

## К ВОПРОСУ О ПРОБОЕ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Г. А. ВОРОБЬЕВ

### Методика эксперимента

Опыты по пробое твердых диэлектриков в неоднородном поле часто проводятся с образцами в виде пластинок, на поверхность которых друг против друга ставят электроды: острое и плоскость. Такая методика имеет тот существенный недостаток, что в результате опыта получается пробивное напряжение нетвердого диэлектрика, а комбинации твердого диэлектрика и окружающей среды. Пробоем твердого диэлектрика при такой методике, как правило, предшествуют разряды по поверхности образца, которые существенно влияют на пробой самого твердого диэлектрика [1].

Для получения закономерностей, характеризующих твердый диэлектрик, необходимо исключить влияние окружающей среды. Опыты с исключением влияния окружающей среды проводились А. Ф. Вальтером и

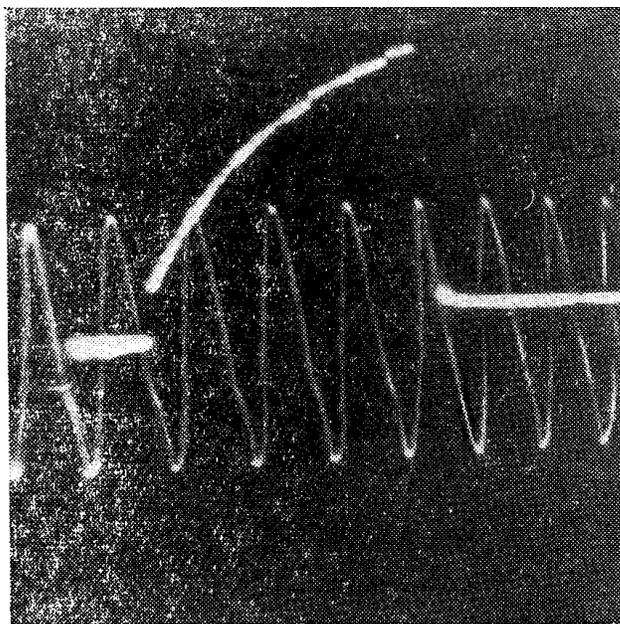


Рис. 1-а—Градуировочные колебания с частотой 100 кГц.

Л. Д. Инге (впаивание электродов внутрь серы, стекла)[2], А. А. Воробьевым и Н. А. Приходько (вдавливание электродов в лед), [1] и др. А. А. Воробьев и В. Д. Кучин [3] в опытах по фосфорисценции в каменной соли

во избежание разрядов по поверхности применяли образцы с глубоко за-  
сверленным одним электродом.

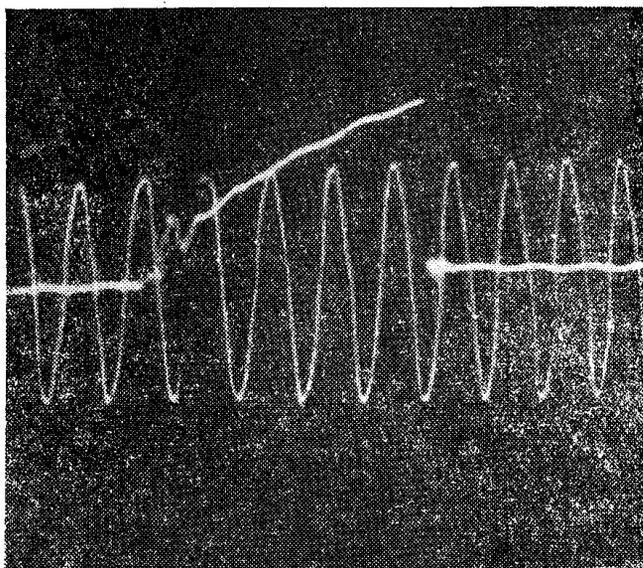


Рис. 1-б—Градуировочные колебания с частотой  
1 мгц.

Нами предлагается для исследования пробоя твердых диэлектриков  
в неоднородном поле применять образцы формы, указанной на рис. 1 [7].  
Образцы твердых диэлектриков указанной формы можно получить высвер-  
ливанием лунок, отливкой, прессованием и другими методами.

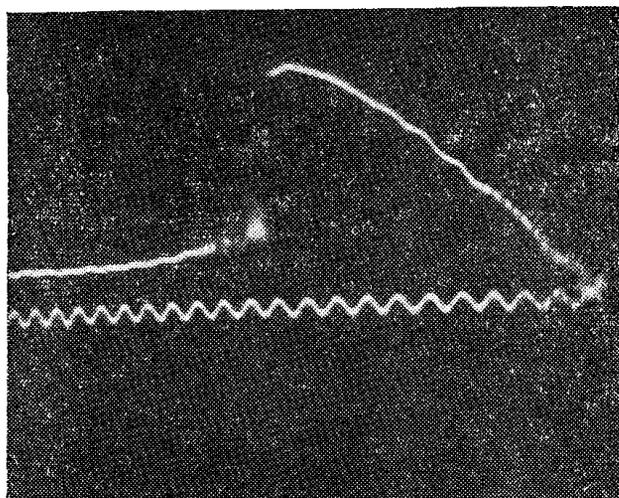


Рис. 1-в—Градуировочные колебания с частотой  
10 мгц.

Нами было проведено экспериментальное исследование по пробую в  
неоднородном поле каменной соли (NaCl), монокристаллов KCl, KBr и KJ,  
выращенных из расплава и органического стекла. Диэлектрики пробыва-  
лись на фронте одиночного импульса, а образцы каменной соли были про-

биты также на постоянном напряжении при обеих полярностях. Опыты по пробое каменной соли на постоянном напряжении были проведены студентами Томского политехнического института Т. В. Шушкаловой, З. И. Дружининой и Ж. И. Калянниковой. Высокое напряжение подавалось на электрод в виде острия, плоский электрод заземлялся. При пробое на импульсном напряжении в качестве регистрирующего и измерительного прибора

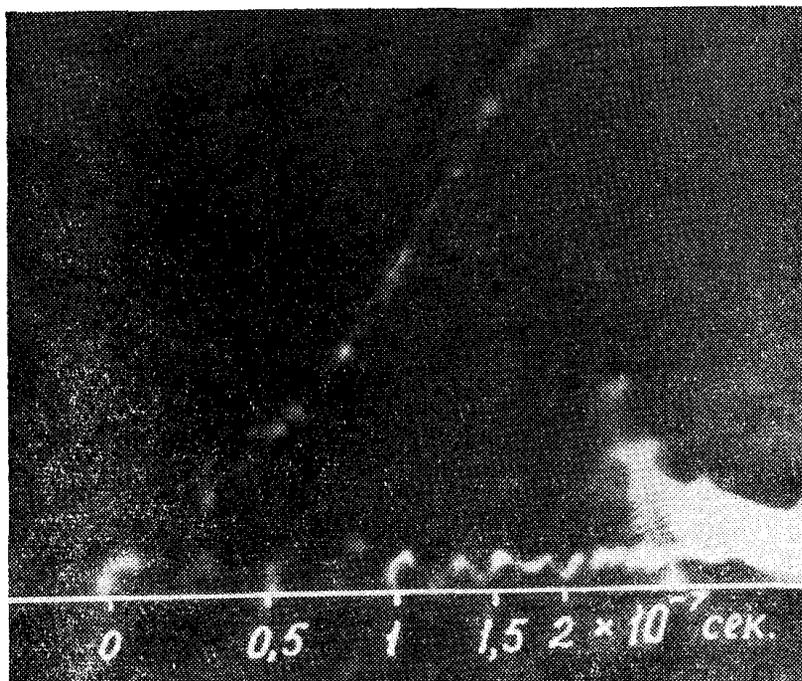


Рис. 1-г—Время воздействия напряжения  $1,7 \cdot 10^{-7}$  сек.

применялся электронный осциллограф. На рис. 1 показаны оциллограммы при пробое исследуемых диэлектриков при различных временах воздействия напряжения.

### Пробой каменной соли

Сняты вольтсекундные характеристики образцов толщиной  $0,7 \pm 0,02$  мм при обеих полярностях электрода—острия. На точку бралось  $20 \div 30$  образцов. Проводилась статистическая обработка опытных данных. На рис. 2 приведены вольтсекундные характеристики при вероятности пробоя  $\psi = 90\%$ . Общий вид кривых сходен с аналогичными кривыми для NaCl, KCl, KBr и KJ в случае однородного поля [4].

Подъем кривых при самых малых временах объясняется запаздыванием разряда, при времени  $2 \div 3 \cdot 10^{-5}$  сек — влиянием объемного заряда, который за это время успевает сформироваться в кристалле.

Не следует объяснять запаздывание разряда в данном случае отсутствием электронов во время воздействия напряжения. В твердых диэлектриках с большой электрической прочностью при напряженностях поля, приближающихся к статическим пробивным, имеет место значительная электростатическая ионизация, которая является хорошим поставщиком электронов, которые должны участвовать в формировании разряда. В случае неравномерного поля у электрода с большой кривизной при напряжениях, приближающихся к пробивным, напряженность поля значительно

превышает электрическую прочность диэлектрика. Следовательно, в этом случае должно быть еще больше свободных электронов.

Поэтому следует считать, что время, прошедшее с момента, когда напряжение достигло пробивного-статического, до пробоя является временем формирования разряда при данных условиях воздействия напряжения. Время формирования разряда определялось по осциллограмме пробоя [4]. В случае,

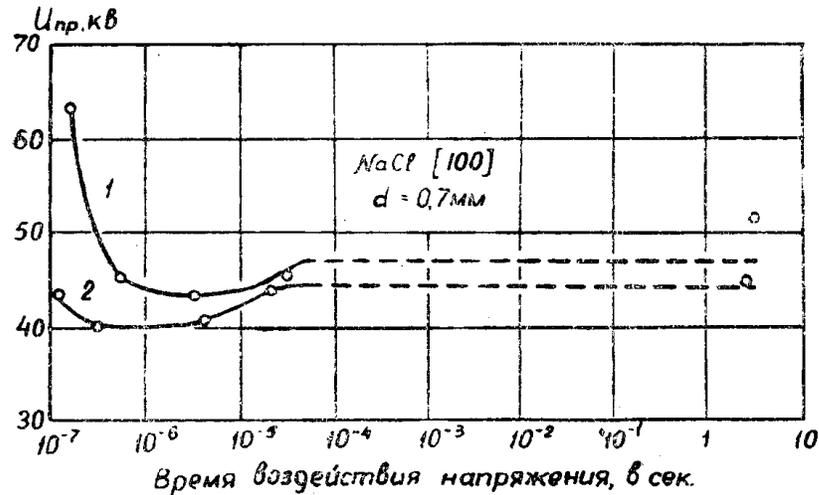


Рис. 2—Вольтвременные характеристики каменной соли при пробое в неоднородном поле. Толщина образца  $d = 0,7$  мм  
1 — острие  $\ominus$ ; 2 — острие  $\oplus$ .

когда острие было отрицательным, время формирования разряда получилось  $5,1 \cdot 10^{-8}$  сек, когда острие было положительным— $0,9 \cdot 10^{-8}$  сек. Соответственно скорости распространения разряда составляют  $1,37 \cdot 10^6$  см/сек и  $7,77 \cdot 10^6$  см/сек. Скорость распространения разряда при положительной по-

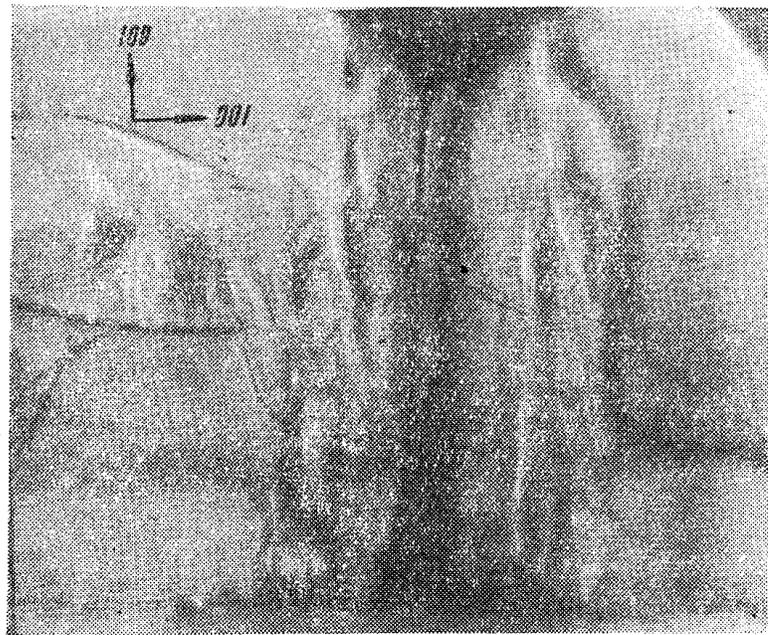
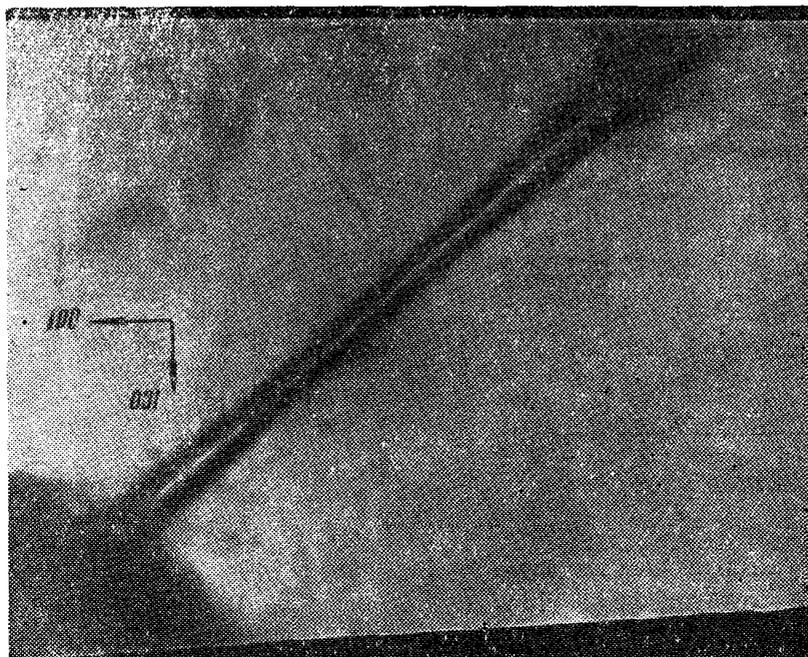


Рис. 3.—Микрофотографии путей разрядов в каменной соли (время воздействия напряжения  $5 \div 6 \cdot 10^{-7}$  сек, увеличение в 80 раз).

лярности остря в 5,67 раза больше, чем при отрицательной полярности остря.

Эти результаты аналогичны наблюдаемым в воздухе. Вероятно, и в случае каменной соли около остря в результате ионизационных процессов образуется положительный объемный заряд, который при положительной полярности остря способствует разряду, а при отрицательной—тормозит разряд. Эффект полярности ясно проявляется при малых временах воздействия напряжения и слабо—при больших временах. Видимо, при больших временах положительный объемный заряд успевает значительно расосаться под действием большой напряженности поля на границах объемного заряда. Это должно вести к сглаживанию эффекта полярности.



б)—положительная полярность остря.

Характерным является направление пути разряда. При отрицательной полярности остря разряд идет по кратчайшему расстоянию между электродами—по ребру куба решетки [100]. При положительной полярности остря разряд идет, как правило, по диагонали грани куба [110] и изредка—по диагонали куба [111]. При времени воздействия напряжения  $1 \div 2 \cdot 10^{-7}$  сек наблюдались отклонения от указанной закономерности при обеих полярностях остря; канал разряда часто был искривленным. При этом часто наблюдалось в одном образце большое количество каналов разряда (до 6), тогда как при больших временах изредка встречались образцы с двумя каналами разряда (при положительной полярности остря). На рис. 3 представлены микрофотографии разрядов при времени воздействия напряжения  $5 \div 6 \cdot 10^{-7}$  сек.

### Пробой монокристаллов KCl, KBr и KJ

Производился пробой монокристаллов KCl, KBr и KJ при обеих полярностях остря и двух временах воздействия напряжения:  $9 \cdot 10^{-7} \div 1,3 \cdot 10^{-7}$  сек и  $1 \div 3 \cdot 10^{-6}$  сек. На рис. 4 представлены результаты опытов. Напряжения соответствуют вероятности пробоя  $\psi = 90\%$ . Каждая

точка—результат обработки 4 ÷ 7 осциллограмм. Характер зависимости тот же, что и для каменной соли.

На рис. 3 [7] представлены зависимости пробивного напряжения от энергии решетки для исследованных кристаллов. С увеличением энергии решетки пробивное напряжение растет также, как и в случае однородного поля [4, 5]. Следовательно, пробивные напряжения кристаллов, пробитых в неоднородном поле, когда исключено влияние окружающей среды, определяются материалом кристалла, как и в однородном поле. В тех случаях, когда затруднительно проводить пробы твердых диэлектриков в однородном поле, для сравнения диэлектриков опыты можно проводить в неоднородном поле.

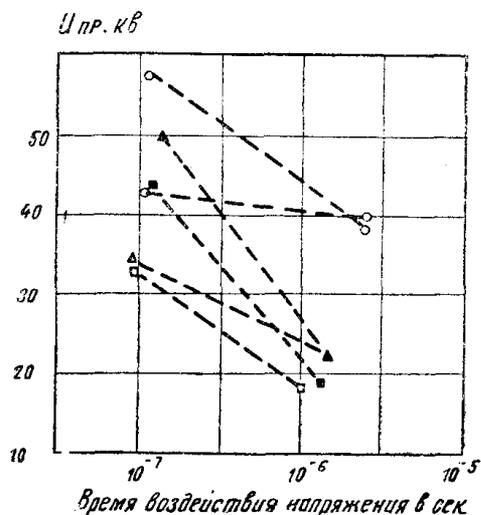


Рис. 4.—Вольтвременные характеристики при пробе монокристаллов KCl, KBr и KI в неоднородном поле.

Острие ⊖      Острие ⊕  
 ● — KCl      ○ — KCl  
 ▲ — KBr      △ — KBr  
 ■ — KI      □ — KI

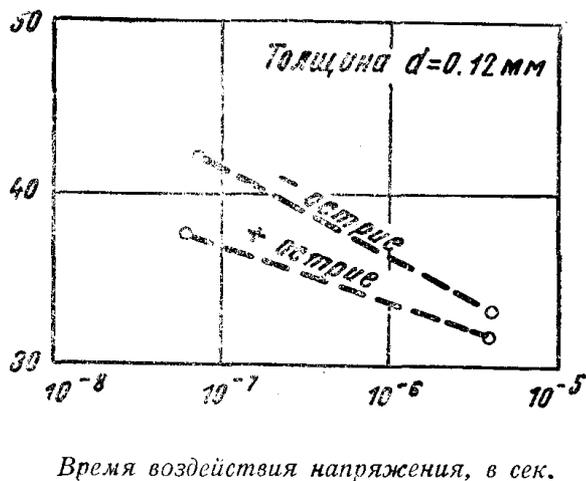


Рис. 5 — Вольтвременные характеристики при пробе органического стекла в неоднородном поле.

Были проведены опыты по пробую в неоднородном поле пластинок NaCl и KBr толщиной  $0,7 \pm 0,02$  мм при времени воздействия напряжения  $1,1 \div 1,7 \cdot 10^{-6}$  сек. На рис. 2 [7] представлены результаты опытов и для сравнения данные по пробую NaCl и KBr с применением образцов с конусной выточкой. Напряжения взяты при вероятности пробоя  $\psi = 90\%$ . Результаты опытов по пробую пластинок не характеризуют диэлектрик.

Вальтер и Инге [6] снимали вольтсекундные характеристики при пробое пластинок каменной соли толщиной 2,7 мм в поле электродов острие—плоскость. Образцы погружались в трансформаторное масло. Они получили пробивное статическое напряжение: 30 кВ при положительной полярности острия и 36 кВ при отрицательной полярности острия. В наших опытах с образцами с конусной выточкой при средней толщине образцов, 0,7 мм, т. е. почти в 4 раза меньшей, пробивное напряжение составило при времени воздействия напряжения порядка  $10^{-6}$  сек, когда еще нет запаздывания разряда, 40 кВ при положительной полярности острия и 43 кВ при отрицательной полярности острия. В опытах же с пластинками средней толщины 0,7 мм мы также получили низкое пробивное напряжение: 18 кВ при положительной полярности острия и 21 кВ при отрицательной

полярности острия. Видимо, поверхностные разряды значительно снижают пробивное напряжение твердого диэлектрика.

Авторы [6] указывают, что наблюдались часто пробои на хвосте импульса и такие же случаи наблюдались при пробое одного трансформаторного масла. В наших опытах с образцами с конической выточкой подобных случаев не наблюдалось. Вальтер и Инге [6] получили далеко отличные от наших данных времена запаздывания разряда. В их опытах увеличение пробивного напряжения начинается при времени воздействия на протяжении  $3 \div 7 \cdot 10^{-6}$  сек, в наших опытах—при времени воздействия  $2,5 \div 6 \cdot 10^{-7}$  сек, то есть на порядок меньше.

Просматривание путей разряда в образцах КС1 показало, что разряд как при отрицательной полярности острия, так и при положительной идет по кратчайшему пути—по направлению [100]. Для КВг и КJ не удалось просмотреть пути разряда.

### Пробой органического стекла

Пробивались образцы из органического стекла толщиной  $0,12 \pm 0,02$  мм при обеих полярностях острия и двух временах воздействия напряжения. На рис. 5 представлены результаты опытов. Напряжения взяты при вероятности пробоя  $\psi = 90\%$ . Каждая точка—результат обработки 7  $\div$  13 осциллограмм. Наблюдаются те же закономерности, что и для кристаллических диэлектриков.

### Выводы

1. Методика испытания на пробой образцов с конусной выточкой устраняет влияние окружающей среды на пробивное напряжение твердого диэлектрика.

2. При малых временах воздействия напряжения ( $6 \cdot 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-7}$  сек) наблюдается запаздывание разряда.

3. При малых временах воздействия напряжения ( $6 \cdot 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-7}$  сек) ясно проявляется эффект полярности, сходный с эффектом полярности в воздухе. Это указывает на наличие ионизационных процессов у исследованных диэлектриков, начинающихся вблизи острия. Эта закономерность имеет место для кристаллических диэлектриков и аморфного диэлектрика (органическое стекло).

4. В неравномерном поле пробивное напряжение также является характеристикой материала. Для щелочно-галоидных кристаллов в неравномерном поле имеет место увеличение пробивного напряжения с увеличением энергии решетки.

Настоящая работа проводилась по предложению и под научным руководством профессора-доктора А. А. Воробьева, которому автор выражает свою искреннюю благодарность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Воробьев и Н. Приходько, Труды СФТИ, том 4, вып. 3, 112—126, 1936.
2. А. П. Александров, А. Ф. Вальтер и др.,—Физика диэлектриков, ГТТИ, Москва—Ленинград, 1932.
3. А. А. Воробьев и В. Д. Кучин, ЖТФ, в печати.
4. Г. А. Воробьев, ЖЭТФ, Том 30, вып. 2, 256—261, 1956.
5. А. А. Воробьев, ЖТФ, 10, 183, 1940.
6. А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге, ЖТФ, том III, вып. 6, 840—849, 1933.
7. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев и В. Д. Кучин—настоящий вып., стр. 193.

Томский политехнический  
институт