

УДК 537.523.9

## Влияние локализации зоны привязки сильноточного разряда к жидкому электролиту на формирование плазменного столба

Х.К. Тазмеев, И.М. Арсланов, Г.Х. Тазмеев

*Экспериментально исследован газовый разряд между жидким электролитным катодом и металлическим анодом в диапазоне токов 4–21 А. Выявлено, что локализация зоны привязки разряда к электролиту способствует увеличению протяженности плазменного столба в вертикальном направлении. Показана возможность формирования в открытом воздушном пространстве над жидким электролитом крупномасштабного плазменного столба с размерами в метровом диапазоне.*

PACS: 52.80.— sn

*Ключевые слова:* газовый разряд, сильноточный разряд, жидкий катод, электролитный катод, протяженный плазменный столб.

### Введение

Газовый разряд с жидким электролитным катодом представляет практический интерес как источник объемной плазмы атмосферного давления [1, 2]. В последние годы исследования данного вида разряда заметно активизировались. С одной стороны, это обусловлено тем, что появились приборы, позволяющие более детально изучить природу газового разряда с нетрадиционными (жидкими) электродами. С другой стороны, разряд становится все более привлекательным в связи с тем, что раскрываются новые возможности его практического применения. Мощность, вкладываемая в разряд, может составить десятки киловатт и более. В связи с этим он становится пригодным для энергоемких плазменных процессов, в частности, может найти применение для конверсии полимерных отходов в синтез-газ [3]. Более эффективное использование плазмы газового разряда для подобного рода приложений возможно при увеличении геометрических размеров разрядной области.

Целью данной работы явилось изыскание способов, способствующих формированию протяженного плазменного столба между жидким электролитным катодом и металлическим анодом.

### Предпосылки

Предварительные опыты показали, что в газовом разряде, возбуждаемом между электролитической ванной и металлическим электродом, переход в сильноточные режимы горения способствует увеличению межэлектродного расстояния. Наблюдалось продолжительное горение разряда при расположении металлического анода над электролитической ванной на высоте 5–6 см. Однако, разряд горел нестабильно. Одной из визуально наблюдаемых причин нестабильности было то, что в сильноточных режимах при увеличении межэлектродного расстояния зона привязки разряда к электролиту становилась подвижной, и она совершала беспорядочные перемещения по свободной поверхности электролита. При её значительных случайных отклонениях от центрального положения происходило гашение разряда. Анализ ситуации привел к выводу о том, что для повышения стабильности разряда необходимо локализовать зону привязки разряда к электролиту около центрального положения, ограничивая свободу её перемещения.

### Эксперимент

Варианты газоразрядных узлов, разработанных для локализации зоны привязки разряда к жидкому электролиту, схематично изображены на рис. 1.

Электролит вытекал из вертикального цилиндрического канала, внутри которого была смонтирована графитовая пластина, служащая отрицательным электродом. В варианте А предполагалось, что площадь зоны привязки разряда к электролиту будет ограничена поперечными размерами канала, из которого истекает электролит. В варианте В на выходном торце канала устанавливалась пластина из огнеупорного пористого материала, выполненная в виде шайбы. Эта

---

Тазмеев Харис Каюмович, доцент.

Арсланов Ильяс Миргарифович, ст. преподаватель.

Тазмеев Гаяз Харисович, студент.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, филиал в г. Набережные Челны.

Россия, 423812, г. Набережные Челны, проспект Сююмбике, 10А.

Тел. (8552) 39–59–72. Факс (8552) 39–59–72.

E-mail: tazmeevh@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2013 г.

© Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х., 2013

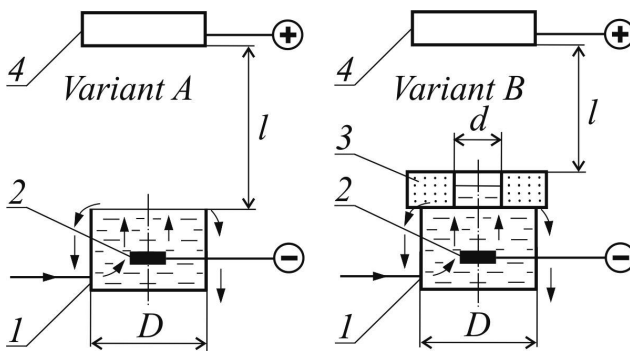


Рис. 1. Варианты газоразрядных узлов. Стрелками указано направление течения электролита. 1 — цилиндрический канал из диэлектрического материала, 2 — графитовая пластина, 3 — пластина из огнеупорного пористого материала, 4 — металлический электрод-анод.

пластина предназначалась для принудительного ограничения площади зоны привязки разряда к электролиту. В опытах течение электролита регулировалось так, чтобы отверстие пористой пластины было заполнено лишь частично.

В обоих вариантах анодом служил металлический электрод, охлаждаемый водопроводной водой. Разряд горел в открытом воздушном пространстве между электролитом и металлическим электродом. Протяженность разрядного промежутка варьировалась изменением расстояния  $l$  от нижней кромки электрода-анода до поверхности электролита (вариант *A*) или до верхней кромки пористой пластины (вариант *B*).

В качестве электролита использовались водные растворы поваренной соли с удельной электрической проводимостью 1,5–2,0 См/м. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации напряжения сглаживались П-образным индукционно-емкостным фильтром. Ток менялся ступенчатым изменением балластного сопротивления, подключенного в цепь питания. Для измерения тока использовался стрелочный прибор М2015 класса точности 0,2. Напряжение  $U$  между графитовой пластиной и металлическим электродом-анодом измерялось такого же класса точности прибором М2016, к которому присоединялось добавочное сопротивление. Для получения моментальных фотографий разряда использовалась скоростная камера ВИДЕОСКАН-415. Напряженность электрического поля в столбе разряда оценивалась по результатам измерений напряжения при различных расстояниях  $l$ . Плотность тока на катоде определялась как отношение тока к площади зоны привязки разряда к электролиту.

## Результаты и их обсуждение

### Вариант *A*

Как и ожидалось, вследствие уменьшения размеров свободной поверхности электролита в горизонтальной плоскости произошла локализация

зоны привязки разряда к электролиту около центрального положения. Разряд горел устойчиво и стабильно при межэлектродных расстояниях, существенно превышающих 5–6 см. Для удлинения расстояния  $l$  потребовалось повышение разрядного тока  $I$  путем уменьшения балластного сопротивления. Естественно, при этом увеличивалось напряжение  $U$  между электродами. Повышение тока сопровождалось расширением зоны привязки разряда к электролиту. Она при малых диаметрах канала, полностью занимая верхнюю поверхность электролита на его торце, начала переходить на боковые стенки (рис. 2). Такая ситуация вызывала скачкообразные пульсации тока. В связи с этим подобные режимы горения не исследовались, как не представляющие практический интерес.

Увеличение диаметра канала, из которого истекал электролит, позволило получить устойчивый разряд при повышенных значениях тока. Соответственно формировался более протяженный плазменный столб (рис. 3, верхние кадры).

Таким образом, для обеспечения устойчивости разряда в режимах с повышенным током понадобились более широкие цилиндрические каналы

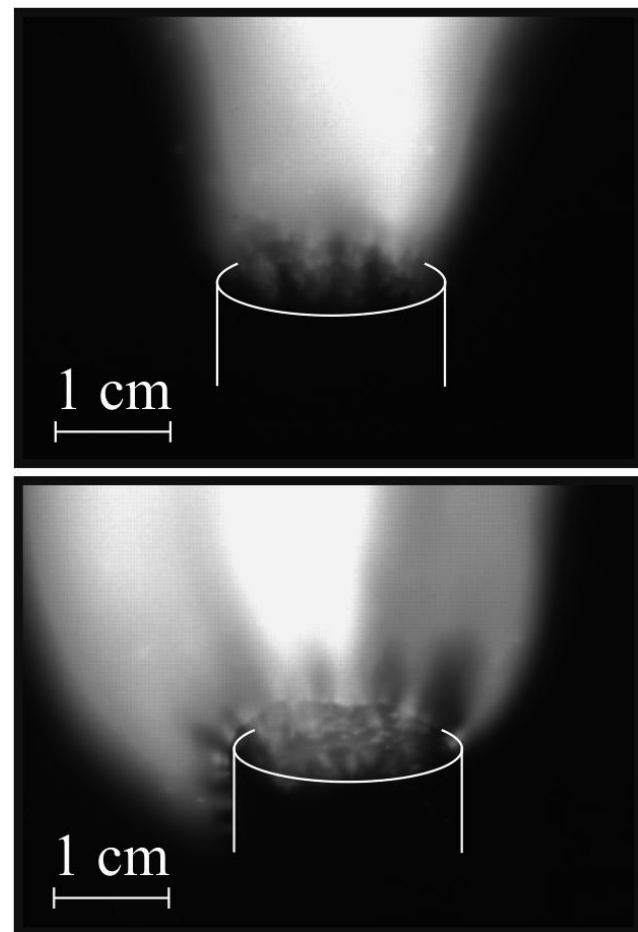


Рис. 2. Фотографии зоны привязки разряда к жидкому электролиту. Экспозиция 196 мкс. Белые линии — очертания стенки канала, из которого истекает электролит. Диаметр канала  $D = 20$  мм.  $I = 4,0$  А (верхний кадр) и 7,4 А (нижний).

для подвода электролита к разрядному промежутку. Меры, принятые в этом направлении, привели к формированию плазменного столба с еще большей протяженностью (рис.3, нижние кадры). Можно ожидать, что использование подобных мер будет способствовать дальнейшему наращиванию протяженности плазменного столба. Для этого потребуется источник питания с более высокими значениями предельного тока и выходного напряжения.

Наличие взаимосвязи между предельным значением тока и диаметром канала (из которого истекает электролит) указывает на то, что максимальная плотность тока на жидком электролитном катоде не превышает некоторого предельного значения  $j_{max}$ . Согласно оценочным расчетам,  $j_{max}$  получилось в пределах 1–1,5 А/см<sup>2</sup>.

**Вариант В**

Пористая пластина, установленная на выходном торце цилиндрического канала (из которого

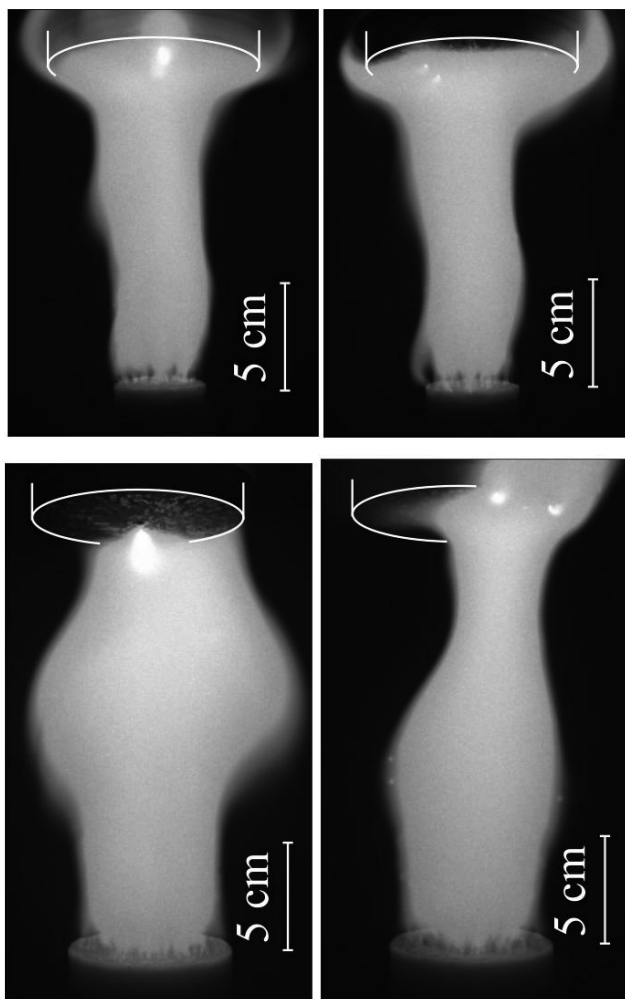


Рис. 3. Фотографии плазменного столба (вариант А). Экспозиция 196 мкс. Интервал между кадрами 125 мс. Белые линии — очертания анода. Внизу — цилиндрический канал, из которого истекает электролит. Верхние кадры: диаметр канала  $D = 40$  мм, межэлектродное расстояние  $l = 15$  см,  $I = 14,5$  А,  $U = 1530$  В. Нижние кадры:  $D = 75$  мм,  $l = 20$  см,  $I = 21$  А,  $U = 1580$  В.

истекал электролит), внесла существенные изменения на картину явлений в зоне привязки разряда к жидкому электролиту. Среди них на первом месте можно отметить то, что зона привязки разряда к жидкому электролиту получилась более компактной. Она полностью располагалась в области, ограниченной отверстием пористой пластины (рис. 4). Произошло сужение прикатодного участка плазменного столба. С гидродинамической точки зрения такое сужение поперечного сечения должно привести к повышению скорости плазменного потока, и, естественно, благодаря этому явлению, следует ожидать увеличение протяженности плазменного столба. В опытах так оно и получилось. В исследованном диапазоне параметров максимальная протяженность плазменного столба составила 52,5 см, что более чем в два раза больше по сравнению с вариантом А.

Оценки плотности тока, выполненные как отношение разрядного тока к площади отверстия в пористой пластине, показали, что максимальное значение плотности тока на катоде доходит до 3 А/см<sup>2</sup>. Однако если учесть привязку разряда к боковым поверхностям отверстия, расчетное значение максимальной плотности тока  $j_{max}$  получается в тех же пределах, как в варианте А. Следует отметить, что существование верхнего предела

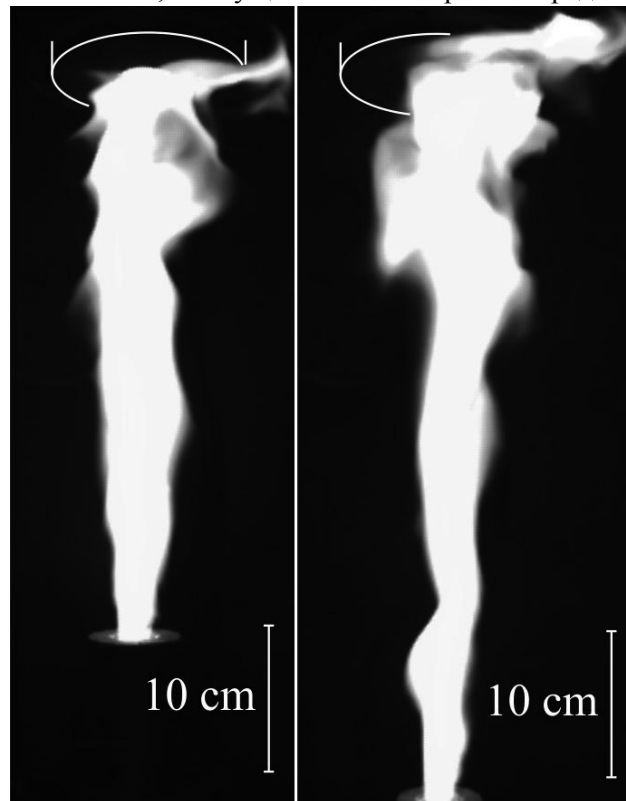


Рис.4. Фотографии плазменного столба (вариант В). Экспозиция 196 мкс. Белые линии — очертания анода. Внизу — пористая пластина на выходном торце канала, из которого истекает электролит. Диаметр отверстия в пористой пластине  $d = 24$  мм. Кадр справа: межэлектродное расстояние  $l = 52,5$  см,  $I = 9,5$  А,  $U = 2720$  В.

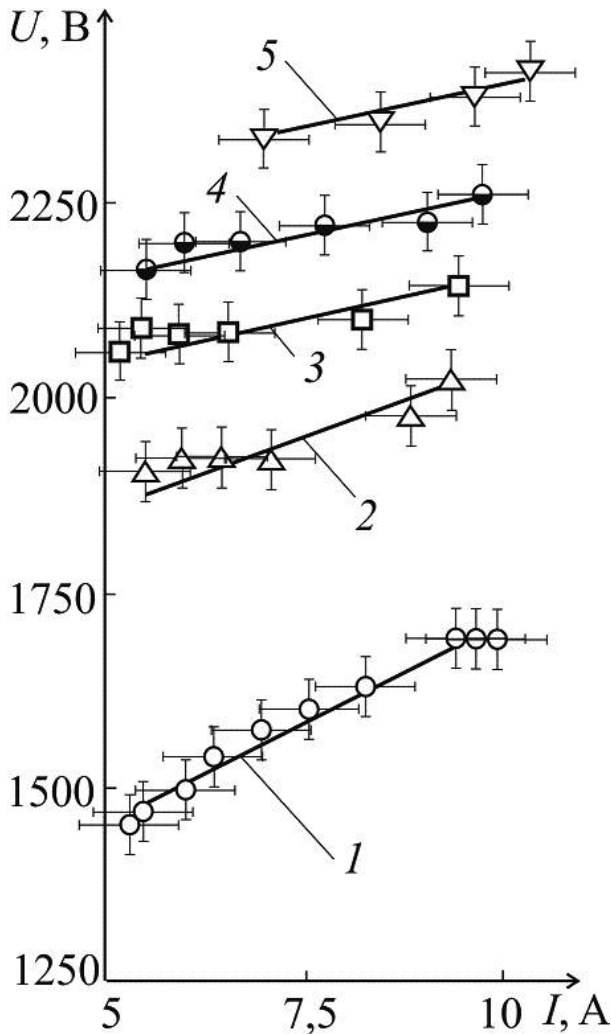


Рис. 5. Вольтамперные характеристики (вариант В). Диаметр отверстия в пористой пластине  $d = 21$  мм. Межэлектродное расстояние  $l$ : 1–15 см; 2–25 см; 3–30 см; 4–35 см; 5–40 см.

для числовых значений  $j_{\max}$  является одним из характерных признаков газового разряда с жидким электролитным катодом. Его проявление было отмечено неоднократно, в частности, в экспериментальных исследованиях [3, 4].

Примечательно то, что напряжение, измеренное на клеммах разрядного узла, увеличивалось при повышении тока (рис. 5). Такой результат частично обусловлен падением напряжения  $\Delta U_c$  внутри электролита над графитовой пластиной, поскольку, согласно закону Ома,  $\Delta U_c$  растет про-

порционально току. Аппроксимирование экспериментальных данных отрезками прямых показало, что крутизна ВАХ не постоянна. Следовательно, напряжение  $U$  растет не только из-за увеличения  $\Delta U_c$ . Напряжение в самом газовом разряде также растет и получает заметный прирост в коротких разрядах. Поэтому крутизна ВАХ больше при малых  $l$  (рис. 5, график 1).

Варьирование длины разрядного промежутка  $l$  позволило определить среднее значение напряженности электрического поля в плазменном столбе как отношение приращения напряжения к соответствующему увеличению разрядного промежутка:  $\langle E \rangle = \Delta U / \Delta l$ . В исследованном диапазоне параметров  $\langle E \rangle$  получилась в пределах  $25 \pm 10$  В/см. Сравнивая с числовыми значениями напряженностей полей других разрядов атмосферного давления, можно отметить, что такая напряженность электрического поля характерна для свободного дугового разряда, горящего в воздухе [4].

### Заключение

Показано, что локализация зоны привязки разряда к жидкому электролитному катоду способствует значительному увеличению протяженности плазменного столба в вертикальном направлении. Установлены режимы горения, которые позволяют формировать плазменный столб протяженностью до 0,5 м и более.

Выявлено, что ВАХ протяженного разряда, возбуждаемого в воздушном пространстве между жидким электролитом и металлическим анодом является возрастающей, а плотность тока на электролитном катоде не превышает предельного значения, находящегося в диапазоне  $1-1,5$  А/см<sup>2</sup>.

### Литература

1. Тазмеев А.Х., Фридланд С.В., Мифтахов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 43.
2. Баринов Ю.А., Школьник С.М. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 3. С. 43
3. Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Фридланд С.В. // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 3. С. 109
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.

## Influence of localization zone binding of the high-current discharge to the liquid electrolyte on the formation of a plasma column

*Kh.K. Tazmeev, I.M. Arslanov, and G.Kh. Tazmeev*

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny Campus.  
10A Syuyumbike av., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia.  
E-mail: tazmeevh@mail.ru

*Experimentally studied gas discharge between liquid electrolyte cathode and a metal anode in the range of currents 4–21 A. It was revealed that the localization zone binding discharge to the electrolyte increases the length of the plasma column in the vertical direction. Was shown the possibility of formation in the open air space above the liquid electrolyte large-scale plasma column with dimensions in the meter range.*

PACS: 52.80.— s

*Keywords:* gas discharge, high-current discharge, liquid cathode, electrolyte cathode, long plasma column.

Bibliography — 4 references

*Received September 25, 2013*