

Б. БРОДСКАЯ, Г. ТРАПИДО

РАЗВИТИЕ СКОЛЬЗЯЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ВОЗДУХ — ЭЛЕКТРОЛИТ. 1.

Поверхностный, или скользящий, разряд представляет собой специфический вид электрического высоковольтного разряда, развивающегося вдоль поверхности раздела двух фаз. В литературе описан поверхностный разряд на границе раздела воздух — твердый диэлектрик [1], вода — твердый диэлектрик [2, 3], воздух — электролит [4] и воздух — жидкий диэлектрик [5]. При этом подчеркнуто, что разряд происходит именно на границе раздела двух сред, а не в любой из них [2] и имеет отличный по сравнению с разрядом в каждой среде характер. Отмечена зависимость разрядного напряжения от рода тока, полярности и ряда других факторов [2]. Для системы техническая вода — твердый диэлектрик значения разрядных напряжений слабо зависят от удельной проводимости диэлектрика [3]. Условия развития скользящего разряда лучше при положительной полярности приложенного напряжения [3, 4]. Лишь в работе И. Е. Балыгина [5] получены обратные результаты, но они относятся к неполярной жидкости. Данные по импульсному высоковольтному скользящему разряду на поверхности электролита определены лишь Ф. Д. А. Бойлеттом и Дж. Г. Маклином [4], исследовавшими импульсные разряды длительностью 0,5—10 мсек и напряжением до 10 кВ обеих полярностей на поверхности раствора поваренной соли одной электропроводности ($\gamma = 2,5 \cdot 10^{-2}$ см/м).

В настоящей работе попытаемся экспериментально изучить физическую картину развития электрического высоковольтного импульсного разряда микросекундной длительности на границе раздела двух фаз воздух — электролит при изменении электропроводности жидкости, полярности и величины приложенного напряжения, межэлектродного расстояния и энергии, а также оценим возможность получения более широкой сети ионизированных ветвей на поверхности электролита.

Методика эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Развитие скользящего разряда исследовалось в вертикальном цилиндрическом реакторе из нержавеющей стали (7), конструкция которого позволяла варьировать его диаметр от 100 до 300 мм и исключала возможность развития разрядов в толще слоя электролита. Потенциальный электрод вводился в реактор через отверстие в плексиглазовой крышке. Корпус реактора был заземлен. Импульсы высокого напряжения микросекундной длительности создавались путем разряда батареи конденсаторов емкостью C от 0,1 до 3,0 мкФ, которая заряжалась от

высоковольтной установки (1) напряжением до 50 кВ обеих полярностей. Сигналы тока и напряжения, снятые соответственно с безындукционного коаксиального шунта (6) и емкостного делителя напряжения (5), фиксировались двухлучевым осциллографом ОК-17М (3). Масштаб времени и амплитуды тока калибровались с помощью генераторов стандартных сигналов ГЗ-7А и RFT-2016 (4). Съемки скользящего разряда производились через прозрачную крышку реактора сверхскоростной фоторегистрирующей установкой СФР-2М, а интегральные

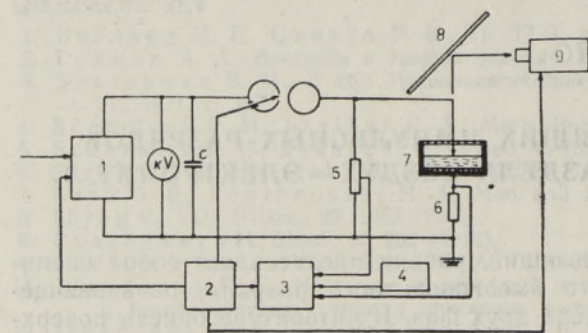


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 — источник высокого напряжения обеих полярностей, 2 — блок управления и синхронизации, 3 — электронный осциллограф, 4 — генератор стандартных сигналов, 5 — делитель напряжения, 6 — шунт, 7 — реактор, 8 — зеркало, 9 — сверхскоростная фоторегистрирующая установка.

съемки — фотоаппаратом «Зенит-3М» с объективом Гелиос-44 и промежуточными кольцами при дистанционном спуске. При сверхскоростных съемках применялось промежуточное зеркало (8), позволяющее поворачивать изображение из горизонтальной плоскости в вертикальную, не искажая при этом его размеров. Синхронизация поджига разрядного промежутка с запуском осциллографа и сверхскоростной фотокамеры осуществлялась специальным блоком (2).

Для оценки влияния конфигурации контактной поверхности потенциального электрода на развитие многоканальных плазменных ветвей было испытано несколько конструкций электродов: точечный, типа «ёрш» с различным количеством контактных острий, а также дисковый того же диаметра. Как показали исследования, решающую роль для развития многоканального разряда играет малая контактная поверхность электрода, обуславливающая высокую напряженность поля у потенциального электрода. Лучшие результаты были достигнуты с точечным электродом, хотя с его погружением в электролит условия развития разряда ухудшались. Электрод типа «ёрш» позволяет получать большое число ионизированных ветвей с каждого из потенциальных острий, однако не все из них заканчиваются перекрытием поверхности электролита вследствие недостаточной напряженности поля. Применение дискового электрода в тех же условиях дает лишь экспоненциальное стекание заряда. Исходя из изложенного выше, дальнейшие исследования проводились с точечным электродом из нержавеющей стали. В качестве электролита применялся 0,1—5%-ный водный раствор хлористого аммония (NH_4Cl) (электропроводность от 0,2 до 80 сим/м). Данные, приведенные в работе, получены в результате обработки не менее 5—10 осциллограмм и СФР-грамм разряда.

Результаты исследования

На рис. 2 представлены характеристики перекрытия скользящего разряда вдоль поверхности раствора NH_4Cl ($\gamma = 0,5 \text{ сим/м}$, $C = 3 \text{ мкф}$). Для сравнения даны пробивные характеристики соприкасающихся сред

в отдельности. Как видно, прирост значения минимального напряжения перекрытия при скользящем разряде (1,9 кв на см в линейной части) значительно ниже прироста минимального пробивного напряжения при разряде как в воздухе (7 кв на см), так и в электролите (8 кв на см) (при отрицательной полярности соответственно 2,1; 11 и 20 кв на см). Следовательно, при положительной полярности напряжения перекрытия ниже, чем при отрицательной. С увеличением расстояния влияние полярности сказывается меньше и рост напряжения уменьшается. Это указывает на потенциальную возможность осуществления перекрытия промежутков большей протяженности при относительно невысоких значениях напряжения.

Рис. 2. Характеристика перекрытия скользящего разряда на границе раздела фаз воздух—электролит и в каждой из фаз в отдельности: 1 — скользящий разряд отрицательной полярности, 2 — он же положительной полярности; 3 — разряд в воздухе отрицательной полярности, 4 — он же положительной полярности; 5 — разряд в растворе отрицательной полярности, 6 — он же положительной полярности.

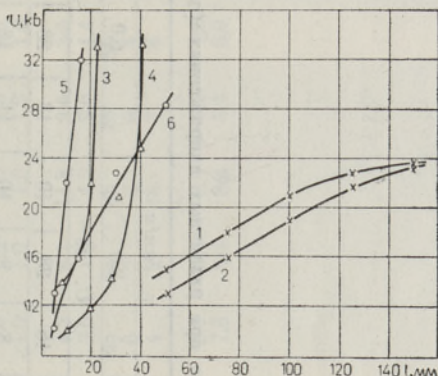


Таблица 1

Зависимость характера скользящего разряда от приложенного напряжения и разрядной емкости (раствор NH_4Cl , $\gamma = 0,5$ см/м, $r = 90$ мм)

Показатели	$C = 0,6$ мкф					$C = 1,2$ мкф			
	$U, \text{ кв}$								
	15	20	25	30	35	15	20	25	30
Время разряда, мксек	200	200	200	100	45	200	200	85	75
Предпробивной период, мксек	200	200	200	100	32	200	200	72	57
Число периодов	—	—	—	—	1	—	—	1	1
Максимальный ток, ка	0,04	0,07	0,09	0,17	3,2	0,05	0,15	4,6	4,8
Падение напряжения в предпробивной период, кв	15	20	25	30	12	15	20	8	11
Энергия, выделявшаяся в предпробивной период, %	100	100	100	100	40	100	100	40	30
Число ветвей	1—2	1—2	2—3	5—6	6—7	2—3	3—4	4—5	4—5
Из них закончилось пробоем	—	—	—	—	1	—	—	1	1
Длина ветвей, мм	5—10	5—10	20—50	40—70	40—90	20—30	20—30	70—90	70—90

В табл. 1 приведены зависимости характеристик скользящего разряда от приложенного напряжения и разрядной емкости. С увеличением напряжения наблюдается рост максимального тока, причем он достигает наибольших значений при большей разрядной емкости. Это происходит за счет увеличения количества и длины ионизированных ветвей. При большей разрядной емкости перекрытие промежутка осуществляется при более низком напряжении. Предпробивной период и время

Таблица 2
Зависимость характера скользящего разряда от электропроводности электролита при различных напряжениях (положительная полярность)

Показатели	γ, см/м														
	0,24			1,0			6,0			8,0					
	18	28	40	18	28	40	18	28	40	18	28	40			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее число ветвей	1,0	2,3	2,6	1,6	3,5	4,0	2,5	3,5	3,5	2,5	6,0	6,5	5,0	5,5	7,0
Из них закончилось пробоем	1,0	2,3	2,6	1,6	2,0	3,5	1,5	2,0	2,5	1,0	2,5	2,5	0,5	2,5	2,5
Средняя скорость развития канала, 10 ⁴ м/сек	33	33	33	11,8	16,0	22,0	5,2	13,0	13,0	4,0	4,0	4,0	3,2	4,0	4,0
Время развития канала, мксек	0,4	0,4	0,4	1,2	0,8	0,6	2,5	1,0	1,0	3,2	3,2	3,2	4,0	3,2	3,2
Длительность свечения разряда, мксек	75	75	65	65	65	65	65	65	65	75	55	35	40	35	25
Предпробивной период, мксек	5	1	1	3	1	1	4	1	1	4	3	1	30	3	2
Падение напряжения в предпробивной период, кв	1	—	—	2	1	—	2	1	—	3	5	—	12	8	6
Предпробивной ток, ка	—	—	—	1,8	1,0	—	2,0	1,8	—	3,6	4,2	—	3,6	4,2	4,8
Максимальный ток, ка	9,0	10,8	10,8	9,0	9,6	10,8	9,0	9,6	10,8	7,8	7,8	7,8	4,2	7,8	7,8

Таблица 3
Зависимость характера скользящего разряда от электропроводности электролита при различных напряжениях (отрицательная полярность)

Показатели	γ, см/м														
	0,24				1,0				6,0				8,0		
	18	28	40	18	28	40	18	28	40	18	28	40	18	28	40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее число ветвей	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,5	3,6	1,5	1,5	2,5	1,5	4,0	5,5	4,5	5,0
Из них закончилось пробоем	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0	0,5
Средняя скорость развития канала, 10 ⁴ м/сек	33	33	33	6,5	11,8	16,0	4,3	8,1	11,8	2,6	3,0	3,2	3,2	1,5	2,0
Время развития канала, мксек	0,4	0,4	0,4	2,0	1,2	0,8	3,0	1,6	1,2	5,0	4,4	4,0	4,0	—	6,5
Длительность свечения разряда, мксек	65	65	57	65	65	65	65	65	65	75	55	35	22	20	12
Предпробивной период, мксек	8	3	1	6	2	1	6	2	2	6	4	1	1	15	8
Падение напряжения в предпробивной период, кв	1	1	—	2,2	3	—	4	12	18	7	8	—	—	18	20
Предпробивной ток, ка	—	0,6	—	3	1,8	—	—	2,6	2,4	3,0	4,2	4,8	—	3,6	4,8
Максимальный ток, ка	9,0	9,8	9,6	7,6	9,0	8,4	8,4	7,8	8,4	8,8	5,4	6,0	6,6	3,6	6,0

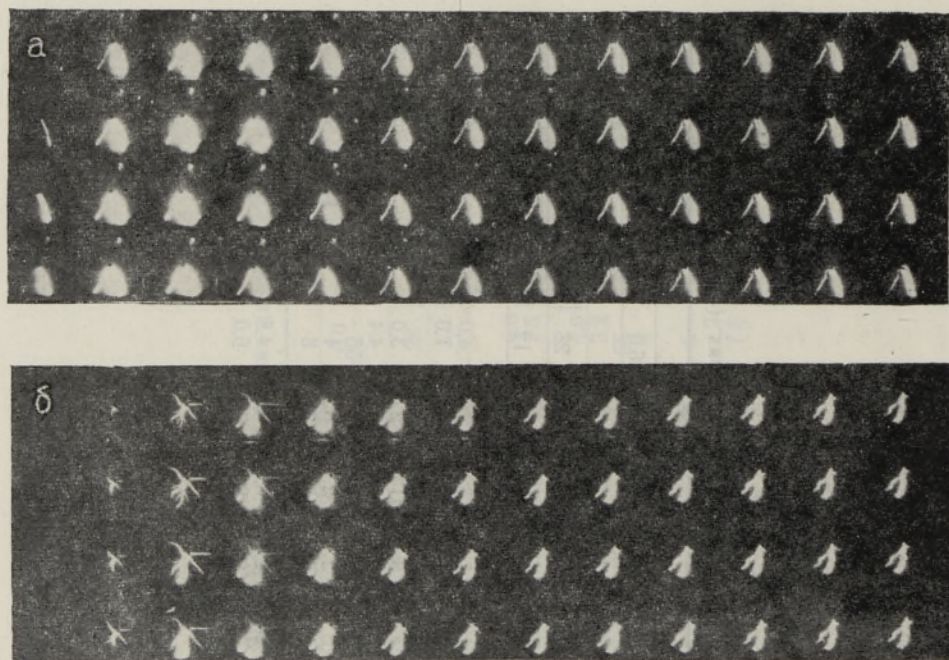


Рис. 3. СФР-граммы развития скользящего разряда на поверхности раствора NH_4Cl ($U = 28$ кв, $C = 1,2$ мкф, $r_{\text{реакт.}} = 130$ мм, $V = 2,5$ млн. кадров/сек): а — раствор 0,1%-ной концентрации ($\gamma = 0,24$ сим/м); б — раствор 3%-ной концентрации ($\gamma = 6,0$ сим/м).

разряда уменьшаются при увеличении как напряжения, так и разрядной емкости. В области перекрытия с ростом перенапряжения увеличение максимального тока замедляется в основном вследствие увеличения сечения плазменных каналов.

Основные показатели, характеризующие физическую картину развития процесса при различных значениях проводимости электролита, напряжения и полярности, приведены в табл. 2 и 3. Эти данные относятся к энергии единичного импульса около 500 дж и радиусу реактора 130 мм. Для других значений энергии и радиуса получены аналогичные закономерности. В качестве величин разрядных напряжений скользящего разряда принимались начальные значения импульса напряжения, поданного на электрод после пробоя формирующего промежутка. Перекрытие (пробой) завершалось, как правило, при напряжениях, значения которых снижались за время развития разряда в зависимости от напряжения, полярности и проводимости среды. Поэтому в таблицах приводится падение напряжения в период развития разряда. За число ионизированных ветвей взято среднее значение 5—10 опытов, поэтому эти данные выражены в дробных числах.

При определенных параметрах разряд может проходить как в режиме перекрытия, так и в режиме стекания. Данные, приведенные в табл. 2 (графа 14) и в табл. 3 (графы 15, 16), относятся к режиму перекрытия.

С ростом электропроводности увеличивается число ионизированных ветвей, из которых не все заканчиваются пробоем, уменьшается скорость развития канала (от $3,3 \cdot 10^5$ до $1,5 \cdot 10^4$ м/сек), возрастает предпробивной ток. Во всех случаях наблюдается преимущественное развитие

разряда при положительной полярности. Отмечается более густая сеть ионизированных ветвей, большее число ветвей заканчивается пробоем, выше ток пробоя и скорость развития каналов. С ростом проводимости электролита это различие усугубляется.

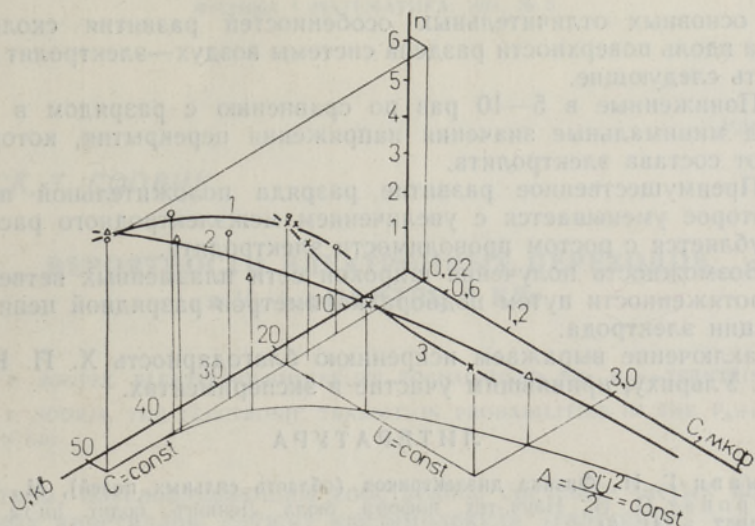


Рис. 4. Зависимость количества каналов скользящего разряда от приложенного напряжения и разрядной емкости ($r_{\text{реакт.}} = 50$ м, $\gamma = 0,24$ см/м): 1 — $C = 0,22$ мкФ, 2 — $A = 275$ Дж, 3 — $U = 22$ кв.

Следует отметить, что скорость развития отдельных каналов неодинакова. При малой электропроводности после замыкания одного канала, другие продолжают расти и тоже достигают противоположного электрода (рис. 3, а). При большей электропроводности при замыкании одного или нескольких каналов другие начинают угасать (в течение 6—8 мксек), после чего происходит перераспределение тока и увеличение яркости замкнутых каналов (рис. 3, б). Скорость прорастания отдельных ветвей также неравномерна. Так, например, скорость прорастания одной ветви по отрезкам времени $0,4$ мксек была следующей: $(4,3; 4,3; 4,3; 3,6; 3,6; 2,9; 3,6; 5,7) \cdot 10^4$ м/сек ($U = 28$ кв, $C = 1,2$ мкФ, средняя скорость $4,0 \cdot 10^4$ м/сек). Такую неравномерность можно объяснить неоднородностью состава электролита, наличием на его поверхности микровключений, искажающих распределение напряженности поля.

На рис. 4 представлены зависимости среднего количества ионизированных ветвей (каналов), достигших катода, от приложенного напряжения и разрядной емкости при постоянных значениях емкости (кривая 1), энергии импульса (кривая 2) и напряжения (кривая 3). Как видно, количество каналов растет с увеличением напряжения и достигает шести при напряжении 50 кв. С увеличением разрядной емкости количество каналов падает, но при этом наблюдается большое число ионизированных ветвей, не достигших катода. При постоянной энергии импульса количество каналов также пропорционально приложенному напряжению.

В дальнейших исследованиях намечается расширить пределы отдельных параметров (напряжения, емкости, межэлектродного расстоя-

ния, электропроводности и химического состава электролита) с изучением развития скользящего разряда как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Выводы

Из основных отличительных особенностей развития скользящего разряда вдоль поверхности раздела системы воздух—электролит следует отметить следующие.

1. Пониженные в 5—10 раз по сравнению с разрядом в каждой из сред минимальные значения напряжения перекрытия, которые зависят от состава электролита.

2. Преимущественное развитие разряда положительной полярности, которое уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния и усугубляется с ростом проводимости электролита.

3. Возможность получения широкой сети плазменных ветвей большой протяженности путем подбора параметров разрядной цепи и конфигурации электрода.

В заключение выражаем искреннюю благодарность Х. Й. Калдасу и П. А. Ульриху, принявшим участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сканави Г. И., Физика диэлектриков (область сильных полей), М., 1958.
2. Шкуропат, П. И., Науч.-тех. информ. бюлл. Ленингр. политех. ин-та, вып. 1, 1957, с. 41—51.
3. Дашук П. Н., Емельянов А. С., Иванова Т. А., Изв. ВУЗов, Физика, 1968, № 2, с. 111—117.
4. Boylett F. D. A., Maclean J. G., Proc. R. Soc. London, A 324, 469 (1971).
5. Балыгин И. Е., Электричество, № 7 (1956).

Институт химии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
28/1 1974

B. BRODSKAJA, G. TRAPIDO

IMPULSSPINDLAHENDUSTE ARENEMINE ÕHU JA ELEKTROLÜÜDI PUUTEPINNAL. I

Käsitletakse kõrgepingel impulsslahenduste arenemist mööda õhu ja elektrolüüdi puute-pinda ning võimalust saavutada elektrolüüdi pinnal võimalikult laiem ioniseeritud harude võrk. On toodud eksperimentaalandmed pindlahenduste karakteristikute sõltuvuse kohta elektrolüüdi juhtivusest, pinge suurusest ja polaarsusest, mahtuvusest ning elektroodidevahelisest kaugusest.

B. BRODSKAYA, G. TRAPIDO

THE PROPAGATION OF HIGH VOLTAGE PULSE DISCHARGES ACROSS THE AIR-ELECTROLYTE CONTACT SURFACE. I

The paper deals with the propagation of high voltage pulse discharges across the air-electrolyte contact surface and ways of obtaining a wide network of ionized branches on the electrolyte surface. The experimental of the dependence of surface discharges upon electrolyte conductivity, range and polarity of voltage, capacity and distance between electrodes are given.