

Оказалось, что с возрастанием n (рис. 4) количество РВ сначала увеличивается, достигая максимального значения (около 10% от первоначального), а затем уменьшается.

Содержание же свободной и связанной серы в щелоке заметно уменьшается с ростом n (рис. 5).

Из рис. 7 видно, что рН щелока увеличивается (и это особенно важно) с ростом числа электрогидравлических ударов.

Выводы

Результаты исследований позволяют судить об эффективности электрогидравлической обработки жидкостей с целью достижения желаемого показателя в соответствии с технологическим процессом производства. Предстоит изучение побочных явлений, обнаруженных при испытаниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барамбойм Н.К.* Механохимия высокомолекулярных соединений. М., 1973.
2. *Каплан С.З., Радзевенчук И.Ф.* Вязкостные присадки и загущенные масла. Л., 1982.

Поступила 17.03.03

Summary

In the article some experimental results are submitted on application of electro-hydraulic effect (EHE) in liquid media. Test medium: glycerin and alkaline solution. The influence of the EHE on Pb, PH, SO₂ has been investigated. Using EHE it is possible to improve industrial (for example, of cellulose), save materials and enhance the end – product quality.

В.И. Курец, Г.П. Филатов, А.И. Жучков, А.Ю. Юшков

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОБОЕ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД

*НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете,
пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия*

Электроразрядные технологии [1–3], обладающие существенными преимуществами по сравнению с традиционными, как правило, достаточно энергоемки. Особенно это проявляется, когда в качестве передающей ударные нагрузки или сама среда, на которую воздействуют электрические импульсы, является проводящей. Как правило, в качестве среды, передающей ударные нагрузки в электроразрядных технологиях, используется техническая вода с удельным сопротивлением $\rho = (1–6) \cdot 10^3$ Ом·см, а если в процессе используются бетонные, цементные смеси, электролиты и т.д., то $\rho = (4–20) \cdot 10^2$ Ом·см.

Основные потери энергии при электрическом пробое проводящих сред авторы многочисленных исследований [1–15] связывают с предпробивными процессами в рабочем промежутке, то есть в процессе зарождения и развития лидерных каналов до их замыкания с противоположным электродом. Как правило, электродные системы, используемые в электроразрядных технологиях, имеют форму, обеспечивающую максимальную неоднородность поля, причем электрод, имеющий меньший диаметр, как правило, является потенциальным электродом, а подаваемые импульсы напряжения имеют положительную полярность, что обеспечивает наиболее благоприятные условия для формирования импульсного электрического разряда в среде.

Разработка инженерных методов расчета потерь энергии в конкретных конструкциях электродных систем позволит обоснованно выбирать параметры импульса, а также должна указать

на меры, которые необходимо использовать для уменьшения этих потерь. В работах [4–8] предлагались методы оценки потерь энергии в предпробивной стадии развития разряда, однако их использование дает существенно заниженные величины потерь, так как учтены не все факторы, их определяющие. В данной работе нами сделана попытка учесть максимальное количество факторов, влияющих на потери энергии в предпробивной стадии.

Экспериментальные исследования формирования разряда микросекундной длительности в воде и водных электролитах [4–12] привели к качественному разделению времени запаздывания пробоя τ_3 на несколько составляющих. При регистрации электрических характеристик развития разряда удается зафиксировать две основные области их изменения в период формирования пробоя [4–9]:

$$\tau_3 = t_{д.л} + t_{л}, \quad (1)$$

где $t_{д.л}$ – время долидерной стадии, $t_{л}$ – время развития разряда.

Схематичное изображение осциллограмм тока и напряжения представлены на рис. 1.

Следует отметить, что время запаздывания разряда носит статистический характер и характеризуется широким диапазоном разбросов измеряемых значений.

Для оценки потерь энергии в предпробивной стадии развития разряда нами использована конструкция электродной системы, представленная на рис.2, которая используется для создания буронабивных свай с использованием электрического импульсного разряда для уширения основания сваи и развития ее поверхности по высоте.

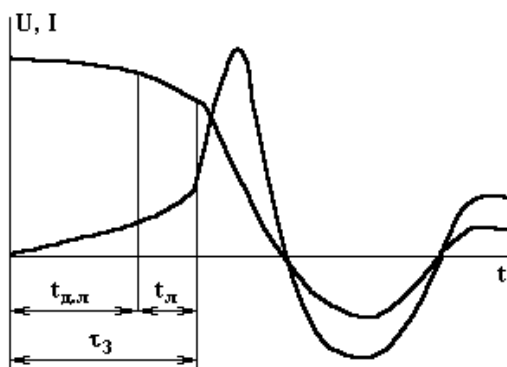


Рис.1. Характерные осциллограммы тока и напряжения

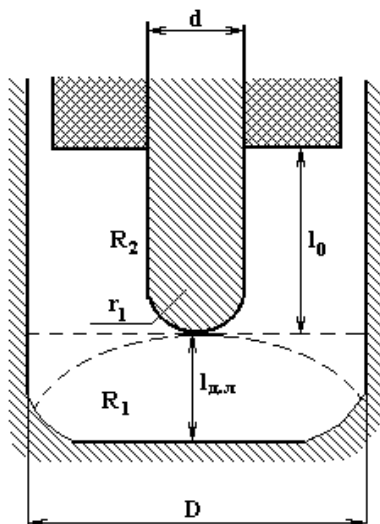


Рис.2. Конструкция электродной системы.

D – внутренний диаметр рабочей камеры, d – диаметр потенциального электрода, r_1 – радиус закругления потенциального электрода, $l_{р.л}$ – длина рабочего промежутка, l_0 – длина оголенной части потенциального электрода, R_1 – сопротивление среды в зоне между потенциальным электродом и землей, R_2 – сопротивление среды в зоне между потенциальным электродом и боковыми стенками камеры

Для такой электродной системы потери энергии $W_{\text{п}}$ в предпробойной стадии развития разряда можно представить в виде следующей суммы:

$$W_{\text{п}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \quad (2)$$

где W_1 – потери энергии для создания перегретой неустойчивости в зоне потенциального электрода, W_2 – потери энергии за счет растекания токов с оголенной части потенциального электрода, W_3 – потери энергии на формирование лидеров в рабочем промежутке, W_4 – потери энергии за счет растекания токов с поверхности оголенной части потенциального электрода и лидеров, развивающихся в рабочем промежутке.

Потери энергии W_1 и W_2 характеризуются временем от момента приложения напряжения до момента начала развития лидеров ($0 - t_{\text{д.л}}$), а W_3 и W_4 характеризуются временем от начала образования лидерных структур до полного замыкания ими рабочего промежутка ($t_{\text{д.л}} - t_{\text{п}}$).

Рассмотрим энергетические потери в каждой стадии.

Расчет и анализ потерь энергии проведем на основе следующих основных закономерностей и допущений, которые характерны для пробоя проводящих сред и используются большинством исследователей:

- условия зарождения лидеров связано с возникновением перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода за счет токов ионной проводимости;
- развитие лидеров начинается с потенциального электрода и состоит из системы лидеров, концы которых образуют эквивалентную поверхность, распространяющуюся от потенциального электрода. Ориентация лидерных каналов не связана с расположением потенциального электрода;
- скорость развития лидеров является постоянной, за исключением (8–10%) длины рабочего промежутка вблизи заземленного электрода;
- средняя напряженность поля между концами лидерной системы и заземленным электродом в процессе развития лидеров изменяется.

Рассмотрим стадию зажигания разряда, протекающего от момента приложения напряжения до $t_{\text{д.л}}$.

Порог развития перегретой неустойчивости определяется энергией источника импульса, то есть способностью источника поддерживать квазипостоянное напряжение на рабочем промежутке. Так, напряжение на рабочем промежутке при работе емкостного накопителя энергии запишется как

$$U(t) = U_0 \exp(-t_{\text{п}} / R_0 C), \quad (3)$$

где $t_{\text{п}}$ – время, необходимое для создания перегретой неустойчивости.

Указанное выше условие достигается при $t_{\text{п}} \ll R_0 C$, которое в реальных условиях практически всегда выполнимо.

Энергию, затраченную на образование перегретой неустойчивости без учета потерь энергии на развитие и пробой газового пузырька, можно записать в виде

$$W_1 = \int_0^{t_{\text{д.л.}}} i(t)u(t) dt,$$

или при условии $t_{\text{п}} \ll R_0 C$ и $R_0 = \text{const}$.

$$W_1 = \frac{U_0^2}{R_0} \int_0^{t_{\text{д.л.}}} dt. \quad (4)$$

Для решения этого уравнения необходимо определить пределы интегрирования и значения сопротивления электродной системы.

В рамках используемой модели длительность стадии зажигания разряда определяется постоянной времени развития перегретой неустойчивости.

В работе [14] время $t_{\text{д.л}}$ определяется по величине инкремента нарастания перегретой неустойчивости из соотношения

$$t_{\text{д.л}} \approx \lambda_{\text{п}}^{-1},$$

$$\lambda_n = \frac{1}{\gamma \cdot C_p} \cdot E_{0r}^2 \cdot \frac{d\sigma}{dT^0} \cdot \lambda_n^*, \quad (5)$$

где γ – плотность, C_p – теплоемкость, $\frac{d\sigma}{dT^0}$ – температурная зависимость проводимости жидкости, λ_n^* – безразмерный инкремент $\sim 2 - 2,5$, E_{0r} – напряженность у потенциального электрода. Для коротких промежутков $E_{0r} \sim (0,9U_0/l) [(l+r_1)/r_1]$, а для длинных промежутков $E_{0r} \sim (0,9U_0/r_1)$.

Для нашего случая (рис. 2), при $U_0 \sim 30$ кВ, $\sigma_0 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ расчетные времена зажигания разряда представлены в табл. 1. Для сравнения в этой же таблице даны экспериментальные оценки времени задержки импульса при пробое технической воды с $W_0 \sim 1,35$ кДж для этой же электродной системы.

Сопоставление расчетных величин $t_{д.л}$ и времени запаздывания разряда τ_3 показывает удовлетворительную сходимость результатов, из чего следует, что в нашем случае $t_{д.л} \approx \tau_3$. Таким образом, время задержки импульса в основном определяется временем создания перегретой неустойчивости жидкости, находящейся вблизи потенциального электрода, то есть $t_{д.л} \gg t_n$. Следует отметить чрезвычайно большой разброс в экспериментальной оценке времени запаздывания разряда в проводящей жидкости, что отмечается практически всеми авторами, исследующими этот процесс. Это связано с стохастическим характером возникновения перегретой неустойчивости и образованием первичных факелов на потенциальном электроде с учетом локальных напряженностей на его поверхности.

Таблица 1. Время задержки импульса от длины рабочего промежутка

Длина рабочего промежутка $l_{p.n}$, мм	10	20	30	40
Расчетное время $t_{д.л}$, мкс*	46 – 58	68 – 85	80 – 100	90 – 110
Экспериментальное время задержки импульса τ_3 , мкс	$25 \pm 11,4$	$70 \pm 22,5$	$93 \pm 30,3$	$95 \pm 35,2$

* Минимальные значения $t_{д.л}$ соответствуют $\lambda_n^* = 2$, максимальные значения $\lambda_n^* = 2,5$.

Следует отметить, что по расчету и эксперименту время запаздывания разряда с ростом промежутка вначале возрастает, а затем стабилизируется.

В нашем случае с увеличением $l_{p.n} \geq 50$ мм время запаздывания практически постоянно и составляет $\tau_3 \sim 150$ мкс, так как при этом напряженность у потенциального электрода практически не зависит от длины рабочего промежутка.

Расчет низковольтного сопротивления рабочего промежутка R_0 с учетом оголенной поверхности электрода проведем, разделив активную зону, где происходит растекание токов на две составляющие: зона под потенциальным электродом R_1 и зона между стенкой камеры и его оголенной частью потенциального электрода R_2 , тогда

$$R_0 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2), \quad (6)$$

где сопротивление зон можно рассчитать из выражений

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{2l_{p.n} - d}{l_{p.n} \cdot d} \right); \quad R_2 = \frac{\rho \cdot \ln(D/d)}{2\pi l}, \quad (7)$$

а сопротивление рабочего промежутка

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{(2l_{p.n} - d) \ln(D/d)}{l_0(2l_{p.n} - d) + l_{p.n} d \ln(D/d)} \right). \quad (8)$$

Безусловно, это выражение сильно упрощено, но приемлемо для практических инженерных оценок сопротивления электродной системы. В табл.2 представлены значения сопротивления

электродной системы для $\rho = 3 \cdot 10^3$ Ом·см, $l_0 \approx 1$ см, $D = 28,0$ см, $d = 1,2$ см при изменении длины рабочего промежутка ($l_{p.л}$).

Таблица 2. Сопротивление рабочего промежутка от его длины

Длина рабочего промежутка $l_{p.л}$, мм	10	20	30	40	50	60
Сопротивления рабочего промежутка R_0 , Ом	246	369	402	418	427	433

Используя выражения (2) и (4) с учетом величины R_0 и пределов интегрирования, можно оценить потери энергии в долидерной стадии развития разряда ($t_{д.л}$).

$$W_{д.л} = W_1 + W_2 = \frac{U_0^2}{R_0} \int_0^{t_{д.л}} dt + \frac{U_0^2 2\pi l_0}{\rho \ln(D/d)} \int_0^{t_{д.л}} dt = U_0^2 \tau_3 \left[\frac{1}{R_0} + \frac{2\pi l_0}{\rho \ln(D/d)} \right], \quad (9)$$

где второй член суммы определяет потери энергии от растекания токов с оголенной части потенциального электрода.

В табл. 3 представлены значения W_1 и W_2 , а также общие потери в долидерной стадии развития разряда от длины рабочего промежутка.

Таблица 3. Потери энергии в долидерной стадии развития разряда от длины рабочего промежутка

Длина рабочего промежутка $l_{p.л}$, мм	10	20	30	40
W_1 , Дж	168,3 – 212,2	163 – 204	179 – 224	193 – 236
W_2 , Дж	37,6 – 47,4	55,6 – 69,5	65,4 – 81,8	73,6 – 89,98
$W_1 + W_2$, Дж	205,9 – 259,6	218,6 – 273,5	244,4 – 305,8	267,1 – 325,98
Среднее значение $(W_1 + W_2)_{ср}$, Дж	232,75	246,05	275,1	296,5

Как видно из представленных расчетных данных (табл. 3), основные потери энергии в этой стадии связаны с созданием перегретой неустойчивости жидкости вблизи потенциального электрода, а потери, связанные с растеканием тока с оголенной части электрода для наших условий составляют (20–40%) от общих потерь, причем их доля несколько увеличивается с ростом рабочего промежутка.

Потери энергии в стадии развития системы лидеров также состоят из двух составляющих: потерь энергии на образование и продвижение лидерной системы и потерь энергии за счет растекания токов с оголенной части потенциального электрода и с поверхности лидеров.

$$W_{л} = W_3 + W_4, \quad (10)$$

Характерное время этой стадии развития разряда определяется скоростью развития лидера ($V_{p.л}$). Большинство авторов [1, 5, 9], исследовавших этот процесс, указывают на постоянство этой величины, но дают достаточно разные ее значения для воды – от $1 \cdot 10^5$ до $2,5 \cdot 10^6$ см/с. Такой разброс в диапазонах скоростей развития лидера, на наш взгляд, связан с условиями опыта и проводимостью среды, хотя интерпретация результатов исследований различна. Так, в [9] указывается, что $V_{p.л}$ увеличивается с ростом удельной электропроводности жидкости, а в [1, 5] утверждается, что с увеличением электропроводности воды скорость развития лидера уменьшается, и т.д. Наши работы и исследования других авторов с использованием фоторегистрации одновременно с фиксацией электрических процессов в канале разряда [4] не дают значения скорости разряда в технической воде более $(1-5) \cdot 10^5$ см/с, что связано со значительным выравниванием поля в рабочем промежутке за счет большого количества развиваемых параллельно лидерных образований. Поэтому в наших расчетах используем $V_{p.л} = 2,5 \cdot 10^5$ см/с. В [4] приводится выражение для расчета потерь при образовании и развитии лидеров ($t_{л} \ll R_0 C$):

$$W_3 \approx \frac{U_0^2 l_{p.л}}{V_{p.л} R_0} \ln \frac{E_{кр} l_{p.л}}{U_0}, \quad (11)$$

где $E_{0r} \sim 4 \cdot 10^6$ В/м – критическая напряженность, при которой возможно развитие лидеров.

Потери энергии за счет растекания тока с лидерных образований и оголенной части электрода за время прорастания лидерных образований от потенциального электрода ($t_l \sim l_{p.n} / V_{p.l}$) может быть оценена по выражению

$$W_4 = \frac{U_0^2 2\pi (l_0 + l_{p.n})}{\rho \ln(D/d)} \cdot \frac{l_{p.n}}{V_l} \quad (12)$$

Тогда потери энергии в стадии развития лидерных образований могут быть рассчитаны из выражения

$$W_3 + W_4 = \frac{U_0^2 l_{p.n}}{V_l} \left[\frac{\ln E_{kp} l_{p.n} / U_0}{R_0} + \frac{2\pi (l_0 + l_{p.n})}{\rho \ln(D/d)} \right] \quad (13)$$

В табл. 4 представлены расчетные значения потерь энергии W_3 и W_4 , а также их сумма в лидерной стадии развития разряда для различных рабочих промежутков. Расчеты приведены для рассматриваемой электродной системы, параметров импульса и удельного сопротивления используемой воды.

Таблица 4. Потери энергии в лидерной стадии развития разряда от длины рабочего промежутка

Длина рабочего промежутка $l_{p.n}$, мм	10	20	30	40
W_3 , Дж	3,8	9,27	12,17	14,18
W_4 , Дж	6,52	19,56	39,12	65,2
$W_3 + W_4$, Дж	10,32	28,83	51,29	79,38

В отличие от долидерной стадии представленные результаты (табл. 4) потерь в лидерной стадии существенно зависят от длины рабочего промежутка. Причем основная часть потерь связана с растеканием тока с лидерных образований и оголенной части потенциального электрода, а доля затрат энергии на формирование лидеров незначительна ($\sim 20\%$ от общих затрат энергии в этой стадии).

Общие суммарные затраты энергии в указанной электродной системе при $U_0 = 30$ кВ, $\rho \approx 3 \cdot 10^3$ Ом·см представлены в табл. 5.

Таблица 5. Суммарные потери энергии на стадии развития разряда от длины рабочего промежутка

Длина рабочего промежутка $l_{p.n}$, мм	10	20	30	40
$W_1 + W_2$, Дж	232,7	246,0	275,1	296,5
$W_3 + W_4$, Дж	10,3	28,8	51,3	79,4
W_n , Дж	243,0	274,8	336,4	375,9

Проверку полученных расчетных значений потерь энергии можно провести экспериментально, если считать, что при 50% вероятности пробоя рабочего промежутка потери энергии приблизительно соответствуют энергии импульса источника. Результаты экспериментов по оценке вероятности пробоя в указанной электродной системе представлены в табл. 6.

Сравнивая расчетные потери энергии при $l_{p.n} = 40$ мм (табл. 5) с энергией импульса 540 Дж, при вероятности пробоя $\approx 50\%$ (табл. 6), видим, что расхождение не превышает 30%. Такое соответствие с учетом стохастичности процесса пробоя следует считать удовлетворительным.

Анализ полученных выражений и расчетов показывает, что при небольших рабочих промежутках основную долю потерь составляет энергия, идущая на создание перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода, которая при увеличении рабочего промежутка остается приблизительно постоянной. Однако с увеличением рабочего промежутка доля потерь энергии на растекание токов с оголенной части потенциального электрода и с лидерных образований существенно увеличивается, причем энергия на образование и движение лидеров также не велика в связи с большой скоростью развития лидеров в промежутке.

Таблица 6. Вероятность пробоя рабочего промежутка от энергии импульса и длины рабочего промежутка

Длина рабочего промежутка $l_{р.п.}$, мм	Энергия импульса, кДж			
	0,54	1,35	2,25	4,5
10	100	100	100	100
20	90	100	100	100
30	65	100	100	100
40	55	94	100	100
50	10	71	100	100

Согласно полученным выражениям желательно максимально увеличивать степень изолирования потенциального электрода, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными.

Предложенная методика расчета потерь энергии позволяет выбрать параметры импульса и конструкцию электродной системы, включая длину рабочего промежутка, при известных характеристиках нагружения обрабатываемой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулых Г.А. Научные основы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1990.
2. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты, 2002.
3. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Л., 1988.
4. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
5. Кривицкий Е.В., Раковский Г.Б. Расчет энергетических потерь в предпробивной стадии разряда в жидкости // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев, 1980. С. 24–29.
6. Жегул В.Г., Загребенко В.И., Раковский Г.Б., Хаскина Л.С. Исследования формирования разряда в воде для системы цилиндрических коаксиальных электродов // Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости. Киев, 1980. С. 13–18.
7. Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н., Бондарец Л.М. Исследования энергетических характеристик предпробивной стадии искрового разряда // Журн. техн. физики. 47. Вып. 2. 1977. С. 319–325.
8. Арсентьев В.В. К теории импульсных разрядов в жидкой среде // Прикл. механ. и техн. физика. 1965. № 5. С. 199–206.
9. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975.
10. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрический разряд в воде. М., 1971.
11. Камельков В.С. Развитие импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики. 31. Вып. 8. 1961. С. 948–960.
12. Трофимова Н.Б. Исследования пробоя проводящих негазированных жидкостей // Пробой диэлектриков и полупроводников. М., Л., 1964. С. 210–224.
13. Скрипун В.П., Павлов П.А. Взрывное вскипание жидкостей и флуктуационное зародышеобразование // Теплофизика высоких температур. 8. № 4. 1970. С. 833–840.
14. Раковский Г.Е. О развитии неустойчивостей в предпробивной стадии разряда в электропроводящих жидкостях // Физические основы электрического взрыва. Киев, 1983. С. 10–18.
15. Жегул В.Г., Раковский Г.Е. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости // Журн. техн. физики. 53. Вып.1. 1983. С. 8–14.

Поступила 17.04.03

Summary

A problem of energy consumption determination at the stage of breakdown formation in a conducting liquid is considered. The calculation procedure is based on the thermal mechanism of breakdown and takes into account a constant rate of leader system growing, constant resistance value of the gap preceding the leading stage and currents spreading out of the potential electrode and leader formations. The equation for energy losses is obtained having accounted these suppositions.