

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В. Ф. ПАНИН

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

### Введение

При сложившихся нормах защиты высоковольтной изоляции от грозовых перенапряжений показателями импульсной прочности изоляционных конструкций являются 50%-е разрядное напряжение и вольтсекундные характеристики, получаемые с использованием стандартных импульсов 1,5/40 (1/50) мксек. Результаты измерений электрической прочности твердых диэлектриков при стандартных импульсах, выполненные многими исследователями, явились основой проектирования высоковольтных аппаратов с твердой изоляцией, с координацией по атмосферным перенапряжениям.

Улучшение характеристик грозовых разрядников дало возможность снижения уровней твердой изоляции. Однако для реализации этой возможности необходимо изучение поведения изоляции при нестандартных импульсных напряжениях, к которым в основном относятся коммутационные перенапряжения. Последние отличаются большим разнообразием форм. Частоты колебаний при коммутациях, лежат в пределах  $10^2$ — $10^5$  гц в связи с чем возникают понятные трудности в систематическом изучении электрической прочности твердой изоляции при воздействиях коммутационной формы, особенно при изучении ее прочности в больших междуэлектродных промежутках.

При постановке исследований прочности твердой изоляции в области воздействия коммутационных перенапряжений необходимо решить вопрос: изменение каких параметров, характеризующих форму импульсного напряжения, оказывает наибольшее влияние на разрядный процесс в твердом диэлектрике и, следовательно, на его электрическую прочность.

Анализ пространственно-временных картин и количественных характеристик разряда в воздухе и жидкости по данным [1 ÷ 5 и др.] с учетом известных аналогий в развитии разряда в воздухе и твердых диэлектриках [6, 7 ÷ 9] показал, что для твердых диэлектриков, как для воздуха и жидкостей, параметром, определяющим особенности развития разряда при импульсах разной формы, является скорость нарастания напряжения.

Этот вывод позволил сделать заключение о том, что для систематических исследований поведения твердой изоляции в условиях воздействия коммутационных перенапряжений целесообразно изучить ее электрическую прочность на косоугольных волнах напряжения с крутизнами, соответствующими интервалу крутизн реальных перенапряжений:  $10^3 \div 10^{-2}$  кв/мксек.

## Методика исследования

В соответствии с изложенным при изучении электрической прочности твердой изоляции в области воздействия коммутационной формы была принята методика исследований, заключающаяся в следующем: измерение средних разрядных напряжений и стандартных отклонений разрядного напряжения от среднего значения при пробое твердых диэлектриков на фронте экспоненциального импульса (крутизна импульса изменялась в пределах  $1,4 \cdot 10^3 - 10^{-2}$  кв/мксек); последующий сравнительный анализ полученных и литературных данных.

Аппаратура и метод обработки результатов описаны в [10, 11].

Исследовалась электрическая прочность образцов из модельных диэлектриков: кристаллического (лед) и аморфного (битум) в типовых разрядных промежутках «острие — плоскость» длиной  $10 \div 15$  мм при обеих полярностях острия и «шар — плоскость» длиной 10 мм при положительной полярности сферического электрода.

Образцы льда изготавливались по методике, принятой в [12], образцы битума — путем заливки расплавленного и затем охлажденного до  $112^\circ\text{C}$  битума в латунные формы при температуре окружающего воздуха  $18 \div 26$  С и атмосферном давлении.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 (кривая 1) представлены зависимости средних разрядных напряжений  $U_p$  от крутизны импульса  $a_{cp}$  для образцов льда в промежутке «О—П», 15 мм: Характерной особенностью зависимости  $U_p(a_{cp})$

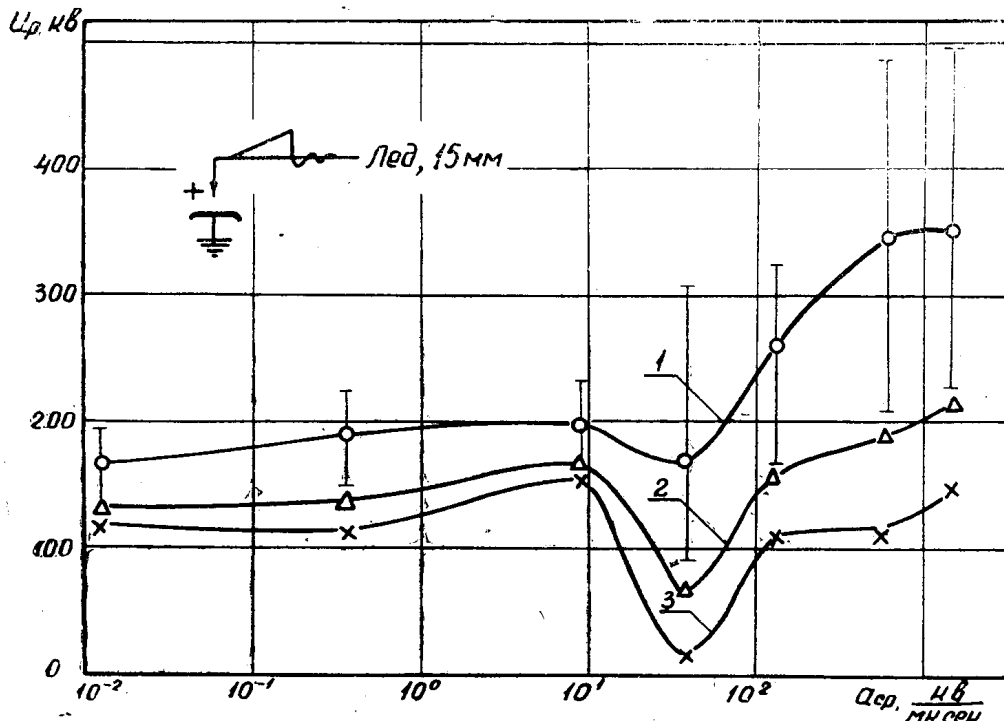


Рис. 1. Зависимость разрядного напряжения  $U_p$  от крутизны  $a_{cp}$  положительной косоугольной волны для образцов льда: 1 — для средних значений, 2 — для значений  $U_{cp} - 2\sigma$ , 3 — для значений  $U_{cp} - 3\sigma$ .

является аномальное снижение средних разрядных напряжений в области крутизны около  $30$  кв/мксек. При данной крутизне средние разрядные напряжения были примерно равны разрядным напряжениям при кру-

тизне  $\sim 10^{-2}$  кВ/мксек, соответствующей максимальной длительности коммутационных перенапряжений.

Другой характерной особенностью электрической прочности образцов льда является значительное повышение разброса разрядных напряжений в области крутизны около 30 кВ/мксек. На рис. 2 представлена зависимость стандартного отклонения  $\sigma$  от крутизны напряжения для образцов льда. Как следует из рис. 2, величина  $\sigma$  в области крутизны 30 кВ/мксек в 1,5–2,5 раза превышает разброс при других крутизнах. Снижение средних разрядных напряжений и повышенный разброс

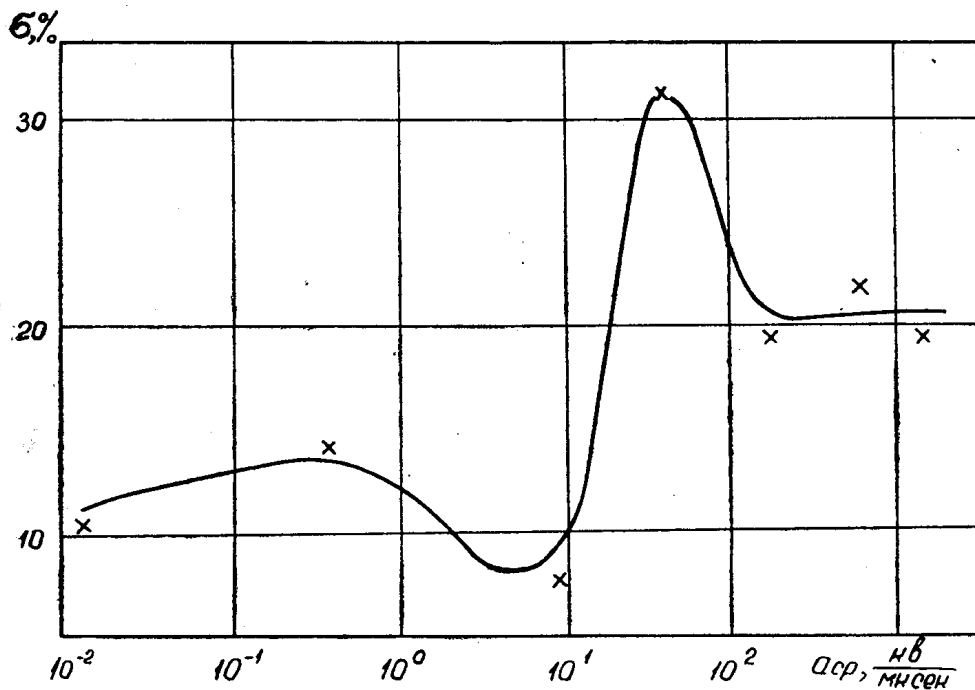


Рис. 2. Зависимость стандартного отклонения  $\sigma$  от крутизны для образцов льда.

результатов в области крутизны,  $a \approx 30$  кВ/мксек обуславливают значительное снижение уровней  $U_{\text{ср}} - 2\sigma$  и  $U_{\text{ср}} - 3\sigma$ , которыми в практике характеризуют выдерживаемые напряжения изоляционных конструкций, рис. 1 (кривые 2 и 3), где  $U_{\text{ср}}$  — среднее разрядное напряжение.

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений для образцов битума. Как видно, для битума также характерными являются значительное уменьшение средних разрядных напряжений и повышенный разброс результатов в области крутизны около 30 кВ/мксек. Как и в случае льда, в области крутизны 30 кВ/мксек уровни напряжения  $U_{\text{ср}} - 2\sigma$  и  $U_{\text{ср}} - 3\sigma$  значительно ниже соответствующих уровней в области крутизны  $10^{-2}$  кВ/мксек.

Аналогичный эффект уменьшения импульсной прочности в области крутизны 30 кВ/мксек установлен также для образцов из льда и битума при их пробое в слабонервномерном поле, при положительной полярности сферического электрода. При отрицательной полярности острия указанный эффект наблюдался в случае битума. Для зависимостей разрядного напряжения образцов льда от крутизны при отрицательной полярности острия характерно монотонное уменьшение разрядного напряжения с уменьшением крутизны волны.

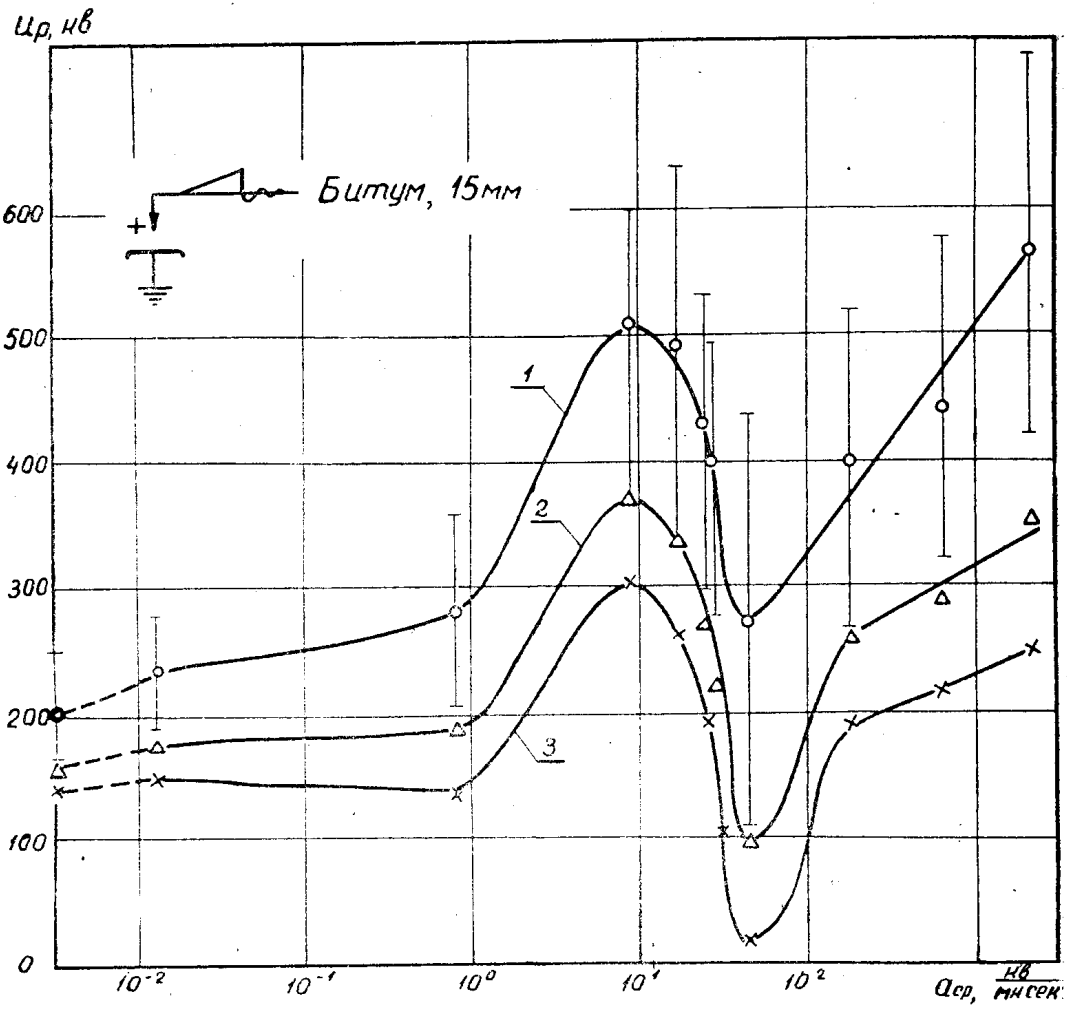


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для образцов битума.

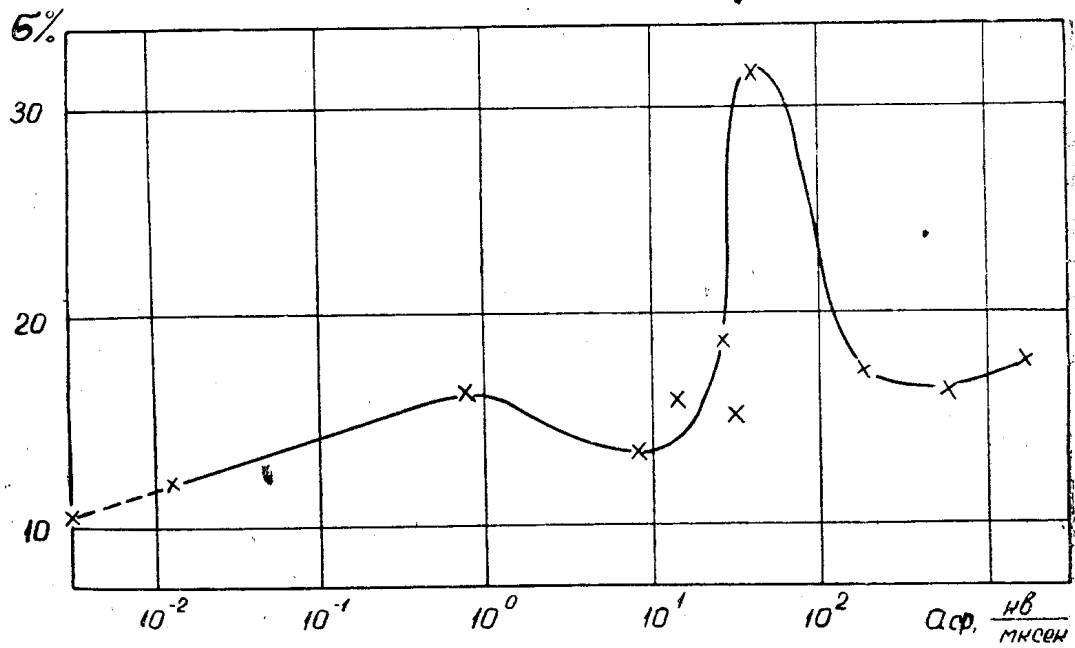


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для образцов битума.

Представляло интерес сравнить полученные результаты с данными ранее опубликованных работ по пробое твердых диэлектриков на косоугольных волнах напряжения. Сравнительный анализ полученных и литературных данных показал, что твердые диэлектрики с различными физико-химическими свойствами при их пробое в разрядных промежутках разной длины, с электродами разной формы характеризуются аномально низкими разрядными напряжениями в области крутизны  $30 \text{ кв/мксек}$ , которая в дальнейшем будет определяться как критическая. Некоторые результаты сравнительной оценки приведены в табл. 1, по данным [12—14].

Важно отметить, что аналогичный вывод — о существовании критических крутизны — сделан и в отношении газообразной (воздух) и жидкой (трансформаторное масло) изолирующих сред [15].

В ранее опубликованных работах [16, 17] наличие минимума в вольт-секундных характеристиках твердых диэлектриков связывалось с поляризационными процессами, играющими значительную роль при импульсном пробое твердых диэлектриков в слабонервномерном поле.

В случае пробоя твердых диэлектриков в резконервномерном поле объемные поляризационные заряды, по-видимому, также оказывают определенное влияние на уровень прочности диэлектрика при разной скорости нарастания напряжения. Однако в этом случае задолго до пробоя начинается ионизационный процесс, сопровождающийся образованием ионизационных объемных зарядов.

Для промежутков в воздухе с резко нервномерным полем непосредственными измерениями установлено [5], что уровень прочности промежутка однозначно связан с величиной избыточного объемного заряда, внедренного в промежуток разрядным процессом, причем минимуму объемного заряда соответствует минимальное разрядное напряжение.

Проводимые в литературе аналогии между развитием разряда в твердых диэлектриках и в воздухе [6,7÷9], в жидкости и в воздухе [4, 18, 19] дают основания полагать, что разрядные напряжения твердых диэлектриков при разных скоростях нарастания напряжения также определяются различной величиной объемных ионизационных зарядов, внедряемых в промежуток разрядным процессом.

Интересно отметить, что влияние ионизационных объемных зарядов на электрическую прочность твердых диэлектриков аналогично влиянию поляризационных объемных зарядов. Об этом свидетельствует совпадение крутизны минимальной прочности для образцов, пробиваемых в слабо- и резконервномерном полях (рис. 1, 3, табл. 1).

Заслуживает внимания совпадение критических скоростей нарастания напряжения для твердых диэлектриков, независимо от физико-химических свойств диэлектрика, длины междуэлектродного промежутка, формы электродов. Этот факт можно истолковать на основе представлений о кинетике разряда в длинных воздушных промежутках, используя отмеченные выше аналогии.

Согласно [20], аномальное уменьшение разрядных напряжений длинных воздушных промежутков при временах нарастания напряжения  $100 \div 300 \text{ мксек}$  обусловлено совпадением скоростей распространения внешнего поля в промежутке и дрейфа объемного заряда, что приводит к увеличению результирующего поля и понижению прочности промежутка. С другой стороны, по [15] минимум прочности воздушных промежутков имеет место при одной и той же, критической, крутизне напряжения (около  $7 \text{ кв/мксек}$ ). Если учесть, что скорость распространения внешнего поля в диэлектрике определяется скоростью нарастания напряжения между электродами, то изложенное приводит к следующему заключению: снижение прочности промежутков разной длины и с электродами

различной формы при одной, критической, крутизне обусловлено постоянством скорости дрейфа объемного заряда в данной среде. Различия в физико-химических свойствах твердых диэлектриков по-видимому не могут существенно влиять на скорость дрейфа объемного заряда, и решающим в данном случае является принадлежность диэлектрика к одному из агрегатных состояний изолирующих сред.

Таблица 1

Значения критической крутизны для твердых диэлектриков

Материалы	Авторы	Электр. системы	Длина промежутка, мм	Полярность	Значение, кв/мксек
Монокристаллы NaCl	[13,12]	О.—П.	0,7; 10	+	30; 37
				—	15; 30
	[13,14]	Ш.—П.	0,15	+	17,5; 17
				—	17,5
Монокристаллы KCl	[13]	Ш.—П.	0,15	+	18
				—	18
Монокристаллы KBr	[13]	Ш.—П.	0,15	+	18
				—	18
Монокристаллы KI	[13]	Ш.—П.	0,15	+	20
				—	20
Органич. стекло	[12]	О.—П.	2	+	30
				—	нет
[13]	Ш.—П.	0,05	+	35	
			—	нет	
Лед	[12]	О.—П.	15	+	37
				—	22
		Ш.—П.	10	+	22
Парафин	[12]	О.—П.	34	+	40
				—	40
		Ш.—П.	34	+	нет

Примечание: О—острие, Ш—шар, П—плоскость.

Предположение об однозначной связи между величиной избыточного объемного заряда и разрядного напряжения твердого диэлектрика дает возможность объяснить снижение средних разрядных напряжений исследованных в работе образцов в области крутизн, меньших 10 кв/мксек (рис. 1,3)

Образование объемного заряда сопровождается обратным процессом: его рассасыванием [21] или диффундированием на периферию образца под действием высоких градиентов на его границах. Интенсивность рассасывания должна возрастать при увеличении длительности приложения напряжения и повышении электропроводности материала. В области уменьшения крутизны от  $\sim 10^2$  кв/мксек до 10 кв/мксек преобладают, по всей вероятности, процессы, ведущие к увеличению объемных зарядов. При крутизнах, меньших 10 кв/мксек, начинает сказываться утечка зарядов, что приводит к уменьшению его величины и, следовательно, к уменьшению разрядного напряжения.

Для монокристаллов каменной соли, отличающихся весьма малой электропроводностью, снижения разрядного напряжения при крутизнах, меньших 10 кв/мксек, не установлено [21], что подтверждает предположение о значительном влиянии электропроводности на условия образования объемных зарядов и их роль в электрическом пробое.

При рассмотрении причин снижения разрядного напряжения диэлектриков в области малых крутизн следует учитывать тепловой эффект токов проводимости, на возможность которого (даже при длительности  $10^{-5}$  сек) указывают опыты Келлера [22] и Фермера [23].

Таким образом, представленные результаты конкретизируют представления о закономерностях поведения твердой изоляции в условиях воздействия перенапряжений с большим разнообразием форм, указывают на необходимость учета особенностей разряда на импульсах разной формы при постановке исследования прочности в области коммутационных перенапряжений.

Установление для твердых диэлектриков критической крутизны напряжения, характеризующейся аномальным уменьшением разрядного напряжения, дало возможность систематического подхода к установлению форм наиболее опасных для твердой изоляции перенапряжений. Наиболее опасными перенапряжениями являются импульсные воздействия, крутизна которых лежит в области критической.

Для типичных форм коммутационных перенапряжений, которые можно свести к аperiodическим, пульсирующим и колебательным импульсам, получены выражения, связывающие длительность фронта  $\tau_{\phi}$  аperiodического импульса, частоты пульсирующего и колебательного импульсов  $f_{\cos}$  и  $f_{\sin}$  с величиной импульсного напряжения и критической крутизной  $a_{кр} = 30$  кв/мксек.

$$\tau_{\phi} = \frac{1,06 U_a}{a_{кр}}, \quad (1)$$

$$f_{\cos} = \frac{0,334 U_a}{a_{кр}}, \quad (2)$$

$$f_{\sin} = \frac{0,212 U_a}{a_{кр}}. \quad (3)$$

Если вместо  $U_a$  положить амплитуды перенапряжений с крутизной  $a_{кр}$ , представляющие опасность для изоляции, можно получить значения опасных параметров  $\tau_{\phi}$ ,  $f_{\cos}$ ,  $f_{\sin}$  для твердой изоляции на разные классы напряжения.

В табл. 2 представлены результаты расчета опасных параметров, произведенного для изоляции на номинальное напряжение 110 ÷ 330 кВ.

Как видно из табл. 2, расчетные значения частот пульсации и колебаний опасных импульсов соответствуют средним частотам реальных коммутационных перенапряжений (килогерцы — десятки килогерц).

Это дает основания считать, что аномальное снижение импульсной электрической прочности твердых диэлектриков в области критических крутизн необходимо учитывать при выборе уровней твердой изоляции, работающей в условиях воздействия перенапряжений с средней частотой колебаний.

Таблица 2

Параметры опасных перенапряжений для твердой изоляции

Класс напряжения	$\tau_{\phi} \pm 14,3 \%$	$f_{\cos} \pm 14,3\%$	$f_{\sin} \pm 14,3\%$
<i>кв</i>	<i>мксек</i>	<i>кГц</i>	<i>кГц</i>
110	9,06	39	24,7
220	18,2	19,5	12,35
330	24,5	14,48	9,15

### Выводы

1. Для изучения поведения твердой изоляции в условиях воздействия перенапряжений различной формы целесообразны исследования электрической прочности твердых диэлектриков на косоугольных волнах в интервале крутизн реальных перенапряжений  $10^3 \div 10^{-2}$  кв/мксек.

2. Электрическая прочность твердых диэлектриков в типовых разрядных промежутках характеризуется аномальным снижением средних разрядных напряжений и повышенным разбросом результатов в области крутизны 30 кв/мксек.

3. Эффект аномального снижения разрядных напряжений твердых диэлектриков в разрядных промежутках с резконеравномерным полем по-видимому обусловлен той же ролью объемных ионизационных зарядов, которую последние играют при пробое длинных промежутков в воздухе и жидкости.

4. Для твердой изоляции на напряжения 110 ÷ 330 кв наиболее опасными перенапряжениями следует считать коммутационные перенапряжения с частотами колебаний 9 ÷ 40 кГц.

### ЛИТЕРАТУРА

- И. С. Стекольников. Природа длинной искры. Изд. АН СССР, 1960.
- И. С. Стекольников, Е. Н. Браго, Э. М. Базелян. ЖТФ, 32, вып. 8, 1962.
- И. С. Стекольников, А. В. Шкилев. ДАН, 151, № 4, 1963.
- В. Я. Ушаков. Диссертация, Томск, 1965.
- Э. М. Базелян. ЖТФ, 36, вып. 2, 1966.
- М. А. Мельников. Диссертация, Томск, 1959.
- Müller H., Wiss. Zeitschr. Techn. Hochsch., Dresden, 4, 629, 1954—55.
- Caspravi M. E., Phys. Rev., V. 98, № 6, 1675, 1955.
- А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, М. А. Мельников. ФТТ, 2, № 9, 1960.
- И. И. Каляцкий, В. Ф. Панин. Изв. вузов СССР—Энергетика, № 6, 1966.
- В. Ф. Панин. Изв. ТПИ, Томск, т. 139, 1965.
- А. В. Астафуров. Диссертация, Томск, 1958.
- Г. А. Воробьев. Диссертация, Томск, 1956.
- В. Д. Кучин. Диссертация, Томск, 1958.
- А. А. Воробьев, И. И. Каляцкий, В. Ф. Панин. Изв. ТПИ, т. 152, Томск, 1966.
- A. Von Hippel a. R. S. Alger, Phys. Rev., 76, 127, 1949.
- Г. А. Воробьев. ЖЭТФ, т. 30, вып. 2, 1956.
- В. С. Комельков. ДАН СССР, 47, № 4, 1945.
- В. С. Комельков. ДАН СССР, ЖТФ, т. 31, вып. 8, 1961.
- Boylett F. D. A., Edwards H. G. J., Williams B. G., «Nature» (engl.), 207, № 5001, 1086, 1965.
- Г. А. Воробьев. Изв. ТПИ, т. 91, Томск, 1956.
- Keller K. J., Physica, XVII, № 5, p 511—530, 1951.
- Vepmer J., Physica, XX, № 6, p. 313, 1954.