

УДК 537.523.9; 621.387.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГЕНЕРАТОРЕ ПЛАЗМЫ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Р. Н. Тазмеева, Р. Р. Зиганшин, Х. К. Тазмеев

Камская государственная инженерно-экономическая академия, Набережные Челны, Россия

Введение.

Водяной пар как плазмообразующая среда обладает уникальными свойствами. Плазма, образуемая из водяного пара, содержит значительное количество химически активных частиц, преимущественно, в виде гидроксильных радикалов. Такая плазма представляет большой практический интерес для осуществления плазмохимических технологий, в частности, технологий плазменной переработки промышленных отходов и органического сырья [1,2].

Плазменный поток из паров воды может быть получен с помощью газового разряда, горящего между жидким электролитом и твердотельным электродом, когда в качестве жидкого электролита используются слабо концентрированные растворы солей [3]. Технические возможности создания на базе такого газового разряда генераторов плазмы с достаточно высокими энергетическими параметрами экспериментально обоснованы в работах [4,5]. Однако в настоящее время процессы формирования плазменного потока в этих генераторах плазмы мало изучены, в том числе мало исследованы процессы теплообмена в них.

Поскольку плазменный поток образуется из паров электролита, энергетические характеристики генератора плазмы в основном определяются тепловыми явлениями на жидком электроде. Исходя из этого, целью данной работы явилось экспериментальное исследование процессов нагрева и испарения электролита, используемого в качестве жидкого катода.

Эксперимент.

Генератор плазмы схематично изображен на рис.1. Его катодом служил проточный электролит. В качестве электролита применялись водные растворы поваренной и глауберовой солей. Поскольку наличие хлора в условиях газового разряда может привести к образованию вредных веществ в виде диоксинов, эксперименты преимущественно проводились с электролитами, приготовленными из глауберовой соли ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ в дистиллированной воде). Концентрация по массе у электролитов менялась в пределах от 0,5 до 1,5 кг/м³. Источник питания генератора плазмы состоял из повышающего трансформатора и трёхфазного двухполупериодного выпрямителя. Эксперименты проводились в диапазоне токов от 1 до 18 А. Мощность, подводимая к генератору плазмы, достигала до 25 кВт.

Съем тепла от электролита осуществлялся в теплообменнике, через который электролит прокачивался с помощью гидронасоса. Количество теплоты определялось калориметрическим способом. Температура охлаждающей воды на входе в теплообменник и на выходе из него измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Их выходные концы были термостатированы. Теплота, уносимая из теплообменника охлаждающей водой, принималась как величина Q_k . Относительная погрешность измерения Q_k , оцененная при доверительной вероятности 0,9, составила $\pm 10\%$.

В экспериментах толщина h слоя электролита над токоподводом поддерживалась неизменной. Для этого вместо испарившегося электролита в корпус генератора плазмы

I (рис. 1а) через разъем $б$ добавлялась дистиллированная вода. Ее расход принимался за массовую скорость испарения электролита.

Под действием реактивных сил паров поверхность электролита прогибалась вовнутрь. В электролите образовалось углубление, что способствовало формированию плазменной струи в вертикальном направлении. Расстояние H между токоподводом 2 и анодом 4 (рис. 1б) составляло 15 мм. Толщина h слоя электролита менялась в диапазоне от 10 до 15 мм. Температура электролита t контролировалась термостатированной хромель-алюмелевой термопарой, размещенной на удалении 50-60 мм от разрядной зоны по направлению течения электролита.

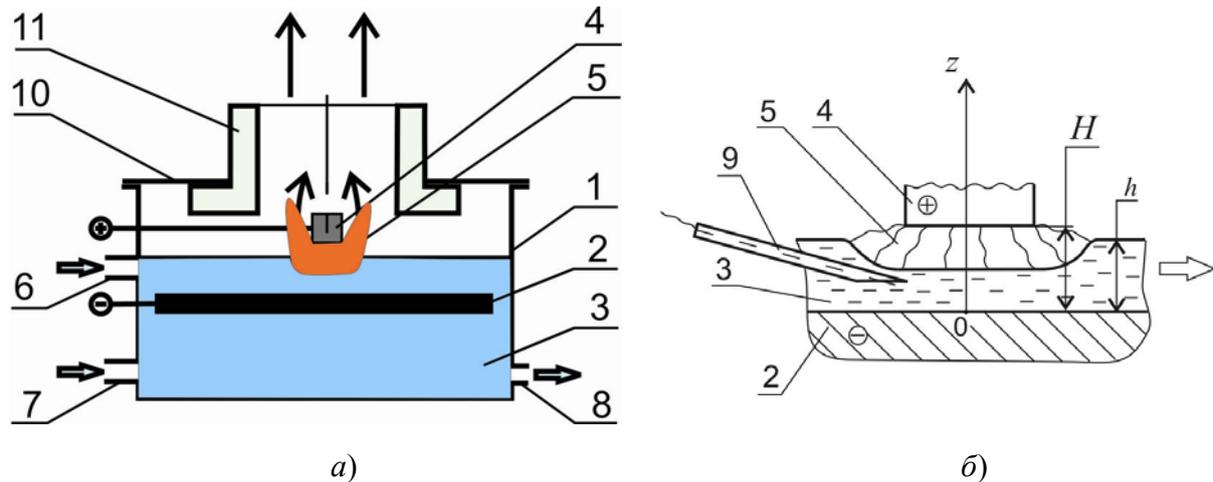


Рис. 1. Генератор плазмы (а) и его газоразрядный узел (б). 1 – корпус генератора плазмы; 2 – токоподвод; 3 – жидкий катод (электролит); 4 – анод; 5 – газоразрядная зона; б – разъем для соединения с системой подачи электролита; 7,8 – разъемы для соединения с системой циркуляции электролита; 9 – зонд; 10 – крышка; 11 – выходное сопло из огнеупорного материала.

В опытах, выполненных при открытой крышке генератора плазмы, производились измерения потенциала φ электрического поля внутри электролита одиночным зондом 9 (рис. 1б), представляющим собой вольфрамовый провод, вставленный в кварцевую трубку. Детальное описание зонда приведено в [5]. Зонд перемещался координатным устройством, снабженным переменным резистором, с помощью которого механическое перемещение преобразовывалось в электрический сигнал. Этот сигнал поступал в “X”-вход потенциометра ПДП4-002, а к “Y”-входу потенциометра присоединялись через ограничительный резистор токоподвод и зонд. При этом токоподвод был заземлен. Таким образом, потенциометр регистрировал потенциал φ зонда относительно заземленного токоподвода.

На рис. 2 представлены фрагменты диаграмм, записанных для некоторых режимов работы генератора плазмы. Они наложены на координатные оси с соответствующими масштабами. Начало отсчета координаты z находится на поверхности токоподвода (рис. 1б, точка 0). Как видно из представленных на рис.2 диаграмм, внутри электролита потенциал φ практически равномерно возрастает в направлении оси z (до точки K).

При выходе зонда из электролита в разрядную область зависимость φ от z становится нелинейной, и появляются пульсации потенциала (после точки K). Такая особенность зависимости φ от z позволила определить падение напряжения ΔU_k на

жидком катоде. За ΔU_k принимались значения φ на конце линейного участка диаграмм (значения φ , соответствующие точкам K на диаграммах, представленных на рис. 2).

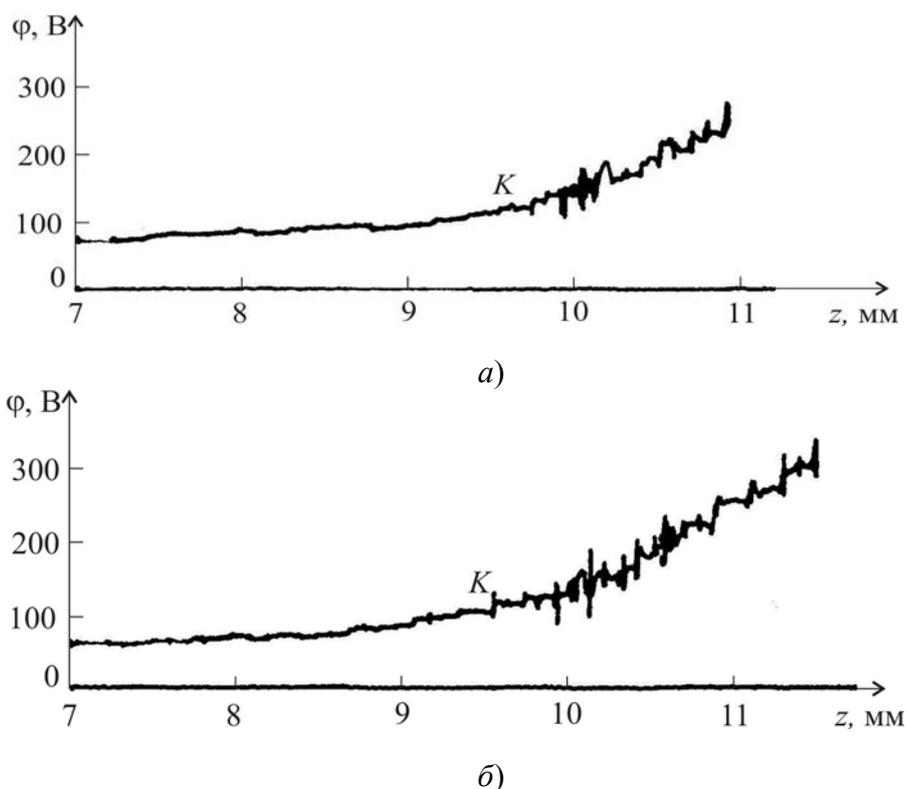


Рис. 2. Распределение потенциала внутри электролита. Электролит – водный раствор глауберовой соли. $\sigma = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ при температуре 20°C . Анод цилиндрический $\varnothing 42$. $h = 12$ мм. $t = 70 \pm 2^\circ\text{C}$. $a - I = 15$ А; $b - 12$.

Используя ΔU_k , вычислялась мощность джоулевого тепловыделения внутри электролита по формуле

$$Q_j = I \cdot \Delta U_k. \quad (1)$$

Относительная погрешность Q_j , оцененная по методике обработки косвенных измерений при доверительной вероятности 0,9, составила $\pm 10\%$.

Обсуждение результатов.

Согласно закону Джоуля-Ленца тепло, выделяемое внутри электролита, зависит от тока и омического сопротивления электролита. Увеличение тока при прочих одинаковых условиях приводит к росту ΔU_k , что видно из сравнения диаграмм на рис.2. Диаграмма, записанная при бóльшем значении тока (рис. 2а), располагается по оси φ выше, чем диаграмма, записанная при меньшем токе (рис. 2б). Это свидетельствует о том, что повышается ΔU_k , и, согласно формуле (1), происходит увеличение Q_j . Однако, Q_j не пропорциональна квадрату тока, как следовало бы ожидать из закона Джоуля-Ленца. Из опытов следует, что зависимость Q_j от I является монотонно возрастающей нелинейной функцией, и зависит от условий охлаждения электролита (рис. 3а).

Нагрев электролита приводит к увеличению его электрической проводимости. Причем, наиболее значительное повышение σ происходит в интервале t от 20 до 90 °С (более чем в два раза). Чем больше σ , тем меньше становится R_e . При прокачке электролита через генератор плазмы с постоянной массовой скоростью m электролит нагревается до определенной температуры t . Поскольку с увеличением тока растет джоулево тепловыделение, температура электролита с ростом тока также повышается (рис. 3б). Соответственно, снижается R_e , и замедляется рост Q_j . При больших значениях тока температура электролита растет быстрее. Такая зависимость t от I более отчетливо наблюдается на графиках 1 и 2 (рис. 3б). По этой причине с увеличением тока, при повышенных его значениях, рост Q_j происходит медленнее (рис. 3а). При этом Q_j становится практически прямо пропорциональной I . Объясняется это незначительным изменением ΔU_k в зависимости от тока. Следует отметить, что данный экспериментальный факт требует более детального изучения.

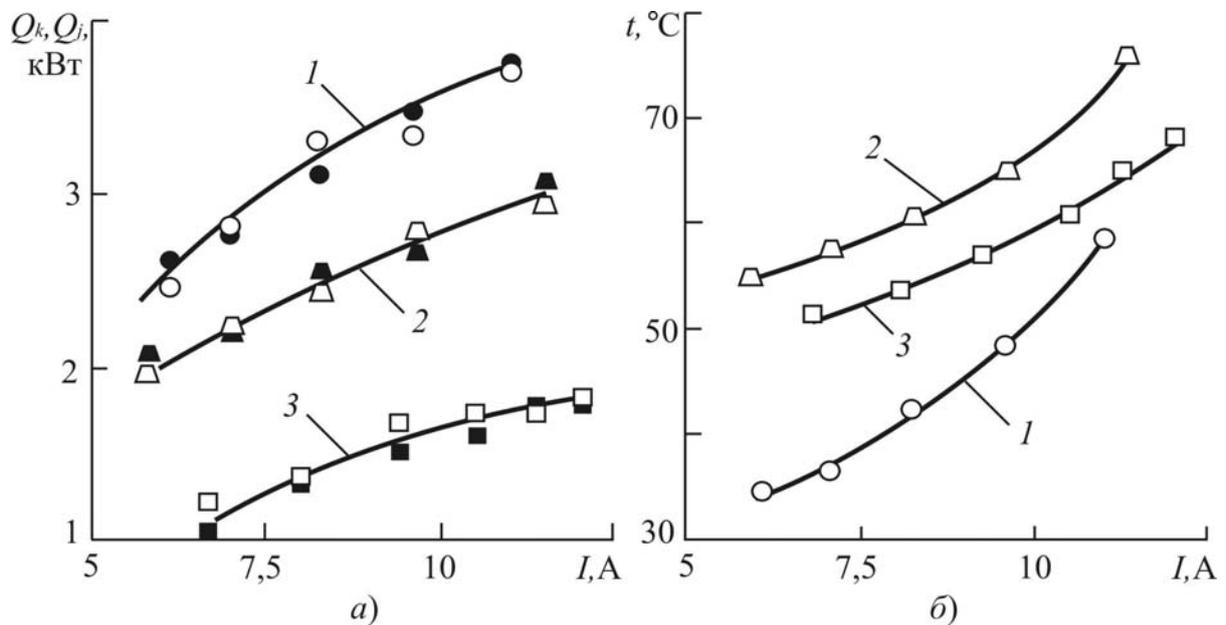


Рис. 3. Зависимости тепловых потерь (светлые значки) и мощности джоулевого тепловыделения (темные) на жидком катоде (а) и температуры электролита (б) от тока. Электролит – водный раствор глауберовой соли. 1,2 – $\sigma = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ при температуре 20°С; 3 – $2,1 \cdot 10^{-3}$. 1 – $m = 56 \text{ г/с}$; 2,3 – 32.

Уменьшение скорости прокачки электролита приводит к установлению более высоких значений t , что видно из сравнения графиков 1 и 2 на рис.3б. При этом джоулево тепловыделение значительно сокращается (рис. 3а). Сравнение графиков 1 и 2 на рис.3а показывает, что Q_j снижается более чем на четверть.

Увеличение σ усиливает снижение Q_j . Причем, как следует из сравнения графиков 2 и 3 на рис.3а, примерно во столько же раз, во сколько раз повышается σ .

Примечательным является то, что в исследованных режимах работы генератора плазмы тепловые потери на жидком катоде с достаточно большой точностью совпали с мощностью джоулевого тепловыделения внутри электролита. Разность между Q_k и Q_j не превышала погрешность определения этих двух величин.

Выводы.

Эксперименты показали, что в генераторе плазмы с жидким электролитным катодом тепловые потери на жидком катоде зависят от джоулевого тепловыделения внутри электролита. Снижение омического сопротивления электролита позволяет существенно уменьшить тепловые потери на жидком катоде. Омическое сопротивление электролита можно снизить двумя способами: 1) увеличивая концентрацию водного раствора солей, используемого в качестве электролита; 2) повышая температуру жидкого катода в процессе работы генератора плазмы. Поскольку концентрация раствора не может быть увеличена выше определенного предела, для достижения максимального положительного эффекта необходимо создать такие режимы охлаждения электролита, при которых его температура должна повыситься до предельно возможных значений. Как показали опыты, температура жидкого катода (электролита) может быть повышена до 90 °С. Выше этой температуры в электролите начинается пузырьковое кипение, и работа генератора плазмы становится нестабильной.

Таким образом, тепловые потери на жидком электролитном катоде могут быть минимизированы в случае использования в качестве электролита водных растворов поваренной и глауберовой солей, удельная электрическая проводимость которых составляет $(2,4-2,6) \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, и установления такого режима охлаждения электролита, при котором температура электролита находится в пределах 80-90 °С.

Условные обозначения.

H – расстояние между токоподводом и анодом, мм; h – толщина слоя электролита над токоподводом, мм; I – ток, А; Q_j – мощность джоулевого тепловыделения внутри электролита, кВт; Q_k – тепловые потери на жидком катоде, кВт; m – массовая скорость прокачки электролита через генератор плазмы, г/с; R_e – электрическое сопротивление электролита, Ом; t – температура электролита (жидкого катода), °С; z – координата по вертикали, отсчитываемая от поверхности токоподвода, мм; ΔU_k – падение напряжения на катоде, В; φ – потенциал электрического поля внутри электролита, В; σ – удельная электрическая проводимость электролита, $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$.

Литература

- [1] Туманов Ю.Н. Плазменные технологии в формировании нового облика промышленного производства. Вестник РАН. 2006. №6. С. 491-502.
- [2] Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука. 1990.
- [3] Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 2. Под ред. В.Е. Фортова. М: Наука. 2000. С. 241–246.
- [4] Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х. Пористые элементы в генераторах плазмы с жидким электролитным катодом. ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 107-114.
- [5] Мифтахов М.Н., Тазмеев А.Х., Тазмеев Х.К., Фридланд С.В. Некоторые результаты экспериментального исследования газового разряда между проточным электролитом и металлическим электродом. ИФЖ. 2006. Т.79. №3. С.109-115.