

лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин: Дисс. докт. техн. наук: Санкт-Петербург, 2005.

11. Маскинская А.Ю. Повышение эффективности теплообменных аппаратов за счет интенсификации теплообмена на поверхности с лунками: Дисс. канд. техн. наук: М., 2004.

12. Haasenritter A., Weigand B. Optimization of the rib structure inside 2d cooling channel // Proceedings of ASME Turbo Expo-50, June 2004. № GT2004-53187, Vienna, Austria, p.1-10.

Получено 22.03.2007 г.

УДК 537.523.5; 553.93

**ЖОВТЯНСКИЙ В.А.**

*Институт газа НАН Украины*

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА – ОСНОВА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ ПЛАЗМЫ. Часть I. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

В обзорной работе анализируются наиболее важные свойства плазмы электрической дуги с точки зрения ее теплотехнических применений. Особо отмечены такие важнейшие свойства электрической дуги как высокая энергетическая эффективность ее технологических применений вследствие минимальных потерь на транспорт электрического тока в ее канале и способность обеспечивать экстремальные режимы в тех или иных процессах, недостижимые обычно при использовании источников энергии химического типа. Показано, что определяющее влияние на режимы существования электродуговой плазмы имеют процессы теплопереноса.

В обзорной работе анализируются наиболее важные свойства плазмы электрической дуги с точки зрения ее теплотехнических применений. Особо отмечены такие важнейшие свойства электрической дуги как высокая энергетическая эффективность ее технологических применений вследствие минимальных потерь на транспорт электрического тока в ее канале и способность обеспечивать экстремальные режимы в тех или иных процессах, недостижимые обычно при использовании источников энергии химического типа. Показано, что определяющее влияние на режимы существования электродуговой плазмы имеют процессы теплопереноса.

The most important properties of the electric arc plasma are analyzed in this review from the standpoint of industry heat engineering applications. As it is illustrated the most valuable energy efficiency of the plasma application in numerous technologies is reached due to minimal loss of electric power during its transfer in electric arc channel. The extreme conditions in technology processes are immediately available due to using of electric arc plasma. They are unattainable often with using of chemical power supply. As is shown, the heat transfer is determining factor in problem of electric arc stable regime existing.

$a$  – ускорение частицы;  
 $D$  – энергия диссоциации;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $E$  – электрическое поле;  
 $h$  – постоянная Планка;  
 $i$  – ток электрического разряда (дуги);  
 $I$  – энергия ионизации;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $m$  – масса частицы;  
 $N$  – концентрация частиц;

$p$  – давление;  
 $P$  – мощность электрического разряда;  
 $q$  – тепловой поток;  
 $Q$  – тепловая энергия;  
 $r$  – радиальная координата, радиус;  
 $R$  – радиус;  
 $S$  – тепловой потенциал;  
 $T$  – температура;  
 $u$  – дрейфовая скорость частицы;  
 $U$  – напряжение;

$v$  – средняя тепловая скорость частицы.  
 $\alpha$  – степень ионизации плазмы;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, длина свободного пробега;  
 $\mu$  – подвижность частицы;  
 $\nu = 1, 2$  – характеризует цилиндрическую или сферическую геометрию, соответственно;  
 $\sigma$  – электропроводность плазмы;  
 $\tau$  – характерное время между последовательными столкновениями частицы;  
 $\Sigma$  – статистическая сумма частиц;  
 $\chi$  – множитель Саха;  
 $\omega$  – относительная концентрация частиц отдельного элемента в последовательных зарядовых состояниях;  
 USD – доллар США.

### **Общая характеристика плазменных технологий**

Плазменные технологии, используя электрическую энергию для получения собственно плазмы как рабочего тела в тех или иных технологических процессах, легко позволяют достигать экстремальных состояний вещества и/или процесса, если сравнивать их с возможностями технологий, использующих наиболее распространенные первичные источники энергии химического типа. Вместе с тем, следует иметь в виду, что в конечном итоге коэффициент преобразования энергетического ресурса в таких процессах по отношению к использованию первичного топлива на электрических станциях составляет не более 0,25 с учетом эффективности генерации электрической энергии и потерь на ее транспортировку потребителям [1 (разд. 3, 26)]. Собственно говоря, указанные рамки предопределяют, в конечном итоге, целесообразность применения плазменных технологий.

Пугающе малым упомянутый коэффициент выглядит на первый взгляд, если рассматривать его с точки зрения энергосбережения (энергоэффективности) в рамках соответствующих физических законов. Если же исходить из социально-экономических интересов (именно эту часть проблемы отражает существующее законодательство), то ситуация смягчается. Действительно, применительно к настоящей публикации

### **Индексы верхние:**

$(z)$  – заряд частицы.

### **Индексы нижние:**

$a$  – характеризует атомарную компоненту плазмы, в отдельных случаях – указывает на соответствие параметра области электрической дуги;

$e$  – характеризует электронную компоненту плазмы;

$i$  – характеризует ионную компоненту плазмы;

$m$  – характеризует молекулярную компоненту плазмы;

$s$  – сорт частицы (плазмообразующего газа);

$w$  – характеризует состояние охлаждающей стенки.

представляет интерес, в конечном итоге, тепловой эффект от применения источников энергии. Вследствие радикальных изменений цен на первичные топливно-энергетические ресурсы последних лет стоимости единицы тепловой энергии, получаемой по их тепловому эквиваленту в промышленности за счет сжигания газа и за счет применения электрической энергии, различаются в меньшей мере, составляя в Украине 25,7 и 92,5 грн /ГДж, соответственно. Здесь приняты стоимость газа для упомянутой категории потребителей 864 грн/1000 м<sup>3</sup> и рыночный розничный тариф на электрическую энергию 0,333 грн /кВт·ч по состоянию на апрель 2007 года. Это не удивительно, т.к. стоимость электрической энергии в значительной степени определяется стоимостью угля; последняя не подвержена столь значительным колебаниям, как в случае газа или нефти. В конечном итоге, такое соотношение предопределяется тем, что мировые запасы угля в несколько раз превышают запасы нефти и природного газа. К тому же месторождения угля достаточно равномерно распределены по странам мира в отличие от месторождений нефти и газа, что обеспечивает стабильность цен на него [2]. Особенно благоприятно для внедрения плазменных технологий применение дешевой электроэнергии в ночные часы, тарифный коэффициент для которой в случае применения тризонного тарифа, дифференцированного по времени суток [1 (разд. 19)], в настоящее время составляет 0,25.

Это обстоятельство, кстати, особенно ярко показывает разницу в подходах к энергосбережению на основе физических представлений и социально-экономических факторов (см. также [1 (разд. 1)]).

Автор избегает, как правило, терминологических обсуждений, поскольку чаще всего за ними скрывается нежелание рассматривать ту или иную проблему по существу. Тем не менее, касательно настоящей публикации необходимы некоторые предварительные объяснения. Исторически сложившаяся практика (именно она обычно и является источником некорректных терминов), например, в электрометаллургии [3] или же в технике нанесения покрытий [4] вводит два понятия — электродуговых и плазменных технологий. Обращает на себя внимание даже формальная нестрогость такой классификации, т.к. один класс однородных явлений характеризуется по виду устройства, применяемого для получения рабочего тела (электрическая дуга), а второй — по состоянию вещества (плазма) (см. также [4]). По существу же в обоих вариантах технологий рабочим телом является плазма, а для ее получения в последнем варианте применяется плазмотрон. Однако и в самом плазмотроне для генерирования плазмы применяется электрическая дуга. Глубинное различие состоит в том, что в одном случае применяется дуга с плавящимся электродом, а в другом — с неплавящимся. Внешнее же — в способе организации плазменного объема. Если в обычной дуге плазма локализована между электродами разрядного промежутка, то в дуговом плазмотроне ее локализация определяется потоком газа, продуваемого через разряд; применительно к обсуждаемым здесь применениям она чаще всего имеет вид струи, истекающей через отверстие в аноде. Вот почему мы включаем здесь в рассмотрение оба класса упомянутых технологий.

### **Электрическая дуга и преимущества ее технологических применений**

Электрическая дуга — одна из разновидностей электрических газовых разрядов, в которых в результате приложения напряжения к разрядному промежутку ионизируется вначале нейтральный газ и возникает электропроводный канал. Строго говоря, к дуговым относят разряды, в которых

прикатодное падение потенциала в разрядном промежутке (являющееся частью напряжения на дуге  $U$  в целом) имеет относительно небольшую величину порядка потенциала ионизации атомов, т.е. десяти вольт [5]. Причиной названия стала характерная изогнутая форма, которую приобретает канал дугового разряда в открытой атмосфере вследствие всплывания его средней части под воздействием архимедовой силы. Дуговым разрядам свойственны значительные токи ( $i \sim 1 \dots 10^5$  А), намного превышающие типичные токи в других видах разрядов. Например, в также довольно распространенных тлеющих разрядах токи, как правило, значительно слабее ( $i \sim 10^{-4} \dots 10^{-1}$  А), а напряжения составляют сотни вольт. Таким образом, для замыкания даже килоамперных токов через межэлектродный промежуток в электрической дуге требуются относительно небольшие напряжения. Другими словами, дуга обеспечивает эффективный транспорт электрической энергии в ее канале.

Тем не менее, в дуге происходит выделение тепловой энергии часто огромной мощности  $P \sim Ui$ , которая может достигать по порядку величины уровня мегаватт. Именно это обстоятельство с учетом ограниченности объема, в котором происходит энерговыделение (обычно от долей до сотен см<sup>3</sup>), предопределяет тот уровень высоких температур, которые достижимы в обсуждаемых технологиях.

Все же этих преимуществ электрической дуги было бы недостаточно для ее широкого применения в отсутствие самоорганизации в плазме дуги физических процессов, определяющих устойчивость ее существования в достаточно широкой области параметров. Действительно, например, высокотемпературная плазма в исследованиях термоядерного синтеза демонстрирует несравненно более высокие параметры рабочего тела как по удельному энергокладу, так и по достижимым температурам. Тем не менее, едва не каждый шаг в исследовании этой перспективы энергетического эльдорадо сопровождается проблемой возникновения и преодоления очередной неустойчивости. Далее кратко анализируются физические причины устойчивости (а также их пределы) и энергетической эффективности технологических применений электрической дуги. Они, в конечном итоге, обусловлены особенностями процессов тепло- и массопереноса.

В целом, электрическая дуга – уникальный объект физики и техники плазмы, где совокупность физических процессов, определяющих ее свойства, самоорганизована таким образом, чтобы “обречь” ее на широкие технологические применения. Она – один из первых искусственно созданных плазменных объектов, полученный еще в начале XIX века (см. [5]). Упомянутые выше свойства дуги обусловили ее активное проникновение в технологии в том же столетии, наиболее известное из которых – электрическая сварка. При этом оказалось достаточным руководствоваться эмпирически полученной суммой знаний о свойствах электродуговой плазмы.

К середине XX ст. плазма электрической дуги – уже достаточно исследованный объект физики плазмы, исходя из концепции ее равновесных свойств (отсюда широко используемый термин, характеризующий ее состояние – “термическая плазма” [6]). Успехи в исследованиях электродуговой плазмы способствовали значительному расширению ее технологических применений. О наиболее устоявшихся из них уже упоминалось. К менее устоявшимся или перспективным можно отнести технологии плазменно-водородного восстановления оксидов тугоплавких металлов с получением высокодисперсных порошков [7 (разд. IV, гл. 1)], плазменные технологии получения углеродных наноструктур [7 (разд. IV, гл. 2), 8], розжига и стабилизации горения пылеугольного факела, термохимической подготовки низкорекреационных топлив на тепловых электростанциях [1 (разд. 30)], получения синтетических газовых топлив (в частности – водорода) на основе газификации твердых топлив [9 – 11] и жидких соединений, содержащих углеродсодержащие вещества [12]. Примечательно, что последовательное применение принципа получения синтетического газового топлива с использованием плазменной конверсии углеродосодержащих материалов позволяет создать даже наиболее экономичные технологии переработки отходов [7 (разд. II, гл. 1), 13].

### **Теплофизические свойства равновесной плазмы**

В тех же предположениях идеальности, что и для обычного газа, уравнение состояния для

плазмы внешне существенно не отличается от аналога для нейтрального газа и равняется сумме парциальных давлений компонент, входящих в состав плазмы:

$$p = kT \left( N_e + \sum_{s,z} N_s^{(z)} \right). \quad (1)$$

Здесь суммирование в правой части проводится кроме электронной компоненты также по всем ступеням ионизации  $z$  всех элементов  $s$ , присутствующих в плазме; принято также обычно приемлемое для электродуговой плазмы допущение о равенства кинетических температур ее частиц. При отмеченном уже сходстве уравнения (1) с уравнением состояния для идеального газа, появляются и важные различия. Одно из них – давление перестает быть линейной функцией от температуры, т.к. входящие в правую часть (1) концентрации частиц различных зарядов сами экспоненциально зависят от температуры. Действительно, относительная концентрация частиц отдельного элемента в последовательных зарядовых состояниях определяется, согласно уравнению Саха [14], следующим образом:

$$\omega^{(z+1)} = N^{(z+1)} / N^{(z)} = \left( \Sigma^{(z+1)} / \Sigma^{(z)} \right) \times \left[ \chi(kT) / N_e \right] \exp(-I^{(z)} / kT), \quad (2)$$

где

$$\chi(kT) = 2 \left( 2\pi m_e kT / h^2 \right)^{3/2} \quad (3)$$

– множитель Саха. Присутствующие в (2) статистические суммы частиц характеризуют число различных квантовых состояний частицы с заданной энергией и зависят от ее возможных квантовых конфигураций. В обычно приемлемых допущениях они кратны единице. Например, у инертных газов  $\Sigma^{(0)} = 1$ ,  $\Sigma^{(1)} = 6$  и, соответственно, в  $N$ ,  $O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$   $\Sigma^{(0)} = 4, 9, 1, 3$ , а  $\Sigma^{(1)} = 9, 4, 2, 4$  [5].

Для большинства теплотехнических применений уравнение Саха (2) можно существенно упростить, ограничившись рассмотрением первой кратности ионизации частиц  $z = 1$ ; в случае так-

же одноэлементной плазмы оно принимает простейший вид:

$$N_e N_i / N_a = N_e^2 / N_a = (\Sigma^{(1)} / \Sigma^{(0)}) \chi(kT) \exp(-I/kT) \quad (4)$$

(здесь и далее опущен верхний индекс для потенциала ионизации атомных частиц). Мы не сочли возможным ограничиться здесь этой — обычной — формой представления упомянутого уравнения, т.к. в одной из монографий, посвященной плазменным технологиям, обнаружили утверждение о приблизительном характере уравнения Саха. В основу этого утверждения легло предложение рассмотреть (4) при больших температурах. В действительности же, таким температурам соответствует “включение” в процесс ионизации частиц с зарядом  $z > 1$  согласно (2); само же по себе уравнение Саха является точным, если система удовлетворяет критериям равновесного состояния, для которого оно получено.

Одна из особенностей уравнения Саха состоит в том, что максимальное значение концентрации ионов определенной кратности ионизации  $N_s^{(z+1) \max}$  достигается при энергетической температуре плазмы

$$kT^* \sim 0,1 I_s^{(z)}. \quad (5)$$

В физике и технике плазмы удобно оперировать с энергетической единицей — электрон-вольт (эВ). Это естественно, поскольку основным объектом рассмотрения в плазме на микроуровне является электрон со свойственным ему зарядом, а энергия ионизации частицы выражается через потенциал ионизации — разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энергию достаточную для ионизации. Удобно представлять в таких же энергетических единицах температуру  $kT$ . Нетрудно показать, что одному электрон-вольту соответствует температура 11600 К. Учитывая, что для большинства атомов  $I \sim 10...15$  эВ, можно ожидать их максимальной степени однократной ионизации  $\omega_{\max}^{(1)}$  при  $T \sim 1,5 \cdot 10^4$  К.

Следует подчеркнуть, что подобного рода довольно грубые оценки температур неприемлемы, однако, если речь идет об анализе процессов в плазме конкретных технологических установок. Более того, неприемлемы даже результаты опре-

деления температуры в технологических процессах с внешне безобидной погрешностью  $\pm 10\%$  (часто подобными оценочными расчетами замещают довольно нетривиальную проблему температурной диагностики плазмы). Действительно, это соответствует неопределенности экспоненциального множителя в (4) с учетом оценки (5) в пределах  $e^{-9}...e^{-11}$  раз, иными словами, результат определения степени ионизации будет отличаться в  $e^2$  раз или почти на порядок величины для температурного диапазона в пределах отмеченной погрешности.

Равновесный химический состав плазмы (степени диссоциации молекул, концентрации вновь образующихся продуктов) также подчиняется уравнениям, аналогичным уравнению Саха. Например, плотности атомов  $N_A$  и молекул  $N_{A_2}$ , принимающих участие в реакции диссоциации  $A_2 \leftrightarrow 2A$ , удовлетворяют соотношению

$$N_A^2 / N_{A_2} \sim \exp(-D/kT). \quad (6)$$

Поэтому изложенные выше замечания о точности температурных измерений имеют достаточно общий характер касательно высокотемпературных технологических процессов.

У таких газов как кислород ( $D = 5,08$  эВ,  $I_a = 13,61$  эВ,  $I_m = 14,01$  эВ) и водород ( $D = 4,48$  эВ,  $I_a = 13,59$  эВ,  $I_m = 15,43$  эВ) диссоциация проходит от начала до конца в диапазоне температур примерно 2000...5000 К. У азота же этот диапазон сдвинут вверх (4000...8000 К), т.к. его молекула связана исключительно сильно:  $D = 9,76$  эВ,  $I_a = 14,54$  эВ,  $I_m = 15,51$  эВ.

В чистых газах в области заметной ионизации молекул чаще всего уже не остается, т.к. обычно  $I > 2D$ . В смесях может быть иначе. Например, ионизация воздуха начинается с отрыва электронов от молекул NO, образующихся при его нагревании в концентрации нескольких процентов. Они обладают довольно низким потенциалом ионизации  $I = 9,3$  эВ, обуславливая заметную ионизацию воздуха при далеко не полной диссоциации азота.

Частицы плазмы обладают значительной потенциальной энергией, запасаемой в результате энергетических затрат на разрушение молекул, отрыв электронов, а также на химические пре-

вращения в смеси, что вносит весомый вклад в удельную энергию и, соответственно, теплоемкость плазмы. Последовательный учет особенностей влияния диссоциации молекулярных частиц на удельную энергию плазмы частиц в проблеме напыления покрытий позволил отказаться от дефицитной в свое время и дорогостоящей аргон-водородной плазмообразующей смеси, заменив ее продуктами сгорания природного газа [15, 16]. Плазма, генерируемая в этой смеси, содержит компоненты с различными значениями температур максимальных скоростей диссоциации:  $\text{H}_2\text{O} - 2800$ ,  $\text{CO}_2 - 3500$ ,  $\text{H}_2 - 4500$ ,  $\text{N}_2 - 7000$  К. Это обеспечивает максимальные теплоотдачу от плазменной струи и оплавление напыляемого дисперсного порошка. Кроме того, в такой смеси кислород воздуха – нежелательный компонент при напылении многих материалов – связывается в термически стойкий оксид углерода; при этом водород, обычно специально добавляемый к инертным газам для повышения энтальпии, образуется в смеси так или иначе. Причем его количество, как и восстановительный потенциал среды в целом, управляется соотношением газ/воздух. Иными словами, процесс сопровождается образованием синтез-газа  $\text{CO} + \text{H}_2$ , являющегося основным предметом интереса во всех процессах конверсии топлив [9 – 13].

### **Транспортные свойства плазмы. Электропроводность**

Существенно более важным по сравнению с особенностями поведения уравнения состояния (1) является определяющее влияние заряженных частиц плазмы, и в первую очередь – электронов, на ее транспортные свойства. В частности, специфическим для плазмы является эффект подвижности заряженных частиц, характеризующий их способность ускоряться под воздействием электрического поля между двумя последовательными преимущественными столкновениями с нейтральными частицами, определяя в целом их дрейфовое движение. Результирующая направленная скорость  $u$ , приобретаемая электроном между двумя последовательными соударениями, определяется ускорением частицы  $a$  на протяжении промежутка времени  $\tau$  между среднестатис-

тическими соударениями, которые в свою очередь, определяются величиной электрического поля  $E$ , а также длиной свободного пробега электрона  $\lambda_e$  и его тепловой скоростью  $v$ :

$$u = a \tau = \frac{eE}{m_e} \frac{\lambda_e}{v} = \frac{e\lambda_e}{m_e v} E = \mu_e E. \quad (7)$$

Выделенный здесь отдельно коэффициент пропорциональности  $\mu_e$  по отношению к величине электрического поля  $E$  и представляет собой подвижность электрона. Соответственно, электропроводность плазмы определяется следующим образом:

$$\sigma = e \mu_e N_e. \quad (8)$$

Эта формула справедлива для не слишком высоких степеней ионизации плазмы  $\alpha = N_e / N_a < 0,01$  и приемлема для описания большинства теплотехнических процессов.

Особенности процессов теплопереноса. Одним из главнейших механизмов выноса энергии из плазмы является теплопроводность. Температура в газоразрядной плазме обычно определяется балансом между выделением джоулева тепла и теплопроводным оттоком энергии. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  в допущении неделимости частиц плазмы зависит только от температуры, увеличиваясь с ее ростом пропорционально тепловой скорости частиц. Строгие формулы для расчетов  $\lambda$  вытекают из анализа кинетического уравнения Больцмана; их особенностью в плазме или газе, в которых происходят ионизация, диссоциация или химические превращения, являются локальные максимумы в температурных интервалах, соответствующих этим процессам. Они обусловлены преобразованием потенциальной энергии, связанной с упомянутыми процессами, в кинетическую энергию частиц при их сопутствующей диффузии из более горячих областей в холодные.

Распределение температуры как в области существования дуги, так и вне ее определяется уравнением теплопроводности (или баланса энергии) Эленбааса-Хеллера [5, 17]:

$$\frac{1}{r^v} \frac{d}{dr} \left( r^v \frac{dS}{dr} \right) + \sigma E^2 = 0; \quad (9)$$

$$S = \int_0^T \lambda(T) dT. \quad (10)$$

Введенный здесь потенциал потока тепла  $S$  позволяет сгладить влияние нерегулярно изменяющегося в функции от температуры коэффициента теплопроводности, входящего в конечном итоге под знак дифференцирования в уравнении (9). Граничными условиями являются:

$$dS/dr (r = 0) = 0; \quad (11)$$

$$S(r = r_w) = S_w. \quad (12)$$

Довольно фундаментальной является проблема охлаждающей стенки. Действительно, в простейшем случае разряда цилиндрической формы невозможно решение уравнений (9, 10) в системе “плазма–окружающий газ” при следующей замене граничного условия (12):

$$S(r = \infty) = S, \quad (13)$$

где  $S$  характеризует температуру невозмущенного электрической дугой газа. Причина состоит в том, что отвод потока тепла из центральных зон электрической дуги на ее периферию не может быть обеспечен в условиях незначительного градиента температуры. Действительно, тепловой поток через некоторое концентрическое сечение за пределами дуги на расстоянии  $r$  от ее оси по определению составляет:

$$q = -2\pi\nu r^\nu \lambda \frac{dT}{dr} = -2\pi\nu r^\nu \frac{dS}{dr}. \quad (14)$$

Интегрируя выражение для потока в цилиндрической геометрии в области от радиуса дуги  $r_a$ , в пределах которого сосредоточено тепловыделение, до  $R > r_a$ , получим величину отводимой от дуги тепловой энергии:

$$Q = 2\pi[S(r_a) - S(r)] / \ln(R/r_a). \quad (15)$$

Отсюда следует, что  $Q \rightarrow 0$  при  $R \rightarrow \infty$ , то есть величина теплового потока, который может быть отведен теплопроводностью от открытой дуги цилиндрической формы, логарифмически спадает к нулю. Такая проблема принципиально от-

сутствует в случае сферической геометрии ( $\nu = 2$  в уравнении (9)), хотя, строго говоря, сферическая дуга не реализуема.

В силу двух последних обстоятельств свободнотгорящая электрическая дуга может существовать обычно в виде достаточно короткой дуги, длина которой не превышает нескольких ее диаметров. Вопрос теплоотвода решается при этом самосогласованно с учетом геометрического фактора. Действительно, дуга в этом случае принимает форму эллипсоида вращения, что приближает ее к сферической геометрии, облегчая теплоотвод [18].

В случае длинной дуги проблема, в принципе, может сниматься возникающими конвективными потоками в атмосфере, в которой находится цилиндрической источник тепла. Однако возможности отвода энергии за счет конвективных механизмов весьма ограничены [18]. Поэтому попытки удлинить короткую дугу обычно приводят к неустойчивому режиму горения и к ее погасанию.

Вот почему получение стационарной длинной дуги предполагает, вообще говоря, наличие стенки, на которую отводится возникающий тепловой поток. Главная особенность такой системы состоит в принципиальной возможности существования двух форм длинного дугового разряда: объемного и контрагированного. В случае первого из них столб дуги занимает более или менее равномерно все сечение разряда между ограничивающими стенками. Во втором – происходит стягивание разряда в относительно узкий шнур. Причина этого явления – неустойчивость газового разряда; наиболее характерна в этом случае ионизационно-перегревная или тепловая неустойчивость [5, 19]. Дестабилизирующую роль играет локальное повышение температуры газа. Оно сопровождается уменьшением плотности его частиц  $N$  за счет теплового расширения в условиях постоянства давления. При постоянстве же электрического поля  $E$  в разряде это приводит к возрастанию отношения  $E/N$ , и зависящей от него электронной температуры. Последнее ведет к усилению ионизации, локальному повышению проводимости, возрастанию плотности тока и выделению Джоулева тепла. В результате газ нагревается еще сильнее, продолжая цепочку раз-

вития неустойчивости. Стабилизирующими факторами являются диффузия и теплопроводность, способствующие рассасыванию неоднородностей плотностей частиц и температуры; их относительная роль уменьшается с возрастанием давления и силы тока в разряде.

### **Генераторы плотной низкотемпературной плазмы**

Стеночностабилизированные электрические дуги в чистом виде применяются преимущественно для исследований теплофизических свойств веществ при высоких температурах [20]. Они позволяют получить достаточно большой объем разрядной плазмы, но, кроме того, снимают проблему пространственной фиксации канала дуги, одной из причин нестабильности которого являются неустойчивости катодного и анодного пятен, через которые замыкается электрический ток на электроды [5, 6]. Характерная особенность стеночностабилизированных электрических дуг состоит в том, что для повышения температуры плазмы в канале следует увеличивать уровень охлаждения на периферии. Например, в случае интенсивного охлаждения столба дуги водяным вихрем удалось получить рекордную тогда температуру более 50 000 К в дуге при силе тока 1500 А в диафрагме диаметром 2,5 мм [6]. Последовательное решение проблемы теплоотвода применительно к практическим целям привело к созданию так называемых плазмотронов — устройств, генерирующих плазменную струю в потоке плазмообразующего газа, обдувающего дугу. Процессы в дуговом канале плазмотрона довольно сложны; тем не менее, основой для их понимания и адекватного управления параметрами рабочей среды плазмотрона являются свойства электрической дуги.

Физика и техника плазмотронов в настоящее время достаточно развиты (см., например, [17, 21, 22]), но изложение их основ выходит за пределы возможностей этой публикации. Имея в виду в дальнейшем перейти к оценкам перспектив плазменных технологий, отметим только два важных параметра, лимитирующих применение плазмотронов в теплотехнических установках: относительно высокая стоимость оборудования

и ограниченный ресурс. Первый из них обусловлен в значительной степени стоимостью электротехнических устройств питания и стабилизации режимов работы плазмотрона постоянного тока, составляющих в удельном представлении около 1 тыс. USD/кВт при мощностях единиц киловатт и снижающихся до уровня примерно 0,1 тыс. USD/кВт при единичной мощности оборудования близко 1 МВт. Второй — эрозией материала электродов, в первую очередь катода. В настоящее время разработаны различные типы достаточно эффективных электродов. Однако их ресурс для плазмотронов, представляющих интерес в энергетических применениях, составляет 200...300 часов. Поэтому для дальнейших оценок мы ориентируемся на простейшие медные электроды минимальной стоимостью, ресурс которых, тем не менее, составляет 200 часов [23].

Вместе с тем, применение плазмотронов в теплотехнике вследствие их относительной сложности и дороговизны в ряде случаев бывает вообще избыточным. Поэтому — если это позволяют конкретные условия — функции рабочего тела выполняет плазма обычной электрической дуги [10, 12]. Например, в работе [10] для исследований газификации низкосортного угля применена 3-фазная электрическая дуга между угольными электродами. Ток локализуется в электродуговой зоне реактора, охваченной электромагнитной катушкой; последняя обеспечивает магнитное управление дугой. Мощность установки составляет 70 кВт.

Значительные преимущества имеют также плазмотроны переменного тока. В разрядной камере такого плазмотрона одновременно может гореть несколько дуг, заполняющих доступное пространство, за счет чего, а также благодаря диффузии электронов формируется объемная область с высокой плотностью электронов. При этом реализуется диффузионный (а не контрагированный) режим существования дуги. Благодаря также интенсивной конвекции газа, энергия электрического тока, затраченная на нагрев, распределяется по оставшейся части объема, что способствует повышению среднemasсовой температуры. Минимальны также потери на излучение и, соответственно, высок коэффициент передачи энергии разряда газу. Еще одно



преимущество – диффузионный характер горения дуг обеспечивает плавный переход тока через нуль, поэтому токи разряда близки к синусоидальным [13].

Одним из направлений, связанных с проблемой преодоления ограниченного ресурса работы электродов, стало применение высокочастотных плазмотронов [22, 24]. В них создается безэлектродный индукционный (реже – емкостной) разряд под воздействием высокочастотного электромагнитного поля. Продувая газ через разрядную камеру плазмотрона, получают струю плазмы; его ресурс практически не ограничен при работе с любой газовой средой, а плазма, естественно, не загрязнена материалом электродов. Рабочая частота таких плазмотронов соответствует  $10^6 \dots 10^8$  Гц, мощность – от единиц до тысяч кВт. Сравнительно слабое место такой техники – несовершенство разрядных камер; кроме того, коэффициент полезного действия этих плазмотронов невысок по сравнению с электродуговыми [22].

Одним из вариантов решения проблемы эрозии электродов является использование расплава металла (например, стали [9]) в качестве одного или обоих электродов в электродуговом реакторе. Еще одним ее преимуществом является определенная стабилизация температуры в реакторе, недостатком – значительная инертность устройства.

Несмотря, однако, на успехи в развитии физики и техники генераторов низкотемпературной плазмы, тематика эта еще далеко не исчерпана для научных исследований. Достаточно сказать, что свободногорящая электрическая дуга между плавящимися электродами – прародительница современной физики низкотемпературной плазмы – до сих пор не может быть адекватно описана с точки зрения баланса энергии [18]. Есть достаточные основания полагать, что одной из причин такого несоответствия является неравновесность электродуговой плазмы, хотя это идет в разрез с бытующими представлениями о ее базовых свойствах. Анализ этого вопроса будет посвящена следующая часть этой работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали / Колективна*

*монографія в 2-х томах / За ред. Жовтянського В.А., Кулика М.М., Стогнія Б.С. – Т.1: Загальні засади енергозбереження. – К.: Академперіодика, 2006. – 510 с.*

2. *Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И.* Экологически чистые угольные энерготехнологии. – К.: Наукова думка, 2004. – 186 с.

3. *Электрометаллургия* стали и сплавов / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рошин, М.А. Рысс и др. – М.: Metallurgy, 1984. – 568 с.

4. *Газотермические* покрытия из порошковых материалов / Ю.С.Борисов, Ю.А.Харламов, С.Л.Сидоренко, Е.Н.Ардатовская. Отв. ред. В.И.Трефилов– К.: Наук. думка, 1987.– 544 с.

5. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 592 с.

6. *Финкельнбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. – М.: ИИЛ, 1961. – 371 с.

7. *Энциклопедия* низкотемпературной плазмы / Под общей ред. Фортова В.Е. – Т. XI-5, серия Б: Прикладная химия плазмы / Под ред. Лебедева Ю.А., Платэ Н.А., Фортова В.Е. – М.: Янус-К, 2006.– 536 с.

8. *Дьячков П.Н.* Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение. – М.: Бином, 2006. – 293 с.

9. *Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С.* Плазмохимическая переработка угля. – М.: Наука, 1990. – 200 с.

10. *Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б.* Плазменные технологии переработки твердых топлив // Горение и плазмохимия. – 2003.– Т.1, №2. – С. 131 – 139.

11. *Козин Л.Ф., Волков С.В.* Водородная энергетика и экология. – К.: Наукова думка, 2002. – 335 с.

12. *Santilli R.M.* Foundations of Hadronic Chemistry. With Applications to New Clean Energies and Fuels. – Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 431 p.

13. *Rutberg Ph.G.* Plasma Pyrolysis of Toxic Waste // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2003. – 45. – P. 957 – 969.

14. *Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. – 375 с.

15. *Карп И.Н., Марцевой Е.П., Пащенко В.Н.* Математическое моделирование нагрева и дви-

жения частиц в плазменной среде // Хим. технология. – 1985. – №6. – С. 27 – 33.

16. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газоздушное напыление. – К.: Наук. думка, 1993. – 495 с.

17. Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под ред. Дресвина С.В. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.

18. Жовтянський В.А., Патріюк В.М. Особливості тепловідведення від електричної дуги в парах міді // Укр. фіз. журн. – 2000. – Т. 45, № 9. – С. 1059 – 1066.

19. Порицький П.В. Механізми контракції дугового розряду. 1. Особливості теплової контракції // Укр. фіз. журн. – 2004. – Т. 49, № 9. – С. 885 – 891.

20. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги

и их применение в теплофизическом эксперименте. – М.: Наука, 1992. – 264 с.

21. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.

22. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: Физматлит, 2003. – 760 с.

23. Разработка и изготовление опытной установки плазменной обработки пылеугольного топлива: Отчет по НИР №3/2001 (ООО ТОПАС). Науч. руковод. Петров С.В. К., 2004. – 52 с.

24. Дресвин С.В. Основы теории и расчета высокочастотных плазмотронов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.

Получено 04.06.2007 г.

УДК 536.241: 536.248.2

РУДЕНКО А.И.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ИЗ МЕДИ С ОРЕБРЕНИЕМ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Наведено результати експериментальних досліджень термічного опору контакту для мідних теплових труб з оребренням із алюмінієвого сплаву. Виконано порівняння дослідних даних з розрахунковою методикою, що отримана для інших контактних пар.

Приведены результаты экспериментального исследования контактного термического сопротивления для медных тепловых труб с оребрением из алюминиевого сплава. Выполнено сравнение опытных данных с расчётной методикой, полученной для других контактных пар.

Results of experimental investigation of contact thermal resistance for copper heat pipes with aluminium fins are presented. The comparison of experimental data with calculated methods, that was received for another contacting pairs, is made.

$B_n$  – коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей;

$c_1, c_2$  – коэффициенты уравнения (8), учитывающие влияние деформации на геометрические размеры охватывающей и охватываемой поверхностей;

$d$  – внешний диаметр тепловой трубы;

$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$  – приведенный модуль Юнга для контакта разнородных материалов;

$E_1, E_2$  – модули Юнга для меди и алюминиевого сплава соответственно;

$F$  – номинальная (геометрическая) площадь контакта;