

ФИЗИКА

Л. Г. ГИНДИН, Л. М. МОРОЗ, И. Н. ПУТИЛОВА,  
член-корреспондент АН СССР Я. И. ФРЕНКЕЛЬ и О. А. ШПАНСКАЯ

**ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ СУСПЕНЗИЙ МЕТАЛЛОВ  
В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ**

Вопрос об электрическом пробое супензий металлов в жидким диэлектриках, именно пробое, обусловленном образованием проводящих «мостов» из металлических частиц, насколько мы знаем, совершенно не освещен в литературе. Между тем вопрос этот заслуживает внимания.

Явление такого рода пробоя было нами изучено, главным образом, на супензиях алюминия в бензине, вазелиновом масле и других жидким диэлектриках. Содержание металла в супензиях изменялось от 0,005 до 1 вес. %. Большинство опытов было проведено с супензиями, содержащими 0,1% металла.

Основной метод исследования заключался в том, что в цепь высоковольтной установки, описанной в работе <sup>(1)</sup>, позволявшей подавать напряжение от 300 до 4000 в, включался, последовательно с дополнительным сопротивлением в 4,5 мегома, прибор (см. рис. 1) с супензией. Пробой обнаруживался по резкому усилению тока в цепи.

Пробой супензии обусловлен образованием из металлических частиц «моста», соединяющего электроды. Процесс возникновения такого «моста» особенно легко наблюдаем в прозрачной и маловязкой жидкости, например, в бензине.

При подаче на электроды напряжения в 300 в в супензии начинается интенсивное движение частиц, усиливающееся с повышением напряженности поля. При этом наблюдается ярко выраженная асимметрия движения. Большинство частиц металла, несущих, в соответствии с правилом Кёна, небольшой положительный заряд, устремляется к катоду, покрывая его более или менее толстым слоем, состоящим из довольно рыхлых агрегатов, растущих в направлении анода. Последний в начале процесса остается чистым, и только спустя некоторое время начинает обрастиать частицами, перелетающими к нему от катода, которые дают начало новым структурам, растущим в противоположном направлении.

На известной стадии процесса почти все пространство между электродами оказывается заполненным агрегатами частиц. Однако система при этом продолжает оставаться диэлектриком пока напряженность электрического поля  $E$  не превысит определенную критическую величину  $E_{kp}$ . Лишь по достижении  $E \geq E_{kp}$  (спустя некоторое время, названное нами индукционным периодом) происходит пробой. Для супензий алюминия в бензине  $E_{kp} = 4000$  в/см, а индукционный период — нескольким секундам. Пробой, помимо резкого усиления тока в цепи,

легко обнаруживается по прекращению движения частиц и стремительному осыпанию их с электродов, что объясняется снижением напряженности электрического поля с нескольких кВ/см до  $\sim 1$  в/см.

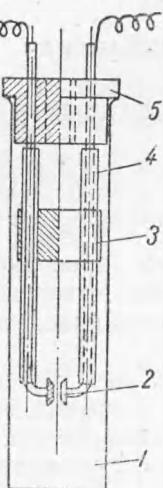
После того как частицы осядут, становится видимым «мост» — тончайшая нить, соединяющая электроды. При хорошем освещении эта нить различима невооруженным глазом. Повидимому, проводящая основа нити состоит из последовательно связанных, находящихся в тесном контакте друг с другом звеньев, представляющих собою небольшие компактные агрегаты металлических частиц и, возможно, отдельные крупные частицы. К этой основе примыкает множество других частиц и их агрегатов, некоторая доля которых участвует в проводимости тока. При сотрясении нити частицы, слабо связанные с основой, легко осыпаются, а более прочно связанные, повидимому, внедряются между ее звеньями и

тем самым способствуют ее удлинению. Обычно нить получается провисающей, с той или иной стрелой прогиба.

Нить сравнительно устойчива и под слабым током может существовать неопределенно долгое время. Однако нить сохраняется и после того, как напряжение снимается, в чем легко убедиться, измерив ее проводимость.

Время существования нити в отсутствие поля было названо нами «электрической памятью». Длительность «электрической памяти» зависит от ряда факторов и, в частности, от вязкости дисперсионной среды. В бензине, например, «память» нити достигала часа; в вазелиновом масле она была еще более длительной. Повидимому, в идеальных условиях нить может существовать очень долго, что важно для оценки тех молекулярных сил, которые обусловливают в основном существование нитей.

Рис. 1. Прибор для изучения пробоя.  
1 — стеклянный сосуд, 2 — электроды, 3 — крепительная муфта, 4 — фарфоровые изоляторы, 5 — пробка



Электрическое сопротивление «мостов», колебалось в довольно широких пределах: например, «мосты» из медных частиц ( $d = 40 \mu$ ), полученные в бензине, имели сопротивление в  $25 \Omega$ ; «мосты» из алюминиевых частиц ( $4-6 \mu$ ), возникшие в том же бензине, — от  $150$  до  $18000 \Omega$ ; «мосты» из тех же частиц в вазелиновом масле —  $300-800 \Omega$ ; в виде исключения встречались «мосты» с сопротивлением в несколько мегомов, однако они были очень нестойки. Эффективное сечение таких мостов, вычисленное в предположении, что они состоят из сплошной металлической нити длиною 3 мм, будет соответственно равным  $2,00 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ ;  $5,24 \cdot 10^{-9} \div 4,39 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ ;  $2,62 \cdot 10^{-9} \div 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$ . Условно оно может быть принято за минимальную площадь контакта между частицами, образующими нить.

Сопротивление нити резко повышалось при осыпании с нее частиц, причем она заметно утоньшалась. В некоторых случаях наблюдалось удлинение нити (обычно под влиянием толчков по прибору), которое сопровождалось также возрастанием ее сопротивления. При постукивании по стенкам прибора нити, закрепленные у верхнего края электродов, сползали и их проводимость при этом обычно падала.

Изменения формы и положения нити наблюдались также при резком повышении или понижении подаваемого напряжения. Так например, нить, прикрепленная у верхнего края электродов (см. рис. 2, а) при внезапном изменении напряжения, отклонившись от анода (рис. 2, б) пунктиром, поворачивалась (рис. 2, б) и через 2—3 мин. возвращалась обратно (рис. 2, а).

Существенное влияние на пробой оказывают размеры суспендиро-

ванных частиц. С уменьшением их размеров  $E_{kp}$  заметно возрастает. Так, с пятикратным измельчением частиц алюминия  $E_{kp}$  с 4000 возросло до 13 000 в/см. Напротив, влияния формы частиц обнаружить не удалось; самые разнообразные частицы (пластиинки, палочки, шарики, глобулы и т. д.) образовывали нити, замыкавшие электроды.

Из свойств материала частиц важен их удельный вес, точнее, разность удельных весов материала частиц и дисперсионной среды. В таких суспензиях, где эта разность невелика, например, в суспензиях алюминия в дигидриоде ( $d_4^{20} = 2,18$ ) «электрическая память» была наибольшей из всех наблюдавшихся нами систем.

Частицы очень тяжелые седиментируют настолько быстро, что не успевают образовать «моста». В этом случае «мосты» можно получать иначе, чем это описано выше, а именно: погружением электродов в слой осевшей суспензии. Если после этого осторожно поднимать электроды, то проводящая нить извлекается из осадка частично (рис. 3, в) или полностью.

Как показал опыт, форма, размеры и положение электродов не влияют на пробой, в частности, на величину  $E_{kp}$ . Она оставалась практически одной и той же при самых разнообразных электродах: два параллельных диска, расположенных вертикально или горизонтально один над другим; острие против диска, острие против острия. Одним и тем же был также индукционный период.

Этим описываемый вид пробоя отличается от известных в литературе<sup>(2)</sup>.

Кроме того, проводя опыты с электродами, изготовленными из различных металлов (меди, алюминия, нержавеющей стали, свинца), а также с электродами, покрытыми гальваническим путем никелем и хромом, мы убедились, что материал электродов не влияет на  $E_{kp}$ . Степень обработки поверхности электродов также не оказывает заметного влияния на пробой.

Длительное пребывание суспензий в электрическом поле при  $E < E_{kp}$  приводило к столь сильному обрастианию электродов частицами, что пробой не наступал при  $E \geq E_{kp}$ . В особенности пробой затруднялся при обрастиании электродов в тех случаях, когда суспензия была в течение нескольких часов в электрическом поле и благодаря этому успевала заметно агрегироваться. В таких суспензиях пробой долго не наступал даже при  $E > E_{kp}$ . Для того чтобы он наступил, приходилось механическим путем счищать электроды, после чего почти мгновенно возникал «мост».

Образование проводящих мостов, повидимому, не зависит от температуры; во всяком случае, наблюдения пробоя суспензий алюминия в вазелиновом масле в интервале температур 20—115° не позволили обнаружить изменений критической напряженности поля.

Опыты с суспензиями алюминия в бензине, в вазелиновом масле, серном эфире, хлорбензоле и нитробензоле показали, что с повышением диэлектрической постоянной среды  $E_{kp}$  заметно снижалось. Так, в бензине и вазелиновом масле  $E_{kp}$  было 4000, а в нитробензоле 1000 в/см.

Кроме того, было обнаружено, что с увеличением диэлектрической постоянной дисперсионной среды уменьшается сопротивление образующихся «мостов». Не исключено, что эти эффекты обусловлены различием в степени агрегации частиц в изученных нами средах.

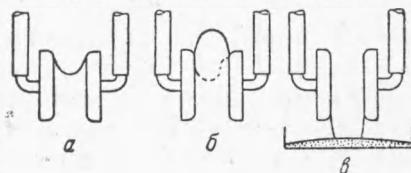


Рис. 2. Различные виды проводящих мостов

Здесь мы даем чисто феноменологическое описание явления пробоя в суспензиях металлов. Теоретический анализ его будет дан в другой статье.

Поступило  
5 IV 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> И. Н. Путилова, Л. Г. Гиндин и Л. М. Мороз, ДАН, 71, № 1 (1950).  
<sup>2</sup> А. Никурадзе, Жидкие диэлектрики, 1936, стр. 174.