

## Повышение ресурса работы электродного узла электрогидравлической установки удалением изолятора положительного электрода из области разряда

© Ю.Ю. Инфимовский<sup>1</sup>, М.А. Строков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup>ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, 119991, Россия

*Широкое применение электрогидравлического эффекта в промышленности и лабораторной практике сдерживается малым сроком службы электродного узла. Наиболее слабым звеном в конструкции этого узла является изолятор. Повышение ресурса работы электродного узла связано с поиском как новых материалов, так и новых конструктивных решений. Предложена конструкция узла с изолятором, удаленным из области формирования разрядного канала. В качестве материала изолятора использован поликарбонат. Конструктивная особенность в виде кольцевой проточки в изоляторе вокруг электрода позволила исключить нежелательный рост стримера с границы металл — диэлектрик. На основе экспериментально полученных осциллограмм разрядного тока сформулирован критерий оценки эффективности разряда по величине амплитуды разрядного тока в первой полуволне разряда. Определены условия получения стабильно повторяющегося высокоэффективного разряда. Сформулированы направления работ для дальнейшего повышения ресурса электродного узла. Показано, что конструкция электродного узла, основанная на удалении изолятора из области разрядного канала и применении поликарбоната в качестве материала изолятора обеспечивает достаточный ресурс работы разрядного узла.*

**Ключевые слова:** электрогидравлический эффект, импульсный разряд, жидкость, поликарбонат, ресурс работы, электродный узел.

Способность импульсного электрического разряда в жидкости совершать механическую работу (так называемый электрогидравлический эффект) вызывает интерес исследователей и инженеров, стремящихся использовать его в промышленности. Несмотря на давнюю историю (эффект и многие устройства на его основе подробно описаны Л.А. Юткиным в 1960–1980-х гг. [1]), практическая работа до сих пор сопряжена с трудностями [2, 3].

Многие приложения электрогидравлического эффекта, такие как измельчение твердых порошковых материалов [4, 5], штамповка [6], бурение скважин [7], формирование профиля железобетонных свай [8], обеззараживание воды [3], экстрагирование биологически активных компонентов из жидких сред [9], для своего осуществления требуют довольно высоких амплитуд давлений. Для этого необходимо за короткое время сформировать между электродами плазменный ка-

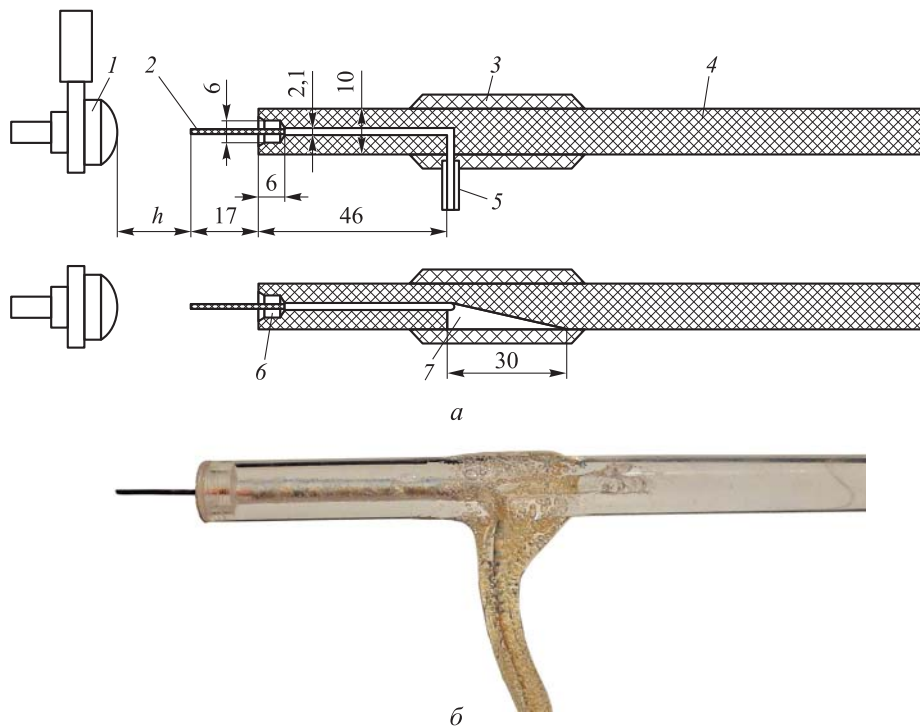
нал определенной длины (для более полного преобразования энергии и получения более высоких значений амплитуды давления вблизи канала разряда [10]). Такие условия разряда достигаются применением более высоких напряжений, использованием низкоиндуктивных конденсаторов и подводящих цепей.

Очевидно, что с увеличением давления в жидкости повышаются нагрузки на электродный узел. Механические напряжения в материалах изолятора и электрода могут достигать соответствующих пределов прочности, что влечет за собой разрушение электродного узла. Даже при нагрузках, меньших предела прочности, электроды могут деформироваться, что приводит к нарушению условий электрического пробоя жидкости [10], разряды становятся менее интенсивными и перестают оказывать необходимое воздействие на обрабатываемый материал. Для восстановления свойств системы разрядный узел требует частого ремонта либо замены. В этих условиях конструктивное исполнение электродного узла является решающим фактором для повышения ресурса работы электродного узла, а следовательно, и установки в целом. В данной статье рассмотрен один из вариантов повышения ресурса работы электродного узла лабораторной установки для получения металлических нанопорошков.

Идея метода снижения воздействия на материал изолятора, основанная на удалении изолятора из области воздействия плазменного канала, была предложена еще в работе [1]. На рис. 1 показана основанная на этой идее конструкция электродного узла.

Выбор материала изолятора связан прежде всего с необходимостью обеспечить высокие значения электрической прочности и ударной вязкости. К дополнительному требованию можно отнести прозрачность изолятора, позволяющую наблюдать место, из которого начинает формироваться разрядный канал, и возникшие в толще материала трещины. Материалы, традиционно применяемые в электродных узлах электрогидравлических установок [11], достаточно подробно изучены. Однако, несмотря на преимущества поликарбоната, упоминаний о его применении в электрогидравлических устройствах мало. Так, в патенте [12] поликарбонат упомянут лишь в качестве материала рабочей камеры.

В нашем случае в стержне 4 из поликарбоната длиной 0,7 м выполнен канал (под медный одножильный провод 2 сечением  $0,75 \text{ мм}^2$  в изоляции), заканчивающийся боковой прорезью 7 и поперечным отверстием для удобного размещения провода и его надежной фиксации от выбивания при дальнейшем воздействии ударных нагрузок. Выходящий из стержня провод дополнительно изолирован гибкой трубкой 5 толщиной 2 мм, а место входа провода в стержень залито водостойким винилацетатным герметиком 3. Общая длина провода 60 см.



**Рис. 1.** Схема, расположение (а) и внешний вид (б) положительного электрода: 1 — отрицательный электрод; 2 — медный одножильный провод сечением  $0,75 \text{ мм}^2$ ; 3 — водостойкий герметик; 4 — стержень из поликарбоната; 5 — изоляционная трубка; 6 — углубление, подавляющее развитие разряда с границы металл — диэлектрик; 7 — прорез для помещения провода в стержень

В рабочем торце стержня предварительно выполнено углубление 6, диаметр которого много больше диаметра провода. Таким образом подавляется развитие разрядного канала — стримера из места контакта металла и диэлектрика и, пока проводник выступает над торцом стержня, все стримеры формируются с острия медной жилы.

Рост стримера с границы металл — диэлектрик нежелателен, так как в этом месте диэлектрик многократно подвергается воздействию высоких давлений и контакту с плазмой, вследствие чего быстро обугливается (меняя условия формирования стримера) и разрушается. Существуют работы [13], в которых провоцируется рост стримера именно с границы металл — диэлектрик на строго определенном участке, однако при таком способе требуется применение редких материалов и сложной технологии спайки диэлектрика (алюмооксидная керамика и аналогичные высокопрочные материалы) с металлом.

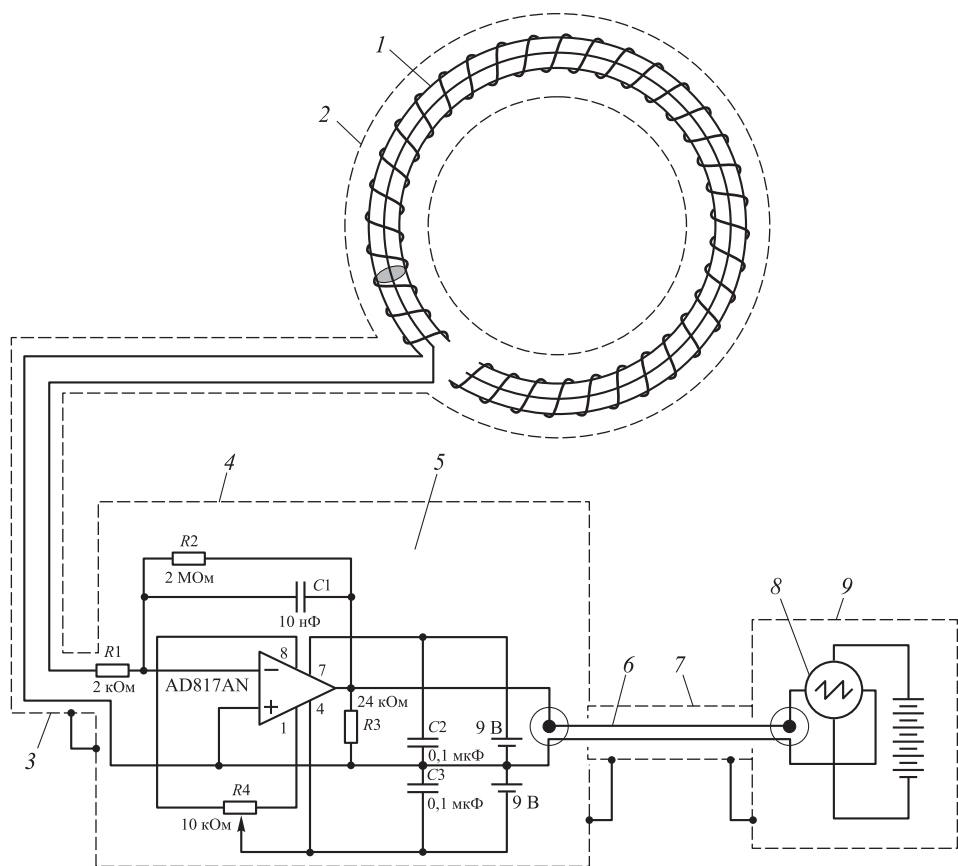
Для формирования импульсов тока использовали либо один конденсатор, либо батарею из двух-трех параллельно соединенных конденсаторов К75-15 номинальным напряжением 10 кВ и емкостью 1 мкФ, заряжаемых до напряжения 9,5...10,5 кВ, а также воздушный

разрядный промежуток. Напряжение заряда перед пробоем контролировали посредством резистивного делителя напряжения и цифрового мультиметра.

Ток от батареи передавался по двум многожильным проводам сечением  $10 \text{ мм}^2$  и длиной 1,7 м, расположенным на расстоянии не более 5 см один от другого.

Разряды проводились в пластиковом контейнере с водой. Размеры контейнера: высота 32 см, диаметр 30 см.

Ток разрядов регистрировали посредством пояса Роговского и цифрового осциллографа (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема включения и экранирования пояса Роговского (все экраны соединены между собой, но ни в одной точке не соединены с электронной цепью):

1 — измерительная катушка; 2 — фольговый экран катушки (выполнен внахлест с продольной прорезью); 3 — экранированный акустический кабель; 4 — закрытый металлический корпус интегратора; 5 — интегратор; 6 — коаксиальный кабель RG58; 7 — дополнительный фольговый экран поверх коаксиального кабеля; 8 — цифровой осциллограф с питанием от внутреннего аккумулятора; 9 — фольговый экран осциллографа с окном для дисплея

На подготовительном этапе был опробован положительный электрод без углубления (см. рис. 1) и с медным проводником, располо-

женным заподлицо с торцом стержня. По мере увеличения емкости конденсаторной батареи с 1 до 3 мкФ наблюдался рост наибольшего пробиваемого промежутка воды, что косвенно свидетельствует о расходовании основной энергии не на механическую работу при пробое, а на формирование исходного разрядного канала.

При этом не было обнаружено никакой взаимосвязи между количеством полувольт на осциллограмме тока разряда и интенсивностью эффекта. Сильный эффект, равно как и слабый, наблюдался и с одиночным импульсом тока, и с несколькими полуволнами. Между тем наблюдалась следующая зависимость: чем меньше расстояние  $h$  между электродами, тем из большего числа колебаний тока состоит разряд.

Во всех экспериментах максимальная длина пробиваемого промежутка между электродами не превышала 8 мм, что существенно снижало эффективность электрогидравлического эффекта. Формирование разрядных каналов непосредственно у кромки изолятора привело к частичному разрушению электродного узла после 35 опытов.

После того как положительный электродный узел заменили на конструкцию, показанную на рис. 1, существенно (почти вдвое) увеличилась максимальная длина пробиваемого промежутка.

Как и в ранее описанных экспериментах, наблюдалась четкая закономерность: чем больше емкость конденсаторной батареи, тем большей длины промежутки воды пробиваются.

Во всех последующих экспериментах использовали батарею из трех конденсаторов емкостью 1 мкФ каждая. Накопленная энергия составляла 135...165 Дж.

Было проведено по 50 разрядов при различном расстоянии между электродами с записью осциллограмм тока. Расстояние между электродами определяли следующим образом: проносили между ними пластиковые стержни известного диаметра, не извлекая электроды из воды.

В зависимости от расстояния  $h$  между электродами наблюдались следующие эффекты:

- 17 мм — пробоя водного промежутка не происходит;
- 16 мм — отдельные стримеры достигают отрицательного электрода (эффект слабый);
- 15 мм — 60 % разрядов происходят с пробоем промежутка (все разряды слабые и практически не сопровождаются механическим эффектом);
- 14 мм и менее — 100 % стримеров достигают отрицательного электрода (механический эффект различен по интенсивности).

Следует отметить, что во всех случаях, даже когда полного пробоя промежутка не происходит, стример возникает с острия положительного электрода.

На рис. 3–5 представлены характерные осциллограммы тока разрядов при различном расстоянии  $h$  между электродами.

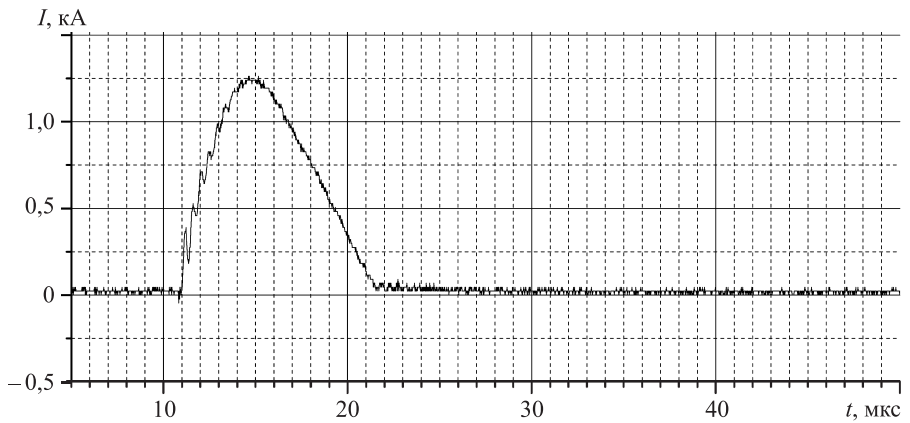


Рис. 3. Осциллограмма тока разряда при  $h = 15$  мм (слабый эффект)

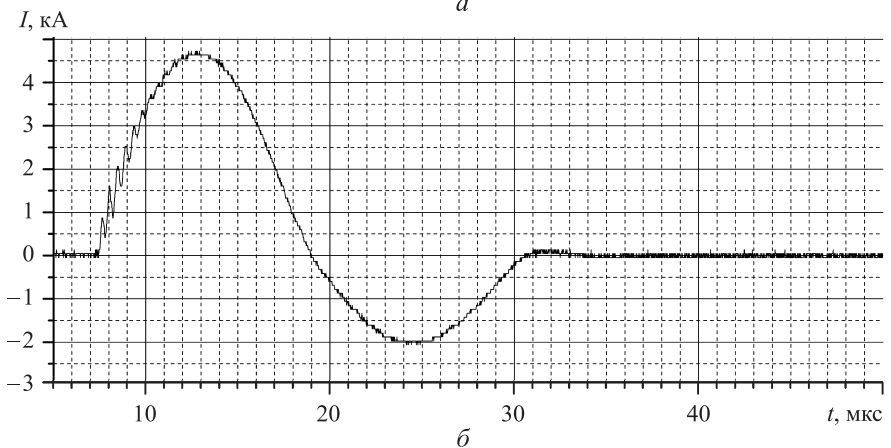
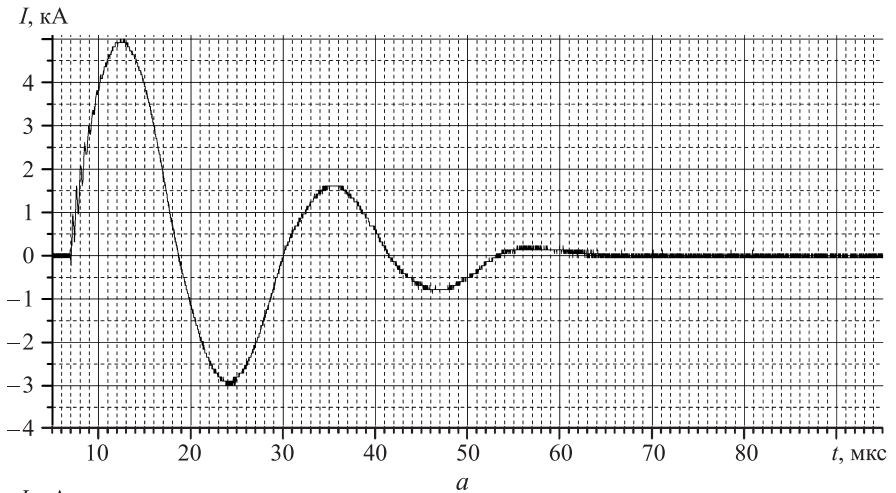


Рис. 4. Осциллограмма тока разряда при  $h = 11 \dots 13$  мм:  
 а — умеренный эффект; б — сильный эффект

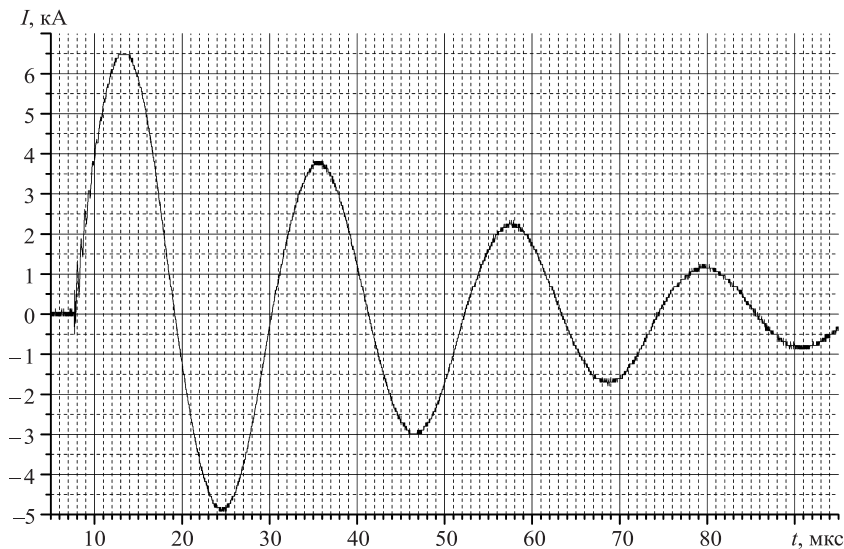


Рис. 5. Осциллограмма тока разряда при  $h = 9$  мм (сильный эффект)

Разряды с сильным эффектом, состоящие из одной полуволны тока, получить не удалось (вероятно, вследствие большой собственной индуктивности используемых конденсаторов), однако разряды, содержащие две полуволны и более наблюдались как с сильным, так и с умеренным эффектом.

В качестве критерия, по которому можно различать эффективность разряда, предложено использовать максимальную силу тока в первой полуволне: 5...6 кА для сильных и менее 4 кА для слабых разрядов. Указанное различие косвенно свидетельствует об определяющем влиянии длительности формирования разрядного канала и потерь энергии на этом этапе, что хорошо согласуется с описанием в работе [1], а также подтверждается осциллограммами предразрядных стадий, приведенными на рис. 6–8.

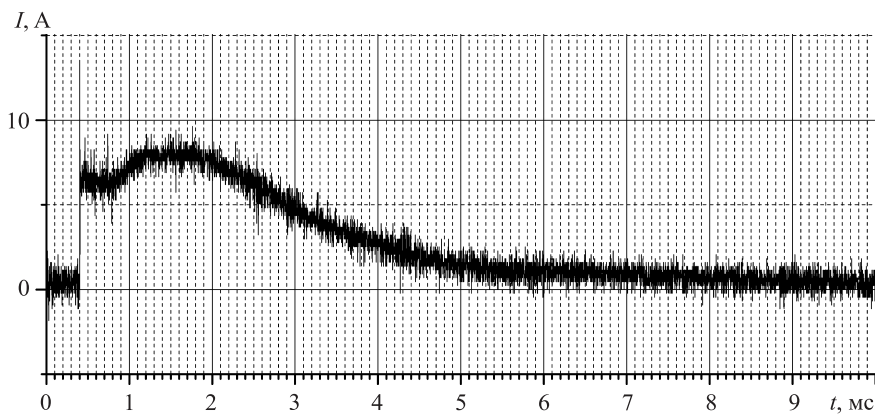
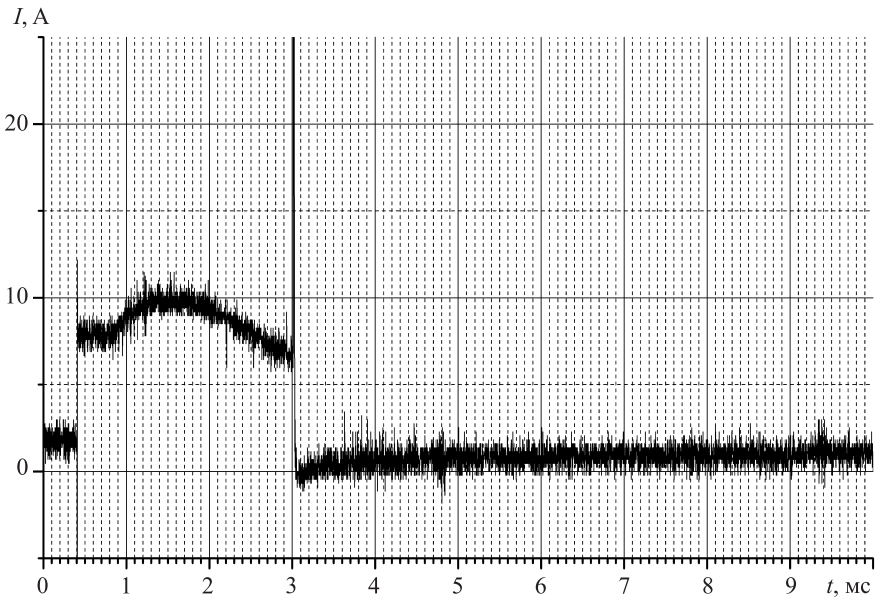
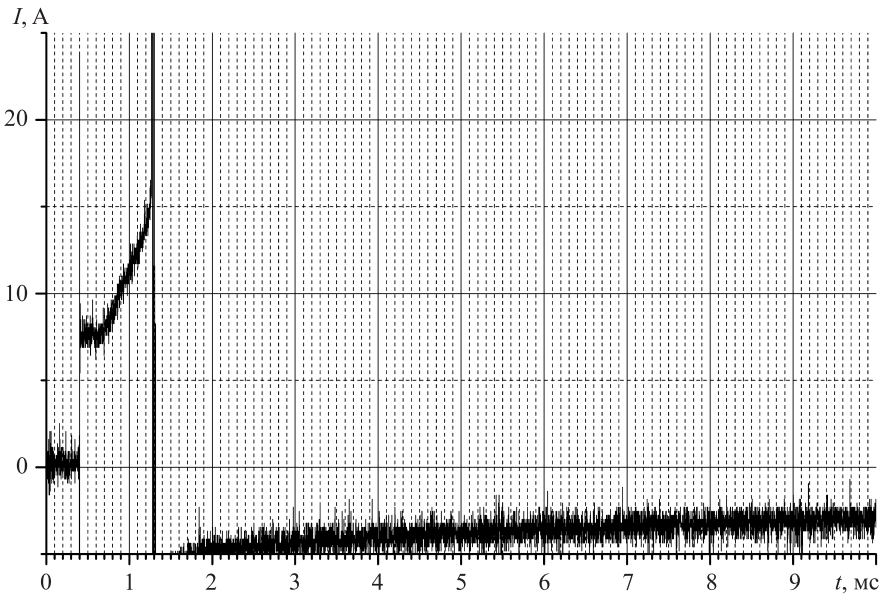


Рис. 6. Осциллограмма тока на предразрядной стадии при  $h = 16$  мм (стример не достиг второго электрода, пробоя нет)



**Рис. 7.** Осциллограмма тока на предразрядной стадии при  $h = 15$  мм (на  $t = 3$  мс произошел пробой промежутка со слабым механическим эффектом)



**Рис. 8.** Осциллограмма тока на предразрядной стадии при  $h = 9$  мм (на  $t = 1,3$  мс — пробой промежутка с сильным механическим эффектом)

Отклонение от нуля в начале осциллограмм, приведенных на рис. 6, 7, обусловлено напряжением смещения операционного усилителя и его температурным дрейфом в течение эксперимента.



Оценка энергии по осциллограммам предразрядного тока показывает, что сильный эффект проявляется, только если к моменту пробоя сохранилось не менее  $1/3$  исходного заряда конденсаторной батареи.

Целью следующего этапа работы было получение стабильно повторяющегося разряда с силой тока не менее 5 кА (сильный эффект) при наибольшем расстоянии между электродами.

Критерием того, что разряд прошел на пределе возможной длины, можно считать наличие в осциллограмме тока только одной-двух полувольт колебаний.

Разрядник настраивали так, чтобы разряды следовали с промежутком около 2 с. Интенсивность разряда отмечали по амплитуде тока в первой полувольте разряда.

Проведено 500 разрядов при наибольшем возможном расстоянии между электродами и силе тока в первой полувольте не менее 5 кА. Разряды с силой тока 5 кА и более составляли около 95 % общего количества. В этих экспериментах 100 % стримеров формировалось с острия положительного электрода.

На изоляторе положительного электрода трещин и деформаций не выявлено.

Длина выступающей из торца стержня проволоки уменьшалась с 15,5 до 8,5 мм.

Замеченные особенности процесса:

1. При неосесимметричном расположении электродов медный проводник вскоре отгибается к краю диэлектрического стержня под действием ударных нагрузок. Причина — недостаточная жесткость меди. Поскольку увеличение толщины стержня затруднит формирование длинных стримеров, возможное решение — использовать более жесткий материал.

2. При вертикальном расположении положительного электрода над отрицательным в углублении  $b$  (см. рис. 1) накапливается пузырек газа. В результате некоторые пробой формируются от края пузырька, а не с острия, что может вызвать быстрое разрушение диэлектрика.

3. В испытательной камере после экспериментов обнаружена мелкодисперсная медь. Следовательно, при разряде происходит лишь ее испарение с электрода без химической реакции с водой. На основании этого следует ожидать, что другие металлы и сплавы, более электроотрицательные, чем медь (платина, родий), либо химически стойкие (коррозионно-стойкие стали, хром) и обладающие более высокими температурами плавления и кипения, были бы менее подвержены износу. Оценка падения напряжения на электроде показывает, что, несмотря на большее, чем у меди, удельное сопротивление, применение указанных материалов не приведет к заметным потерям энергии и чрезмерному разогреву проводника импульсным током.

4. По мере уменьшения диаметра положительного электрода ускоряется его разрушение в результате оплавления с последующим уносом напором воды и испарением электрода. Выбор диаметра проводника определяется компромиссом между условием формирования стримера с острия и прочностью проводника на изгиб.

**Выводы.** Удаление изолятора положительного электрода из зоны формирования плазменного канала существенно повышает ресурс электродного узла. Поликарбонат обладает достаточными прочностными свойствами для изготовления длительно работающих электродов. Дальнейшее повышение ресурса электродного узла возможно путем подбора материала электрода.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Юткин Л.А. *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности*. Санкт-Петербург, Машиностроение, 1986, 252 с.
- [2] Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И., Осташко И.А. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом. *Вопросы химии и химической технологии*, 2008, № 6, с. 163–166.
- [3] Вилков К.В., Григорьев А.Л., Нагель Ю.А., Уварова И.В. Обеззараживающее действие мощного электрического разряда в воде. *Письма в ЖТФ*, 2004, т. 30, вып. 7, с. 48–54.
- [4] Инфимовский Ю.Ю., Строков М.А. Перспективы получения мелкодисперсных порошков с помощью импульсного электрического разряда в жидкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-8-1104
- [5] Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов. *Новые огнеупоры*, 2005, № 3, с. 41–43.
- [6] Долматов А.И. Применение специальных технологических приемов при электрогидроимпульсной штамповке листовых деталей с локальными элементами большой кривизны. *Вестник нац. техн. ун-та ХПИ*, 2011, № 46, с. 83–89.
- [7] Емелин М.А., Морозов В.Н., Новиков Н.Г. *Новые методы разрушения горных пород*. Москва, Недра, 1990, 239 с.
- [8] Курец В.И., Лобанов Г.Л., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Активация цементных растворов электрическими разрядами. *Электронная обработка материалов*, 2003, № 1, с. 76–80.
- [9] Кудимов Ю.Н., Казуб В.Т., Голов Е.В. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Ч. 1. Ударные волны и кавитация. *Вестник ТГТУ*, 2002, т. 8, № 2, с. 253–264.
- [10] Юшков Ю.Г., Климов А.С., Гречневский Е.А., Юшков А.Ю. Исследование иницирования электрического разряда в воде при разработке электрогидравлической технологии. *Технические науки: теория и практика: материалы междунар. науч. конф.* Чита, апрель 2012 г. Чита, Молодой ученый, 2012, с. 139–141.
- [11] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой конденсированных сред. *Известия Томского политехнического университета*, 2006, т. 309, № 2, с. 58–63.

- [12] Рутберг Ф.Г., Коликов В.А., Курочкин В.Е., Мальцев В.Г. *Способ производства наночастиц*. Пат. № 2272697 Российская Федерация, 2006, бюл. № 9, 7 с.
- [13] Месяц Г.А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков. *Письма в ЖЭТФ*, 2005, т. 31, вып. 24, с. 51–63.

Статья поступила в редакцию 01.09.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Инфимовский Ю.Ю., Строков М.А. Повышение ресурса работы электродного узла электрогидравлической установки удалением изолятора положительного электрода из области разряда. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-10-1546>

**Инфимовский Юрий Юрьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: высокотемпературная сверхпроводимость, импульсный электрический разряд в жидкости.  
e-mail: inf-yura@yandex.ru

**Строков Максим Анатольевич** — инженер АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана», аспирант ФИАН им. П.Н. Лебедева. Область научных интересов: импульсный электрический разряд в жидкости, когерентная оптика.  
e-mail: makstrokov@yahoo.com

# Increasing service life of an electrohydraulic system electrode assembly by moving the positive electrode insulator away from the discharge region

© Yu.Yu. Infimovskiy<sup>1</sup>, M.A. Strokov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

*Low service life of electrode assemblies limits the application of electrohydraulic effect in the industry and laboratory practice. The insulator is the weakest link in the electrode assembly design. Increasing the electrode assembly service life involves searching for new materials and new design options. We suggest an assembly design with the insulator moved away out of the region where the discharge channel forms. We use polycarbonate as the insulator material. A design feature in the shape of a circular groove in the insulator surrounding the electrode allowed us to eliminate unwanted streamer growth from the metal-dielectric interface. We define a criterion for estimating discharge efficiency from the magnitude of the discharge current in the first discharge half-wave, based on discharge current oscillograms obtained in experiments. Furthermore, we determine the conditions leading to a stable, recurrent, highly efficient discharge. We state the directions for further investigations in the field of increasing electrode assembly service life. We show that the electrode assembly design based on moving the insulator away out of the discharge channel region and using polycarbonate as the insulator material ensures an adequate service life of the discharge assembly.*

**Keywords:** electrohydraulic effect, pulsed discharge, liquid, polycarbonate, service life, electrode assembly.

## REFERENCES

- [1] Yutkin L.A. *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its industrial applications]. St. Petersburg, Mashinostroeniye Publ., 1986, 252 p.
- [2] Vinogradov B.V., Fedin D.A., Emelyanenko V.I., Ostashko I.A. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii — Problems of Chemistry and Chemical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 163–166.
- [3] Vilkov K.V., Grigorev A.L., Nagel Yu.A., Uvarova I.V. *Pisma v ZhTF — JETP Letters*, 2004, vol. 30, issue 7, pp. 48–54.
- [4] Infimovskiy Yu.Yu., Strokov M.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-8-1104
- [5] Vinogradov B.V., Fedin D.A. *Novye ognepory — Refractories and Industrial Ceramics*, 2005, no. 3, pp. 41–43.
- [6] Dolmatov A.I. *Vestnik nats. tekhn. un-ta KhPI — Herald of Kharkiv Polytechnic Institute*, 2011, no. 46, pp. 83–89.
- [7] Emelin M.A., Morozov V.N., Novikov N.G. *Novye metody razrusheniya gornykh porod* [New methods of rock destruction]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 239 p.
- [8] Kurets V.I., Lobanov G.L., Filatov G.P., Yushkov A.Yu. *Elektronnaya Obrabotka Materialov — Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2003, no. 1, pp. 76–80.

- [9] Kudimov Yu.N., Kazub V.T., Golov E.V. *Vestnik TGTU — Transactions of the TSTU*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 253–264.
- [10] Yushkov Yu.G., Klimov A.S., Grechnevskiy E.A., Yushkov A.Yu. Issledovanie initsiirovaniya elektricheskogo razryada v vode pri razrabotke elektrogidravlicheskoj tekhnologii [Investigating electric discharge initiation in water during development of an electrohydraulic technology]. *Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy mezhdunar. nauch. konf. Chita, april 2012 g.* [Engineering sciences: theory and practice; proc. of the international scientific conference in Chita, April 2012]. Chita, Molodoy Uchenyy Publ., 2012, pp. 139–141.
- [11] Ushakov V.Ya. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 58–63.
- [12] Rutberg F.G., Kolikov V.A., Kurochkin V.E., Maltsev V.G. *Sposob proizvodstva nanochastits* [Technique of nanoparticle production]. Patent RU2272697, 2006, bulletin no. 9, 7 p.
- [13] Mesyats G.A. *Pisma v ZhTF — JETP Letters*, 2005, vol. 31, no. 24, pp. 51–63.

**Infimovskiy Yu.Yu.**, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. Specializes in high-temperature superconductivity, pulsed electric discharge in liquids. e-mail: inf-yura@yandex.ru

**Strokov M.A.**, engineer, BMSTU Center of Applied Physics JSC, post-graduate, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Specializes in pulsed electric discharge in liquids, coherent optics. e-mail: makstrokov@yahoo.com