

ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Д. Д. РУМЯНЦЕВ

Представлена научным семинаром кафедры Т В Н

Для увеличения электрической прочности изоляционных конструкций широко применяются барьеры. Наличие барьеров в разрядном промежутке в жидких диэлектриках и воздухе приводит к значительному увеличению пробивных напряжений [1 — 3]. Установлено, что барьерный эффект наблюдается и в твердых диэлектриках [4 — 6].

Показано [5], что барьеры из гетинакса и текстолита в чистом парафине и кабельной массе МК-45 повышают пробивное напряжение до 160—170%. Барьеры из полиэтиленовой и триацетатной пленок в целлулоиде и каменной соли [6] увеличивают пробивное напряжение образцов на 10—70% по отношению к пробивному напряжению без барьера при воздействии постоянного, переменного и импульсного напряжений.

Данная работа ставит своей задачей выявить наличие барьерного эффекта в сложном диэлектрике, каким является бумажно-масляная изоляция, и получить качественные зависимости изменения $U_{пр}$ бумажно-масляной изоляции при наличии тонких высокопрочных барьеров.

ЧАСТЬ I.

Исследовалось влияние барьеров на кратковременное пробивное напряжение бумажно-масляной изоляции в резко неравномерном поле электродов «острие-плоскость».

Исследования проводились на импульсном напряжении при положительной и отрицательной полярности импульса и на переменном напряжении промышленной частоты. Источником импульсного напряжения служил ГИН на 1000 кВ с емкостью в разряде 0,022 мкФ. Длина фронта импульса изменялась от $0,5 \cdot 10^{-6}$ сек до 10^{-5} сек. Пробой происходил всегда на фронте импульса. Напряжение на образце измерялось с помощью осциллографа ОК-19М.

Источником переменного напряжения служил испытательный трансформатор на 150 кВ. Напряжение повышалось плавно до пробоя. Скорость подъема напряжения составляла 5 кВ/сек.

Образцы набирались из листов кабельной бумаги толщиной 0,12 мм. Бумага пропитывалась чистым трансформаторным маслом без вакуумировки и сушки. Листы размером 20×20 см накладывались друг на друга, образуя «пакет». Пакет состоял из 20 листов в экспериментах на импульсном напряжении, из 15 — на переменном. Образец зажимался в изоляционную рамку, чем обеспечивалась одинаковая толщина прослоек масла. Чтобы уменьшить вероятность воздушных включений между листами, операция сборки образца осуществлялась под маслом.

Барьер помещался между листами. В качестве барьеров использовались пленки из полиэтилена, полистирола и фторопласта — 4. Толщина пленок составляла 25 — 30 мк.

На каждую точку производилось 15 — 25 пробоев. Перекрытые или частично перекрытые образцы отбраковывались. Повышение пробивного напряжения подсчитывалось по формуле:

$$\Delta U = \frac{U_6 - U_0}{U_0},$$

где

U_6 — пробивное напряжение образца с барьером,

U_0 — пробивное напряжение образца без барьера, подсчитанные как среднее арифметическое из ряда измерений.

Ниже приведены некоторые характерные зависимости, полученные в экспериментах.

На рис. 1 представлена зависимость повышения $U_{пр}$ пакета кабельной бумаги от расположения барьера из фторопласта — 4. Как следует из рисунка, наибольшее увеличение $U_{пр}$ наблюдается при

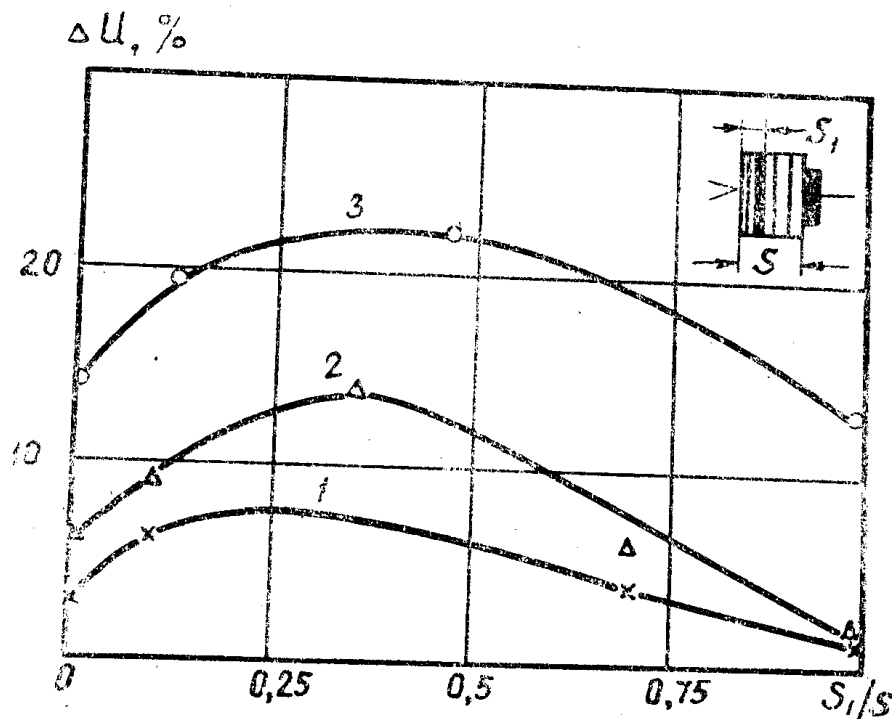


Рис. 1. Влияние положения барьера на пробивное напряжение пакета кабельной бумаги. Импульсы положительной полярности.

1, — $\tau_{фр} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ сек, 2 — $\tau_{фр} = 10^{-5}$ сек,
3 — переменное напряжение 50 гц.

расположении барьера на 0,2 — 0,4 толщины образца от острия на импульсном напряжении; на переменном напряжении — близко к середине образца. Влияние барьера более существенно на импульсах большей длительности. Зависимость, аналогичная кривым 1 и 2 (рис. 1), полученная при длине фронта импульса $3 \cdot 10^{-6}$ сек, занимает промежуточное положение между кривыми 1 и 2.

Исследование влияния барьера на $U_{пр}$ при положительных и отрицательных импульсах позволило установить, что полярность импульса при временах 10^{-5} сек и менее не имеет существенного значения. Однако, когда барьер располагается вплотную к острию, небольшое упрочнение наблюдается при положительной полярности импульса и не наблюдается при отрицательной полярности.

Изменение $U_{пр}$ пакета в зависимости от расположения барьера из различных материалов представлено на рис. 2. Максимальное повышение $U_{пр}$ (на 16%) наблюдается при расположении барьера из полистирола (3) на 0,1 толщины образца. Барьеры из фторопласта (2) и полиэтилена (1) дают повышение $U_{пр}$ на 12% и 10% соответственно.

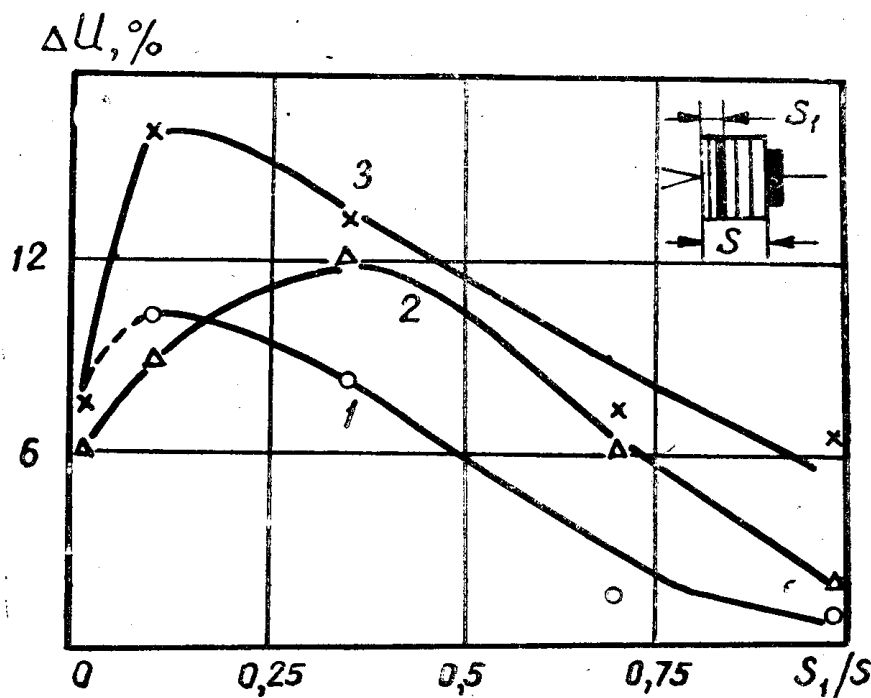


Рис. 2. Влияние положения барьера на пробивное напряжение пакета кабельной бумаги. Импульсы положительной полярности, $\tau_{фр} = 10^{-5}$ сек. Материал барьера: 1 — полиэтилен, 2 — фторопласт-4, 3 — полистирол.

В таблице 1 приведены данные по электрической прочности барьеров в поле электродов «острие-плоскость».

Поскольку прочность самого барьера невелика по отношению к прочности пакета (табл. 1) и прочность образца с барьером значительно выше, чем суммарная прочность отдельно образца и барьера, то можно говорить о «барьерном эффекте» в бумажно-масляной изоляции. Исходя из полученных результатов (рис. 2, табл. 1), можно заключить, что барьерный эффект в бумажно-масляной изоляции выше при наличии барьеров с большим $U_{пр}$.

Т а б л и ц а 1

Материал	Вид напряжения	Число слоев	$U_{пр}(кв)$
1. Кабельная бумага, пропитанная трансформат. маслом (пакет)	имп.	20	295
	перем.	15	97
	имп.	5	40
2. Фторопласт-4	перем.	1	5—6
	имп.	5	30
3. Полиэтилен	перем.	1	3,5—4,5
	имп.	5	40
4. Полистирол	перем.	1	5—6

Представляло интерес исследовать влияние двух барьеров на $U_{пр}$ пакета кабельной бумаги. В таблице 2 приведены результаты экспериментов.

Т а б л и ц а 2

Условия эксперимента	Расположение барьеров S_1/S		$\Delta U, \%$
	1 барьер	2 барьер	
Импульсы положительной полярности с длиной фронта 10^{-5} сек, число листов в пакете — 20; материал барьеров — полистирол	0,1	0,1	18
	0,1	0,35	30
	0,35	0,35	15
	0,35	0,7	13

Как видно из таблицы 2, максимальное увеличение $U_{пр}$ (до 130%) наблюдается при расположении барьеров на 0,1 и 0,35 толщины образца. Другие комбинации расположения барьеров дают меньшее повышение $U_{пр}$.

ЧАСТЬ II.

Экспериментальные результаты, приведенные в ч. 1, показывают, что барьеры из тонких высокопрочных пленок значительно увеличивают кратковременное пробивное напряжение бумажно-масляной изоляции.

Для выяснения возможности практического применения этого явления проведены эксперименты по исследованию влияния барьеров из полиэтиленовой пленки на прочность бумажно-масляной изоляции в неравномерном поле электродов «диск-плоскость». Эксперименты проводились на переменном напряжении промышленной частоты. Источником высокого напряжения служил испытательный трансформатор на 150 кВ.

Высоковольтным электродом служил латунный диск с острыми краями диаметром 40 мм. Заземленным электродом служила алюминиевая фольга, вырезанная в форме круга диаметром 120 мм. При исследовании влияния барьеров на электрическую прочность бумажно-масляной изоляции в равномерном поле электродами служили плоскость с закругленными краями диаметром 40 мм и лист фольги размером, превышающим размер образца.

Образцы готовились описанным выше способом. Число листов бумаги в образце — 12. Часть образцов была приготовлена из высушенной и пропитанной под вакуумом кабельной бумаги. Образцы сушились и пропитывались при остаточном давлении 1 мм рт. ст. Температура сушки образцов — 100—110°C, температура пропитки — 55—65°C [7].

В качестве барьера использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 40—50 мк. Полиэтилен был выбран нами из соображений, что он обладает большей термической стойкостью по сравнению с полистиролом, что важно при подсушке и пропитке. По сравнению с фторопластом-4, полиэтилен значительно дешевле, менее дефицитен и может быть изготовлен в виде рулонов пленки практически неограниченной ширины.

Барьер располагался между листами бумаги через 4 листа от высоковольтного электрода. В экспериментах с двумя барьерами первый располагался через 2 листа от высоковольтного электрода, второй — через 4. В опытах с 3 и 4 барьерами они располагались через 2, 4, 8 и 2, 4, 6, 9 листов соответственно.

Подаваемое на образец напряжение поднималось со скоростью 6,5—7 кВ/сек до 0,75 предполагаемого $U_{пр}$, а затем до пробоя со скоростью 1,5—2 кВ/сек, что составляло 2—2,5% $U_{пр}$ в секунду.

При исследовании влияния устойчивой ионизации на барьерный эффект в бумажно-масляной изоляции под напряжение ставилось одновременно по 6 образцов с барьером и без барьера. Величина напряженности, при которой возникает устойчивая ионизация, рассчитывалась по формуле, данной в [8], и равнялась 14,6 кВ/мм.

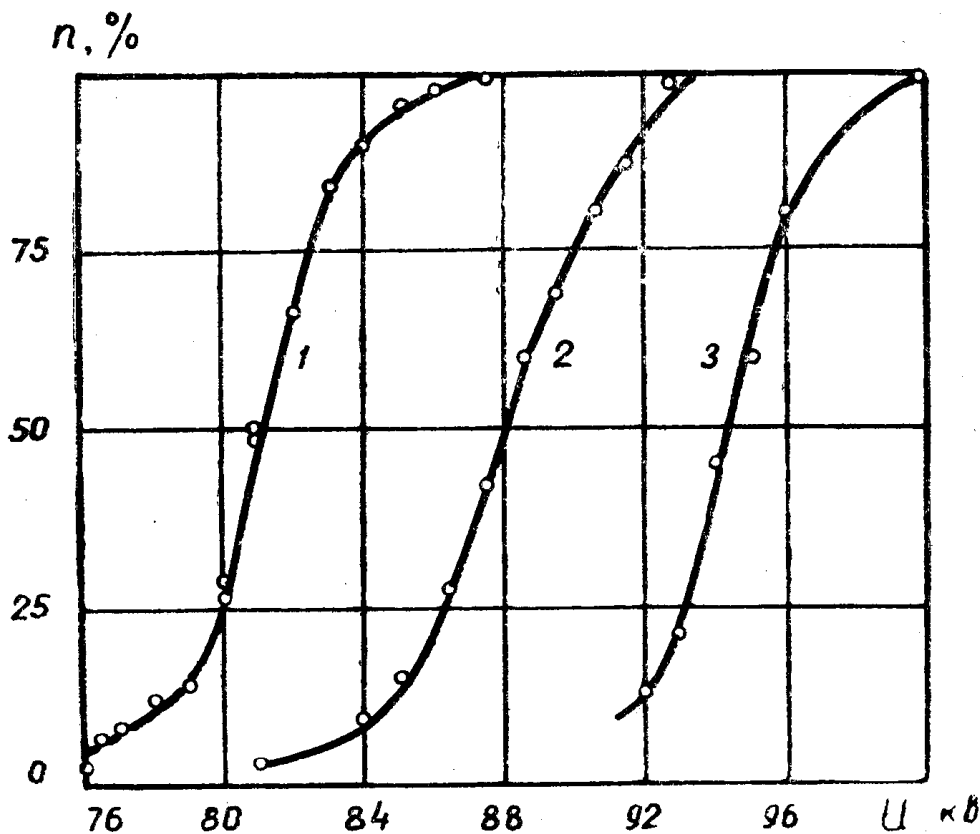


Рис. 3. Интегральные функции распределения образцов по $U_{пр}$.
1 — без барьера, 2 — с одним барьером, 3 — с двумя барьерами.

В [8] указывается, что напряженность возникновения устойчивой ионизации в бумажно-масляной изоляции значительно ниже, если пропитка производилась при остаточном давлении 200 мм рт. ст. и выше. В данных опытах образцы пропитывались без вакуума, и следовательно, при напряженности 14,6 кВ/мм устойчивая ионизация была гарантирована.

По истечении 120 минут или 480 минут напряжение отключалось, а затем определялось кратковременное $U_{пр}$ по обычной методике.

Для измерения времени до пробоя (τ) напряжение быстро поднималось до $0.6 U_{пр}$ образцов без барьера и сохранялось неизменным до пробоя.

При определении интегральных функций распределения образцов по $U_{пр}$ и τ пробивалось по 30—60 образцов. В остальных экспериментах на каждую точку пробивалось 12—15 образцов. Погрешность измерения напряжения составляла 2%.

Ниже приведены результаты экспериментов.

На рис. 3 представлены интегральные функции распределения образцов без барьера (1), с одним (2) и двумя (3) барьерами по величине кратковременного $U_{пр}$. Как видно из рис. 3, при 50% вероятности пробоя один барьер увеличивает $U_{пр}$ на 9%, а два — на 17% по отношению к $U_{пр}$ без барьера.

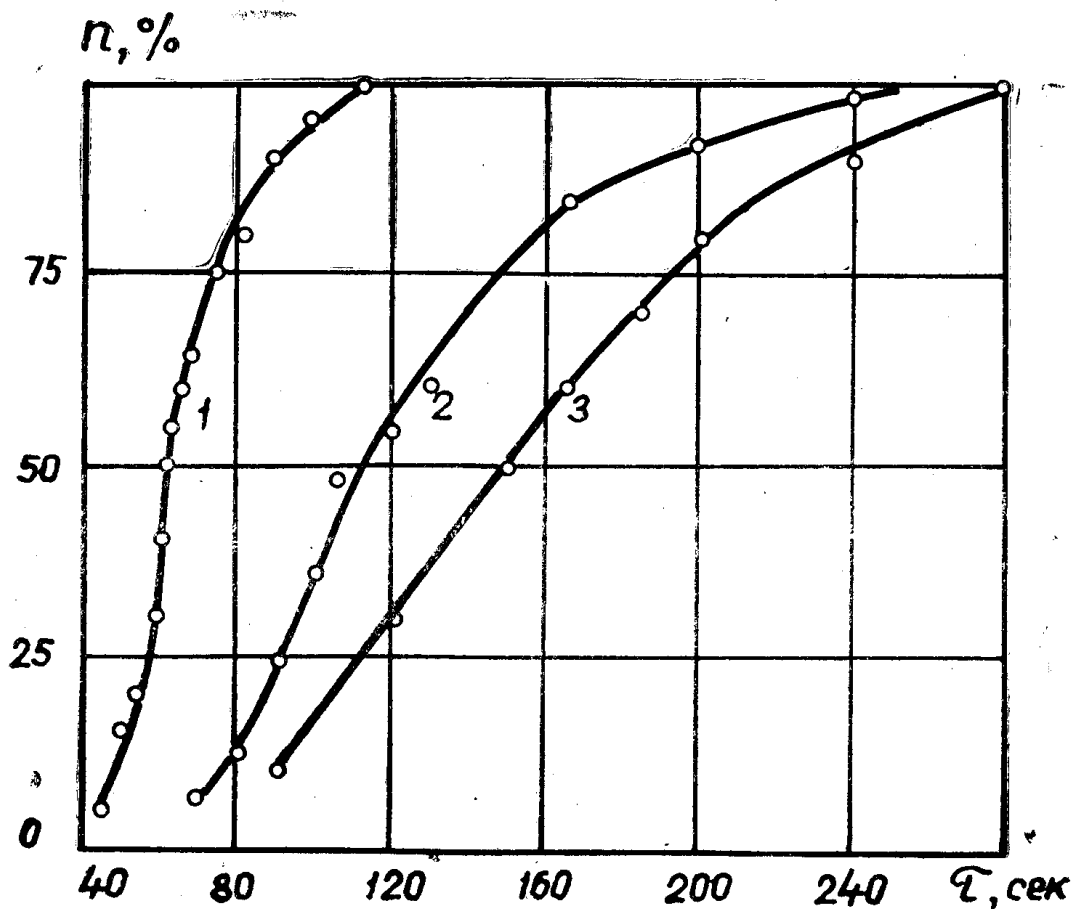


Рис. 4. Интегральные функции распределения образцов по τ .
1 — без барьера, 2 — с одним барьером, 3 — с двумя барьерами.

На рис. 4 приведены интегральные функции распределения образцов по времени до пробоя (τ) при напряжении, равном $0,6 U_{пр}$. Из рисунка следует, что образцы с барьером (2) имеют τ в 2 раза, а с двумя барьерами (3) в 2,5 раза выше, чем образцы без барьера (1). Следует отметить, что при наличии барьеров разброс значений по τ значительно выше, чем по $U_{пр}$.

На рис. 5 приведены зависимости $U_{пр}$ от числа барьеров при неизменном числе листов (1) и от числа листов (2) в образце. Как видно из рис. 5, два барьера увеличивают $U_{пр}$ на 17%, тогда как при увеличении числа листов бумаги в образце с 12 до 15 $U_{пр}$ возрастает на 13%. Очевидно, что для увеличения $U_{пр}$ при ограничении в толщине изоляции целесообразно применение барьеров.

В таблице 3 приведены данные по исследованию барьерного эффекта в бумажно-масляной изоляции в различных условиях.

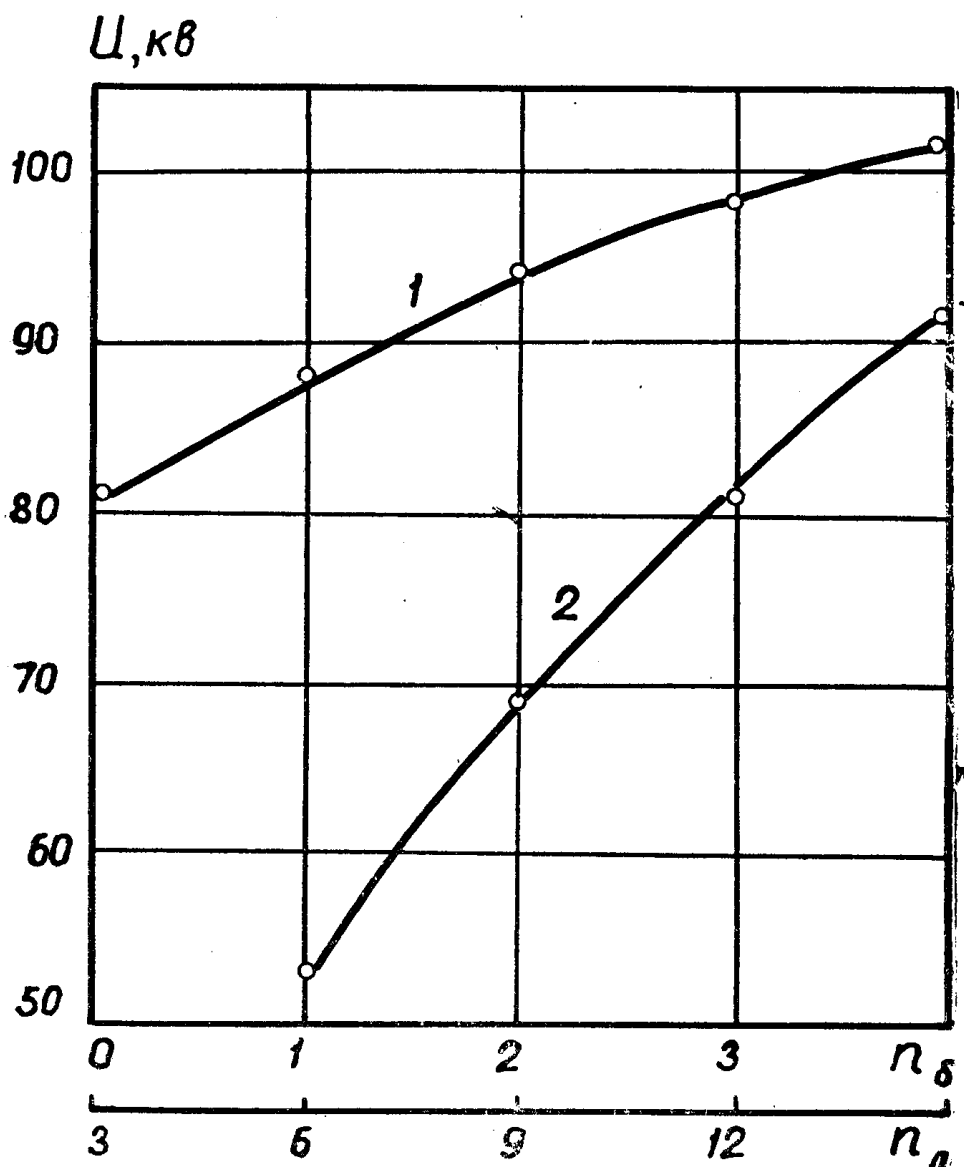


Рис. 5. Влияние числа барьеров и числа листов на $U_{пр}$ пакета кабельной бумаги. 1—влияние числа барьеров (в образце 12 листов), 2— влияние числа листов (образцы без барьера).

Таблица 3

Условия эксперимента		Неравномерное поле	Старение $T=120$ мин.	Старение $T=480$ мин.	Равномерное поле	Сушка и пропитка под вакуумом
Образцы без барьера	$U, кВ$	81,1	81,1	81,2	90,3	103,2
Барьер из полиэтиленовой пленки	$U, кВ$	88,4	88,6	88,4	98,7	113,0
Повышение $U_{пр}$	$\Delta U, \%$	9,0	9,3	9,0	9,4	9,5

Как следует из таблицы 3, увеличение $U_{пр}$ за счет барьера наблюдается: в равномерном и неравномерном поле; при наличии устойчивой ионизации в течение 480 минут; в образцах, пропитанных под вакуумом.

Известно, что полимерные пленки обладают слабой короностойкостью. Однако в [9] показано, что кратковременное $U_{пр}$ сохраняется неизменным до 0,75 τ . Следовательно, барьеры из полимерных пленок должны повышать $U_{пр}$ в случае кратковременного существования ионизации в бумажно-масляной изоляции. Это подтверждается нашими экспериментами.

Поскольку в бумажно-масляной изоляции недопустимо длительное существование ионизации, можно говорить о практическом применении пленочных барьеров в бумажно-масляной изоляции. О возможности практического применения барьеров в бумажно-масляной изоляции говорит и то, что барьеры увеличивают $U_{пр}$ в равномерном и неравномерном полях, в пропитанной под вакуумом изоляции.

ВЫВОДЫ

1. В бумажно-масляной изоляции при наличии барьеров из высокопрочных пленок (полиэтилен, фторопласт-4, полистирол) наблюдается повышение $U_{пр}$ на 10—20% на импульсном и переменном напряжении.
2. Максимальное упрочнение барьер оказывает при расположении на 0,1—0,4 толщины образца от высоковольтного электрода.
3. Повышение $U_{пр}$ при наличии барьера из полиэтиленовой пленки наблюдается в равномерном и неравномерном поле.
4. Барьеры из полиэтиленовой пленки повышают $U_{пр}$ при наличии устойчивой ионизации в бумажно-масляной изоляции.
5. Повышение $U_{пр}$ бумажно-масляной изоляции при помощи пленочных барьеров может найти применение при конструировании высоковольтной изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волощенко Н. Ф. «Электричество», 3, 21, 1946.
2. Комельков В. С., Лифшиц А. М. «Изв. АН СССР» 10, 39, 1950.
3. Шилван А. А. Тр. ЛПИ, 1, 300, 1954.
4. Леонтьев Ю. Н., Торбин Н. М. «Изв. вузов «Энергетика», 12, 34, 1961.
5. Митов Б. Годишник машиноэлектротехн. ин-т, 6, 2, 27, 1959 (Болг.).

6. Румянцев Д. Д., Торбин Н. М. «Пробой диэлектриков и полупроводников». Сб. докладов IV Межвузовской конференции, 170, 1964.
7. Грейсух М. А., Кучинский Г. С. и др. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях, ГЭИ, 1963.
8. Кучинский Г. С., Каплан Д. А., Тихонова О. В. «Изв. вузов «Энергетика», 8, 39, 1959.
9. Койков С. Н., Платонов М. П., Цигин А. Н. Тр. конф. «Ионизационное старение, короностойкость», 27, ЦИНТИЭП, 1963.