

### Summary

At investigation in a square-law approximation on amplitude of capillary oscillations of a heavily charged drop is shown, that in a cause of interaction of various modes of capillary oscillations the losses of a stability by a drop having a charge smaller then critical, can be initiated by virtual excitation not only basic, but any of modes or linear combination of several arbitrary modes. The analysis of regularities of formation of a linear combination of several arbitrary modes. The analysis of regularities of formation of a spectrum of modes and losses of a stability by some their them, excited owing to interaction in the second order of smallness of several modes is carried spent, which perturbation is set in an initial instant.

В.В. Шамко, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов, И.С. Швец

## ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРЯДА В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ В ИСКРОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 540018, Украина*

Искровым приближением называют полуэмпирический подход к описанию состояния разрядной плазмы, в основу которого положена линейная зависимость между удельной внутренней энергией  $\omega$  и проводимостью  $\sigma$  плазмы [1–3]

$$\omega = A \sigma, \quad (1)$$

где  $A$  – искровая постоянная, зависящая от свойств среды, в которой осуществляется разряд. Если энергию выразить через давление  $P$  и эффективный показатель адиабаты  $\gamma$  плазмы [4], то окажется, что между  $P$  и  $\sigma$  также существует линейная зависимость

$$P = (\gamma - 1) A \sigma. \quad (2)$$

Впервые эти закономерности были установлены для разрядов в газах [1], а несколько позже – для подводных искровых разрядов [2] и электрического взрыва в жидких и твердых диэлектриках [3]. Как показал впоследствии анализ [5], выполненный для подводной искры, функциональная зависимость  $\sigma = \sigma(P)$  имеет более сложный вид и может быть представлена многочленом четвертой степени относительно  $P$ . Однако при характерном для разрядов в воде диапазоне давлений  $50 \leq P \leq 400$  МПа отклонение значений  $\sigma$ , вычисленных по линейной зависимости [2], от рассчитанных по более точному сплайн представлению [5] не превышает 23% (табл. 1). Величина этого отклонения характеризует меру погрешности искрового приближения.

Таблица 1. Сравнение расчета по линейной (2) и нелинейной [5] зависимостям

$10^{-8}P$ , Па		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00
$10^{-3} \sigma$ , См/м	ф-ла (2)	7,69	11,5	15,4	19,2	23,1	30,8	38,5	46,2	61,5
	[5]	9,32	14,6	19,9	25,0	29,6	37,4	42,9	46,8	57,6

По аналогии с [1,2] для искровой постоянной водонефтяных эмульсий может быть записана следующая формула

$$A = \left( \frac{3}{2}nkT + \sum_i w_{0i}n_{0i} + \sum_j w_{1j}n_{ej} \right) / (e\mu_e n_e). \quad (3)$$

Здесь  $w_{0i}$  – энергия диссоциации, одной молекулы  $i$ -го сорта;  $w_{1j}$  – энергия ионизации атомов  $j$ -го сорта;  $n_{ej}$  – концентрация электронов вследствие ионизации атомов  $j$ -го сорта;  $n$ ,  $n_e$  – общая концентрация частиц и электронов соответственно,  $\mu_e$ ,  $e$  – подвижность и заряд электрона. Однако уже для разрядов в воде оценка искровой постоянной по формуле типа (3) давала только порядок ее величины, вычисляемой по экспериментальным данным [2]. Для эмульсий погрешность такого расчета будет еще больше из-за существенного усложнения структуры жидкости. Поэтому для реальных сред, не относящихся к классу простых жидкостей, целесообразно рассматривать  $A$  как подгоночный параметр и выполнять его расчет, исходя (как и ранее для подводной искры [2]), из уравнения баланса энергии в разрядном канале:

$$A_k = \left[ \int_0^{t_k} i^2 R dt - 2(\gamma - 1)l^2 \sum_{j=1}^{k-1} A_j \int_0^{t_j} \dot{a}(aR)^{-1} dt \right] \times \\ \times \left[ l^2 R^{-1}(t_k) + 2(\gamma - 1)l^2 \int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{a}(aR)^{-1} dt \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $i$  – разрядный ток;  $R$  – активное сопротивление плазменного канала;  $l$  – длина разрядного промежутка;  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты разрядной плазмы;  $a$  и  $\dot{a}$  – радиус и скорость расширения канала разряда.

Таким образом, для расчета искровой постоянной по рекуррентной формуле (4) следует наряду с током и сопротивлением иметь информацию о законе расширения разрядного канала. Водонефтяные эмульсии, в которых осуществляется разряд при обработке скважин [6], являются непрозрачными жидкостями и поэтому для них не удастся определить параметр  $A$  по соотношению (4) из-за невозможности регистрации радиуса канала. Для решения поставленной задачи воспользуемся тогда уже оправдавшей себя в ряде случаев [1–3] для сред, плазма которых подчиняется закономерностям (1), (2) приближенной нелинейной зависимости активного сопротивления от разрядного тока

$$R^2 = Al^2 / 2 \int_0^t i^2 dt. \quad (5)$$

Эта зависимость более точно выполняется для сред, у которых работа расширения плазменного канала является пренебрежимо малой по сравнению с введенной в него электрической энергией. Следовательно, в соответствии с уравнением (4), по мере увеличения доли работы (за которую ответственны вторые члены в квадратных скобках 4) определенное по приближенной зависимости (5) значение искровой характеристики будет завышенным. То есть, вычисленное по (5) значение  $A$  должно быть скорректировано. Величина корректировочного коэффициента  $k_A$  находилась для близкой к водонефтяной эмульсии по плотности среды, в качестве которой использовалась дистиллированная вода. В последней осуществлялся электрический разряд с синхронной регистрацией разрядного тока, напряжения на разрядном промежутке  $U$  и радиуса плазменного канала. Для стабилизации пробоя и геометрии плазменного канала осуществлялось инициирование разряда микропроводником ( $\varnothing = 3$  мкм). Вычисляя искровую характеристику по формуле (4) и получаемой из (5) рекуррентной формуле

$$A_k = \frac{2R_k^2}{l^2} \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (6)$$

находим величину усредненного корректировочного коэффициента, на который необходимо будет разделить определенное по формуле (6) усредненное значение искровой постоянной. Соответствующие экспериментальные и расчетные данные для колебательного ( $l=0,02$  м) и околокритического ( $l=0,12$  м) разрядов приведены в табл. 2.

Средние квадратичные значения искровой постоянной для каждого из режимов составляют  $A_{(4)}^I = 0,27$ ;  $A_{(6)}^I = 0,38$ ; и  $A_{(4)}^{II} = 0,25$ ;  $A_{(6)}^{II} = 0,35$  соответственно, а их отношение  $k_A = A_{(6)}^I / A_{(4)}^I \approx 1,40$ . Величина  $k_A$  несколько больше для колебательных режимов разряда ( $j=I$ ) и меньше для околокритических ( $j=II$ ). Поскольку доля работы расширения разрядного канала от введенной в него электрической энергии определяется главным образом плотностью среды, в которой осуществляется разряд [1-4], то полученное значение коэффициента  $k_A$  может быть сохранено для любых жидкостей с мало отличающимися от воды плотностями.

И тогда по экспериментально регистрируемому току и напряжению разряда в водонефтяных эмульсиях искровая характеристика с учетом соотношения (6), корректировки и замены  $R = U / i$  может быть вычислена по уточненной формуле

$$A_k \approx \frac{1,43}{l^2} \frac{U_k^2}{i_k^2} \int_0^{t_k} i^2 dt. \quad (7)$$

Таблица 2. Результаты расчета искровой характеристики

$U_0=44$ кВ, $C=3,2$ мкФ, $L=1,9$ мкГн, $l=0,02$ м: режим I					$U_0=40$ кВ, $C=3,2$ мкФ, $L=2,2$ мкГн, $l=0,12$ м: режим II				
$t$ , мкс	$i$ , кА	$U$ , кВ	$A_k, 10^5$ $B^2c/m^2$		$t$ , мкс	$i$ , кА	$U$ , кВ	$A_k, 10^5$ $B^2c/m^2$	
			ф-ла(4)	ф-ла(6)				ф-ла(4)	ф-ла(6)
0,50	11,3	5,90	0,18	0,43	0,61	0,92	35,6	0,23	0,54
0,99	22,7	4,54	0,25	0,38	1,22	2,68	31,7	0,32	0,53
1,49	32,8	3,74	0,30	0,38	1,83	5,58	27,2	0,34	0,48
1,98	40,4	3,02	0,27	0,35	2,44	9,55	23,3	0,32	0,43
2,48	46,2	2,66	0,27	0,35	3,05	14,2	19,9	0,31	0,38
2,98	50,0	2,35	0,28	0,37	3,66	18,6	17,1	0,30	0,36
3,48	51,2	2,09	0,28	0,38	4,27	22,5	14,8	0,29	0,34
3,98	50,8	1,87	0,28	0,40	4,88	25,5	12,7	0,28	0,32
4,46	48,3	1,58	0,28	0,38	5,49	27,2	10,9	0,26	0,30
4,96	43,7	1,40	0,29	0,42	6,10	27,5	9,5	0,26	0,30
5,46	38,7	1,15	0,28	0,40	6,71	26,8	8,2	0,26	0,29
5,96	31,4	0,94	0,29	0,43	7,32	25,1	6,8	0,24	0,27
6,46	23,5	0,65	0,27	0,38	7,93	22,4	5,6	0,23	0,26
6,96	14,7	0,43	0,29	0,44	8,54	18,4	4,6	0,23	0,28
					10,97	5,05	1,4	0,23	0,35

Результаты соответствующего расчета по (7) для водонефтяной эмульсии на основе нефти плотностью  $\rho_n=937$  кг/м<sup>3</sup> (Павловское месторождение Пермской области) обводненностью  $\phi=0,32-0,48$  и соленой воды различной начальной электропроводности  $\sigma_0$  представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения искровой постоянной для водонефтяных эмульсий различной обводненности и воды различной электропроводности

$\phi$	0,32	0,40	0,48	1,0	1,0
$\sigma_0$ , См/м	0,83	0,83	0,83	0,07	0,28
$A$ , $10^5 B^2c/m^2$	2,6	2,9	3,2	2,8	3,4

Осуществлялся режим разряда с напряжением  $U_0=30$  кВ, емкостью конденсаторной батареи  $C=2,3$  мкФ, индуктивностью контура  $L=4,9$  мкГн и длиной разрядного промежутка  $l=0,032$  м. Легко видеть, что зависимость искровой постоянной данной водонефтяной эмульсии от обводненности является линейной

$$10^5 A = 1,40 + 3,75 \varphi. \quad (8)$$

В формуле (8) размерность величины  $A$  берется в системе СИ, а  $\varphi$ , как и в табл. 3, в абсолютных единицах. Полагая, что искровая постоянная эмульсии  $A_3$  обладает свойством аддитивности относительно основных ее составляющих

$$A_3 = (1 - \varphi)A_1 + \varphi A_2, \quad (9)$$

на основе данных табл. 3 получаем оценку значений искровой постоянной нефти  $A_1=1,4 \cdot 10^5$  В<sup>2</sup>с/м<sup>2</sup> и пластовой воды ( $\sigma_0=0,83$  См/м)  $A_2=5,2 \cdot 10^5$  В<sup>2</sup>с/м<sup>2</sup>. В результате искровая постоянная нефти оказалась большей соответствующего значения  $A$  для дистиллированной воды, которое при иницировании разрядов высоким напряжением составляет  $10^5$  В<sup>2</sup>с/м<sup>2</sup> [2].

Неожиданным результатом явилось увеличение более чем в три раза искровой постоянной для соленой воды по сравнению с дистиллированной. Ранее [2] априори считалось, что для воды с  $\sigma_0 \leq 0,2$  См/м величина  $A$  не изменяется. Результаты же настоящих исследований свидетельствуют о зависимости  $A$  от проводимости среды. Пока остается открытым вопрос о пороговом значении  $\sigma_0$ , начиная с которого эта зависимость проявляется. Такое резкое изменение  $A$  для подсолненной воды в соответствии с зависимостью (3) обусловлено меньшими значениями подвижности электронов в плазме, где присутствуют атомы и ионы щелочных металлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мик Дж.М., Крэгс Дж.Д. Электрический пробой в газах. М., 1960.
2. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
3. Семкин Б.В. Электрический взрыв в конденсированных средах. Томск, 1979.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.
5. Ершов А.П., Куперитох А.Л. Исследование канальной стадии подводного электрического разряда. // Нестационарные проблемы гидродинамики. В. 48. Новосибирск, 1980. С. 54–60.
6. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Ткаченко А.К., Трофимова Л.П. Пути стабилизации параметров разрядов и снижение предпробивных потерь в скважинных электроразрядных устройствах // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах. Тез. докл. VIII научн. школы. Николаев, 1997. С. 27.

Поступила 10.07.2000

#### Summary

A spark approach is used for description of the discharge dynamics in water and oil emulsions. The approximate method for calculation of the spark constant which is the factor between plasma internal energy and conductivity is grounded on the base of the experimentally registered electric discharge volt-ampere characteristics in the emulsions. The influence the degree of oil saturation with water and the initial specific conductivity of water in the stratum upon the spark constant is shown. The results obtained will be useful for numerical simulation of the transient electric and hydrodynamic processes of the phenomenon under investigation.