

## ИМПУЛЬСНЫЙ ПРОБОЙ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПРИ МАЛЫХ ВРЕМЕНАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

А. Т. ЧЕПИКОВ, Б. В. СЕМКИН, А. М. МИРОНОВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института высоких напряжений)

Получены вольтсекундные характеристики импульсного пробоя водных растворов NaCl в интервале времен воздействия напряжения  $8 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-6}$  сек в неоднородном электрическом поле для расстояния 5 мм. Удельное сопротивление раствора изменялось от  $10$  до  $10^5$  ом см, при этом сопротивление системы изменялось соответственно от 3,5 до  $3,5 \cdot 10^4$  ом. Установлено, что в исследованном диапазоне времен электрическая прочность обратно пропорциональна логарифму удельного «низковольтного» сопротивления раствора. При крутизне импульса напряжения 1000 кв мксек производилось осциллографирование предпробивного тока в промежутке. Оценены максимальные значения развиваемой мощности и энергия, выделившаяся в промежутке до пробоя, в зависимости от удельного сопротивления раствора.

### Введение

Большинство исследований по импульсному пробое электролитов выполнено на импульсах длительностью порядка  $10^{-4}$  сек [1, 2, 3]. Имеющиеся данные об импульсной электрической прочности электролитов на импульсах микросекундной длительности весьма ограничены [4, 5, 6].

В связи с расширением полезных технических применений импульсного электрического разряда в жидкости представляло научный и практический интерес исследование электрических разрядных характеристик электролитов в зависимости от их удельного сопротивления на импульсах микросекундной и наносекундной длительности. Установлено [3], что характер «высоковольтного» разряда в основном зависит от удельной «низковольтной» электропроводности, а не от его химического состава. Поэтому в настоящей работе были использованы только водные растворы NaCl с удельным «низковольтным» сопротивлением от  $10$  до  $10^5$  ом см.

В данной работе экспериментально изучена зависимость импульсной электрической прочности упомянутых выше растворов от времени воздействия напряжения в неоднородном поле. С целью получения полезных количественных данных, а также для объяснения механизма разряда получены зависимости импульсной электрической прочности, энергии, выделяемой в промежутке, и максимальной мощности, развиваемой до пробоя от удельного сопротивления раствора.

## Методика экспериментов

Источником импульсного высокого напряжения являлся четырех-ступенчатый генератор импульсных напряжений на 480 кВ, с емкостью в разряде  $C = 15600$  пф. Волновое сопротивление разрядного контура генератора 36 ом. Напряжение на исследуемом промежутке измерялось с помощью емкостного делителя напряжения и электронного осциллографа ОК 19-М2. Длина фронта волны регулировалась формирующей цепью ( $L_{\text{фр}}$  и  $C_{\text{фр}}$ ) в пределах  $8 \cdot 10^{-8} - 7 \cdot 10^{-6}$  сек. Пробой промежутка всегда происходил на фронте экспоненциальной волны.

Измерение тока осуществлялось с помощью коаксиального шунта, сигналы от которого по кабелю РК-103 подавались на пластины явления трубки осциллографа ОК19-2М. На выходе кабеля РК-103 ставилось согласующее сопротивление  $R_{\text{в}} = 75$  ом.

Емкостная составляющая тока определялась расчетным путем и не превышала 3 % от полного тока, протекающего через шунт. Сопротивление шунта и его индуктивность были равны соответственно  $R_{\text{ш}} = 0,2$  ома и  $L_{\text{ш}} = 1,02 \cdot 10^{-9}$  гн.

Исследования проведены для электродной системы «стержень-плоскость». Импульсы положительной или отрицательной полярности подавались на «стержень», плоский электрод заземлялся через сопротивление шунта.

Высоковольтный электрод выполнен из медного стержня диаметром 6 мм. Для снижения растекания импульсных токов стержень покрывался полиэтиленовой изоляцией толщиной 6 мм. Длина неизолированной части стержня 12 мм, угол заточки острия  $30^\circ$ .

Плоскостью являлся полированный латунный диск диаметром 120 мм. Расстояние между электродами составляло 5 мм. Электродная система помещалась в бак из органического стекла размерами  $350 \times 320 \times 220$  мм. Удельное сопротивление раствора изменялось путем растворения кристаллов NaCl в дистиллированной воде ( $\rho = 3 \cdot 10^5$  омсм).

Измерение удельного сопротивления раствора осуществлялось в стандартном сосуде с платиновыми электродами с помощью мостиковой схемы и генератора звуковой частоты ЗГ-10.

### Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 показаны зависимости электрической прочности водных растворов NaCl от времени воздействия напряжения в резко неоднородном поле при положительной и отрицательной полярности «стержня» соответственно. По вольтсекундным характеристикам, указанным на рис. 1 и 2, были построены зависимости пробивного напряжения раствора от его удельного сопротивления при временах воздействия напряжения:  $10^{-7}$  сек,  $2 \cdot 10^{-7}$  сек,  $5 \cdot 10^{-7}$  сек,  $10^{-6}$  сек. Указанные зависимости представлены на рис. 3. В исследуемом интервале удельных сопротивлений растворов NaCl ( $10 - 10^5$  ом см) для времен воздействия напряжения  $5 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-8}$  сек зависимости пробивного напряжения раствора от его удельного сопротивления для любого времени воздействия напряжения могут быть представлены в виде

$$U_{\text{пр}} = A_t + B_t \lg \rho, \quad (1)$$

где  $A_t$  и  $B_t$  — постоянные, определяемые крутизной подаваемого импульса напряжения;

$\rho$  — удельное сопротивление раствора, измеренное на низком напряжении.

Найдем зависимость пробивного напряжения электролита от концентрации диссоциированных молекул в нем.  
Согласно [7]

$$\rho = \frac{1}{e(g^{(+)} + g^{(-)})\alpha N_0}, \quad (2)$$

где  $e$  — величина заряда иона;

$g^{(+)}$  и  $g^{(-)}$  — подвижности положительных и отрицательных ионов;

$\alpha$  — коэффициент диссоциации, определяемый как отношение концентрации диссоциированных молекул к концентрации молекул растворенного вещества до его диссоциации  $N_0$

$$N = \alpha N_0. \quad (3)$$

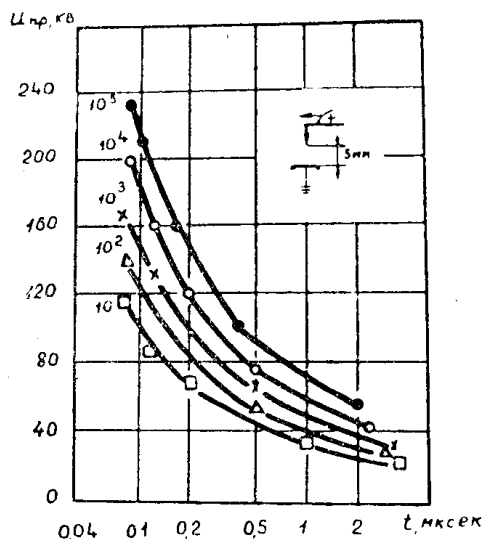


Рис. 1. Вольтсекундные характеристики водных растворов при вероятности пробоя  $\phi = 5\%$  и положительной полярности «стержня».

- —  $\rho = 10 \text{ Ом см};$
- △ —  $\rho = 10^2 \text{ Ом см};$
- × —  $\rho = 10^3 \text{ Ом см};$
- —  $\rho = 10^4 \text{ Ом см};$
- —  $\rho = 10^5 \text{ Ом см}.$

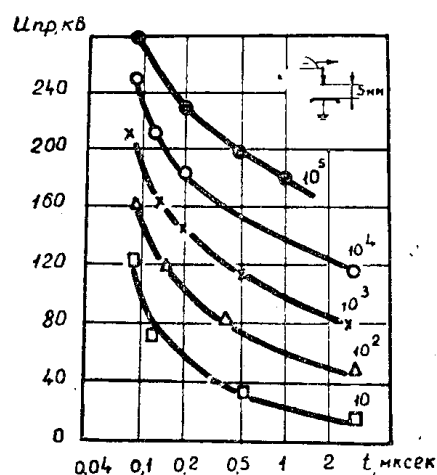


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но при отрицательной полярности «стержня».

Подвижность ионов не зависит от напряжения вплоть до полей порядка миллионов вольт на сантиметр [7].

В исследуемом диапазоне удельная электропроводность раствора линейно зависит от его концентрации и в первом приближении можно считать, что подвижность ионов не зависит от концентрации. Поэтому для исследуемых значений удельная проводимость

$$\rho = \frac{1}{\text{const} \cdot N}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1), имеем

$$U_{\text{пр}} = A_t^+ B_t \lg \frac{1}{\text{const} + N}. \quad (5)$$

В работе [6] исследовалась электрическая прочность водного раствора NaCl в зависимости от концентрации раствора  $N_0$  при временах до пробоя 9 мксек; 3,9 мксек и 0,1 мксек; межэлектродное расстояние составляло 2 мм. При  $t = 9 \text{ мксек}$  и  $t = 3 \text{ мксек}$  в диапазоне концентраций 0,001 — 0,1 % пробивное напряжение изменялось обратно пропорционально логарифму концентрации раствора. Учитывая, что при большом разведении сильного электролита  $\alpha \approx 1$  и  $N \approx N_0$ ,

полученные зависимости хорошо согласуются с (5). При  $t = 0,1$  мксек в диапазоне концентраций  $N_0 = 1 \div 10$  % было получено увеличение электрической прочности с ростом концентрации. Авторы объясняют это явление возможной сменой механизма разряда.

А. И. Лимасовым [5] были получены зависимости пробивного напряжения раствора NaCl в воде от его концентрации  $U_{пр} = f(N_0 \%)$  при  $t = 0,5 \cdot 10^{-6}$  сек и  $t = 2 \cdot 10^{-6}$  сек в поле „стержень—плоскость“.

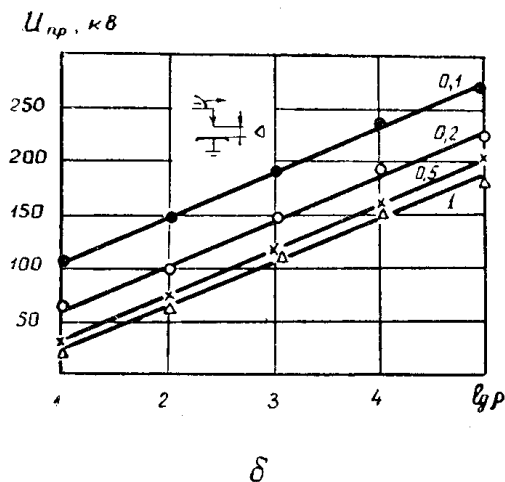
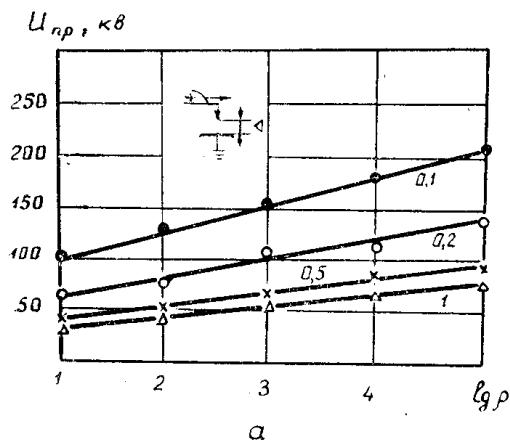


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения водного раствора NaCl от логарифма его удельного сопротивления для различных времен воздействия:

- —  $t = 0,1$  мксек;
- —  $t = 0,2$  мксек;
- × —  $t = 0,5$  мксек;
- △ —  $t = 1$  мксек;
- а — при положительной полярности „стержня“.
- б — при отрицательной полярности „стержня“.

до 10 мм носит логарифмический характер. В крепких растворах характер зависимости меняется. Для водного раствора NaCl точка перегиба соответствует

$$N_0 \approx 2\% (\rho = 40 \text{ ом см}).$$

В диапазоне концентраций  $0,03 \div 1\%$  эти зависимости достаточно удовлетворительно описываются равенством (5). При увеличении концентрации выше 2% электрическая прочность раствора оставалась постоянной. Из анализа данных, полученных в настоящей работе и приведенных в работах [5, 6], следует, что зависимость электрической прочности водного раствора при больших разведениях от его „низковольтного“ удельного сопротивления при длительностях воздействия напряжения  $10^{-7} \div 10^{-5}$  сек и расстоянии между электродами

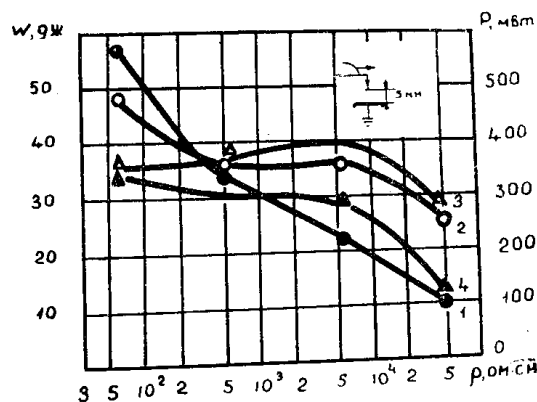


Рис. 4. Зависимость энергии  $W$ , рассеиваемой в промежутке, и максимальной мощности  $P$ , развиваемой в промежутке до пробоя, от удельного сопротивления водного раствора NaCl; крутизна подаваемого импульса 1000 кВ/мксек

- 1 —  $W = f(\rho)$  — при положительной полярности „стержня“;
- 2 —  $W = f(\rho)$  — при отрицательной полярности „стержня“;
- 3 —  $P = f(\rho)$  — при положительной полярности „стержня“;
- 4 —  $P = f(\rho)$  — при отрицательной полярности „стержня“.

Исследование токов, предшествующих пробоем, позволило оценить энергию, рассеиваемую в промежутке до пробоя,

$$W = \int_0^{t_{\text{пр}}} U i dt, \quad (6)$$

и максимальную мощность, развиваемую в промежутке перед пробоем,

$$P = U_{\text{пр}} i_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где  $U_{\text{пр}}$  — пробивное напряжение;

$i_{\text{пр}}$  — мгновенное значение тока перед пробоем.

На рис. 4 представлены зависимости рассеиваемой энергии и максимальной мощности, развиваемой в промежутке до пробоя, при крутизне импульса напряжения 1000 кВ/мксек. Пробой происходил при  $t_{\text{пр}} = (0,16 \div 0,28) \cdot 10^{-6}$  сек. Приведенные зависимости  $W = f(\rho)$  и  $P = f(\rho)$  получены на основании обработки 20 осциллограмм на точку. Как видно из рис. 4, для функции  $W = f(\rho)$  при различной полярности «стержня» имеются две характерные области. При  $\rho > 3 \cdot 10^2$  омсм значение энергии, выделяемой в промежутке до его пробоя, при отрицательной полярности «стержня» выше, чем при положительной. Это объясняется, во-первых, более высокой электрической прочностью промежутка при отрицательной полярности стержня и, следовательно, большим временем до пробоя; во-вторых, более высоким значением среднего предпробивного тока при отрицательной полярности «стержня» [10]. При  $\rho < 3 \cdot 10^2$  омсм значение энергии, выделяемой в промежутке до его пробоя, при отрицательной полярности «стержня» ниже, чем при положительной. Это явление хорошо согласуется с более низкой электрической прочностью раствора для отрицательного «стержня» при  $\rho < 10^2$  омсм.

Максимальное значение мощности, развиваемой в промежутке до его пробоя, при положительном «стержне» лежит ниже, чем при отрицательном, во всем интервале исследуемых удельных сопротивлений.

## Выводы

1. Установлено, что импульсная электрическая прочность водных разбавленных растворов электролитов определяется концентрацией диссоциированных молекул растворенного вещества. Зависимость импульсного пробивного напряжения разбавленного раствора от его удельного «низковольтного» сопротивления носит логарифмический характер.

2. Показано, что эффект полярности при импульсном пробое водного раствора в неоднородном поле ослабевает с увеличением электропроводности раствора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Мельников, Г. А. Остроумов, М. Ю. Стояк. ДАН СССР, 148, 5, 1963.
2. Н. П. Мельников, Г. А. Остроумов, М. Ю. Стояк. ЖТФ, XXXIV 4, 1962.
3. Н. П. Мельников, Г. А. Остроумов, Штейнберг. ДАН, 147, 4, 1962.
4. Torigata, Shinozaki, Phys. Rev., 1937, 51, 580.
5. А. И. Лимасов и др. Отчет по теме: «Исследование импульсной электрической прочности некоторых твердых диэлектриков и жидкостей». Сиб. НИИ энергетики. Томск — Новосибирск, 1963.

6. П. В. Пономарев, К. С. Пономарева и др. Отчет по теме 162 за 1956—1961 г.: «Разработка теоретических основ, методики и технологии бурения скважин с помощью электрогидравлического эффекта». ВИТР, Ленинград, 1962.

7. А. Н. Матвеев. Электродинамика и теория относительности. Высшая школа, 1964.

8. Н. А. Изгарышев, С. В. Горбачев. Курс теоретической электрохимии. Госхимиздат, 1951.

9. Под редакцией проф. А. А. Воробьева. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. Госэнергоиздат, 1960.

10. В. С. Комельков, ДАН СССР, 47, № 4, 1945.

---