

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ СРЕДЫ-ДИЭЛЕКТРИКА КАК ИСТОЧНИК ТЕПЛА ДЛЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Кировоградский национальный технический университет,
пр. Университетский, 8, Кировоград, 25006, Украина*

Технологии, основанные на использовании известных электрических дуг, достигли «технологического потолка», критической «точки насыщения» и до известной степени исчерпали себя. Поэтому появление новых технологий с использованием электрической дуги может быть связано только с появлением качественно новых дуг с новым, более высоким уровнем регулируемых энергетических, а следовательно, и технологических характеристик.

В этой связи научный и практический интерес представляет предложенная нами и получившая практическое применение электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика, отличающаяся тем, что ее получают при динамическом давлении потока более 5–10 кПа [1], то есть при давлениях, которые ранее не были реализованы ни наукой, ни практикой. Такая дуга позволяет получить качественно новый уровень энергетических характеристик, легко регулируемых в самых широких пределах и значительно превышающих известные, что дает возможность рассматривать ее как качественно новый источник тепла для целей науки и новых технологий. Опишем ее.

Энергетические характеристики дуги. В качестве рабочей среды-диэлектрика могут быть использованы не только газы, но, и все известные среды-диэлектрики, позволяющие сформировать поперечный поток среды-диэлектрика: вода, нефтепродукты, эмульсии, суспензии, твердые среды. Более того, именно жидкие среды (а не газы) являются более удобными и эффективными. Для разнообразных рабочих сред универсальный параметр взаимодействия дуги с потоком – динамическое давление потока, Па:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность (объемная масса), кг/м³; v – скорость потока, м/с.

На рис. 1 показана принципиальная схема получения электрической дуги в поперечном потоке жидких сред-диэлектриков. При этом необходимые динамические давления потока в зоне горения дуги достигаются применением соответствующих насосных установок. Важным является наличие источников питания технологическим током соответствующих характеристик. Необходимо учитывать, что напряжение дуги при заданных длине дуги и силе тока является функцией динамического давления потока и резко возрастает при увеличении последнего. Так, при динамическом давлении потока 1 МПа напряженность электрического поля в столбе дуги достигает 4 кВ/см.

Для количественной и качественной оценки такой электрической дуги как источника тепла необходимо установить ее электрические характеристики (силу тока и напряжение), определить геометрические характеристики (площадь поперечного сечения и длину), плотность тока на катоде и аноде, суммарное значение катодного и анодного падения напряжения, напряженность электрического поля в столбе дуги, построить вольт-амперную характеристику дуги. В качестве примера рассмотрим эти характеристики для случая реализации дуги в поперечном потоке водопроводной воды.

Электрические характеристики дуги – сила тока I и напряжение U – могут быть установлены по осциллограммам. Типичная осциллограмма I и U такой дуги (рис. 2) подтверждает непрерывное протекание разряда и не имеет принципиальных отличий от типичных осциллограмм известных стационарных дуг. Силу тока такой дуги можно регулировать, как и для известных дуг, от нескольких до многих тысяч ампер. Напряжение дуги определяется главным образом длиной дуги и динамическим давлением потока и может изменяться от значений, характерных для обычных сварочных дуг, и дос-

тигать сотен и тысяч вольт.

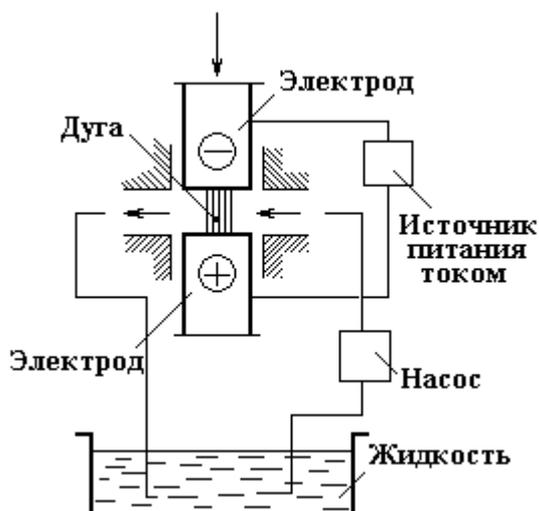


Рис. 1. Принципиальная схема получения электрической дуги в поперечном потоке жидких сред

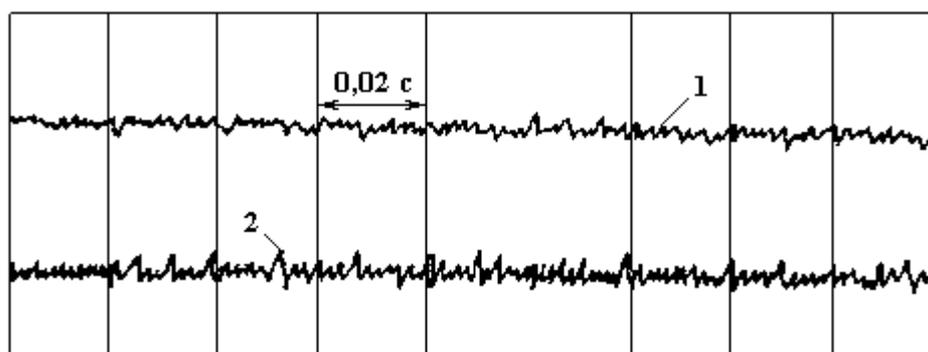


Рис. 2. Типичная осциллограмма силы тока (1) и напряжения (2) дуги

Электрические дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика при динамическом давлении потока более 5–10 кПа характеризуются всеми признаками стабилизированных дуг. Они имеют вид, близкого к цилиндру, непрерывно мигрирующего столба с четкими оптическими границами. Площади поперечного сечения столба, катодной и анодной областей дуги примерно равны. На рис. 3 приведен типичный кадр скоростной киносъемки дуги, протекающей в поперечном потоке воды между медным (расположен сверху, на снимке не показан) и графитовым катодом (внизу); сила тока дуги $I = 250$ А, напряжение $U = 70$ В, динамическое давление потока $P_d = 0,3$ МПа, частота киносъемки 4000 кадр/с, экспозиция 1/20000 с.



Рис. 3. Кадр скоростной киносъемки дуги

На рис. 4 показана зависимость площади поперечного сечения дуги S от I и P_d , на рис. 5 – зависимость длины дуги L от U и P_d , на рис. 6 – зависимость плотности тока в дуге j от I и P_d , на рис. 7 – зависимость напряженности электрического поля в столбе дуги E от I и P_d , на рис. 8 – зависимость объемной плотности тепловой мощности в столбе дуги K от I и P_d , на рис. 9 – вольт-амперная характеристика дуги, которая построена и в функции P_d , то есть $U = f(I, P_d)$ при длине дуги 0,2 мм (все зависимости приведены для случая протекания разряда в поперечном потоке воды между катодом из стали 45 и анодом из электроэрозионного графита МПГ-7 и ограничены возможностями

применяемой техники: $U = 80$ В, $I = 1000$ А, $P_d = 1$ МПа). Суммарное значение катодного и анодного падений напряжения мало зависит от режимов горения дуги, определяется прежде всего материалом электродов и составом рабочей среды и колеблется в пределах 12–21 В. Такие выводы позволяет сделать совокупность представленных экспериментальных данных.

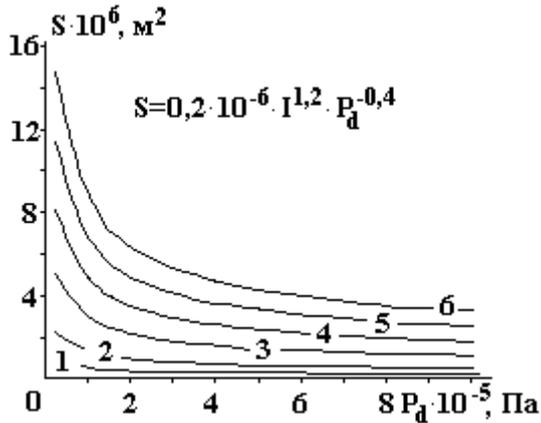


Рис. 4. Зависимость площади поперечного сечения S столба дуги от I и P_d . I , А: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600; 5 – 800; 6 – 1000

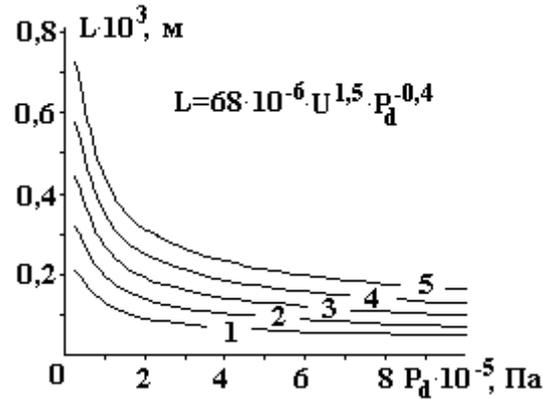


Рис. 5. Зависимость длины дуги L от U и P_d . U , В: 1 – 30; 2 – 40; 3 – 50; 4 – 60; 5 – 70

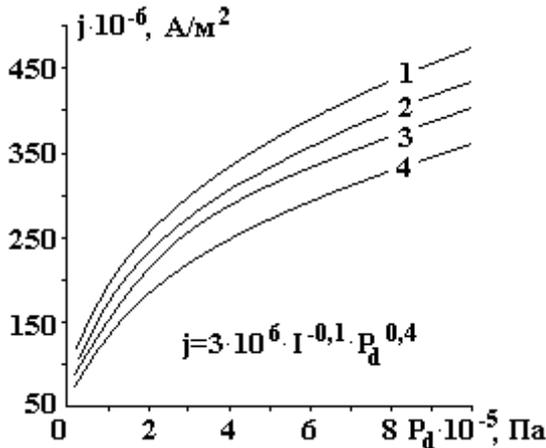


Рис. 6. Зависимость плотности тока j от I и P_d . I , А: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 1000

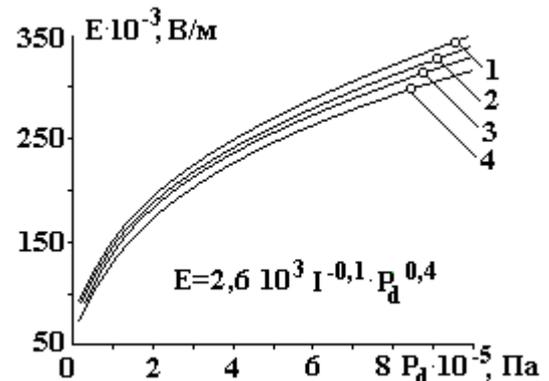


Рис. 7. Зависимость напряженности E в столбе дуги от I и P_d . I , А: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 600; 4 – 1000

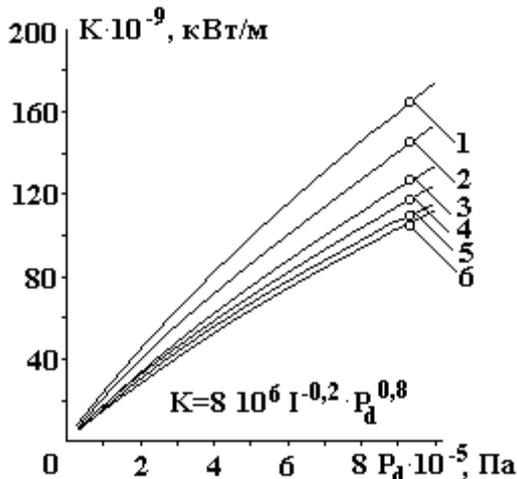


Рис. 8. Зависимость объемной плотности тепловой мощности K в столбе дуги от I и P_d . I , А: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600; 5 – 800; 6 – 1000

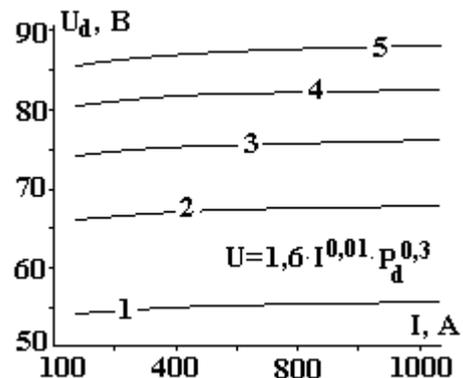


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики дуги в поперечном потоке воды при $L = 0,2$ мм. P_d , МПа: 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0

Геометрические параметры дуги (площадь поперечного сечения, длина и в конечном счете объем) обусловлены силой тока и динамическим давлением потока и с увеличением последнего уменьшаются.

По сравнению с известными сварочными и плазменными дугами площадь поперечного сечения такой дуги при прочих равных условиях (сила тока и напряжение) в несколько раз меньше, длина дуги в десятки раз меньше, а ее объем в сотни раз меньше.

Плотность тока в дуге является главным образом функцией динамического давления потока, возрастает с его увеличением, достигая 40 кА/см^2 более и по сравнению с обычными сварочными и плазменными дугами при прочих равных условиях (сила тока и напряжение) по крайней мере в несколько раз больше.

По сравнению с известными сварочными и плазменными дугами напряженность электрического поля в столбе дуги при прочих равных условиях (сила тока и напряжение) в десятки раз выше, достигает 3 кВ/см и более и является главным образом функцией динамического давления потока.

Объемная плотность тепловой мощности в столбе исследованной дуги обусловлена прежде всего динамическим давлением потока, резко возрастает с его увеличением и по сравнению с известными сварочными и плазменными дугами при прочих равных условиях (сила тока и напряжение) в десятки и сотни раз выше.

Таким образом, при горении дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика с увеличением (уменьшением) динамического давления потока геометрические характеристики дуги (площадь поперечного сечения и длина) уменьшаются (увеличиваются), а ее энергетические данные, характеризующие, в частности, напряженностью электрического поля и плотностью тока в столбе дуги, возрастают (уменьшаются), что следует рассматривать как явление саморегулирования геометрических и энергетических характеристик дуги в функции динамического давления потока.

Оценим энергетическое состояние плазмы в столбе дуги, определяемое концентрацией элементарных частиц, температурой и давлением. Измерение этих характеристик сопряжено с большими трудностями и является особой проблемой. Покажем, однако, что состояние теории и практики дугового разряда позволяет описать эти характеристики просто и надежно по полученным выше значениям плотности силы тока и напряженности электрического поля. Для этого воспользуемся следующими соображениями.

Описываемая дуга имеет достаточно четкие оптические границы, что позволяет достоверно определить ее геометрические характеристики – площадь поперечного сечения, длину, объем. Известно явление саморегулирования дуги по площади поперечного сечения: с увеличением (уменьшением) силы тока площадь поперечного сечения дуги увеличивается (уменьшается) примерно прямо пропорционально току [2, с. 14]. Механизм такого саморегулирования состоит в том, что с увеличением (уменьшением) силы тока число носителей тока (элементарных частиц) увеличивается (уменьшается), следствием чего, собственно, и является увеличение (уменьшение) площади поперечного сечения дуги. Из этого следует, что число частиц в столбе дуги прямо пропорционально току, а их концентрация (число в единице объема) может быть представлена выражением, $1/\text{м}^3$:

$$n = C_1 j, \quad (2)$$

где C_1 – коэффициент размерности; j – плотность тока, А/м^2 .

Температура плазмы в столбе дуги определяется энергией элементарных частиц. Она прямо пропорциональна объемной плотности тепловой мощности столба дуги, Вт/м^3 :

$$K = E j, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м , и обратно пропорциональна концентрации частиц (см. выражение (2)). Поэтому температура плазмы в столбе дуги может быть представлена выражением, К :

$$T = C_2 E, \quad (4)$$

где C_2 – коэффициент размерности, согласно обработанных статистических данных,

$$C_2 = 150\text{--}200 \text{ К/(В/см)}.$$

Чтобы убедиться в этом, достаточно изучить результаты измерений температуры плазмы в столбе различных дуг согласно литературным данным. Если, например, температура плазмы в столбе обычной сварочной дуги $T = 5000\text{--}6000 \text{ К}$ при $E \approx 30 \text{ В/см}$, то для дуги Гердиена $T = 50\ 000 \text{ К}$ при $E \approx 300 \text{ В/см}$ [3, с. 101–102, 245].

Давление плазмы в столбе дуги прямо пропорционально концентрации частиц и их температуре и определяется по известной формуле, Па:

$$p = n kT, \quad (5)$$

здесь k – постоянная Больцмана.

После подстановки (2) и (4) получаем

$$p = C_3 jE, \quad (6)$$

где C_3 – коэффициент размерности.

Соотношения (2), (4), (6) позволяют просто и надежно оценить энергетическое состояние плазмы в столбе дуги с точки зрения простой сути такого сложного физического явления, как дуга. Используя эти соотношения, сравним значения максимально достигнутых энергетических характеристик плазмы столба описанной дуги с наиболее эффективной дугой Гердиена (см. таблицу).

Энергетические характеристики столба дуги

Вид дуги	Плотность силы тока, кА/см ²	Напряженность электрического поля, В/см	Концентрация элементарных частиц, 1/м ³	Температура плазмы, К	Давление плазмы, МПа	Объемная плотность тепловой мощности, кВт/см ³
Дуга Гердиена	30	300	10 ¹⁸	50 000	12	9000
Описанная дуга	40	3500	10 ²⁴	500 000	200	140 000

В связи с ограниченными возможностями применяемой техники полученные результаты требуют дальнейшего уточнения.

Феноменологическое описание дуги. Из выражений (2), (4), (6), а также описанных зависимостей плотности силы тока и напряженности электрического поля (см. рис. 6, 7) и таблицы следует, что энергетические характеристики плазмы в столбе рассматриваемой дуги регулируются в широких пределах и значительно превышают энергетические характеристики плазмы известных дуг, что следует рассматривать как результат саморегулирования энергетических характеристик плазмы в столбе дуги в функции динамического давления потока. Рассмотрим вероятный физический механизм подобного саморегулирования, являющийся результатом взаимодействия дуги с потоком.

Описать такое явление в терминах фундаментальных частиц и их взаимодействий пока не представляется возможным. Поэтому рассмотрим это взаимодействие на феноменологическом уровне с макроскопической точки зрения, с точки зрения взаимодействия собственно дуги и поперечного потока среды-диэлектрика. Согласно представлениям современной физики, любое взаимодействие осуществляется через некоторые поля. Электрическая дуга – это порождение того, что называем электрическим полем, это материальная форма его проявления, это в отличие от металлических проводников тока “обнаженная” форма существования электрического поля, которое таким образом имеет самый непосредственный контакт с внешней средой, взаимодействуя с ней, и чем, собственно, объясняются тонкие механизмы саморегулирования дуги в функции состава и состояния внешней среды. Поток среды – это силовое поле. Напомним, что силовое поле – это любая причина, вызывающая движение или его изменение.

Таким образом, взаимодействие дуги с потоком следует рассматривать как взаимодействие электрического поля, характеризуемого силой тока I , и силового поля, характеризуемого динамическим давлением потока P_d . Основным результатом такого взаимодействия является то, что взаимодействующие системы претерпевают изменения.

Как было показано, в результате взаимодействия дуги с потоком наблюдается явление саморегулирования энергетических характеристик дуги (напряженности электрического поля и плотности тока) и соответственно энергетических характеристик плазмы в столбе дуги (концентрации элементарных частиц, температуры и давления) в функции динамического давления потока. Опишем физический механизм такого взаимодействия. Начнем с анализа некоторых фактов существования дуги в экстремальных условиях “механического” взаимодействия дуги с потоком, когда, во-первых, дуга обычно перемещается по направлению движения потока, но перемещается дискретно, после некоторого выстаивания, со скоростью примерно на порядок меньше скорости потока (но тогда, скажем так, какова природа сил, “механического сцепления” дуги с электродами), и, во-вторых, в результате бокового давления потока на столб дуги существования дуги казалось бы возможным только в том случае, когда столб дуги будет обладать достаточной “механической прочностью” (иначе будет разру-

шен). Следствие взаимодействия дуги с потоком есть также факт движения дуги в направлении, поперечном направлению движения потока, что наблюдается, например, при горении дуги между стальными электродами при $I > 300\text{--}400$ А и динамическом давлении потока $P_d > 0,3$ МПа. Это также требует объяснения, но и позволяет более определенно взглянуть на совокупность изложенных фактов.

Согласно существующим представлениям, в данном случае единственной силой, которая может перемещать дугу в направлении, поперечном потоку, может быть только собственное магнитное поле дуги, усиленное действием ферромагнетика. При этом в отличие от обычных дуг типа сварочных такое магнитное поле не является симметричным, а направление вектора магнитной индукции поля совпадает с направлением потока среды-диэлектрика (согласно правилу “левой” руки). Понятно при этом и “механическая прочность” такой дуги, так как собственное магнитное поле дуги соответствующих характеристик, определяемых динамическим давлением потока и значительно более высоких по сравнению с обычными дугами, сжимает, удерживает и уравнивает давление плазмы в столбе дуги (которое, напомним, многократно превышает давление в столбе известных дуг – см. выражение (6) и таблицу) и таким образом обеспечивает соответствующую энергетическую структуру столба дуги, которая термически разрушает набегающий на нее поток среды-диэлектрика. Получает объяснение и указанный ранее факт, когда дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика перемещается не вместе с потоком и не с его скоростью, так как мощное собственное магнитное поле обеспечивает перемещение дуги согласно принципу минимума Штеенбека.

Таким образом наличие собственного мощного магнитного поля, магнитная индукция которого является функцией не только силы тока I (что известно как закон Био–Саварра), но и динамического давления потока P_d (что неизвестно), является следствием и необходимым условием существования дуги в экстремальных условиях поперечного потока среды-диэлектрика. Определим магнитную индукцию такого поля.

На основании изложенного и выполненных экспериментальных исследований, а также учитывая существующие представления в области теории и практики известных дуг, можно сделать вывод, что магнитная индукция такого поля пропорциональна силе тока I и динамическому давлению потока среды-диэлектрика P_d , зависит от направления потока по отношению к столбу дуги и может быть представлена выражением, Гл:

$$B = k_1 I P_d \sin \alpha, \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности (при надлежащем выборе единиц измерения $k_1 = 1$); α – угол между направлением потока среды-диэлектрика и столбом дуги; при горении дуги в поперечном потоке среды диэлектрика $\alpha = 90^\circ$ и тогда $\sin \alpha = 1$.

На языке векторной алгебры выражение (7) может быть представлено в виде

$$\vec{B} = \vec{I} \times \vec{P}_d. \quad (8)$$

Выражение (8) имеет принципиальное значение и важные последствия. Сформулируем в самом общем виде его физический смысл, приняв во внимание, что I – основная количественная характеристика электрического поля, P_d – основная количественная характеристика силового поля.

Соотношение (8) выражает, по существу, неизвестную ранее закономерность взаимодействия электрического и силового полей, результатом которого является преобразование энергии электрического поля в энергию собственного магнитного поля дуги, сжимающего и удерживающего плазму столба дуги высоких энергетических характеристик. Следовательно, в столбе предложенной дуги одновременно достигается и получение, и удержание плазмы высоких энергетических характеристик.

Это означает, что одно явление (получение в столбе плазмы соответствующих характеристик) обязательно сопровождается другим (наличием собственного магнитного поля дуги соответствующих характеристик). Иначе говоря, каждое из этих явлений есть следствие и продолжение другого, а в целом – это две стороны одного и того же явления, называемого электромагнетизмом дугового разряда.

Соответствующий анализ показывает, что указанная закономерность распространяется на все известные дуги. В этой связи любые перемещения известных дуг, в том числе и многочисленные примеры так называемого аномального обратного движения дуги [3, с. 306], объясняются наличием собственного магнитного поля дуги, которое всегда несимметрично и переменчиво и обеспечивает перемещение дуги согласно принципу наименьшего действия, сформулированного для дуг как принцип минимума Штеенбека. Именно поэтому перемещение дуги в пространстве является ее безусловным свойством.

В отличие от существующих представлений, что магнитная индукция – функция только силы

тока (закон Био–Саварра), выражение (8) устанавливает, что в условиях существования дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика магнитная индукция собственного магнитного поля дуги является также и функцией динамического давления потока. Однако если учесть, что электрические и магнитные силы составляют части одного физического явления – электромагнитного взаимодействия частиц [4, с. 276], и соответственно электрические и магнитные эффекты следует рассматривать как разные стороны одного и того же явления, называемого электромагнетизмом, указанная закономерность не противоречит существующим в этой области представлениям.

Следует напомнить, что любое явление вне связи и взаимозависимости с другими явлениями становится иррациональным. В этой связи отметим, что выражение (8) в известной мере аналогично выражениям, описывающим закон электромагнитной силы (закон Ампера) и закон электромагнитной индукции (закон Фарадея) с той принципиальной разницей, что в первом случае устанавливается, по существу, закон взаимодействия электрического и магнитного полей, результатом которого является преобразование энергии электрического поля в энергию силового поля; во втором случае – закон взаимодействия силового и магнитного полей, результатом которого является преобразование энергии силового поля в энергию электрического поля; выражение (8) устанавливает закономерность взаимодействия электрического и силового полей, результатом которого является преобразование энергии электрического поля в энергию магнитного поля, в связи с чем такая закономерность может быть названа законом магнитной индукции.

В аналогиях и общности форм указанных закономерностей, в том, что их объединяет и делает похожими, следует искать общность физической сущности рассматриваемых явлений, которая, по видимому, может быть сформулирована как закономерность взаимопревращения энергий электрического, магнитного и силового полей. В этой связи удобно проследить за такими фактами взаимопревращений энергий электрического E , магнитного B и силового P полей на условной схеме (рис. 10), названной нами треугольником взаимопревращения энергий этих полей.

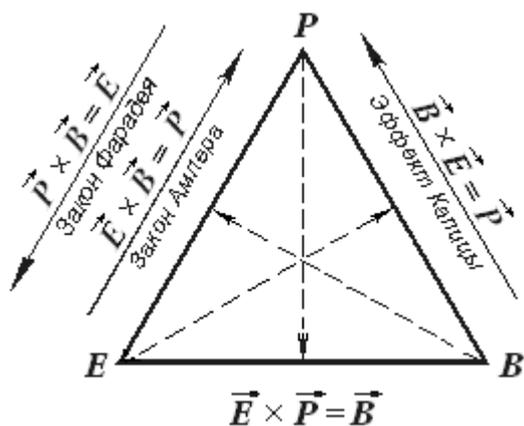


Рис. 10. Треугольник взаимопревращений энергий электрического E , магнитного B и силового P полей

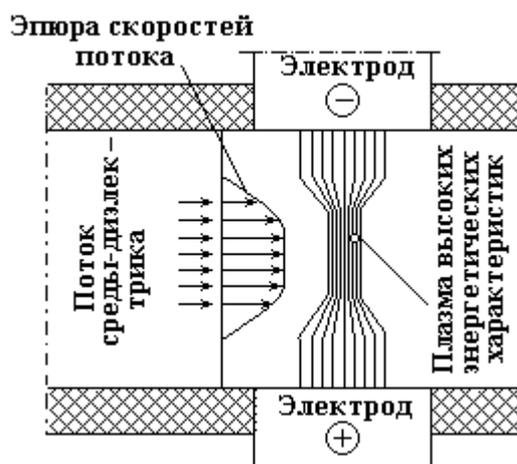


Рис. 11. “Механическая ловушка”

Области рационального применения дуги. В соответствии с изложенным электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика по сравнению с известными дугами обеспечивает значительно более высокий уровень легко регулируемых энергетических характеристик и поэтому может рассматриваться как качественно новый источник тепла для разнообразных применений в областях науки и новых технологий.

Так, в столбе такой дуги можно получить и удерживать плазму высоких энергетических характеристик, ограничиваемых лишь возможностями применяемой техники. Здесь возникает проблема термоизоляции полученной высокотемпературной плазмы и ее удержание в столбе стационарной дуги. Проблему можно решить, если поток среды-диэлектрика в межэлектродном зазоре формировать так, чтобы в приэлектродных областях его скорость равнялась или приближалась к нулю при сохранении необходимой скорости потока (динамического давления) в средней части столба дуги (рис. 11). При этом в отличие от известных технических решений, когда для удержания плазмы высоких энергетических характеристик используются внешние магнитные поля и системы такого вида называются “магнитными ловушками”, предложенное техническое решение согласно изложенной сути рас-

смотренного физического явления (см. выражение (8)) следует назвать “механической ловушкой”.

Следует также учитывать, что энергетические характеристики катодного и анодного источников тепла на электродах описанной дуги также регулируются в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных дуг, типа сварочных, достаточных для плавления металла и заканчивая значениями, достаточными для тонкого локального испарения любых токопроводящих материалов. Это позволяет применять дугу для реализации самых разнообразных новых высокоэффективных технологий, таких как размерная обработка металлов, различные способы поверхностного упрочнения металлов, более эффективная, по сравнению с известной, подводная резка металлов, плазменная резка металлов при отсутствии зоны термического влияния, получение металлических порошков, металлических суспензий, проведение химических реакций и др.

Заключение

Установлена не известная ранее закономерность взаимодействия электрического поля, материальной формой проявления которого является электрическая дуга, характеризуемая силой тока I , и силового поля, материальная форма проявления которого – поток среды-диэлектрика, характеризуемый динамическим давлением P_d , состоящая в том, что такое взаимодействие сопровождается явлением саморегулирования энергетических характеристик плазмы в столбе дуги, собственно температуры, концентрации элементарных частиц, давления, а также магнитной индукции собственного магнитного поля дуги, которые описываются в функции векторного произведения силы тока дуги I на динамическое давление потока среды-диэлектрика P_d , то есть $\vec{I} \times \vec{P}_d$, и возрастают при увеличении последнего.

Изложенная закономерность означает, что при протекании электрической дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика энергетические характеристики плазмы в столбе дуги (температура, концентрация элементарных частиц, давление) регулируются в самых широких пределах в функции динамического давления потока, а собственное магнитное поле дуги сжимает и удерживает в столбе дуги полученную плазму заданных, регулируемых энергетических характеристик, начиная от значений, характерных для обычных сварочных дуг и кончая плазмой, энергетические характеристики которой ограничиваются лишь возможностями применяемой техники (рабочим напряжением источника питания дуги и динамическим давлением потока среды-диэлектрика). Это позволяет использовать такую дугу для разнообразных применений в областях науки и новых технологий.

При протекании электрической дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика энергетические характеристики катодного и анодного источников тепла на электродах регулируются в функции динамического давления потока в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных дуг, типа сварочных, достаточных для плавления металла, и заканчивая значениями, достаточными для тонкого размерного испарения любых токопроводящих материалов. Это позволяет реализовать самые разнообразные новые высокоэффективные технологии, в частности, размерную обработку металлов, различные способы поверхностного упрочнения металлов, более эффективную, по сравнению с известной, подводную резку металлов, плазменную резку металлов при отсутствии зоны термического влияния, получение металлических порошков, получение металлических суспензий, проведение химических реакций и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07./ Кіровоградський держ. техн. ун-т. Киев, 1999.
2. Мазель А. Г. Технологические свойства электросварочной дуги. М., 1969.
3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М., 1961.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. М., 1977.

Поступила 10.05.04

Summary

The electrical arc in a transversal stream of an environment-dielectric is circumscribed which as contrasted to with known arcs ensures considerably more high level of easily regulated power performances, that allows to consider such arc as a qualitatively new source of heat for new techniques.