

УДК 537.523.9

## Экспериментальное исследование массового уноса жидкого электролитного катода под воздействием газового разряда

Р.Н. Тазмеева, Б.Х. Тазмеев

*Экспериментально исследована убыль массы жидкого электролитного катода в диапазоне разрядного тока 8–18 А. Установлены закономерности расходования электролита на создание плазмообразующей среды.*

PACS: 52.80.-s

*Ключевые слова:* газовый разряд, жидкий электрод, электролитный катод, пароводяная плазма.

### Введение

Отличительной особенностью жидкого электролитного катода является то, что он интенсивно улетучивается во время горения газового разряда. Убыль количества жидкого электролита, независимо от механизма возникновения (испарение, распыление или электролитное газообразование), можно обозначить единым термином «массовый унос». Уменьшение массы жидкой фазы связано с множеством физико-химических явлений (тепловых, механических, электрохимических и др.), которые происходят на границе «жидкий электролит – плазма», а также на поверхностях привязки к токоподводящим элементам. Причем они тесно взаимосвязаны между собой. Поэтому раскрытие и изучение механизмов массового уноса жидкого электролитного катода, каждого в отдельности, чрезвычайно сложно. В работах [1–3] предложены модели переноса веществ из электролита в плазму для маломощных разрядов при небольших токах. Однако требуется их уточнение и доработка, т.к. они не позволяют построить картину явлений, количественно в полной мере согласующуюся с экспериментом.

При повышенных мощностях, составляющих десятки киловатт, и разрядных токах более одного ампера интенсивности процессов на катоде многократно увеличиваются. В частности, распыление электролита в виде мельчайших капель становится визуально наблюдаемым [4]. Естественно, в этих условиях возрастает роль экспериментальных исследований для установления

закономерностей массового уноса жидкого электролитного катода. Некоторые результаты, полученные при сравнительно высоких значениях тока и мощности, приведены в [5].

В данной работе проведены исследования в диапазонах перечисленных параметров, ещё более расширенных в сторону увеличения. Потребность в таких исследованиях возникает в связи с тем, что открываются новые возможности создания жидкоэлектродных источников пароводяной плазмы, мощность которых приемлема для энергоёмких технологий [6–7].

### Эксперимент

Разряд зажигался между проточным электролитом и металлическим анодом. В качестве электролита применялись водные растворы 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 1 до 3 кг/м<sup>3</sup>. Массовый расход электролита  $G$  через разрядный узел контролировался поплавковым ротаметром типа РМ. Анодом служила чугунная водоохлаждаемая пластина с размерами рабочей поверхности 35х35 мм. Она располагалась над токоподводящей пластиной катода на высоте 13 мм.

Источник питания генератора плазмы состоял из повышающего трансформатора и трёхфазного двухполупериодного выпрямителя. Эксперименты проводились в диапазоне токов от 8 до 18 А. Мощность, подводимая к генератору плазмы, достигала 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  $Q_k$ .

Продолжительность горения разряда в фиксированном режиме (с постоянными значениями  $I$  и  $G$ , а также толщины слоя  $h$  электролита над токоподводом) составляла не менее 10 минут. Постоянство  $h$  обеспечивалось добавлением электролита из мерной емкости. Скорость

Тазмеева Рамиля Нуриахметовна, доцент.  
Набережночелнинский институт Казанского  
(Приволжского) федерального университета.  
Россия, 423812, г. Набережные Челны,  
пр. Сююмбике, 10А.  
Тел.: (8552) 39-59-72. E-mail: tazmeeva@mail.ru  
Тазмеев Булат Харисович, доцент.  
Набережночелнинский филиал Казанского  
национального исследовательского технического  
университета.  
Россия, 423814, г. Набережные Челны,  
ул. Академика Королева, 1.  
Тел. (8552) 58-36-08. E-mail: tazmeevb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2014 г.

© Тазмеева Р.Н., Тазмеев Б.Х., 2014

массового уноса  $m$  определялась как отношение массы израсходованного электролита к продолжительности режима. После каждого опыта, проведенного в фиксированном режиме, осуществлялась корректировка концентрации электролита путем восстановления его удельной электрической проводимости  $\sigma$ . Измерение  $\sigma$  производилось кондуктометром АНИОН 4150.

### Анализ результатов

На рис. 1 схематично изображены массовые потоки, возникающие в газовом разряде. Унос массы происходит в основном с поверхности электролита в зоне воздействия разряда в виде пара (вертикальные короткие стрелки) и мельчайших капелек (мелкие кружочки). На поверхности токоподвода происходят катодные процессы электролиза. Газы, образуемые в этом процессе (волнистые стрелки), также приводят к уменьшению массы электролита.

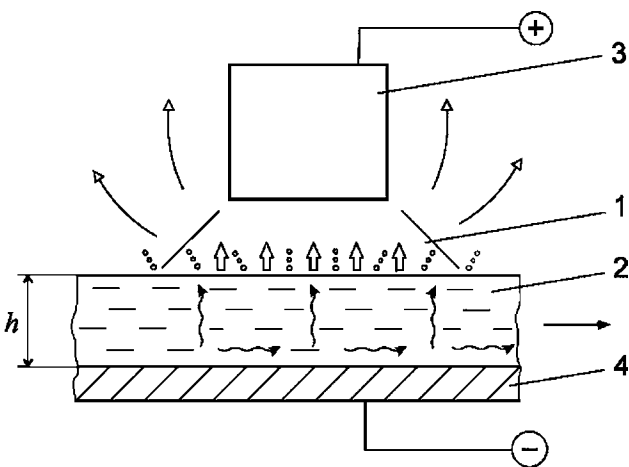


Рис. 1. Массовые потоки в газовом разряде с проточным электролитным катодом. 1 – область горения разряда; 2 – жидкий электролит; 3 – металлический анод; 4 – токоподвод.  $h$  – толщина слоя электролита.

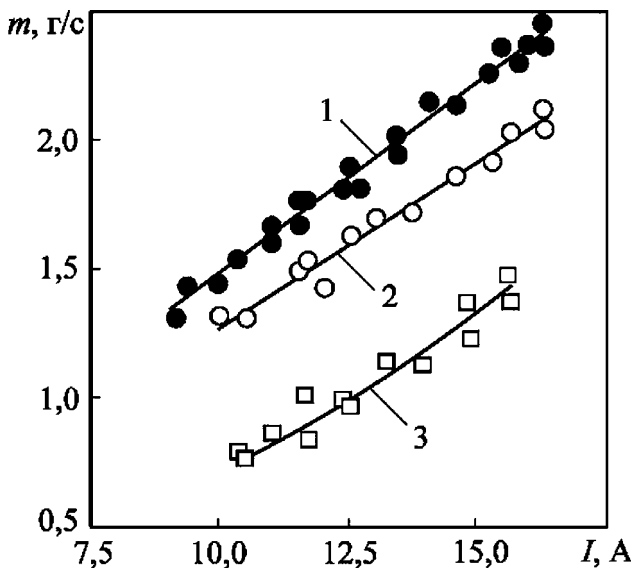


Рис. 2. Зависимость скорости массового уноса электролита  $m$  от разрядного тока  $I$ . Толщина слоя электролита  $h = 11$  мм. 1 –  $\sigma = 1,25$  мСм/см и  $t = 5$  зс; 2 – 2,50 и 5; 3 – 2,50 и 40.  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость электролита.

При одном и том же токе разряда скорость массового уноса электролита менялась в достаточно широких

пределах (рис. 2). Например, как видно из представленных данных, при  $I = 15$  А максимальное значение  $m$  получилось выше минимального на 77%. Однако несмотря на такой значительный разброс полученных результатов, можно отметить некоторые закономерности.

Во-первых, с увеличением тока скорость массового уноса электролита всегда возрастает. Зависимость  $m$  от  $I$ , при неизменных значениях других параметров, может быть аппроксимирована функцией  $m = kI$ . В исследованных диапазонах параметров коэффициент пропорциональности  $k$  находится в пределах от 0,07 до 0,15 г/А.

Другая закономерность наблюдается в изменении  $m$  в зависимости от интенсивности течения электролита. Чем больше массовый расход  $G$  электролита, протекающего через зону действия разряда, тем меньше  $m$ . Такая закономерность отчетливо видна из сравнения данных, полученных при разных значениях  $G$ , в частности, при  $G = 5$  и 40 г/с (графики 2 и 3, рис. 2).

Главным фактором, влияющим на зависимость  $m$  от  $G$ , по-видимому, является изменение теплового режима катода, обусловленное усилением отвода энергии из зоны действия разряда проточным электролитом. Основанием для такого заключения служит зависимость тепловых потерь на катоде  $Q_k$  от  $G$ . Большой массовый расход проточного электролита вызывает резкое возрастание тепловых потерь на катоде. Например, при  $I = 15$  А увеличение  $m$  от 5 до 40 г/с привело к росту  $Q_k$  более чем в два раза (графики 2 и 3, рис. 3).

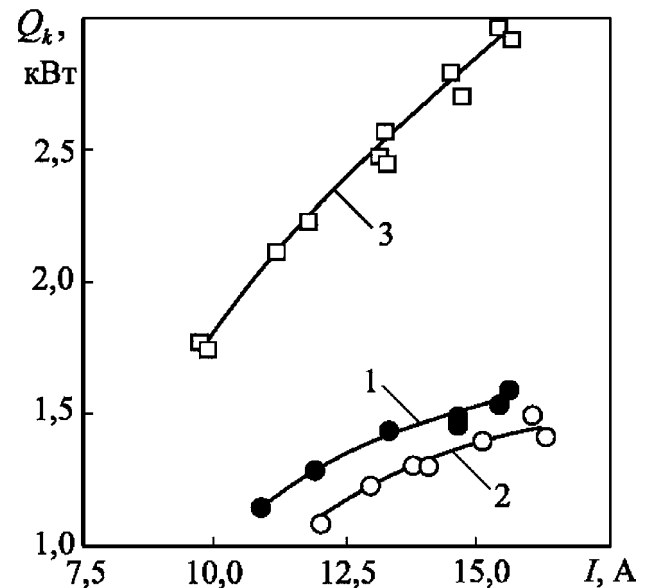


Рис. 3. Зависимость тепловых потерь на катоде  $Q_k$  от разрядного тока  $I$ . Пояснения те же, что к рис. 2.

Часть тепловых потерь  $Q_k$  составляет джоулево тепло  $Q_j$ , выделяемое внутри электролита. Согласно закону Джоуля-Ленца, количество этой теплоты пропорционально омическому сопротивлению электролита. Поскольку  $\sigma$  резко возрастает при повышении температуры, внутри нагретого электролита джоулево тепло должно выделяться в меньшем количестве. Следовательно, нагрев электролита под воздействием газового разряда должен привести к снижению  $Q_j$  и тепловых потерь  $Q_k$ . С этой точки зрения могут быть даны пояснения графикам, представленным на рис. 3.

В частности, в опытах при разрядном токе 15 А увеличение  $G$  от 5 до 40 г/с вызвало снижение температуры от 70 °С до 50 °С. Такое изменение температуры должно привести к уменьшению  $\sigma$  и, соответственно, повышению величин  $Q_j$  и  $Q_k$ . Как показали измерения, в указанном диапазоне температур значение  $\sigma$  уменьшается на 25%, что явно недостаточно для повышения  $Q_j$  в два раза, предполагаемого из сравнения значений  $Q_k$  по графикам 2 и 3 на рис. 3. Поэтому изменение джоулевого тепловыделения не может привести к столь значительному возрастанию  $Q_k$ , которое имело место в экспериментах. Следовательно, рост  $Q_k$  при увеличении  $G$  происходит в основном за счет тепла, идущего от газового разряда. Таким образом, чем больше  $G$ , тем значительнее становится отвод энергии от газового разряда. Однако при этом температура электролита получает сравнительно малое приращение. Электролит нагревается слабее, и он расходуется в меньшем количестве.

Еще одна закономерность заключается в том, что скорость массового уноса электролита зависит от его удельной электрической проводимости  $\sigma$ . При одном и том же массовом расходе ( $G = const$ ), использование электролита с меньшим значением  $\sigma$  приводит к повышению  $m$  (график 1, рис. 2). В этом случае также меняется тепловой режим катода. Растут тепловые потери на катоде (графики 1 и 2, рис. 3). Из-за увеличения джоулевого тепловыделения электролит нагревается сильнее. Изменению теплового режима катода способствует также следующее обстоятельство. Опыты показывают, что использование электролита с малой электрической проводимостью приводит к увеличению напряжения горения разряда. Вследствие чего повышается потребляемая мощность при одном и том же разрядном токе. Избыток энергии частично

поступает катоду и усиливает его нагрев.

### Заключение

Эксперименты показали, что массовый унос электролитного катода существенно зависит от разрядного тока и интенсивности потока электролита через зону воздействия разряда. В несколько меньшей степени наблюдается влияние электрической проводимости электролита. Массовый унос электролита увеличивается при повышении тока. Причем скорость массового уноса растет практически прямо пропорционально току. Коэффициент пропорциональности получается больше при малых расходах электролита, протекающего через зону воздействия разряда. Полученные экспериментальные закономерности могут быть использованы при разработке способов регулирования плазменного потока, генерируемого жидкоэлектродными газоразрядными устройствами.

### Литература

1. Максимов А.И., Наумова И.К., Хлустова А.В. // Химия высоких энергий. 2008. Т. 42, № 6. С. 540.
2. Хлустова А.В., Сироткин Н.А., Максимов А.И. // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44, № 1. С. 77.
3. Поляков О.В., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. // Исследовано в России. 2004. 222. С. 2352.
4. Тазмеев Б.Х. // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 1999. № 4. С. 71.
5. Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х. // ИФЖ. 2003. Т. 76. № 4. С. 107.
6. Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К. // Вестник машиностроения. 2006. № 7. С. 72.
7. Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 33.

## Experimental study of mass carry-over of liquid electrolyte cathode under the influence of a gas discharge

R. N. Tazmeeva<sup>1</sup> and B. Kh. Tazmееv<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Branch of Kazan Federal University in Naberezhnye Chelny.

10A Sujumbike av., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia; e-mail: tazmeeva@mail.ru

<sup>2</sup>Branch of Kazan National Research Technical University in Naberezhnye Chelny.

1 Academician Korolyov str., Naberezhnye Chelny, 423814, Russia; e-mail: tazmeevb@mail.ru

Received January 20, 2014

**Experimentally investigated mass loss of liquid electrolyte cathode in the range discharge current 8-18 A. It was revealed the regularities of spending electrolyte to create a plasma-forming medium.**

PACS: 52.80.-s

Keywords: gas discharge, liquid electrode, electrolyte cathode, steam plasma.

### References

1. A. I. Maximov, I. K. Naumova, and A. V. Khlustova, High Energy Chemistry **42**, 540 (2008).
2. A. V. Khlustova, N. A. Sirotkin, and A. I. Maximov, High Energy Chemistry **44**, 77 (2010).
3. O. V. Polyakov, A. M. Badalyan, and L. F. Bakhturova, Issledovano v Rossii **222**, 2352 (2004), <http://zhurnal.apelam.ru>.
4. B. Kh. Tazmееv, Vestn. Kazan Technical Univ., No. 4, 71 (1999).
5. Kh. K. Tazmееv and B. Kh. Tazmееv, Inzh. Fiz. Zhurn. **76**. No. 4. 107 (2003).
6. S. V. Fridland, A. Kh. Tazmееv, et al., Vestn. Mashinostr., No. 7, 72 (2006).
7. Kh. K. Tazmееv, I. M. Arslanov, and G. Kh. Tazmееv, Prikladnaya Fizika, No. 4, 33 (2013).