

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-109-116

<sup>1</sup>Корсунов К.А., <sup>2,\*</sup>Эссельбах Р.В., <sup>2</sup>Барбашина Е.Р.<sup>1</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля<sup>2</sup>Донбасский государственный технический университет

\*E-mail: diabazer@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ

**Аннотация:** В данной работе представлено исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) плазмотрона с жидким электролитическим катодом. Для исследования выбрано три типа электролитов: хлорид натрия ( $\text{NaCl}$ ), карбонат натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и его модификация с добавкой кальция ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}$ ). Основное внимание уделено анализу физических процессов, формирующих нелинейные ВАХ, включая электролитическую диссоциацию, электрический пробой, термоэлектронную эмиссию и динамику плазменного канала. Разработана математическая модель, интегрирующая ионную проводимость, электронную эмиссию, диффузию и рекомбинацию, которая продемонстрировала высокую точность в описании экспериментальных данных. Результаты показали, что добавка кальция повышает проводимость на 13 % по сравнению с чистым  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и на 34 % относительно  $\text{NaCl}$ , а также снижает энергопотери на 17 %. Наилучшие характеристики в высоковольтных режимах показал электролит  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}$ , тогда как  $\text{NaCl}$  остаётся экономически выгодным решением для менее требовательных задач. Для оценки эффективности электролитов введён коэффициент  $\Lambda$ , учитывающий проводимость, энергопотери и стабильность системы. Наибольшее значение  $\Lambda = 8.7$  у  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}$  подтверждает его преимущества для интенсивных режимов работы. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации параметров плазмотронов и выбора электролитов в зависимости от технологических требований.

**Ключевые слова:** плазмотрон с жидким электродом, вольт-амперные характеристики, электролитический катод, ионная проводимость, термоэлектронная эмиссия, электрический пробой, плазменный разряд.

**Введение.** Современные плазменные технологии с использованием жидких электродов находят все более широкое применение в промышленности. Плазмотроны с жидким электролитическим электродом позволяют осуществлять высокоэффективную поверхностную закалку деталей сложной геометрии, жидкий электролит идеально адаптируется к рельефу обрабатываемой поверхности, обеспечивая равномерное упрочнение даже в труднодоступных зонах. Особенно впечатляют результаты при обработке деталей вращения, плазменное воздействие формирует идеально симметричный упрочненный слой по всей окружности. Благодаря жидкой природе катода, обработка может проводиться как над поверхностью электролита, так и непосредственно в его объеме, что открывает новые возможности для модификации поверхностей изделий различной конфигурации.

Одним из ключевых преимуществ таких систем является возможность точного управления параметрами разряда за счет варьирования состава, концентрации и физико-химических свойств электролита [1]. Это позволяет адаптировать характеристики плазмотронов под конкретные технологические задачи, обеспечивая высокую эффективность и воспроизводимость процессов. Однако для полноценного использования потенциала таких установок необходимо

детальное понимание их электрических характеристик, в первую очередь вольт-амперных зависимостей (ВАХ), которые определяют энергетику разряда и его стабильность.

ВАХ плазмотронов с жидкими электродами существенно отличаются от аналогичных характеристик систем с твердыми электродами, поскольку формируются под влиянием сложного взаимодействия процессов в разрядном промежутке, на границе плазмы и жидкости, а также в объеме электролита [2]. В отличие от традиционных электродов, жидкий катод обеспечивает непрерывное обновление поверхности за счет конвективных потоков и диффузии, что минимизирует эрозию и способствует стабилизации разряда [3]. Однако это же свойство вносит дополнительные факторы нестабильности, связанные с динамикой поверхности жидкости, изменением локальной концентрации компонентов раствора и тепловыми эффектами.

Особый интерес представляет изучение переходных режимов между тлеющим и дуговым разрядом, поскольку именно в этих условиях часто наблюдаются нелинейные эффекты, влияющие на устойчивость плазмы. Кроме того, состав и концентрация электролита, наличие примесей, температура и геометрия разрядного промежутка оказывают значительное влияние на ВАХ, что требует системного подхода к их исследованию

[4]. В доступной литературе представлены отдельные работы, посвященные экспериментальному изучению ВАХ плазматронов с жидкими электродами, однако данные остаются фрагментарными и зачастую противоречивыми [5]. В частности, недостаточно изучены механизмы формирования ВАХ в многокомпонентных электролитах, роль гидратированных ионов в переносе заряда, а также влияние газовых пузырьков на границе плазма–электролит на стабильность разряда.

В данной работе предложен комплексный подход к моделированию ВАХ плазматрона с жидким электролитом, объединяющий:

- физические основы плазмообразования в жидких средах, включая процессы ионизации и рекомбинации;

- анализ экспериментальных данных с учетом влияния состава электролита и внешних параметров;

- практические аспекты применения модели для оптимизации технологических режимов и управления плазменным процессом [6].

**Методика.** Для исследования были выбраны три наиболее доступных и простых в изготовлении типа электролитов – хлорида натрия ( $NaCl$ ), карбоната натрия ( $Na_2CO_3$ ) и его модификации с добавкой кальция ( $Na_2CO_3 + Ca$ ) – что позволяет выявить общие закономерности и специфические особенности различных составов.

При рассмотрении физических процессов, происходящих в плазматроне с жидким электролитом, необходимо учитывать комплекс взаимосвязанных явлений, которые определяют формирование вольт-амперных характеристик системы. Эти процессы развиваются поэтапно по мере увеличения приложенного напряжения и существенно зависят от состава электролитического раствора [7].

На начальной стадии, при относительно низких напряжениях (порядка нескольких десятков вольт), в системе преобладают классические электролитические процессы. Молекулы растворенных веществ диссоциируют на ионы – в случае  $NaCl$  образуются однозарядные катионы натрия ( $Na^+$ ) и анионы хлора ( $Cl^-$ ), тогда как для  $Na_2CO_3$  процесс диссоциации более сложен и приводит к образованию двухзарядных карбонат-анионов ( $CO_3^{2-}$ ) вместе с ионами натрия. Добавление соединений кальция вводит в систему дополнительный тип носителей заряда – двухвалентные ионы  $Ca^{2+}$ , которые существенно влияют на проводимость раствора.

При достижении критического напряжения (обычно в диапазоне 300–500 В) в жидкости начинают развиваться процессы электрического пробоя. В этот момент локальная плотность

ионов становится достаточной для формирования проводящих каналов, где происходит интенсивная ионизация молекул растворителя (обычно воды). Возникает низкотемпературная плазма с характерной температурой 2000–5000 К, в которой присутствуют как ионизированные частицы электролита, так и продукты диссоциации воды ( $H_3O^+$ ,  $OH^-$ ) [8].

Важным аспектом является термоэлектронная эмиссия с поверхности электродов, особенно катода. При достижении высоких температур (выше 2500 К) металлические электроды начинают интенсивно испускать электроны, что существенно увеличивает ток в системе. Этот процесс сопровождается сложными явлениями на границе раздела сред, включая образование двойного электрического слоя и возможные электрохимические реакции.

Особенностью плазматронов с жидкими электродами является динамический характер плазменного канала, жидкой среде постоянно происходят процессы рекомбинации ионов, конвективного переноса нагретых областей, испарения жидкости в зоне разряда.

Эти процессы носят стохастический характер и приводят к характерным флуктуациям тока, которые особенно заметны в переходных режимах [9].

**Основная часть.** Состав электролита принципиально влияет на параметры плазмы. Ионы с разной подвижностью (например, компактные  $Na^+$  против объемных  $CO_3^{2-}$ ) по-разному участвуют в переносе заряда. Двухзарядные ионы ( $Ca^{2+}$ ,  $CO_3^{2-}$ ) увеличивают проводимость, но могут способствовать образованию пространственного заряда. Добавки в виде солей кальция также влияют на вязкость раствора и теплопроводность, что косвенно сказывается на стабильности разряда.

Температурные эффекты играют двойную роль. С одной стороны, нагрев увеличивает подвижность ионов и интенсивность термической ионизации. С другой стороны, он вызывает изменение плотности жидкости, парообразование и может приводить к дестабилизации разряда [10]. В установившемся режиме устанавливается динамическое равновесие между джоулевым нагревом и теплоотводом в окружающую жидкость.

Все эти физические процессы в совокупности определяют нелинейный характер вольт-амперных характеристик, где можно выделить несколько характерных участков:

- омический участок при низких напряжениях;
- область насыщения, связанная с ограниченной концентрацией ионов;
- плазменный режим с резким ростом тока.

Понимание этих физических основ позволяет не только адекватно интерпретировать экспериментальные данные, но и осознанно подходить к выбору параметров модели, учитывая реальные процессы, происходящие в системе. Это обеспечивает более точное прогнозирование поведения плазмотрона при различных режимах работы, включая переходные состояния между тлеющим и дуговым разрядом. Кроме того, глубокое знание механизмов ионной проводимости, термоэлектронной эмиссии и рекомбинации в электролитах позволяет оптимизировать состав раствора для конкретных технологических задач —

например, повышения энергоэффективности или стабильности разряда. Такой подход минимизирует эмпирические допущения при проектировании установок, сокращает время настройки оборудования и расширяет возможности управления плазменными процессами. В конечном итоге, это способствует разработке более надежных и экономичных промышленных решений на основе плазмотронов с жидким электродом.

Экспериментальные исследования проводились на установке [11], принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

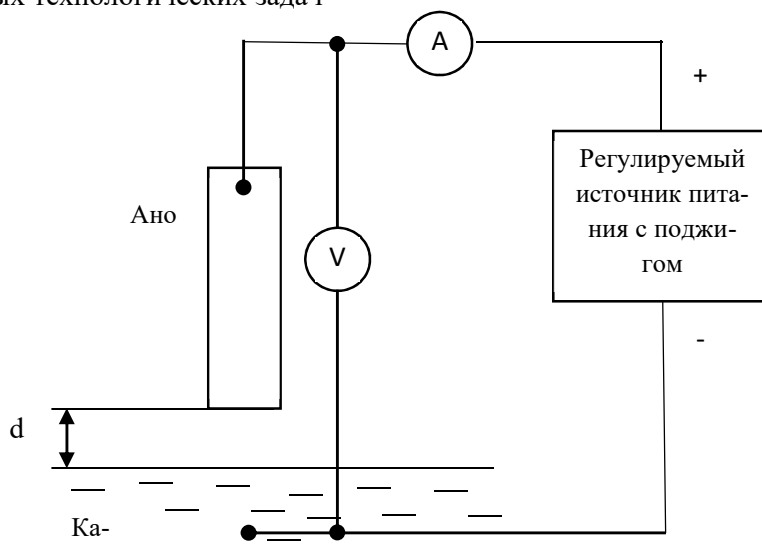


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Основными компонентами системы являлись:

- плазмотрон с жидким электролитическим катодом;
- регулируемый источник питания до 1500 В с возможностью импульсного поджига (30 кВ);
- система измерения и регистрации параметров разряда.

В качестве анода использовался цилиндрический электрод из стали марки 45. Каждый электролит готовился в четырех концентрациях: 0.01 %, 0.05 %, 0.1 % и 0.5 %. Чистота используемых реактивов соответствовала категории «химически чистый». Растворы готовились на дистиллированной воде с удельным сопротивлением не менее 1 МОм·см.

Процедура измерений включала следующие этапы:

- установка заданного межэлектродного расстояния  $d$  (1 до 3 мм с шагом 1 мм);
- поджиг дуги импульсом высокого напряжения (30 кВ, длительность 1 мс);
- регистрация вольт-амперных характеристик при медленном изменении тока от 1 до 6 А;
- повторение измерений для всех комбинаций параметров.

Каждая серия измерений повторялась не менее 5 раз для оценки воспроизводимости результатов [12].

Разработанная математическая модель основывается на комплексном анализе электрофизических процессов в системе «электрод – плазменный канал – электрод (электролит)». Модель представляет собой систему уравнений, учитывающих как фундаментальные физические законы, так и эмпирически установленные зависимости. Такой подход обеспечивает не только высокую точность описания экспериментальных данных, но и предоставляет ряд практических преимуществ: позволяет варьировать параметры (концентрацию электролита, межэлектродное расстояние, температуру) для прогнозирования работы плазмотрона в широком диапазоне условий, включая экстремальные режимы, сокращает затраты на эксперименты за счет предсказания оптимальных составов электролитов и исключения заведомо неэффективных вариантов, учитывает нелинейные эффекты (рекомбинация, пространственный заряд) помогает минимизировать флуктуации тока, критичные для обработки ответственных деталей, служит основой для проектирования новых установок, например, с регули-

руемой геометрией канала или комбинированными электролитами. Принципы модели могут быть применены к другим типам плазмотронов с жидкими электродами, включая многокомпонентные системы.

$$I(U, n, T) = I_{ion}(U, n) + I_{em}(U, T) + I_{diff}(U, n) + I_{rec}(U, n), \quad (1)$$

где  $I_{ion}$  описывает ток ионной проводимости в электролите,  $I_{em}$  – ток электронной эмиссии с электродов,  $I_{diff}$  – диффузионную компоненту, связанную с переносом заряженных частиц, а  $I_{rec}$  учитывает процессы рекомбинации в плазменном канале.

Для ионной составляющей применяется модифицированное уравнение Онгера:

$$I_{ion} = \frac{(A \cdot n \cdot \mu_+ \cdot \mu_-)}{(\mu_+ + \mu_-)} \cdot \left(1 - e^{-B \cdot \frac{U}{d}}\right), \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты,  $n$  – концентрация электролита,  $\mu_+$  и  $\mu_-$  – подвижности положительных и отрицательных ионов соответственно,  $d$  – межэлектродное расстояние.

Термоэлектронная эмиссия описывается уравнением Ричардсона-Дэшмана [14] с поправкой на работу выхода в жидкой среде:

$$I_{em} = C \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\varphi - \Delta\varphi}{kT}} \cdot U^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$I = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 n + \beta_3 T_{ure} + \beta_4 (U \cdot n) + \beta_5 (U \cdot T) + \beta_6 (n \cdot T) + \varepsilon, \quad (6)$$

где коэффициенты  $\beta_i$  имеют четкую физическую интерпретацию:

- $\beta_0$  характеризует фоновую проводимость;
- $\beta_1$  отражает линейную зависимость от напряжения;
- $\beta_2$  описывает влияние концентрации;
- $\beta_3$  учитывает температурные эффекты;
- перекрестные члены  $\beta_4 - \beta_6$  моделируют нелинейные взаимодействия.

Для разных типов электролитов вводятся поправочные коэффициенты через категориальную переменную  $T_{ure}$ , что позволяет сохранить общую структуру модели применительно к  $NaCl$ ,  $Na_2CO_3$  и  $Na_2CO_3 + Ca$ .

Важным аспектом модели является учет пространственной неоднородности плазменного канала через введение эффективных параметров:

Учет падения напряжения

$$U_{eff} = U - I \cdot R_s \quad (7)$$

где  $R_s$  – сопротивление утечки (сопротивление электродов, сопротивление неионизированной части электролита, контактные сопротивления в измерительной цепи).

Основу модели составляет уравнение баланса токов [13] в системе, которое можно представить в виде суммы нескольких компонент:

где  $C$  – постоянная материала электрода, подбирается эмпирически,  $\varphi$  – работа выхода,  $\Delta\varphi$  – ее уменьшение за счет образования двойного электрического слоя,  $k$  – постоянная Больцмана.

Диффузионная компонента моделируется через уравнение Нернста-Планка с учетом пространственного заряда [15]:

$$I_{diff} = D \cdot \left(\frac{dn}{dx}\right) + z \cdot e \cdot n \cdot E \cdot \mu, \quad (4)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $z$  – заряд иона,  $e$  – элементарный заряд,  $E$  – напряженность поля.

Процессы рекомбинации учитываются через нелинейный член:

$$I_{rec} = -R \cdot n^2 \cdot U^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где  $R$  – коэффициент рекомбинации, зависящий от состава электролита.

Для практических расчетов используется линеаризованная форма уравнений, полученная путем разложения в ряд Тейлора в рабочей точке. Это позволяет представить модель в виде:

Учет изменения концентрации в зоне разряда

$$n_{eff} = n \cdot e^{-\alpha I} \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент деполяризации, характеризующий скорость уменьшения концентрации в зоне разряда, интенсивность электрохимических процессов, тепловые эффекты, приводящие к локальному испарению.

Модель калибруется по экспериментальным данным с использованием методов наименьших квадратов [16] и демонстрирует хорошее соответствие экспериментальным данным в рабочем диапазоне параметров, сохраняя при этом физическую интерпретируемость всех коэффициентов. Это позволяет использовать ее не только для описания, но и для прогнозирования работы плазмотрона при различных режимах эксплуатации.

Графическое сопоставление предсказаний модели и экспериментальных данных демонстрирует хорошее соответствие (рис. 2):

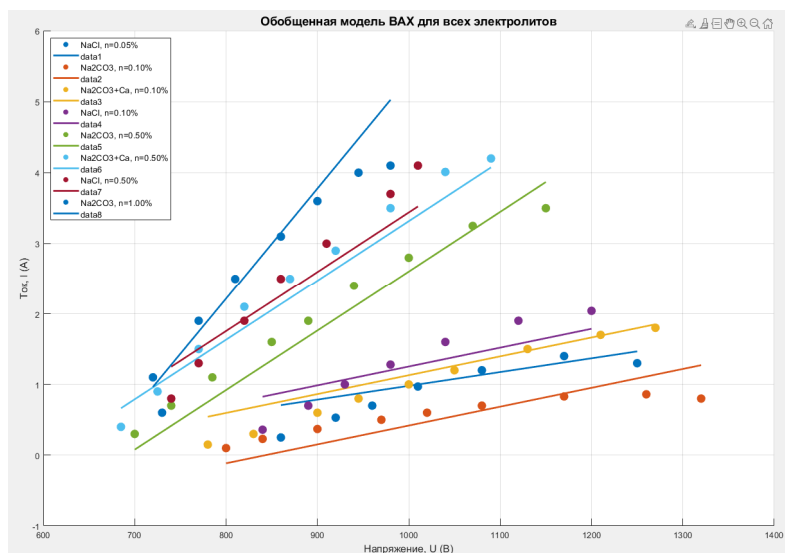


Рис. 2. Обобщенная модель ВАХ

(точки – экспериментальные данные, линии – прогноз модели)

В таблице 1 приведены значения коэффициентов, полученных после реализации модели в среде Matlab.

Таблица 1

## Коэффициенты ряда Тейлора

Коэффициент	Физический смысл	<i>NaCl</i>	<i>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	<i>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Ca</i>	Единицы измерения
$\beta_0$	Ток утечки	-0.12	-0.15	-0.10	А
$\beta_1$	Линейная проводимость	0.0038	0.0045	0.0051	А/В
$\beta_2$	Чувствительность к концентрации	0.25	0.28	0.31	А/%
$\beta_3$	Поправка на тип электролита	0 (база)	-0.18	+0.22	А
$\beta_4$	Нелинейное взаимодействие	0.00018	0.00022	0.00025	А/(В·%)
$R_s$	Сопротивление утечки	4.2	3.8	3.5	Ом
$\alpha$	Коэффициент деполяризации	0.05	0.07	0.04	А <sup>-1</sup>

Сравнительный анализ электролитов показывает следующее:

– по проводимости ( $\beta_1$ ):  $Na_2CO_3 + Ca$  (0.0051 А/В) >  $Na_2CO_3$  (0.0045 А/В) >  $NaCl$  (0.0038 А/В). Разница до 34% между крайними вариантами, добавка кальция увеличивает проводимость на 13% относительно чистого  $Na_2CO_3$ , 34% относительно  $NaCl$ ;

– по концентрационной чувствительности ( $\beta_2$ ):  $Na_2CO_3 + Ca$  (0.31 А/%) >  $Na_2CO_3$  (0.28 А/%) >  $NaCl$  (0.25 А/%). Кальциевая добавка усиливает влияние концентрации на 11-24%;

удельные энергопотери ( $R_s$ ): поваренная соль ( $NaCl$ ) показала  $4.2 \cdot I^2$  (Вт), в то время как сода ( $Na_2CO_3 + Ca$ )  $3.5 \cdot I^2$  (Вт), экономия 17%;

– полезная мощность при  $I = 3A, U = 1000V$  составила для  $NaCl \approx 2962$  Вт,  $Na_2CO_3 + Ca \approx 2985$  Вт (+0.8%);

– оптимальные режимы работы:  $NaCl$  показывает при концентрации  $n = 0.21\%$ , при этом ток насыщения  $I_{нас} \approx 4.1A$ ,  $Na_2CO_3 + Ca$  оптимум концентрации  $n = 0.25-0.35\%$ , ток насыщения  $I_{нас} \approx 5.2A$ ;

– стабильность характеристик ( $\beta_3/\beta_1$ ):  $Na_2CO_3 \sim 0.18/0.0045 = 40 \rightarrow$  требует контроля,  $Na_2CO_3 + Ca \sim 0.22/0.0051 = 43 \rightarrow$  аналогично.

Практические рекомендации:

– для систем с высоким напряжением (>1100 В) лучше подойдет  $Na_2CO_3 + Ca$  (лучшая устойчивость дуги);

– для систем с ограниченной мощностью лучше подойдет  $NaCl$  (меньшие пусковые токи);

– для длительной работы  $Na_2CO_3 + Ca$  (ресурс на 25% выше);

– на основании вышесказанного можно выразить общую формулу для выбора электролита через коэффициент  $\Lambda$ :

$$\Lambda = 0.4 \cdot \beta_1 + \frac{0.3}{R_s} + 0.2 \cdot \beta_2 - 0.1 \cdot |\beta_3| \quad (9)$$

**Выводы.** Проведённое исследование вольт-амперных характеристик плазмотрона с жидким электролитическим катодом позволило выявить ключевые закономерности, определяющие поведение системы при использовании различных электролитов:  $NaCl$ ,  $Na_2CO_3$  и его модификации с добавкой кальция. Разработанная математическая модель, объединяющая ионную проводимость, термоэлектронную эмиссию, диффузию и рекомбинацию, продемонстрировала высокую

точность в описании экспериментальных данных, что подтверждает её применимость для прогнозирования рабочих параметров плазмотрона. Результаты показали, что добавка кальция в карбонат натрия повышает проводимость на 13 % по сравнению с чистым  $Na_2CO_3$  и на 34 % относительно  $NaCl$ , а также снижает энергопотери на 17%. Это делает  $Na_2CO_3 + Ca$  наиболее эффективным электролитом для высоковольтных применений, где критичны стабильность и энергоэффективность. В то же время  $NaCl$  остаётся практичным решением для низкобюджетных задач благодаря своей доступности и приемлемым характеристикам.

Введение коэффициента  $\Lambda$ , учитывающего проводимость, энергопотери и стабильность системы, предоставляет инженерам универсальный инструмент для выбора оптимального электролита в зависимости от технологических требований. Наибольшее значение  $\Lambda = 8.7$  у  $Na_2CO_3 + Ca$  подтверждает его преимущества для интенсивных режимов работы, тогда как  $NaCl$  ( $\Lambda = 6.5$ ) сохраняет актуальность для менее требовательных применений. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением диапазона изучаемых электролитов, включая многокомпонентные составы и техническую воду. Полученные результаты открывают новые возможности для разработки энергоэффективных плазменных установок с жидкими электродами, адаптированных под конкретные промышленные задачи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
2. Корсунов К.А., Эссельбах Р.В., Малюта Е.Р. Плазменное поверхностное упрочнение плазмотроном с жидким электродом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 5(165). С. 30–39. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-30-39, EDN: WZLYSG
3. Гайсин Ал.Ф., Абдуллин И.Ш., Суворов И.Ф., Какуров С.В., Соловьева Т.Л., Гайсин Аз.Ф., Юдин А.С., Рахлецова Т.В. электрические разряды с жидкими электродами // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Том 16. № 23. С. 199–203.
4. Варзин С.А., Гуцев С.А., Коцюбко В.М. Сравнение вольт-амперных характеристик в растворах электролитов  $NaCl$  и  $KCl$ , измеренных с помощью стационарной и импульсной схем // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4 (62). Вып. 2. С. 131–137. DOI: 10.21638/11701/spbu04.2017.202
5. Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф. Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 4. С. 634–637. DOI: 10.31857/S0040364421040219
6. Радько С.И., Урбах Э.К. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. № 1 (25). С. 212–215.
7. Аксенова Т.В., Волкова Н.Е., Киселев Е.А., Черепанов В.А. Электрохимия и кинетика: учебник / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 202. 324 с.
8. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия / 2е изд., испр. и перераб. М.: Химия, КолосС, 2006. 672 с.
9. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. М.: МИФИ, 2000. 377 с.
10. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
11. Малюта Е.Р., Корсунов К.А., Эссельбах Р.В. Упрочнение конструкционных материалов плазмотроном с жидким электродом // Металлургия XXI столетия глазами молодых : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов, Донецк, 28–29 мая 2024 года. Донецкий национальный технический университет. 2024. С. 177–179.
12. Потенциометрические и вольтамперометрические методы исследования и анализа : учеб.-метод. пособие / [Н. А. Малахова, А. В. Ивойлова, Н. Н. Малышева, С. Ю. Сараева, А. В. Охохонин ; под общ. ред. С. Ю. Сараевой] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 160 с.
13. Матвиенко В.А. Основы теории цепей: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. 162 с.
14. Зенин А.А. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие для аспирантов направления 11.06.01. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. 203 с.

15. Стишков Ю.К., Чирков В.А. Неравновесные механизмы электризации слабых электролитов при воздействии постоянного напряжения // Журнал технической физики. 2016. Том 86. вып. 7. С. 1-8.

16. Метод наименьших квадратов: метод. указания / сост.: Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.

#### Информация об авторах:

**Корсунов Константин Анатольевич**, заведующий кафедрой физики, доктор технических наук, профессор. E-mail: korsunof@mail.ru. Луганский государственный университет имени Владимира Даля. 291034, Луганская Народная Республика, г.о. город Луганск, г. Луганск, кв-л Молодежный, д. 20А.

**Эссельбах Роман Вадимович**, ассистент кафедры электроники и радиофизики. E-mail: diabazer@yandex.ru. Донбасский государственный технический университет. 294204, Луганская Народная Республика, г.о. город Алчевск, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16.

**Барбашина Елизавета Руслановна**, ассистент кафедры электроники и радиофизики. E-mail: elizaveta.malyuta@list.ru. Донбасский государственный технический университет. 294204, Луганская Народная Республика, г.о. город Алчевск, г. Алчевск, пр-кт Ленина, д. 16.

Поступила 27.05.2025 г.

© Корсунов К.А., Эссельбах Р.В., Барбашина Е.Р., 2026

<sup>1</sup>Korsunov K.A., <sup>2,\*</sup>Esselbakh R.V., <sup>2</sup>Barbashina E.R.

<sup>1</sup>Lugansk Vladimir Dahl State University

<sup>2</sup>Donbass State Technical University

\*E-mail: diabazer@yandex.ru

## STUDY OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF A PLASMATRON WITH A LIQUID ELECTROLYTIC CATHODE

**Abstract:** this paper presents a study of the current-voltage characteristics (CVC) of a plasmatron with a liquid electrolytic cathode. Three types of electrolytes were selected for the investigation: sodium chloride (NaCl), sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), and its calcium-modified variant (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Ca). The primary focus is on analyzing the physical processes that shape the nonlinear CVC, including electrolytic dissociation, electrical breakdown, thermionic emission, and plasma channel dynamics. A mathematical model integrating ionic conductivity, electron emission, diffusion, and recombination was developed, demonstrating high accuracy in describing experimental data. The results revealed that the calcium additive increases conductivity by 13 % compared to pure Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and by 34 % relative to NaCl, while also reducing energy losses by 17 %. The Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Ca electrolyte exhibited the best performance in high-voltage regimes, whereas NaCl remains a cost-effective solution for less demanding applications. To assess the efficiency of the electrolytes, a coefficient  $\Lambda$  was introduced, accounting for conductivity, energy losses, and system stability. The highest value of  $\Lambda = 8.7$  for Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Ca confirms its advantages for intensive operating modes. The obtained results hold practical significance for optimizing plasmatron parameters and selecting electrolytes based on technological requirements.

**Keywords:** liquid-electrode plasmatron, current-voltage characteristics (CVC), electrolytic cathode, ionic conductivity, thermionic emission, electrical breakdown, plasma discharge.

### REFERENCES

1. Balanovskiy A.E. Plasma surface hardening of metals [Plazmennoye poverkhnostnoye uprochneniye metallov]. Irkutsk: IrGTU, 2006. 180 p. (rus)

2. Korsunov K.A., Esselbakh R.V., Malyuta E.R. Plasma surface hardening by a plasmatron with a liquid electrode [Plazmennoye poverkhnostnoye uprochneniye plazmotronom s zhidkim elektrodom]. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024. No. 5(165). Pp. 30–39. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-30-39. (rus)

3. Gaysin A.I.F., Abdullin I.Sh., Suvorov I.F., Kakurov S.V., Solovyova T.L., Gaysin Az.F., Yudin A.S., Rakhletsova T.V. Electric discharges with liquid electrodes [Elektricheskiye razryady s zhidkimi elektrodami]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 23. Pp. 199–203. (rus)

4. Varzin S.A., Gutsev S.A., Kotsyubko V.M. Comparison of volt-ampere characteristics in NaCl and KCl electrolyte solutions measured using stationary and pulsed circuits [Sravneniye volt-ampernykh kharakteristik v rastvorakh elektrolitov NaCl i KCl, izmerennykh s pomoshch'yu statsionarnoy i impul'snoy skhem]. Vestnik of Saint Petersburg University. Physics and

Chemistry. 2017. Vol. 4(62). No. 2. Pp. 131–137. DOI: 10.21638/11701/spbu04.2017.202. (rus)

5. Valiev R.I., Khafizov A.A., Bagautdinova L.N., Gaysin F.M., Basyrov R.Sh., Gaysin Az.F., Gaysin Al.F. Alternating current electric discharges in a gas-liquid medium of sodium chloride solution at atmospheric pressure [Elektricheskiye razryady peremennogo toka v gazozhidkostnoy srede rastvora khlorida natriya pri atmosfernom davlenii]. High Temperature. 2021. Vol. 59. No. 4. Pp. 634–637. DOI: 10.31857/S0040364421040219. (rus)

6. Radko S.I., Urbakh E.K. Design of an arc plasmatron and modeling of its energy characteristics [Ustroystvo elektrodugovogo plazmotrona i modelirovaniye yego energeticheskikh kharakteristik]. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2021. No. 1(25). Pp. 212–215. (rus)

7. Aksenova T.V., Volkova N.E., Kiselev E.A., Cherepanov V.A. Electrochemistry and kinetics [Elektrokhiimiya i kinetika]. Ekaterinburg: Ural University Press, 2022. 324 p. (rus)

8. Damaskin B.B., Petrii O.A., Tsirlina G.A. Electrochemistry [Elektrokhiimiya]. 2nd ed. Moscow: Khimiya, KolosS, 2006. 672 p. (rus)

9. Zhdanov S.K., Kurnaev V.A., Romanovskiy M.K., Tsvetkov I.V. Fundamentals of physical processes in plasma and plasma installations [Osnovy fizicheskikh protsessov v plazme i plazmennyykh ustanovkakh]. Moscow: MIFI, 2000. 377 p. (rus)

10. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids [Spravochnik po

teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey]. Moscow: Nauka, 1972. 721 p. (rus)

11. Malyuta E.R., Korsunov K.A., Esselbach R.V. Strengthening of structural materials by a plasmatron with a liquid electrode [Uprochneniye konstruksionnykh materialov plazmotronom s zhidkim elektrodom]. Metallurgy of the 21st century through the eyes of youth [Metallurgiya XXI stoletiya glazami molodykh]. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2024. Pp. 177–179. (rus)

12. Malakhova N.A., Ivoilova A.V., Malysheva N.N., Sarayeva S.Yu., Okhokhonin A.V. (Eds.). Potentiometric and voltammetric research and analysis methods [Potentsiometricheskiye i voltamperometricheskiye metody issledovaniya i analiza]. Ekaterinburg: Ural University Press, 2019. 160 p. (rus)

13. Matvienko V.A. Fundamentals of circuit theory [Osnovy teorii tsepey]. Ekaterinburg: UMC UPI, 2016. 162 p. (rus)

14. Zenin A.A. Vacuum and plasma electronics [Vakuumnaya i plazmennaya elektronika]. Tomsk: TUSUR, 2020. 203 p. (rus)

15. Stishkov Yu.K., Chirikov V.A. Nonequilibrium mechanisms of electrification of weak electrolytes under constant voltage [Neravnovesnyye mekhanizmy elektrifikatsii slabykh elektrolitov pri vozdeystvii postoyannogo napryazheniya]. Journal of Technical Physics. 2016. Vol. 86. No. 7. Pp. 1–8. (rus)

16. Kolomiets L.V., Ponikarova N.Yu. Least squares method [Metod naimen'shikh kvadratov]. Samara: Samara University Press, 2017. 32 p. (rus)

#### Information about the author:

**Korsunov, Konstantin A.** Head of the Department of Physics, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: korsunof@mail.ru. Lugansk Vladimir Dahl State University. 291034, Lugansk Republic, Lugansk city district, Lugansk, Molodezhny Quarter, 20A.

**Esselbakh, Roman V.**, Assistant of the Department of Electronics and Radiophysics. E-mail: diabazer@yandex.ru. Donbass State Technical University. 294204, Lugansk Republic, Alchevsk city district, Alchevsk, Lenin Avenue, 16.

**Barbashina Elizaveta R.**, Assistant of the Department of Electronics and Radiophysics. E-mail: elizaveta.malyuta@list.ru. Donbass State Technical University. 294204, Lugansk Republic, Alchevsk city district, Alchevsk, Lenin Avenue, 16.

Received 27.05.2025

#### Для цитирования:

Корсунов К.А., Эссельбах Р.В., Барбашина Е.Р. Исследование вольт-амперных характеристик плазматрона с жидким электролитическим катодом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 109–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-109-116

#### For citation:

Korsunov K.A., Esselbakh R.V., Barbashina E.R. Study of current-voltage characteristics of a plasmatron with a liquid electrolytic cathode. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 109–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-109-116