

На правах рукописи

ЧИЧИКИН Валерий Иосифович

БАРЬЕРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Томск – 2001

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте высоких напряжений (НИИВН) при Томском политехническом университете (ТПУ)

Научный руководитель: Похолков Юрий Петрович
д.т.н., профессор

Научный консультант: Лебедев Сергей Михайлович
к.т.н., ст. науч. сотрудник

Официальные оппоненты: Усов Юрий Петрович
д.т.н., профессор

Важов Владислав Федорович
к.т.н., доцент

Ведущая организация: Институт общей физики РАН
г. Москва

Защита состоится 27 сентября 2001 года на заседании диссертационного совета К212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 18 июля 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Соловьев М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Под барьерным эффектом обычно понимают значительное повышение пробивного напряжения или времени до пробоя изоляционного промежутка, в котором помещен дополнительный диэлектрический слой - барьер. Барьерный эффект известен уже более 75 лет, однако, несмотря на широкое применение его в высоковольтной технике объяснение механизма этого эффекта до сих пор находится на уровне противоречивых полуэмпирических моделей. Практически ни в одной из многочисленных работ, посвященных исследованию или применению барьерного эффекта в твердых диэлектриках, не делается попытка объяснения наличия оптимума в зависимостях пробивного напряжения или времени до пробоя от местоположения барьера в промежутке. Этому факту либо вообще не уделяется внимания, либо он принимается как известный факт, без попытки объяснения физики этого интереснейшего феномена. До настоящего времени нет ответа на вопрос о роли каждого из многочисленных, факторов, таких как влияние объемного заряда, удлинение пути разрядного канала, механические и электрофизические характеристики барьера, неоднородная поляризация и т.д., в пробое промежутка с барьером. Отсутствие корректной физической модели и недостаточность экспериментальных данных о влиянии местоположения границ раздела и электрофизических характеристик барьера на кратковременную и длительную электрическую прочность твердых диэлектриков в квазиоднородном и слабонеоднородном поле не позволяет обоснованно подходить к проектированию изоляции высоковольтных конструкций с небольшим коэффициентом неоднородности внешнего электрического поля, в частности, высоковольтных кабелей.

В этой связи изучение механизма барьерного эффекта в двух- и трехслойных твердых диэлектриках является актуальной задачей как с научной точки зрения, для дальнейшего изучения физики пробоя комбинированной многослойной изоляции, так и с точки зрения его практического применения, для корректного подхода к конструированию барьерной электрической изоляции.

Целью работы являлось исследование влияния различных факторов на время до зарождения дендритов в резконеоднородном электрическом поле и на кратковременную электрическую прочность двух- и трехслойных твердых диэлектриков в слабонеоднородном и квазиоднородном внешнем электрическом поле.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие задачи:

- исследовать влияние барьеров на время до зарождения дендритов в резконеоднородном электрическом поле;
- исследовать влияние местоположения границ раздела слоев и электрофизических характеристик материала барьера на кратковременную электрическую прочность двух- и трехслойных диэлектриков в квазиоднородном электрическом поле;
- исследовать влияние поляризации на барьерный эффект в диэлектриках;
- исследовать корреляционную связь между электрической прочностью

- трехслойных систем изоляции и длиной разрядных каналов;
- разработать и исследовать основные свойства новых композиционных материалов с заданными электрофизическими характеристиками;
- на основании проведенных исследований сформулировать основные практические рекомендации по проектированию высоковольтных устройств с барьерной изоляцией.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые показано, что независимо от конфигурации внешнего электрического поля оптимальное местоположение барьера в изоляционном промежутке определяется "геометрическим" или размерным фактором; экстремальный характер изменения электрической прочности, пробивного напряжения, времени до зарождения дендритов и времени до пробоя при оптимальном местоположении барьера обусловлен наличием минимума локального коэффициента неоднородности поля в промежутке;
- впервые экспериментально установлено, что в квазиоднородном внешнем электрическом поле удлинение пути разрядного канала в многослойных диэлектриках не является определяющим фактором в барьерном эффекте; обнаружена корреляционная связь между длиной разрядных каналов и величиной удельной энергии, запасаемой в первом изоляционном слое;
- впервые экспериментально доказано, что барьерный эффект зависит не только от соотношения диэлектрических проницаемостей и проводимостей материалов основной изоляции и барьера, но и от степени неоднородности композиционного материала с высокой диэлектрической проницаемостью; установлено, что зарождение и развитие каналов неполного пробоя происходит в условиях резконеоднородного поля за счет наличия локальных очагов усиления электрического поля в неоднородных диэлектриках;
- экспериментально показано, что доминирующую роль в барьерном эффекте играет неоднородная поляризация.

Практическая значимость работы:

- сформулированы практические рекомендации по проектированию изоляционных конструкций с барьером для оптимального выбора таких параметров, как местоположение барьера в межэлектродном промежутке, соотношение диэлектрических проницаемостей и проводимостей основного изоляционного и барьерного материалов и выбора рабочей напряженности с учетом перераспределения электрического поля по диэлектрическим проницаемостям слоев и зависимости их электрической прочности от толщины;
- сформулированы основные требования к электрофизическим характеристикам материала барьерного слоя;
- разработаны новые композиционные материалы для барьерного слоя. Результаты исследований' были использованы при выполнении работ по проекту № 015.01.01.39 научной программы Министерства образования РФ "Фундаментальные исследования высшей школы в области естественных и гуманитарных наук. Университеты России", а также при разработке новых видов кабельных изделий в ЗАО "Сибкабель" г.Томск.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались и

докладывались на четырех Российских и пяти Международных конференциях, а также на научных семинарах НИИ ВН при ТПУ и кафедры Электроизоляционной и кабельной техники ТПУ.

Публикации. По теме диссертационной работе опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (94 наименования) и приложения. Диссертация выполнена на 161 странице машинописного текста, содержит 62 рисунка и 37 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, дано краткое описание работы.

В первой главе приведен литературный обзор работ, посвященных исследованию барьерного эффекта в газах, жидкостях и твердых диэлектриках. Проведенный анализ экспериментальных работ за последние 70 лет позволил сделать следующие выводы:

- барьерный эффект является устойчивым явлением, так как наблюдается в газообразных, жидких и твердых диэлектриках независимо от рода воздействующего напряжения (постоянное, переменное, импульсное), формы электродов и расстояния между ними (миллиметровый, сантиметровой, дециметровый диапазон);
- максимальный эффект от применения барьеров наблюдается, как правило, при оптимальном местоположении барьера $\xi \approx 0.25 \pm 0.05$ ($\xi = d_1/d$, где d_1 - расстояние между высоковольтным электродом и барьером, d - общее межэлектродное расстояние);
- описание природы явления находится на уровне противоречивых гипотез.

Барьерный эффект связывается с перераспределением поля за счет влияния объемного заряда, поляризационных процессов, высокой электрической прочностью барьера или действием барьера как преграды для развития канала пробоя. При этом в большинстве работ повышение пробивного напряжения или времени до пробоя изоляционных промежутков с барьерами связывается, в основном, с увеличением времени развития разрядных каналов за счет искривления их траектории. Однако, несмотря на большое количество экспериментальных работ до сих пор не ясно:

- почему независимо от размера промежутка и конфигурации электродов максимум пробивного напряжения наблюдается тогда, когда относительно высоковольтного электрода барьер размещается на расстоянии, составляющем 15-30% от общего межэлектродного расстояния;
- в чем заключается общность явления повышения пробивного напряжения газообразных, жидких и твердых диэлектриков с барьерами;
- какой из многочисленных факторов (объемный заряд, поляризационные процессы, электрическая прочность барьера, искривление траектории раз-

рядного канала) является определяющим в барьерном эффекте.

На основании литературного обзора сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных результатов исследования характеристик дендритообразования твердых диэлектриков в резконеоднородном внешнем электрическом поле и особенностей развития разряда в квазиоднородном поле в зависимости от местоположения и характеристик материала барьера.

Исследование влияния барьеров на процесс дендритообразования в полиметилметакрилате (ПММА) в системе электродов острие-плоскость осуществлялось с помощью оптической системы регистрации. В качестве электрода-острия применялись стальные иглы с радиусом закругления острия 12.5 и 16.5 мкм. Расстояние между электродами составляло $d=8$ мм. Барьерный слой толщиной около 1 мм изготавливался из эпоксидного компаунда, наполненного сегнетоэлектрической керамикой ЦТС-19 или из полиимидной пленки толщиной 25 мкм. Положение барьера в изоляционном промежутке острие-плоскость (ξ) изменялось от 0.1 до 0.5. Отношение диэлектрических проницаемостей ($\Psi = \epsilon_{\sigma} / \epsilon_{\text{он}}$) и проводимостей ($\Psi' = \gamma_6 / \gamma_{\text{он}}$) материала барьера и основного изоляционного материала изменялось от 1 до 20 и от 13 до 112, соответственно. Для снятия остаточных механических напряжений все образцы перед испытаниями подвергались длительному отжигу.

Известно, что в отличие от времени развития дендрита (τ_p), которое определяется средней напряженностью и максимальным коэффициентом неоднородности поля, время до зарождения дендритов (τ_3) зависит не только от максимальной напряженности поля (E_m), но и от скорости убывания напряженности поля вблизи острия. То есть, τ_3 является функцией локального коэффициента неоднородности поля, который можно определить по формуле:

$$K_l = \frac{E_m}{E_{cp.l}} = \frac{2l}{r \cdot \ln[(2l/r) + 1]}, \quad (1)$$

где E_m - максимальная напряженность поля на острие; $E_{cp.l}$ - средняя напряженность поля, достаточная для пробоя локального участка изоляции длиной l ; l - длина дендрита в момент его зарождения; r - радиус закругления острия. Величина $E_{cp.l}$ связана с E_m соотношением:

$$E_{cp.l} = \frac{r \cdot E_m}{2l} \ln \frac{2l + r}{r}, \quad (2)$$

В данном разделе работы была поставлена задача исследовать влияние местоположения барьера ξ , а также соотношения диэлектрической проницаемости Ψ и проводимости Ψ' изоляционного и барьерного слоев на характеристики дендритообразования с целью установления основных зако-

номерностей изменения $\tau_3, l, K_l = f(\xi, \Psi, \Psi')$.

Установлено, что зависимости времени до зарождения дендритов, длины дендрита и локального коэффициента неоднородности поля от местоположения барьера τ_3, l и $K_l = f(\xi)$ имеют экстремальный характер при $\xi \approx 0.25$ (рис.1), причем с ростом Ψ и Ψ' этот эффект увеличивается и при $\xi \approx 0.25, \psi = 19.4$ и $\psi' = 112$ увеличение τ_3 по сравнению с ПММА без барьера составляет 13 раз. Показано, что с ростом Ψ и Ψ' зависимости $\tau_3 = f(\Psi, \Psi')$ имеют тенденцию к насыщению. Однако наиболее интересными здесь являются следующие экспериментальные факты:

- независимо от материала барьера и его параметров максимум функций $\tau_3 = f(\xi)$ совпадает с минимумом функций $l = f(\xi)$ и $K_l = f(\xi)$ при этом средние значения длины дендритов в области малой вероятности $P \leq 0.3 \div 0.4$ примерно в 2-3 раза больше, чем при $P \geq 0.632$;
- изменение соотношений диэлектрической проницаемости Ψ и проводимости Ψ' изоляционного и барьерного слоев практически не влияет на оптимальное местоположение барьера ($\xi \approx 0.25 \pm 0.05$), а сказывается лишь на абсолютной величине τ_3, l, K_l ;
- независимо от ξ, Ψ, Ψ' между $lg\tau_3$ и lgK_l наблюдается устойчивая корреляционная связь (значения коэффициентов корреляции находятся в пределах от -0.9 до -0.999), однако зависимости $lg\tau_3 = f(lgK_l)$ при вероятностях $P =$

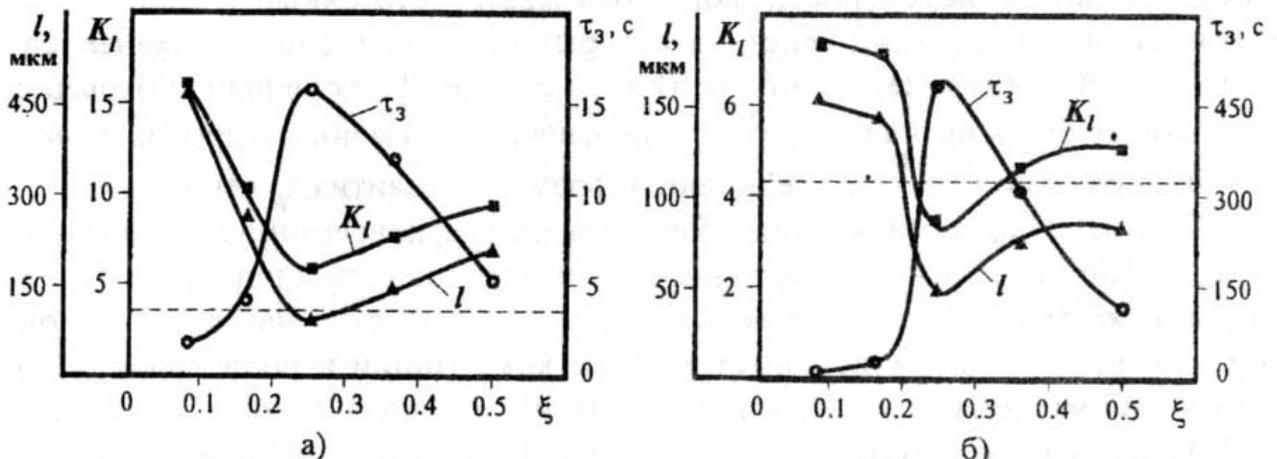


Рис.1. Зависимости времени до зарождения дендритов τ_3 , длины дендрита l и локального коэффициента неоднородности K_l от ξ при вероятностях $P = 0.05$ (а) и 0.632 (б) ($\psi = 8.3, \psi' = 24.5$); пунктирной линией показано время до зарождения дендритов в образцах без барьера.

0.05 и 0.632 имеют разный угол наклона.

Обнаруженная корреляционная связь позволила предположить, что экстремальный характер изменения зависимости $\tau_3 = f(\xi)$ обусловлен "геометрическим" или размерным фактором. Для проверки этого предположения был найден минимум функции локального коэффициента неоднородности поля в зависимости от ξ для промежутка гиперболоид вращения-плоскость. Установлено, что $K_l = f(\xi)$ имеет минимальное значение при $\xi \approx 0.255$, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При этом роль диэлектрических барьеров может сводиться к тому, что вследствие перераспределения поля в изоляционном промежутке локальный коэффициент неоднородности поля при $\xi \approx 0.25$ уменьшается, поскольку, чем больше соотношение диэлектрических проницаемостей материала барьера и основной изоляции, тем меньше локальный коэффициент неоднородности поля. С другой стороны, применение барьера с повышенной ϵ приводит к увеличению средней напряженности поля в изоляционных слоях вдоль оси острия и росту объемной плотности инжектированного заряда из электрода с малым радиусом закругления. За счет экранирующего действия объемного заряда увеличивается эффективный радиус острейного электрода, что приводит к повышению напряжения начала ионизационных процессов и уменьшению их интенсивности.

При оценке влияния параметров барьера на время до зарождения дендритов в области малых вероятностей установлено, что зависимости $\tau_3 = f(\Psi, \Psi')$ при оптимальном положении барьера имеют тенденцию к насыщению. Это может быть обусловлено повышением проводимости материала барьера с ростом его диэлектрической проницаемости и запаздыванием установления поляризации в барьерном слое по отношению к внешнему полю.

Показано, что значительное влияние на время до зарождения дендрита в области малой вероятности могут оказывать остаточные механические напряжения направление действия которых совпадает с направлением силовых линий электрического поля. В этом случае эффект влияния барьеров на τ_3 может стать незначительным и повышение времени до пробоя $\tau_{пр}$ может быть связано только с увеличением времени развития τ_p дендритов.

При исследовании влияния барьеров на кратковременную электрическую прочность двух- и трехслойных диэлектриков в квазиоднородном поле (система электродов плоскость-плоскость) в качестве материала основной изоляции применялись эластомерные композиции и полиэтилен (ПЭ). В качестве материала барьера использовались композиционные материалы (КПМ) на основе эластомеров и ПЭ, наполненные порошком керамики ЦТС-19, а также ненаполненные материалы - смеси ПЭ и хлорпарафина, хлорсульфополиэтилена, СКН26+ПВХ30.

Установлено, что зависимости $E_{np} = f(\xi)$ как и $\tau_3 = f(\xi)$ имеют экстремум при оптимальном положении барьера ($\xi \approx 0.25 + 0.05$). При этом увеличение электрической прочности тем больше, чем выше соотношение диэлектрических проницаемостей материалов.

По мнению ряда авторов барьерный эффект обусловлен увеличением длины разрядного канала L_K . Для проверки этой гипотезы были проведены исследования, результаты которых приведены в табл.1 в относительных единицах. Здесь $K_1 = E_{np\sigma} / E_{np0}$ - отношение электрической прочности образцов с барьерами к электрической прочности образцов без барьера, а $K_2 = L_{K\sigma} / L_{K0}$ - отношение длины разрядных каналов образцов с барьерами к длине разрядных каналов образцов без барьера.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1 показывает, что при фиксированном местоположении барьера ($\xi = \text{const}$) повышение соотношения Ψ от 1.5 до 5.7 приводит к увеличению как K_1 (или E_{np}), так и K_2 (или $L_{K\sigma}$). Это свидетельствует о повышении эффективности удержания разрядных каналов в барьерном слое вследствие увеличения поверхностной плотности заряда на границах раздела слоев, величина которой пропорциональна поляризации этого слоя.

Таблица 1

Результаты определения средних значений K_1 и K_2
для трехслойных образцов на основе ПЭНП

ξ	Ψ					
	1.5		3.4		5.7	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
0.15	1.062	1.044	1.218	1.362	1.515	1.806
0.25	1.061	1.135	1.188	1.636	1.376	1.633
0.45	1.006	1.156	1.042	2.209	1.370	4.344

С другой стороны, для всех фиксированных значений Ψ с ростом ξ наблюдается тенденция к уменьшению K_1 (или E_{np}) и увеличению K_2 (или $L_{K\sigma}$). То есть, в последнем случае существует устойчивая обратная корреляционная связь между электрической прочностью и длиной разрядных каналов. Эти результаты привели нас к мысли о возможности существования корреляционной связи между величиной удельной энергии $W_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon E_m^2}{2} = \epsilon_0 \epsilon E_\delta^2$, запасаемой в первом изоляционном слое, и длиной разрядного канала L_K , где $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\epsilon = 2.3$ - электрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость ПЭ, соответственно, а E_m и E_δ - амплитудное и действующее значения напряженности поля в первом изоляционном слое.

Результаты расчета удельной запасаемой энергии W_3 и коэффициентов корреляции между W_3 и L_K приведены в табл.2. Видно, что при фиксированном Ψ длина разрядных каналов тем больше, чем меньше величина W_3 . Это может быть обусловлено тем, что с увеличением толщины первого изоляционного слоя или ξ и уменьшением энергии, выделяющейся в разрядном канале,

снижается скорость его роста, при этом проводимость канала неполного пробоя недостаточна для выноса потенциала с электрода в барьерный слой.

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между W_3 и средним значением L_k .

ψ	$W_3, 10^5 \text{ Дж/м}^3 \text{ при } \xi$			$L_k, \text{ мм при } \xi$			$\kappa (W_3, L_k)$
	0.15	0.25	0.45	0.15	0.25	0.45	
1.5	2.95	1.87	1.14	0.884	0.944	1.224	-0.97
3.4	2.94	1.92	1.07	0.918	0.986	1.284	-0.87
5.7	3.25	1.94	1.02	1.389	1.539	3.689	-0.85

Таким образом, впервые экспериментально доказано, что увеличение длины разрядного канала в трехслойных диэлектриках в квазиоднородном электрическом поле не является определяющим фактором в барьерном эффекте, так как время развития разрядного канала должно зависеть не только от способности границ раздела удерживать его в барьерном слое, но и от скорости роста канала разряда.

Установлено, что существенное влияние на барьерный эффект оказывает как толщина барьера, так и степень однородности материала барьера. Из рис.2 видно, что при толщине образцов менее 1 мм значительное влияние на величину E_{np} оказывает не только местоположение границы раздела между первым изоляционным слоем и барьером ξ , но и толщина барьера, которая учитывается безразмерным параметром $\xi'=(d_1+d_6)/d$, где d_1 , d_6 и d - толщина первого слоя, толщина барьера и общая толщина образца, соответственно. То есть, в тонкослойной изоляции максимальный эффект может быть достигнут при $\xi=\xi'\approx 0.25$ (пунктирная линия на рис.2б), когда толщина барьера стремится к нулю. Доказательством этого служат результаты, полученные при использовании в качестве барьера ненаполненного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью (хлор-парафина) толщиной около 1% от общей толщины изоляции. В этом случае увеличение E_{np} становится соизмеримым со случаем применения барьеров с большей диэлектрической проницаемостью (рис.3).

При исследовании трехслойных диэлектриков был обнаружен еще один интересный экспериментальный факт. При плавном подъеме напряжения до значений 80-95% от пробивного напряжения трехслойных диэлектриков в образцах с высокой концентрацией наполнителя наблюдались каналы неполного пробоя первого изоляционного слоя и так называемые фигуры Лихтенберга в барьерном слое. Причем, существенное влияние на образование каналов неполного пробоя оказывает как местоположение барьерного слоя, так

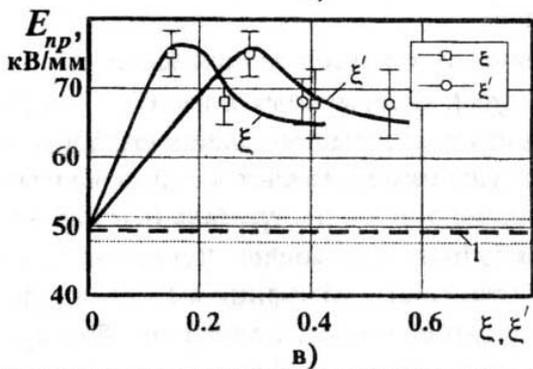
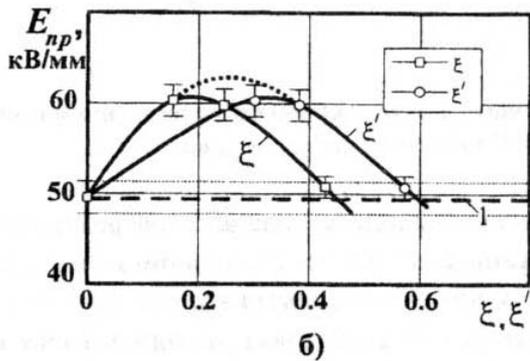
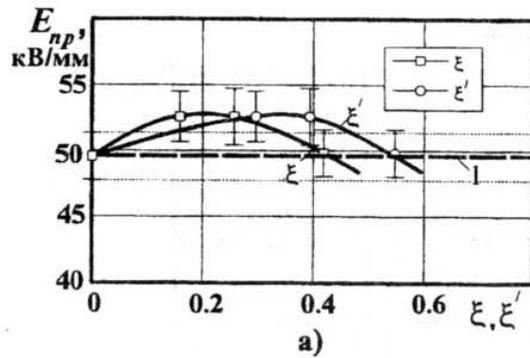


Рис.2. Зависимости E_{np} от местоположения границ раздела слоев ξ и ξ' для образцов без барьера (1) и с барьером при: а) $\psi=1.5$, б) $\psi=3.4$, в) $\psi=5.7$.

и диэлектрическая проницаемость барьера. Если в образцах с $\psi < 2$ каналы не были обнаружены вплоть до пробоя, то в образцах с большими значениями ψ • такие каналы наблюдались уже при $(0.8-0.9)U_{np}$. Каналы неполного пробоя наблюдались, как правило, вблизи края высоковольтного электрода и иногда их число увеличивалось до десяти. Мы связываем этот факт с неоднородностью материала барьера и искажением картины поля в диэлектрике. Доказательством этого являются результаты испытаний аналогичных образцов с барьером из ненаполненного материала- хлорпарафина, в которых каналов неполного пробоя не было зарегистрировано вплоть до пробоя. Эти результаты позволили сформулировать один из главных выводов о том, что общность явления, носящего название "барьерный эффект", заключается в идентичности процессов развития пробоя в диэлектриках с барьером независимо от конфигурации внешнего поля. Это обусловлено тем, что зарождение и развитие

канала неполного пробоя в неоднородных диэлектриках в сильном электрическом поле происходит в условиях резконеоднородного поля, за счет наличия локальных очагов усиления поля, в частности, краевого эффекта.

Третья глава посвящена изучению влияния поляризации на поведение неоднородных диэлектриков в электрическом поле. Экспериментально показано, что тангенс угла диэлектрических потерь в двух- и трехслойных диэлектриках при оптимальном положении барьера имеет минимальное значение. Наличие экстремума в зависимости $\text{tg}\delta = f(\xi)$ и сам факт уменьшения диэлектрических потерь в двух- и трехслойных диэлектриках невозможно

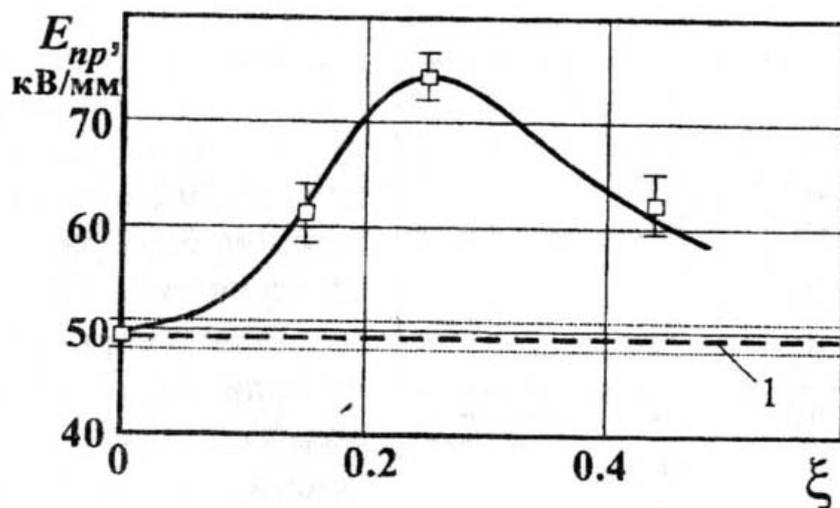


Рис.3. Зависимость электрической прочности от местоположения барьерного слоя для образцов без барьера (1) и с барьером из хлорпарафина ($\psi=4.8$).

объяснить с точки зрения классической модели расчета эффективных значений $\text{tg}\delta$ и диэлектрической проницаемости с использованием последовательной или параллельной схемы замещения диэлектрика, так как применение диэлектрического материала с высокой ϵ должно приводить только к увеличению эффективного значения $\text{tg}\delta$.

Следует отметить, что экстремальный характер зависимости $\text{tg}\delta$ от ξ коррелирует с зависимостями E_{np} , $\tau_3 = f(\xi)$. Если исходить из того, что разрушение диэлектрика в квазиоднородном внешнем, поле начинается в точке с максимальной напряженностью поля (например, за счет наличия краевого эффекта), то как и для резконеоднородного поля, экстремальный характер зависимостей $E_{np} = f(\xi)$ и $\text{tg}\delta = f(\xi)$ может быть обусловлен "геометрическим фактором", т.е. наличием минимума локального коэффициента неоднородности поля при $\xi \approx 0.25$. Так как при оптимальном расположении барьера с повышением ψ локальный коэффициент неоднородности поля уменьшается, то наличие минимума в зависимостях $\text{tg}\delta = f(\xi)$ может быть обусловлено снижением интенсивности ионизации и, соответственно, уменьшением потерь энергии в двух- и трехслойных диэлектриках, связанных с ионизационными процессами. В случае отклонения от оптимального значения ξ происходит увеличение напряженности поля в диэлектрике, увеличиваются диэлектрические потери и уменьшается электрическая прочность диэлектриков.

Кроме того, существенную роль в механизме барьерного эффекта могут играть поляризационные процессы. При этом барьерный эффект в многослойных диэлектриках может быть обусловлен особенностями формирования и релаксации двойного зарядового слоя на границе раздела слоев, где наблюдается резкое изменение диэлектрической проницаемости и/или проводимости.

Изучение неоднородной поляризации в многослойных диэлектриках особенно важно для случая, когда в качестве материала барьеров применяются композиционные материалы, наполненные сегнетоэлектрической керамикой, которая является нелинейным диэлектриком. Показано, что время установления и релаксации поляризации в таких высоконаполненных материалах значительно превышает время релаксации, рассчитанное по модели Максвелла-Вагнера, а значения диэлектрической проницаемости, $\text{tg}\delta$ и полной поляризации P_m резко возрастают при повышении напряженности внешнего электрического поля. Рост тангенса угла диэлектрических потерь может быть связан не только с ориентацией электрических моментов доменов, что требует значительных затрат энергии внешнего поля, но и с повышением проводимости композиционных материалов. Поскольку проводимость композиционных материалов пропорциональна концентрации свободных носителей заряда, то ее увеличение может быть обусловлено диссоциацией примесных молекул в местах локального усиления поля на границах раздела "полимер-наполнитель". Увеличение полной поляризации в области сильных полей ($E > 10^6$ кВ/мм) связано, по-видимому, с нелинейным характером изменения поляризации сегнетоэлектрического наполнителя, и запаздыванием изменения направления вектора поляризации при смене направления внешнего поля.

В работах ряда авторов показано, а в данной работе экспериментально подтверждено, что при $\Psi \geq 6 \div 8$ наблюдается эффект насыщения зависимости $E_{np} = f(\Psi)$ для трехслойных диэлектриков. Поэтому эффективность удержания разрядного канала в барьерном слое должна зависеть как от соотношения диэлектрических проницаемостей и/или проводимостей слоев, так и от времени установления поляризации в барьерном слое. Так как композиционные материалы содержат частицы сегнетоэлектрической керамики, для которой свойственны гистерезисные явления, то с ростом концентрации наполнителя наблюдается запаздывание установления поляризации, особенно при непрерывном подъеме напряжения. В свою очередь, остаточная поляризация может приводить к снижению поверхностной плотности заряда на границах раздела слоев, т.е. снижению эффективности удержания разрядного канала в барьерном слое. Поэтому эффективность удержания разрядного канала в барьерном слое должна зависеть не только от эффективной плотности поверхностного заряда, которая пропорциональна $\Delta q \sim \frac{P_m - P_{ост}}{P_m}$, где $P_{ост}$ -

остаточная поляризация, но и от времени релаксации заряда, которое пропорционально $\varepsilon \cdot \varepsilon / \gamma_a$ где $\gamma_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot \omega$ - активная составляющая проводимости. С повышением концентрации наполнителя вследствие запаздывания поляризации величина Δq уменьшается, а время релаксации растет. Оценить совместное влияние этих факторов мы попытались через коэффициент $A \sim \Delta q \cdot \tau_p$. Результаты расчета коэффициента A для КПМ на основе эластомеров с различной концентрацией наполнителя приведены на рис.4. Здесь же приведена зависимость E_{np} образцов с барьерами при $\xi \approx 0.25$. Видно, что характер зависимостей идентичен, причем коэффициент корреляции между этими величинами практически равен единице. Таким образом, при $C > 40$ об.%

гистерезисные явления в барьерном слое ограничивают эффект повышения $E_{пр}$ трехслойных диэлектриков. При этом в большей степени сказывается увеличение времени релаксации заряда, чем уменьшение Δq .

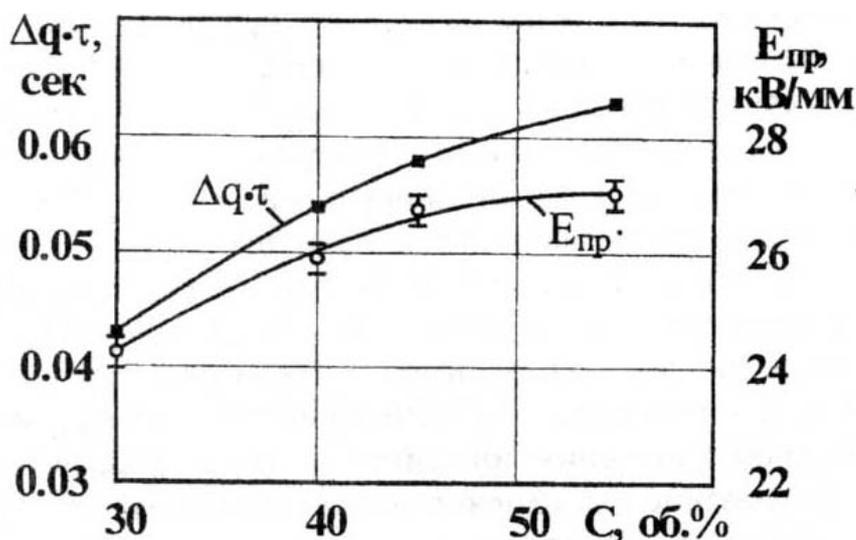


Рис.4. Зависимости $E_{пр}$, $A = f(C)$ для образцов на основе эластомеров.

Еще одним экспериментальным доказательством влияния поляризации на барьерный эффект являются результаты, полученные при исследовании влияния предварительной поляризации барьеров из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) на пробивное напряжение воздушного промежутка острие-плоскость. Показано, что в случае предварительной поляризации барьера величина пробивного напряжения на переменном напряжении при оптимальном положении барьера уменьшается примерно на 15-20% независимо от условий поляризации (рис.5). На постоянном напряжении наблюдается аналогичный эффект, с той лишь разницей, что пробивное напряжение зависит от направления векторов напряженности внешнего поля и поля, создаваемого в барьере при поляризации.

При воздействии переменного напряжения на промежуток острие-плоскость с барьером без предварительной поляризации барьера направление вектора поляризации в барьере изменяется синхронно с изменением внешнего напряжения источника в каждый полупериод. Распределение поля в промежутке в положительный (рис.6а) и отрицательный (рис.6б) полупериоды внешнего напряжения будет выглядеть одинаково: Напряженность поля вблизи острия увеличивается, поле в барьере уменьшается в $\epsilon_{\delta} / \epsilon_{oi}$ раз и имеет вид "потенциальной ямы" для развивающихся от острия стримеров, а поле в про-

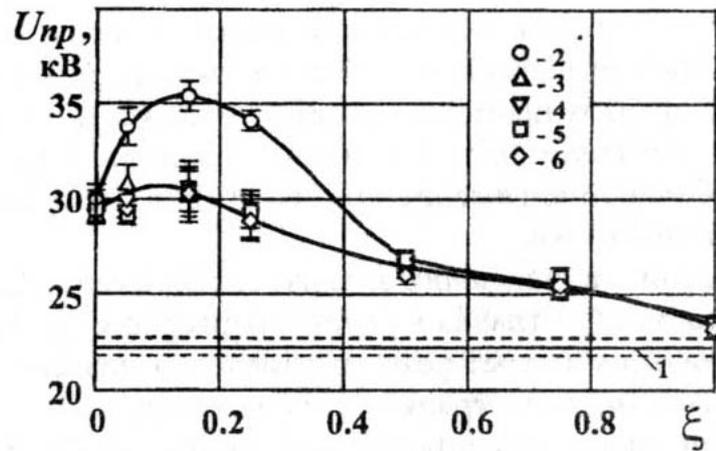


Рис.5. Зависимости $U_{пр} = f(\xi)$ для воздушного промежутка при воздействии переменного напряжения: 1 - без барьера; 2 - неполяризованные барьеры; 3,4 - поляризация при положительной и отрицательной полярности постоянного напряжения, соответственно; 5,6 - поляризация в коронном разряде при положительной и отрицательной полярности напряжения на коронирующем электроде, соответственно.

межутке барьер-плоскость становится более однородным, что приводит к повышению пробивного напряжения по сравнению с промежутком без барьера. Таким образом, изменение направления вектора поляризации материала барьера при изменении направления внешнего поля в этом случае происходит синхронно с изменением полярности напряжения в каждый полупериод (без задержки во времени). Это предположение подтверждается экспериментальными результатами, полученными при исследовании явления электрического гистерезиса в КПМ с высокой диэлектрической проницаемостью, а также тем, что при поляризации барьеров из ПЭТФ на переменном напряжении остаточной поляризации материала барьера после отключения внешнего напряжения не было обнаружено.

В случае предварительной поляризации барьер представляет собой "квазистатический" диполь, направление вектора поляризации которого не

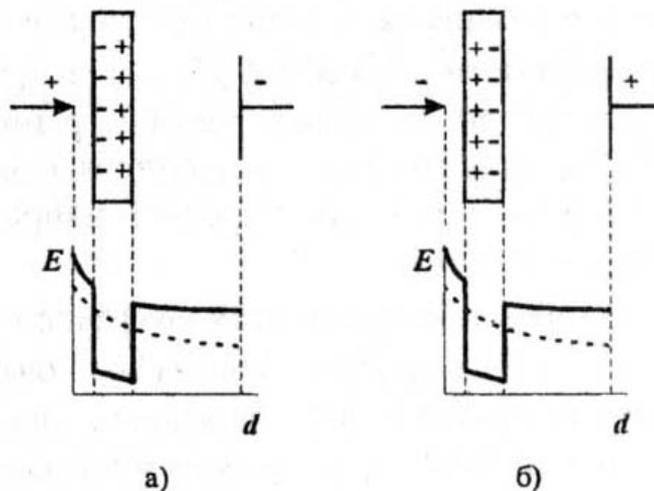


Рис.6. Распределение поля в промежутке с барьером: в положительный (а) и отрицательный (б) полупериоды.

изменяется при изменении направления внешнего поля, что и приводит к снижению пробивного напряжения. Это подтверждается результатами, полученными при пробое промежутка острие-плоскость на постоянном напряжении, где наглядно видно влияние предварительной поляризации барьера на пробивное напряжение при изменении полярности напряжения на электродах промежутка.

Таким образом, на основании анализа экспериментальных результатов установлено, что одну из главных ролей в барьерном эффекте играет неоднородная поляризация за счет резкого изменения диэлектрической проницаемости и проводимости на границе раздела слоев.

В четвертой главе диссертационной работы даны общие принципы конструирования высоковольтной изоляции с барьерами с коаксиальной системой электродов. Приведено обоснование выбора основных параметров барьерной изоляции, таких как:

- местоположение барьера в межэлектродном промежутке;
- соотношение диэлектрических проницаемостей и проводимостей основного изоляционного и барьерного материалов;
- толщина барьерного слоя;
- рабочая напряженность поля в слоях изоляционной конструкции.

Показано, что экстремальный характер изменения зависимости $U_{np} = f(\xi)$ в коаксиальной системе электродов, также как и в резконеоднородном и квазиоднородном внешнем поле, обусловлен геометрическим или размерным фактором и для случая слабонеоднородного поля максимум U_{np} наблюдается при $\xi \approx 0.25$.

Для оценки влияния барьера на перераспределение напряженности поля в слоях изоляционной конструкции был выполнен сравнительный расчет серийно выпускаемого высоковольтного кабеля на номинальное напряжение 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена без барьера и кабеля с барьером.

Установлено, что изменение τ_{np} и U_{np} в коаксиальной системе электродов за счет применения барьера зависит не столько от максимального коэффициента неоднородности поля $K = E_m/E_{cp}$, сколько от соотношения максимальных напряженностей на жиле и первой границе раздела слоев (коэффициент $K_3 = E_m/E_1$, а также от соотношения максимальной напряженности поля на первой границе раздела и средней напряженности поля в промежутке (коэффициент $K_4 = E_1/E_{cp}$).

На рис.7 приведены зависимости этих коэффициентов от ξ , для кабеля с барьером при разных Ψ . Для удобства обозначим точку пересечения зависимостей $K_3 = f(\xi)$ и $K_4 = f(\xi)$ как A . При этом величина локального коэффициента неоднородности поля в точке A характеризует минимальное значение коэффициента перенапряжения η в изоляционной конструкции.

Результаты расчетов показали, что оптимальное положение барьера, при котором коэффициент перенапряжения η имеет минимум, соответствует $\xi = 0.25 \pm 0.05$. При этом на величину коэффициента перенапряжения и положение оптимума в зависимости $\eta = f(\xi)$ оказывают влияние, как толщина барьера, так и соотношение диэлектрических проницаемостей материала

барьера и основной изоляции. Минимальное значение коэффициента перенапряжения наблюдается при толщине барьера, стремящейся к нулю. Однако изготовление тонкослойного барьера из высоконаполненных композиционных материалов методом соэкструзии без уменьшения скорости изолирования является достаточно сложной задачей. Поэтому оптимальная толщина барьерного слоя должна быть возможно меньшей и не превышать 10% от общей толщины изоляции.

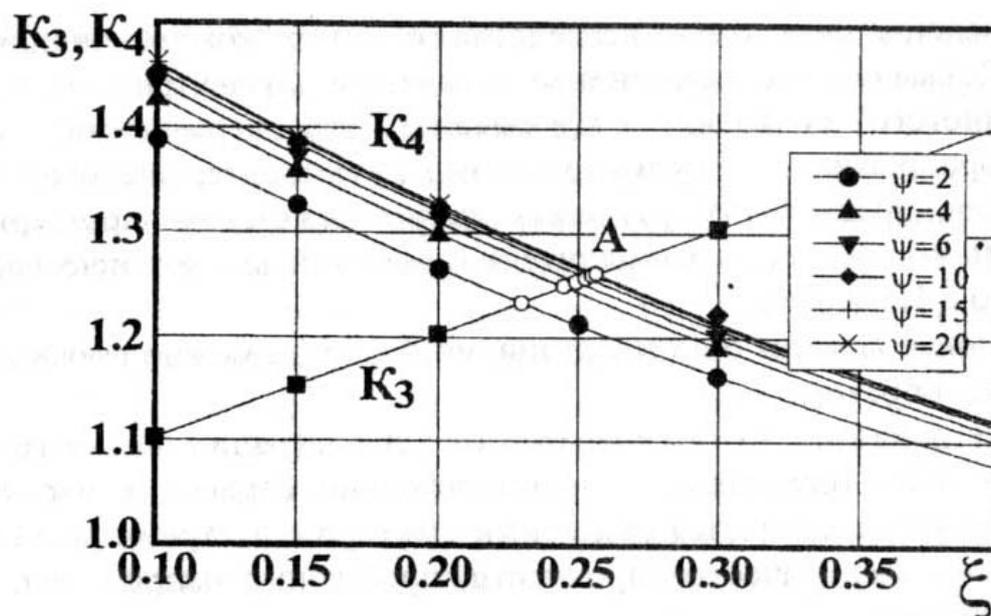


Рис. 7. Зависимости коэффициентов K_3 и $K_4 = f(\xi, \psi)$ для кабеля АПвП $1 \times 350 \text{ мм}^2$ с барьером толщиной 1 мм.

Для достижения максимального эффекта от применения дополнительного барьерного слоя соотношение диэлектрических проницаемостей материала барьера и основной изоляции должно выбираться из условия $2 < \Psi \leq 6$, а соотношение проводимостей $\psi' \leq 100$. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, при $\Psi \leq 2$ эффект повышения E_{np} , τ_3 и τ_{np} незначителен, либо вообще отсутствует, с другой стороны, при $\Psi > 6$ зависимости E_{np} и $\tau_{яp} = f(\psi)$ выходят на насыщение. Проводимость материала барьера не должна превышать величину проводимости основной изоляции более чем на два порядка, так как при $\psi' > 100$ начинает сказываться запаздывание установления поляризации в барьерном слое по отношению к внешнему электрическому полю. К тому же, при $\psi > 6$ наблюдается существенное ухудшение реологических характеристик материала барьерного слоя, что также является фактором, ограничивающим соотношение диэлектрических проницаемостей и проводимостей основного и барьерного материалов.

При расчете рабочей напряженности за критерий пробоя высоковольт-

ного кабеля с барьером было принято возникновение канала неполного пробоя первого изоляционного слоя. При этом величина максимальной напряженности поля в первом изоляционном слое должна выбираться из условия $E_{м1} < E_{np1} - 4\sigma_E$, где E_{np1} - среднее значение электрической прочности первого изоляционного слоя, σ_E - среднеквадратичное отклонение. В таком случае вероятность зарождения каналов неполного пробоя в первом изоляционном слое стремится к нулю даже при уменьшении общей толщины изоляции кабеля на 20 %. Снижение материалоемкости только за счет уменьшения толщины изоляции кабеля позволяет получить экономический эффект около 10000руб/км.

Приведены результаты исследований новых композиционных материалов. Показано, что применение в качестве диэлектрической матрицы вместо "чистого" полиэтилена его смеси с хлорсодержащими полиолефинами (хлорпарафин, хлорсульфополиэтилен) позволяет значительно повысить однородность КПП, улучшить их реологические характеристики и уменьшить концентрацию наполнителя с высокой диэлектрической проницаемостью в 1.5-2 раза.

Основные выводы по диссертационной работе можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые показано, что независимо от конфигурации внешнего электрического поля оптимальное местоположение барьера в изоляционной промежутке определяется размерным фактором; экстремальный характер изменения электрической прочности, пробивного напряжения, времени до зарождения дендритов и времени до пробоя при оптимальном местоположении барьера обусловлен наличием минимума локального коэффициента неоднородности поля в промежутке.
2. Впервые экспериментально установлено, что в квазиоднородном внешнем электрическом поле удлинение пути разрядного канала в многослойных диэлектриках не является определяющим фактором в барьерном эффекте; обнаружена корреляционная связь между длиной разрядных каналов и величиной удельной энергии, запасаемой в первом изоляционном слое.
3. Впервые экспериментально показано, что барьерный эффект зависит не только от соотношения диэлектрических проницаемостей и проводимостей материалов основной изоляции и барьера, но и от степени однородности композиционного материала с высокой диэлектрической проницаемостью; установлено, что зарождение и развитие каналов неполного пробоя происходит в условиях резконеоднородного поля за счет наличия локальных очагов усиления электрического поля в неоднородных диэлектриках.
4. Впервые экспериментально показано, что доминирующую роль в барьерном эффекте играет неоднородная поляризация.
5. Сформулированы практические рекомендации по проектированию изоляционных конструкций с барьерами.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Лебедев С.М., Чичикин В.И., Андреев П.В. Исследование поляризации твердых диэлектриков в сильном электрическом поле. - В сб. докл. 4^{ой} Всероссийской конференции "Перспективные материалы, технологии, конструкции", 28-29 мая 1997, Красноярск, 1998 с. 490-493.
2. Gefle O.S., Lebedev S.M., Pokholkov Yu.P. and Chichikin V.I. Dielectric Dispersion of Laminated Dielectrics. - Proc. 3rd Intern. Conf. on Electric Charge in Solid Insulators, 29 June-3 July, Tours, France, 1998, p. 646-649.
3. Чичикин В.И., Краснослободцев Н.И. Пробой двухслойных диэлектриков. - Тез. докл. 4^{ой} научно-технической конференции молодежи и студентов "Современные техника и технологии", Томск, 1999, с. 359-360.
4. Чичикин В.И., Асначев Г.А. Исследование поляризационных свойств 0-3 композитов. - Тез. докл. 4^{ой} научно-технической конференции молодежи и студентов "Современные техника и технологии", Томск, 1999, с. 357-358.
5. Gefle O.S., Lebedev S.M., Pokholkov Yu.P. and Chichikin V.I. The Hysteresis Phenomena Study in 0-3 Composites for HV Cables. - Proc. NORD-IS'99, June 14-16, 1999, Copenhagen, Denmark, pp.305-311.
6. Lebedev S.M., Gefle O.S., Pokholkov Yu.P. and Chichikin V.I. The Breakdown Strength of Two-layer Dielectrics. - Proc. ISH'99, 23-27 August, 1999, London, UK, pp.4.304.P2-4.307.P2, Conference Publication No 467.
7. Lebedev S.M., Gefle O.S., Pokholkov Yu.P. and Chichikin V.L Two-layer Dielectrics Behaviour in the Electric Field. - Ann. Rep. CEIDP'99, 17-21 October, 1999, Austin, Texas, USA, pp.265-268.
8. Лебедев С.М., Гефле О.С., Похолков Ю.П., Чичикин В.И. Наполненные композиционные материалы для высоковольтных кабелей. - МКЭМК-99, 30 ноября - 2 декабря 1999, Москва, с.44.
9. Лебедев С.М., Чичикин В.И., Фазилов А.А. Влияние поляризации на пробивное напряжение воздушного промежутка с барьером. - В сб. докл. 6^{ой} Всероссийской конференции "Перспективные материалы, технологии, конструкции", Красноярск, 25-27 мая, 2000, с.506-508.
10. Гефле О.С., Лебедев С.М., Чичикин В.И., Шмакова Л.И., Фазилов А.А. Влияние барьеров на электрическую прочность полиэтилена. - В сб. докл. 6^{ой} Всероссийской конференции "Перспективные материалы, технологии, конструкции", Красноярск, 25-27 мая, 2000, с.152-154.
11. Gefle O.S., Lebedev S.M., Pokholkov Yu. P. and Chichikin V.I. Influence of Preliminary Barrier Polarization on the Breakdown Voltage of Air Gaps, - Proc. 1st Inter. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials, 24-29 September, 2000, Tomsk, V.1, pp. 367-371.