

В. С. КОМЕЛЬКОВ

**МЕХАНИЗМ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ ЖИДКОСТЕЙ**

(Представлено академиком К. И. Шенфером 16 XI 1944)

В данной работе описаны результаты исследования механизма пробоя двух жидкостей, резко различающихся структурой молекул: трансформаторного масла и воды. Первая обладает слабо выраженными полярными свойствами; вторая — типично полярная жидкость. Употреблялось: технически чистое трансформаторное масло и дистиллированная вода с остаточной удельной проводимостью  $10^{-5}$  ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>.

Аппаратура и методика эксперимента описаны автором ранее (1) применительно к исследованию разряда в воздухе при нормальных условиях.

В отличие от прежней схемы кабель был заменен экранированной воздушной линией длиной 2 м, соединяющей катодный осциллограф с сопротивлением  $R_{из}$ , включенным в цепь заземленного электрода.

Жидкость содержалась в стеклянном сосуде, имеющем форму прямоугольной призмы, размером 20 × 25 × 45 см. Через бакелитовую крышку сосуда проходил фарфоровый изолятор, внутри которого помещался медный стержень, служивший высоковольтным вводом. Нижний, заостренный конец стержня погружался в жидкость и представлял собой игольчатый электрод. Заземляемый электрод, выполненный также из меди, проходил сквозь отверстие в дне сосуда.

Разряды протекали в двух типах межэлектродных промежутков: игла — игла и игла — плоскость. Максимум напряжения импульсов положительной и отрицательной полярности достигал 500 кв. Эксперименты производились при минимальном импульсном напряжении.

Как известно, включение в цепь разряда сопротивления ( $R_T$ ), тормозящего развитие искры, позволило И. С. Стекольникову и А. П. Белякову впервые замедлить искру в воздухе и измерить скорости процессов ионизации оптическим путем (2).

Вводя сопротивления  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  ом, нам удалось и в жидкостях эффективно затормозить разряд и получать на движущейся фото пленке и осциллограммах записи, позволяющие установить механизм развития пробоя. Обнаружены три основных стадии пробоя длинных промежутков в условиях неоднородного поля.

1. Стадия предварительного пробоя, в которой процесс ионизации девственной среды, протекая с конечной скоростью от электрода к электроду, смыкает последние проводящей нитью. По аналогии с разрядом в газах она может быть названа лидерной стадией.

2. Стадия яркой вспышки, начинающаяся после завершения лидерной стадии, от которой она отличается во много крат большей яркостью свечения канала искры и весьма малой продолжительностью.

3. Стадия дугового разряда. Лидерный разряд начинается с электрода наибольшей кривизны. При электродах острие — острие образуются два лидера, движущиеся навстречу друг другу.

Лидер в масле обладает характерным зеленовато-желтым свечением, обычно столь слабым, что запись его на пленке представляет большие трудности. Лидер в воде, наоборот, отличается богатством излучения (значительно более интенсивное свечение, чем при разряде в воздухе), имеющего голубовато-фиолетовый цвет. Различие в интенсивностях видимого свечения объясняется различными поглощающими способностями жидкостей и структурой их молекул.

Заметное свечение наблюдается только у головки лидера; ранее пройденная им траектория светится значительно слабее.

В начальной фазе скорость лидера максимальна. По мере продвижения в глубь промежутка лидер замедляется и, наконец, в некоторых случаях останавливается. Через некоторый промежуток времени после остановки (отрицательный лидер) или при совершающемся еще движении (положительный и отрицательный лидер) возникает пробой канала лидера, сопровождающийся интенсивным свечением всей пройденной разрядом траектории. Затем движение возобновляется с максимумом скорости, снова замедляется и т. д.

Таким образом, развитие ионизационного процесса, протекая с переменной скоростью, сочетает в себе непрерывное движение с толчкообразным.

Разветвления разряда всегда направлены в сторону движения лидера. Каждому толчку-ступени лидера соответствует импульс тока с максимумом при пробое канала и минимумом при наибольшем замедлении движения лидера или его остановке.

На рис. 1 и рис. 3 даны фотографии и осциллограммы одних и тех же разрядов, протекающих в масле и воде. Рис. 1 дает возможность увидеть лишь последнюю ступень лидера  $n$ , которой на осциллограмме соответствует импульс тока  $n$ . Предыдущие ступени, о наличии и числе которых можно судить по осциллограмме, на фотографии не обнаруживаются, так как интенсивность их свечения была слишком мала.

Интервалы времени между отдельными ступенями лидера в масле больше, количество же ступеней меньше, чем в воде. Ход осциллограммы токов при разряде в воде осложняется присутствием составляющей тока, определяемой остаточной проводимостью жидкости. Начальная величина этой составляющей может быть определена непосредственно из осциллограммы.

В таблице приводятся основные характеристики разрядов.

Жидкость	Сопротивление торможения в омах	Характер электродов	Максимальный ток лидера, А		Средний ток лидера, А		Ток дуги, А		Расстояние между электродами в см		Длительность лидерной стадии в микросекундах		Средняя скорость лидера в см/сек.	
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Трансформаторное масло	$10^5$	острие — плоскость	1,0	1,1	0,3	0,35	1,4	2,0	18,5	15,5	100	21	$1,4 \cdot 10^5$	$5,7 \cdot 10^5$
	$10^6$	острие — плоскость	0,42	0,4	0,1	0,1	0,11	0,11	16,5	14	90	175	$1,4 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^4$
Дистиллированная вода	$10^4$	острие — острие	—	—	—	—	—	—	20	—	9,1	—	$1,64 \cdot 10^6$	—
	$10^5$	острие — острие	—	—	—	—	—	—	—	—	9,5	—	$1,67 \cdot 10^6$	—

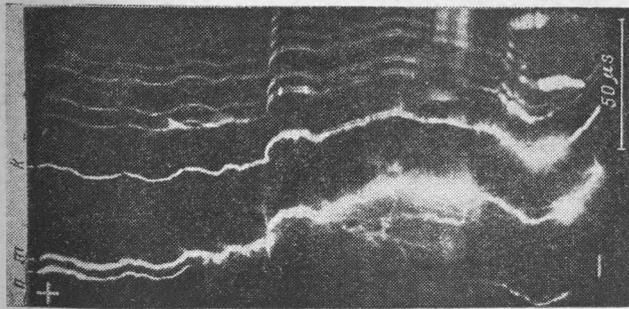


Рис. 1. Фотография разряда в масле при торможении  $10^8$  ом. Электроды острие — острие. Расстояние между электродами 12 см; внизу — осциллограмма того же разряда

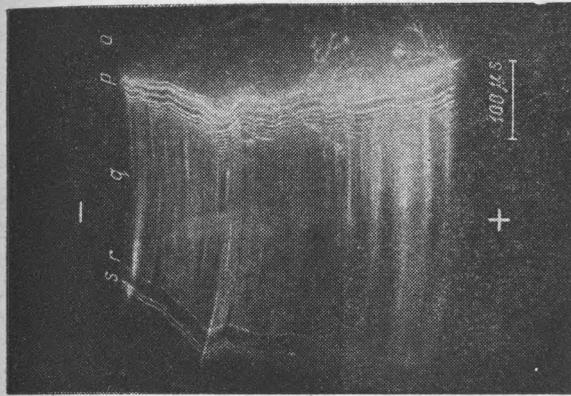
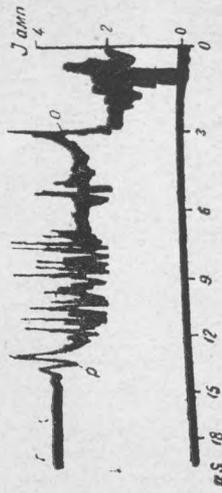
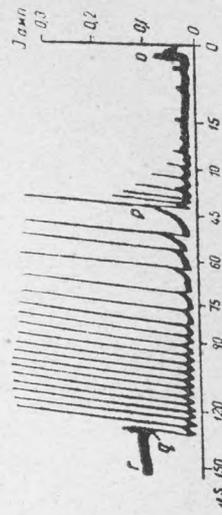
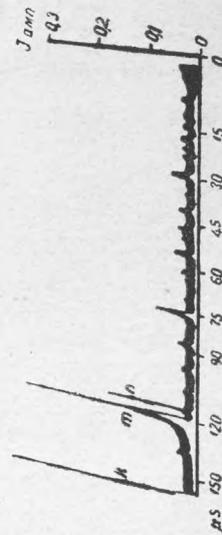


Рис. 2. Фотография разряда в масле при торможении  $1,4 \cdot 10^8$  ом. Электроды острие — острие. Расстояние между электродами 12 см; внизу — осциллограмма разряда при торможении  $1,4 \cdot 10^8$  ом



Рис. 3. Фотография разряда в дистиллированной воде при торможении  $10^8$  ом. Электроды острие — острие. Расстояние между электродами 9 см; внизу — осциллограмма того же разряда



Как уже отмечалось, скорость лидера меняется от точки к точке. В таблице дается величина средней скорости, которая может быть в несколько раз меньше максимальной. При дальнейшем уменьшении торможения (ниже  $10^5$ ) скорости лидеров (особенно отрицательных лидеров) возрастают еще более, превышая вероятные скорости электронов в жидкой среде.

Подобно пробоем в газах этот эффект может быть объяснен фотоионизацией молекул жидкости, производимой излучением, которое несет с собой развивающийся разряд.

Скорости отрицательных лидеров при пробое воды во много раз меньше, чем скорости положительных лидеров, и не всегда поддаются измерению. Если в масле, при торможении  $10^5$  ом, при электродах острей — острей, длина положительного лидера в 1,2—1,5 раза больше отрицательного, то в воде, при тех же условиях, она больше в 12—15 раз.

Лидерная стадия отделяется от стадии дуги резкой вспышкой, которая охватывает весь канал и по интенсивности превосходит свечение лидера. Максимально ярко светится точка встречи двух лидеров; по мере удаления от нее в сторону электродов свечение постепенно ослабевает. Вероятно, что свечение распространяется по каналу в тех же направлениях с очень высокой скоростью. Максимумы тока в стадии вспышки превосходят токи лидера и дуги в несколько раз. Их появление станет понятным, если учесть, что после встречи потенциал канала понижается и возникает обратное стекание зарядов, сосредоточенных на периферии канала и на соседних частицах жидкости. Помимо того в стадии вспышки наступает разряд электродной емкости, дающий свою слагающую тока, накладывающуюся на дуговой ток. Появление подобных импульсов тока (главного разряда) при искровом процессе в атмосфере было впервые обнаружено и подробно обследовано автором (<sup>1</sup>).

Начиная с  $R_T = 120\,000$  ом и выше в масле наблюдается замечательное явление. После завершения лидерной стадии дуга возникает не сразу, а после серии повторных пробоев, число которых возрастает с ростом торможения. На рис. 2 дана оптическая картина и запись тока при  $R_T = 10^6$  ом.

В интервале  $o-p$  длится лидерная стадия, затем следуют: повторные импульсы  $p-q$ , дуга  $q-r$  и, наконец, снова импульсы  $r-s$ . Весьма любопытно прерывание дуги и возобновление повторных разрядов в заключительной фазе, когда напряжение контура и токи в разряде становятся достаточно малыми.

Интервалы времени между повторными импульсами достигают 7—12 микросекунд и заметно снижаются с возрастанием порядкового номера импульса.

В первом приближении повторные разряды можно объяснить самовосстановлением прочности межэлектродного промежутка за счет процессов рекомбинации и захвата носителей зарядов нейтральными частицами.

Пробой жидкостей, описанный выше, не может быть объяснен существующими теориями, игнорирующими роль электронно-лавиного процесса. Поразительное сходство отдельных фаз разряда в жидкостях и газах позволяет предполагать, что в жидкостях, несмотря на серьезное различие условий движения электронов (большая вероятность ступенчатой ионизации, потеря энергии на возбуждение упругих колебаний атомов молекулы, прилипание электронов и проч.), при пробое возникают эффекты, благоприятствующие образованию лавин. Такого рода явлениями могут быть: фотоионизация (или фотовозбуждение) излучением самого разряда и уменьшение работы ионизации за счет воздействия на молекулы

жидкости электрического поля, которое распространяется вместе с лидером.

Ступенчатость лидерного процесса определяется, вероятно, не столько механизмом ионизации, сколько старением канала, проводимость которого, уменьшаясь во времени, вызывает падение градиента в области ионизации и, следовательно, замедление движения носителей заряда.

Автор выражает благодарность доктору технических наук И. С. Стекольникову за содействие настоящей работе.

Энергетический институт  
им. акад. Г. М. Кржижановского  
Академии Наук СССР

Поступило  
16 XI 1944

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. С. Комельков, ЖТФ, **10**, 17, 1426 (1940). <sup>2</sup> И. С. Стекольников, А. П. Беляков, ЖЭТФ, **8**, 4, 444 (1938).