А, $\nabla - I = 200$ А, $G_o = 3 \cdot 10^{-4}$ кг/с, $G = 1,6 \cdot 10^{-4}$ кг/с [48]

Начальный участок ПС дуги вблизи катода отличается большими значениями плотности тока. Газ здесь относительно холодный и большая часть его обладает малой электропроводностью, поэтому напряженность поля большая. Ввиду малости радиуса ПС дуги расстояние между ПС и стенкой велико. Молекулярный перенос тепла между стенкой РК и ПС осуществляется посредством концентрационной и термодиффузии, которые пропорциональны градиенту температуры. На начальном участке ПС дуги этот градиент относительно мал и основным механизмом потери тепла здесь будет излучение дуги.

На переходном участке ПС радиус дуги приближается к стенке РК, плотность тока уменьшается, температура плазмы и ее электропроводность повышаются, а величина E падает. Толщина холодного слоя газа между ПС и стенкой канала быстро уменьшается, что ведет к резкому увеличению здесь $grad T$ и соответственно быстрому росту радиального переноса тепла за счет теплопроводности от дуги к стенке РК.

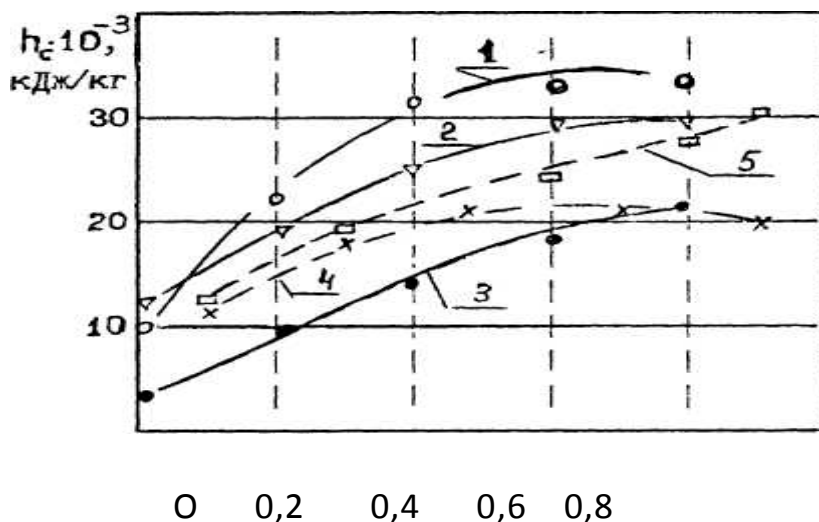


Рис. 6.8. Распределение среднемассовой энтальпии нагреваемого газа вдоль разрядной камеры ЭДН с МЭВ. Кривые (1—3) для цилиндрического канала при $I = 140$ А, 1 — $G_0 = 0,2$ г/с, 2 — $G_0 = 0,4$ г/с, 3 — $G_0 = 0,8$ г/с [56]. Кривая (4) для расширяющегося, а°(5) — для сужающегося каналов с распределенным вдувом газа при $I = 200$ А [48].

Сравнительный анализ зависимостей $E(z)$ и $q(z)$ показывает, что в плазмотронах с цилиндрической РК и сосредоточенным вдувом газа предельный участок дуги достаточно протяженный и устанавливается быстро. Следует отметить, что в области переходного участка ПС дуги процессы ионизации и нагрева газа протекают наиболее интенсивно. В начальных сечениях предельного участка дуги тепловые параметры ПС и потока плазмы практически устанавливаются и с ростом z меняются мало (рис. 6.8). Таким образом, мощность, выделяемая здесь, не ведет к дальнейшему росту температуры газа, поэтому для повышения КПД ЭДП стремятся сократить длину предельного участка путем применения распределенного вдува газа, профилированием сечения РК и другими способами.

Из результатов экспериментов, приведенных на рис. 6.5 — 6.8, видно, что в ЭДП с расширяющимся каналом значение q вначале растет, достигает максимума и далее уменьшается с ростом z . На этом участке ПС напряженность поля увеличивается, также растет и среднемассовая энтальпия газа до некото-

рого предельного значения. Связав факт снижения q с уменьшением здесь величины $grad T$, можно предположить, что скорость роста теплового радиуса ПС вдоль оси z достигает некоторых оптимальных для данного режима горения дуги значений и далее отстает от скорости роста радиуса канала РК.

