

6
АЧ5

СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА И ФАКУЛЬТЕТА
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ им. М. АЗИЗБЕКОВА

На правах рукописи

Э. А. ОГАНЕСОВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ БАРЬЕРНОГО ЭФФЕКТА
В ВОЗДУХЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

(282 — Техника высоких напряжений)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Баку — 1970

СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ФАКУЛЬТЕТА И ФАКУЛЬТЕТА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ им. М. АЗИЗБЕКОВА

На правах рукописи

Э.А. ОГАНЕСОВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ БАРЬЕРНОГО ЭФФЕКТА В
ВОЗДУХЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

(282 - техника высоких напряжений)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

БАКУ - 1970



В связи с высокими темпами развития электроэнергетики нашей страны, перед энергетиками поставлены ряд проблем, требующих неотложного их решения.

Переход на высокие и сверхвысокие напряжения (для передачи больших мощностей на переменном и постоянном напряжениях) требует рационального решения вопросов изоляции высоковольтных аппаратов, так как рабочие градиенты изоляции определяют габариты и стоимость аппаратов.

С этой точки зрения, увеличение электрической прочности высоковольтной изоляции электрического оборудования является одной из актуальных проблем техники высоких напряжений.

Газовый промежуток с барьером является простейшим примером изоляционной конструкции, в которой применена комбинация двух диэлектриков - твердого (барьера) и газообразного. Подобные комбинации находят широкое применение в качестве изоляционных устройств в электрических высоковольтных аппаратах, трансформаторах и в других высоковольтных установках.

В настоящей работе, на основании анализа литературных данных, приведенного в ПЕРВОЙ ГЛАВЕ, показано, что одним из эффективных способов повышения электрической прочности изоляционной конструкции является рациональное использование тонкого слоя твердого диэлектрика в сочетании с воздухом или другим газообразным диэлектриком.

Исследования, выполненные в последние годы, позволили установить, что применение тонкого слоя твердого диэлектрика в сочетании с газообразным, приводит к существенному повышению пробивного напряжения (2 - 2,2 раза).

Представленная работа ставит целью экспериментально исследовать и получить некоторые зависимости, имеющие существенное значение с точки зрения механизма барьерного эффекта в воздухе при постоянном напряжении, а также изыскать конкретные рациональные комбинации барьера и воздуха для достижения максимального повышения прочности изоляционных высоковольтных электрических конструкций.

Были исследованы барьеры из различных материалов: кабельная бумага (0,03 мм), конденсаторная бумага (0,025 мм), лавсановая и фторопластовая пленки (0,035 мм), сетчатые металлические барьеры (с размерами ячеек 0,3 x 0,3 мм, 0,5 x 0,5 мм и 1,0 x 1,0 мм), медная фольга (0,07 мм), алюминиевая фольга (0,05 мм), листовое железо (0,10 мм), а также металлизированные лавсановая пленка (0,045 мм) и конденсаторная бумага (0,035 мм).

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приводится описание установки и методики экспериментирования.

В процессе экспериментов фиксировались следующие основные параметры: пробивные напряжения межэлектродных промежутков с барьерами и без барьеров, месторасположения барьеров относительно электродов, расстояния между электродами, величина заряда, образованного в результате ионизации, и его распределение на поверхности барьера, времена, скорости и токи пробоев.

Барьеры и электроды (электрод с малым радиусом кривизны - плоскость) устанавливались и крепились на специально изготовленной установке с дистанционным управлением. Расстояния между электродами а также месторасположения барьеров в межэлектродном пространстве определялись с точностью 0,3 мм.

В процессе экспериментов использовались острые электроды с различными радиусами закругления r (0,035 мм; 0,10 мм; 0,40 мм; 0,60 мм; 1,175 мм и 1,70 мм).

Исследование картины распределения зарядов на поверхности барьера, в зависимости от его месторасположения в межэлектродном промежутке производилось с помощью специально изготовленных металлических зондов и электронного осциллографа ОК-21. В качестве эталонной емкости использовался образцовый конденсатор $C = 1500 \pm 0,1$.

Для более полного изучения явления пробоя межэлектродного промежутка с барьером была произведена серия экспериментов по фотографированию процесса пробоя при помощи сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР, работающей в режиме кадровой съемки с частотой съемки 2500000 кадров/сек. и размером кадра - ϕ 5 мм. При фотографировании процесса разряда использовалась фотопленка чувствительностью 250 ед.

Большая скорость развития разряда затрудняет получение необходимой фоторазвертки, поэтому в процессе экспериментов применялось искусственное "торможение" разряда путем введения в цепь разрядного промежутка "тормозного" омического сопротивления.

Осциллографирование токов пробоя промежутков с барьерами осуществлялось при помощи двухлучевого электронного осциллографа ОК-21 и омического шунта, включенного в разрядную цепь со стороны заземленного электрода. В процессе осциллографирования использовались экранированные кабели КР-2 с волновыми сопротивлениями $Z_1 = 25$ ом и $Z_2 = 40$ ом.

Фотографирование явления с экрана осциллографа производилось на фотопленку чувствительностью 180 ед.

Для экспериментов в качестве источника напряжения использовался тр-р типа НКФ-220 с кенотронной установкой, собранной по схеме однополупериодного выпрямления. Форма напряжения до и после выпрямительной установки осциллографировалась с помощью двухлучевого электронного осциллографа ДЭО-1.

Большую часть работы составляет исследование прочности межэлектродных промежутков с металлическими и металлизированными барьерами. Ввиду небольшого коэф.упрочняющего действия, последние не нашли широкого применения в высоковольтной электроизоляционной технике. Однако, при приложении к металлическому или металлизированному барьеру, расположенному в соответствующем месте межэлектродного пространства определенного отрицательного потенциала, названного отрицательным смещением, электрическая прочность межэлектродного промежутка значительно увеличивается.

Результаты всех измерений обрабатывались с помощью методов математической статистики: находился закон распределения измеряемой величины, определялись среднее арифметическое,

минимальный и максимальный пределы, дисперсия, стандарт отклонения и т.д.

Закон распределения проверялся по критерию Колмогорова. Среднее квадратическое отклонение (σ) определялось по формуле

$$\sigma = \pm \sqrt{DX}$$

$$\sigma = \pm K \sqrt{\frac{\sum x_i^2 \omega_i}{n} - \left(\frac{\sum x_i \omega_i}{n}\right)^2} \quad (1)$$

где DX - дисперсия,

K - величина интервала,

x_i - отклонения середин интервалов от условного начала,

ω_i - число опытов относящихся к каждому интервалу,

n - общее число опытов.

На основании формул математической статистики определялось необходимое число экспериментов, сравнивались средние арифметические и стандарты отклонений двух серий измерений, производился анализ.

Произведен также подсчет относительной ошибки измерений при определении пробивных напряжений.

Точность среднего арифметического пробивного напряжения определялась исходя из величины разброса данных и числа измерений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{t_{\alpha} S_i}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

где S_i - стандарт отклонения,

n - число опытов,

t_{α} - число, определяемое по таблице Стьюдента-Фишера.

Максимальная относительная ошибка измерений составляет $\pm 4\%$. Экспериментальные данные и данные статистической обработки результатов измерений приведены в 15 приложениях.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА работы посвящена экспериментальному исследованию барьерного эффекта при малых межэлектродных расстояниях ($S = 10$ мм, 15 мм, 20 мм и 25 мм).

В качестве барьеров использовались: кабельная и конденсаторная бумаги, лавсановая и фторопластовая пленки.

В результате опытов выяснилось, что зависимости пробивных напряжений, указанных межэлектродных промежутков, от месторасположений барьеров относительно электрода с малым радиусом кривизны, носят прямолинейный характер, как при \pm так и при \rightarrow \leftarrow . Графические изображения зависимостей $U = f(S_i)$ приведены на соответствующих рисунках настоящей главы.

Эти зависимости приводятся также в аналитическом виде (в виде уравнений). Путем преобразований выведено общее усредненное выражение для определения пробивных напряжений межэлектродных промежутков в зависимости от месторасположений барьеров, которое имеет вид:

$$U = \delta [1,61 (S+2) - 1,29 S_i] \quad (3)$$

где U - пробивное напряжение в [кв],

$1,61$ - коэффициент,

δ - относительная плотность воздуха,

S - расстояние между электродами в [мм],

S_i - расстояние от электрода с малым радиусом кривизны до барьера в [мм].

Максимальная средняя погрешность расчетной формулы, относительно экспериментальных данных не превышает $\pm 2,5\%$.

Для определения влияния барьера на прочность межэлектродного промежутка в зависимости от его месторасположения (S_i) и полярности электродов построены кривые барьерного упрочнения, по которым нетрудно найти зону упрочняющего действия барьера, зону ослабляющего действия (отрицательный барьерный эффект), а также определить месторасположение барьера, при котором последний не будет влиять на прочность данного межэлектродного промежутка.

Анализ полученных зависимостей $U = f(S_i)$ показал, что для межэлектродных промежутков (10 мм $\leq S \leq 25$ мм) в

барьерами полярность электродов не оказывает существенное влияние на пробивные напряжения. К аналогичному заключению приводит сравнение результатов обработки экспериментальных данных с помощью формул математической статистики. Материал барьера также не влияет на барьерный эффект. На пробивные напряжения указанных межэлектродных промежутков оказывает влияние только месторасположение барьеров относительно электродов.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приводятся данные экспериментального исследования электрической прочности межэлектродных промежутков ($30 \text{ мм} \leq S \leq 70 \text{ мм}$) с барьерами, а также данные измерений распределения заряда на барьере при его различном месторасположении. В качестве барьеров использовалась кабельная бумага, толщиной 0,03 мм. В указанном интервале межэлектродных расстояний зависимости пробивных напряжений от месторасположений барьеров относительно электродов имеют криволинейный характер изменения с явно выраженными максимальными и минимальными значениями.

Кривые, характеризующие влияние барьеров на электрическую прочность межэлектродных промежутков, построены в виде зависимостей $K_{упр.} = f(S_1)$. Коэффициент упрочнения ($K_{упр.}$) для данного межэлектродного расстояния определялся как отношение пробивного напряжения промежутка с барьером к пробивному напряжению промежутка без барьера.

По приведенным на рисунке I зависимостям $K_{упр.} = f(S_1)$ нетрудно заметить что коэффициенты упрочнений межэлектродных промежутков, в случае $\rightarrow \left[\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix} \right]$, при расположении барьеров в области малых S_1 незначительны. По мере удаления барьера от электрода с малым радиусом кривизны прочность промежутка снижается и становится меньше прочности данного межэлектродного промежутка без барьера, т.е. фактически наблюдается отрицательный барьерный эффект. Наблюдаемый отрицательный барьерный эффект в случае $\rightarrow \left[\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix} \right]$ при расположении барьера уже на небольшом расстоянии от электрода с малым радиусом кривизны ($S_1 = 0,25$) явление закономерное, так как, в этом случае, барьер способствует созданию концентрированного отрицательного заряда, увеличивающего напряженность поля во внешнем пространстве. Увеличение напряженности поля приводит к снижению проч-

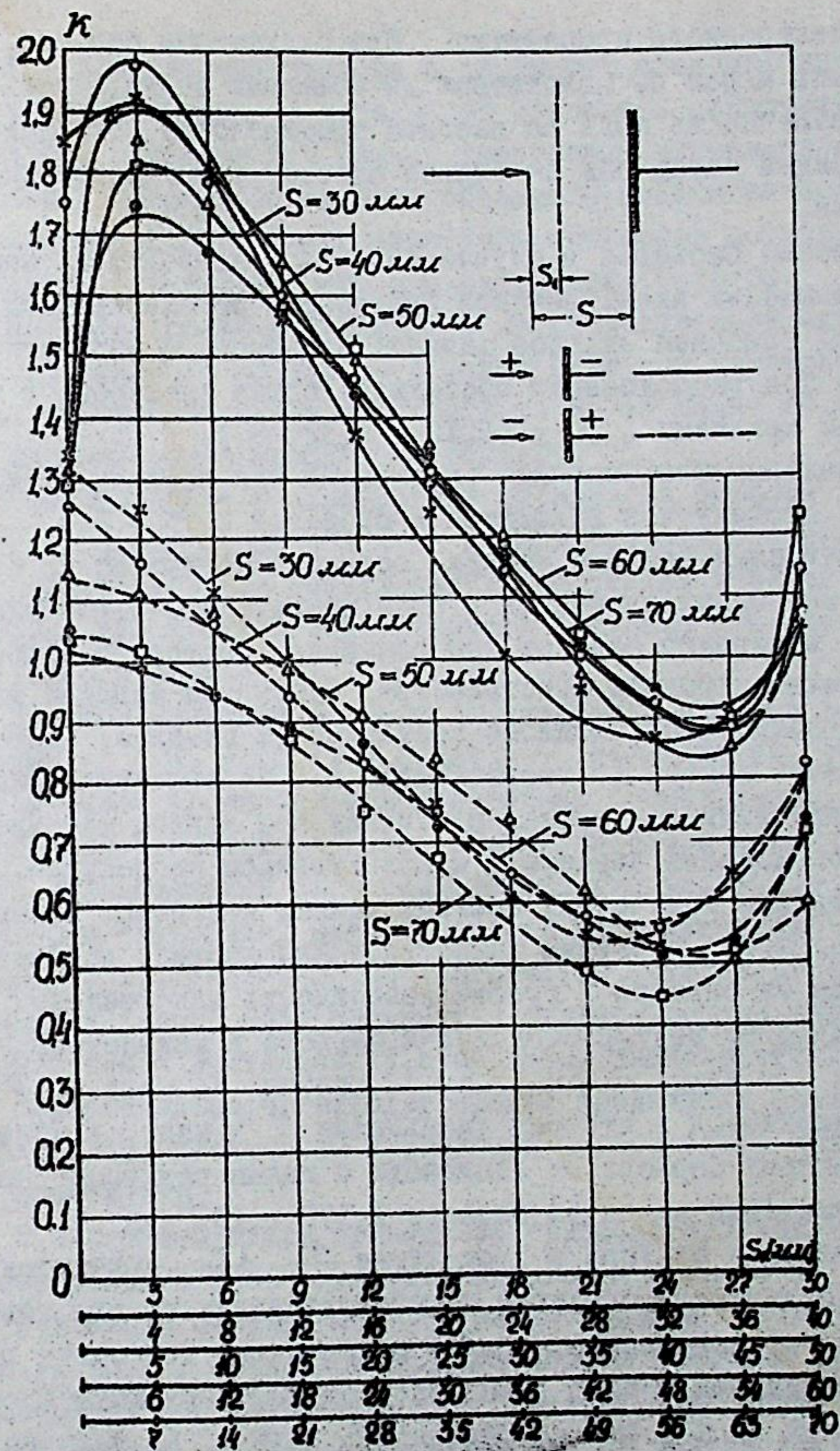


Рис. I. Зависимости коэф. упрочнений межэлектродных промежутков от месторасположений барьера относительно электродов (барьер-кабельная бумага 0,03 мм).

ности межэлектродного промежутка. При отсутствии барьера, основную роль играл бы положительный объемный заряд, уменьшающий напряженность поля во внешнем пространстве, отрицательный же объемный заряд был бы сильно рассеян в межэлектродном пространстве.

Применение барьеров в случае \rightarrow \leftarrow приводит к значительному повышению электрической прочности межэлектродных промежутков. Наиболее сильное влияние барьеров, в этом случае, имеет место при расположении последних вблизи электрода с малым радиусом кривизны ($S_1 = (0,10 \div 0,12) S$).

Максимальные коэффициенты упрочнений для различных межэлектродных промежутков находятся в пределах $1,75 \div 2,0$.

Для выявления влияния заряда, осевшего на барьер на прочность межэлектродных промежутков была произведена серия экспериментов по измерению зарядов при различном месторасположении барьера в межэлектродном пространстве. Измерения зарядов на барьере осуществлялось согласно составленной матрице, состоящей из 49 точек замера (7 горизонталей и 7 вертикалей). Замеры зарядов производились в указанных точках при каждом фиксированном месторасположении барьера в межэлектродном промежутке.

На основании полученных опытных данных построены топографическая диаграмма, наглядно иллюстрирующая картину распределения зарядов на барьере и график зависимости максимальных величин зарядов от месторасположений барьера в межэлектродном пространстве $q_{\text{макс.}} = f(S_1)$. Кривая $q_{\text{макс.}} = f(S_1)$ монотонно изменяется в сторону уменьшения $q_{\text{макс.}}$ в зависимости от удаления барьера от электрода с малым радиусом кривизны. Максимальный заряд на барьере $1,375 \cdot 10^{-8}$ кул.

При установке барьера в промежутке \rightarrow \leftarrow положительные ионы задерживаются барьером и распределяются по его поверхности, причем распределение зарядов оказывается тем более равномерным, чем дальше барьер расположен от коронирующего электрода. Несмотря на то, что напряженность поля в промежутке барьер-плоскость за счет распределенных зарядов на барьере увеличивается с уменьшением расстояния барьер-плоскость, но она распределяется более равномерно на весь промежуток. Степень однородности поля промежутка барьер-плоскость зависит от месторасположения барьера в межэлектродном промежутке

(по мере приближения барьера к плоскости степень однородности поля увеличивается). С установкой барьера в межэлектродном промежутке локализуется резкое увеличение напряженности поля на границе концентрированного объемного положительного заряда, являющееся причиной распространения процессов ионизации вглубь промежутка и имеющее место при отсутствии барьера.

При расположении барьеров в непосредственной близости от положительного электрода с малым радиусом кривизны наблюдается уменьшение барьерного эффекта из-за резко неравномерного распределения зарядов на барьере.

Неравномерное распределение зарядов на барьере приводит к тому, что напряженность поля на поверхности барьера может быть достаточной для возникновения процессов ионизации за барьером, что и будет обуславливать снижение прочности межэлектродного промежутка.

По мере удаления барьера от электрода с малым радиусом кривизны $[S_1 > (0,10 \div 0,12) S]$ наблюдается снижение электрической прочности межэлектродных промежутков.

При расположении барьера вблизи плоского электрода наблюдается отрицательный барьерный эффект (прочность промежутка с барьером становится ниже прочности промежутка без барьера ($K_{\text{упр.}} < 1$)). Указанное обстоятельство обуславливается тем, что напряженность поля промежутка барьер-плоский электрод приближается к критическому пробивному значению 27-28 кв/см.

Первоначально происходит пробой промежутка барьер-плоский электрод, после чего происходит пробой всего межэлектродного промежутка.

В настоящей главе приводится графоаналитический расчет для определения уравнения зависимости $q_{\text{макс.}} = f(S_1)$.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать заключение, что решающую роль в барьерном эффекте играет величина зарядов и их распределение на поверхности барьера. При расположении барьера вблизи плоского электрода пробой межэлектродного промежутка начинается с пробоя промежутка барьер-плоский электрод.

ПЯТАЯ ГЛАВА работы посвящена экспериментальному исследованию упрочняющего действия проводящих барьеров. Условия опытов те же, что и при исследовании диэлектрических барьеров.

На основании опытных данных построены зависимости $K'_{упр.} = f(S_1)$ для межэлектродных промежутков (30 мм, 40 мм, 50 мм, 60 мм, 70 мм, 80 мм, 90 мм и 100 мм) с барьерами, изготовленными из различных материалов.

Анализируя зависимости $K'_{упр.} = f(S_1)$ можно сделать заключение, что максимальное упрочняющее действие металлических барьеров имеет место при расположении последних на расстоянии $S_1 = (0,18 + 0,20) S$ от электрода с малым радиусом кривизны (рис.2). Максимальные значения коэффициентов упрочнения в зависимости от межэлектродных расстояний, находятся в пределах $1,370 + 1,565$. По мере удаления барьера от электрода с малым радиусом кривизны, прочность промежутков снижается. Очевидно, что применение диэлектрических барьеров для упрочнения межэлектродных промежутков целесообразнее, так как пробивные напряжения промежутков с диэлектрическими барьерами на 20-30% выше пробивных напряжений промежутков с металлическими барьерами при прочих равных условиях.

Как было отмечено выше, при приложении к металлическому барьеру, расположенному вблизи электрода с большим радиусом кривизны, отрицательного смещения электрическая прочность межэлектродного промежутка значительно увеличивается. Увеличение прочности промежутка в этом случае, связано с компенсацией зарядов на барьере. Для определения максимального эффекта отрицательного смещения, с точки зрения максимальной прочности данного межэлектродного промежутка, были произведены опыты с подачей на барьер из медной фольги, различных значений отрицательных смещений в зависимости от его месторасположения относительно электрода с большим радиусом кривизны. На основании экспериментальных данных были построены следующие зависимости:

$K = f(S_1)$ с $(-U_q)$ - зависимость коэффициентов упрочнений промежутков от месторасположения барьера (с приложенными различными значениями отрицательных смещений) относительно электрода с большим радиусом кривизны.

12

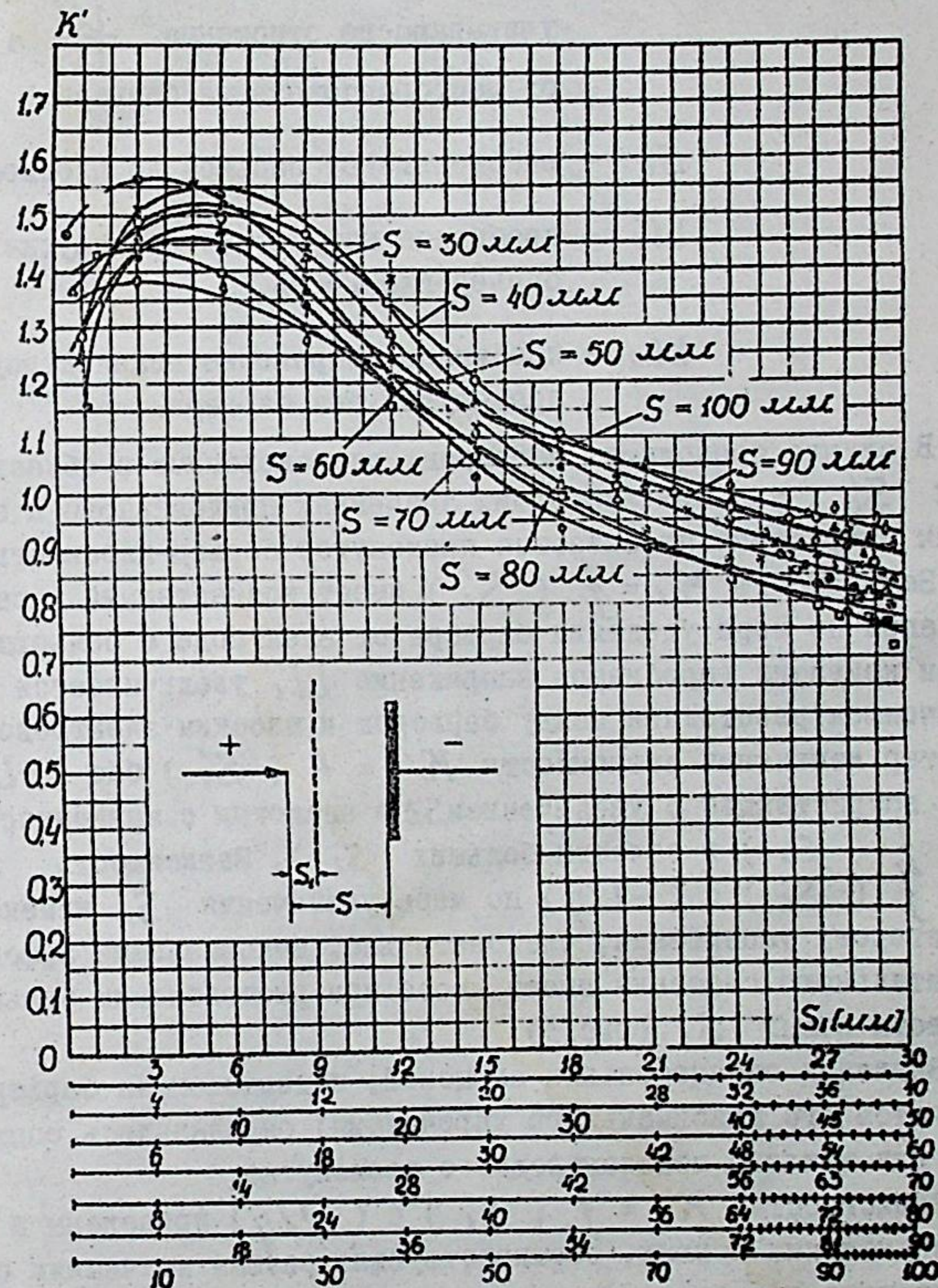


Рис. 2. Зависимости коэф. упрочнений межэлектродных промежутков от месторасположений барьера относительно электродов (барьер-медная фольга 0,07 мм).

$\kappa' = f(S_i)$ без $(-U_g)$ - то же, без отрицательных смещений.

$\kappa_1 = f(S_i)$ - зависимость коэффициента κ_1 , учитывающего отношение $\frac{U_1}{U_2}$, от месторасположения барьера.

где S_i - расстояние от барьера до плоскости,
 U_1 - пробивное напряжение промежутка барьер-плоскость,
 U_2 - пробивное напряжение межэлектродного промежутка без барьера.

В случае проводящих барьеров, расположенных в области малых S_i , уже при небольших значениях приложенного к электродам напряжения пробивается промежуток барьер-плоскость.

Зависимость $\kappa_1 = f(S_i)$ имеет возрастающий характер изменения по мере удаления барьера от электрода с большим радиусом кривизны (пробивное напряжение U_1 увеличивается с увеличением расстояния между барьером и плоским электродом). Характер изменения зависимости $\kappa' = f(S_i)$ без $(-U_g)$ также возрастающий с увеличением S_i по аналогии с зависимостями $\kappa' = f(S_i)$ в области больших S_i). Зависимость же $\kappa = f(S_i)$ с $(-U_g)$ по мере увеличения S_i изменяется в сторону уменьшения, следовательно, максимальный эффект отрицательного смещения имеет место при расположении барьера в области малых S_i (рис.3).

Значения отрицательных смещений, подаваемых на барьер (с учетом его максимального упрочнения) определялись опытным путем для каждого межэлектродного промежутка.

Зависимости $\kappa = f(S_i)$ с $(-U_g)$ приведены в виде нескольких кривых, соответствующих разным значениям отрицательного смещения.

При оптимальных значениях отрицательного смещения на барьере и расположении последнего вблизи плоского электрода прочность межэлектродного промежутка по сравнению с прочностью данного промежутка с барьером без отрицательного смещения (при прочих равных условиях) возрастает более чем в 2 раза и

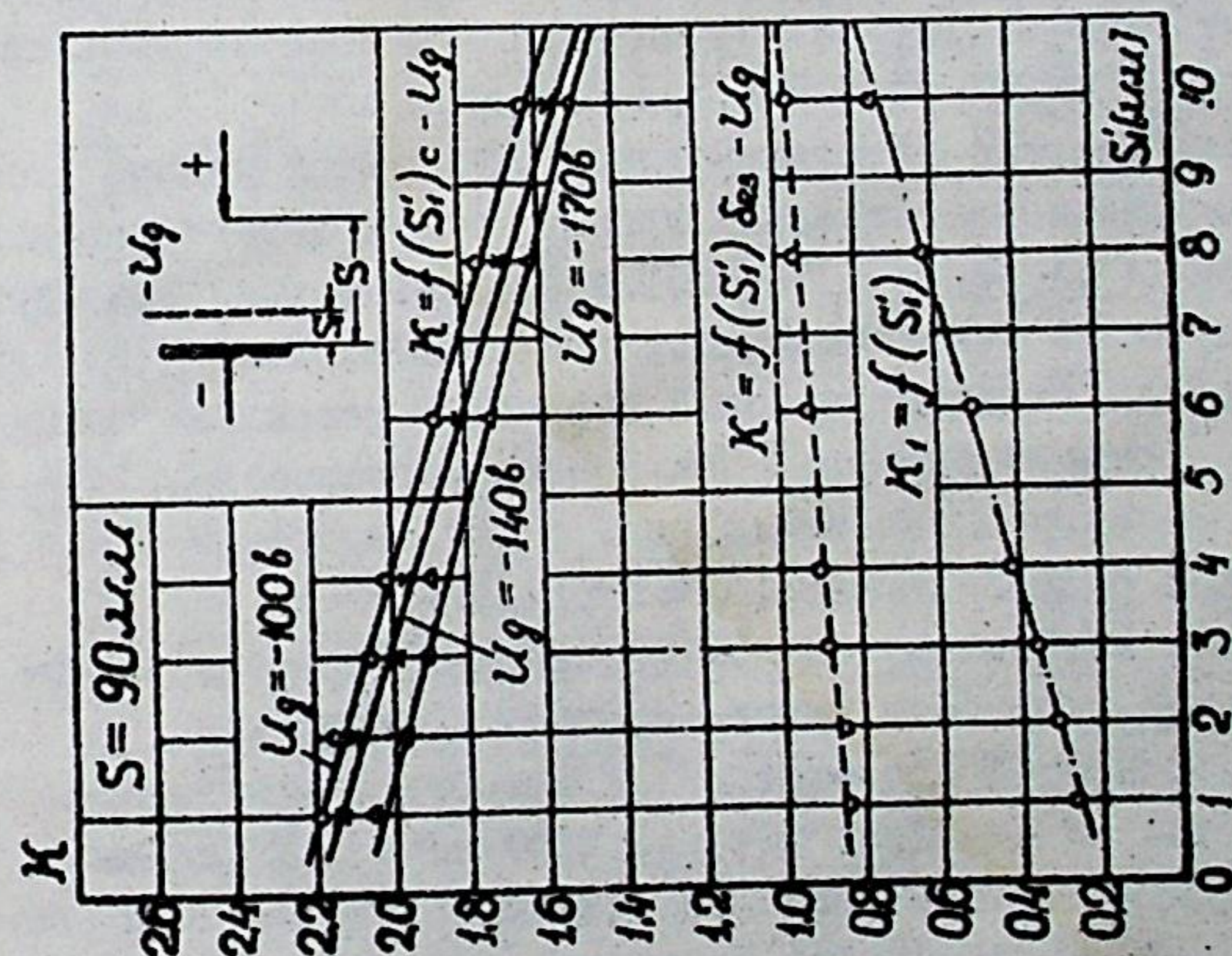
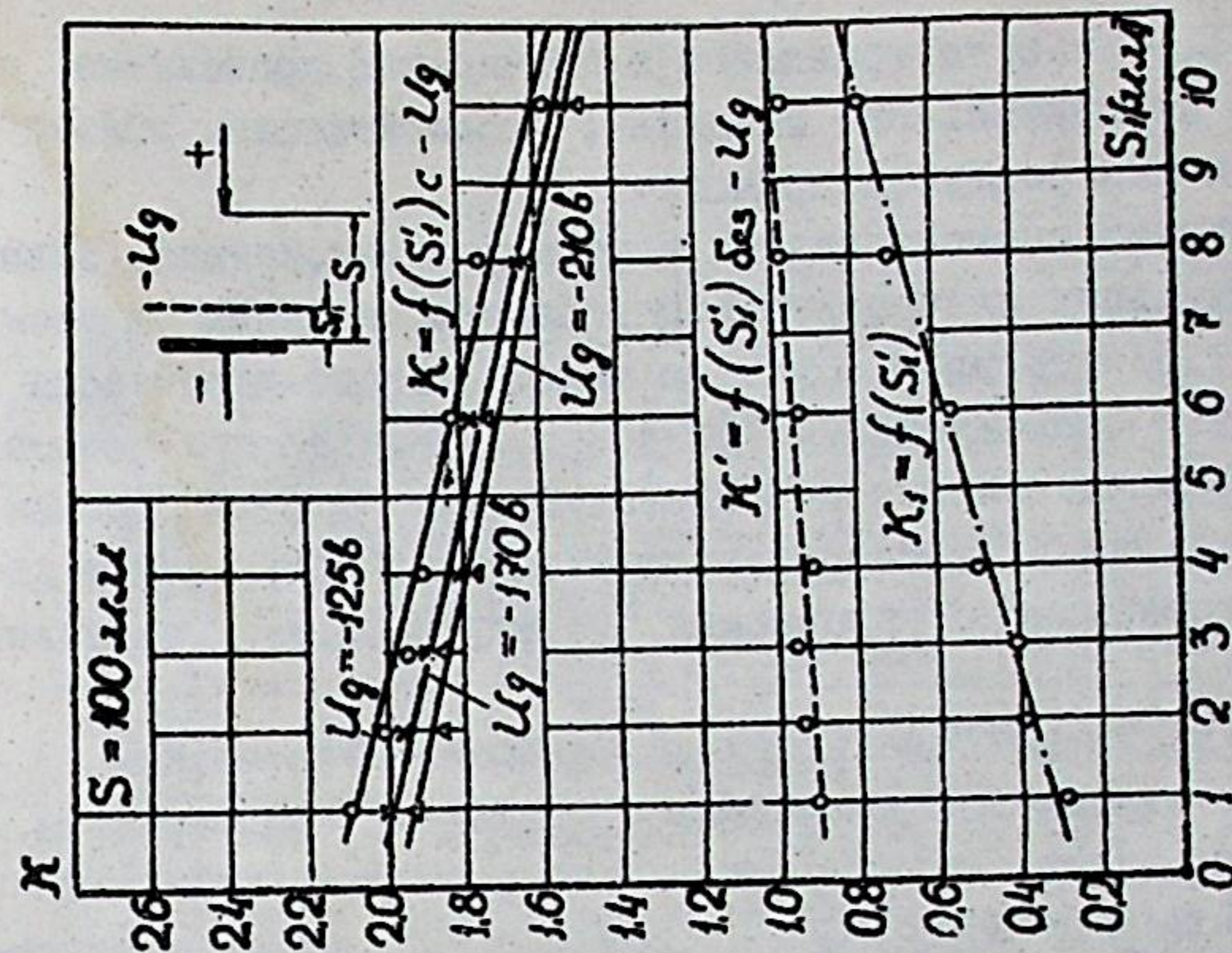


Рис. 3. Зависимости коэф. упрочнений межэлектродных промежутков (90 мм и 100 мм) от месторасположений барьера относительно электрода с большим радиусом кривизны (барьер - медная фольга).

более чем в 1,5 раза по сравнению с прочностью промежутка с барьером без отрицательного смещения, расположенным вблизи электрода с малым радиусом кривизны.

На основании многочисленных опытных данных найдена зависимость оптимальных значений отрицательного смещения от расстояний между электродами с учетом максимального упрочнения межэлектродного промежутка. По данной зависимости для любого межэлектродного расстояния в пределах $30 \text{ мм} \leq S \leq 100 \text{ мм}$, можно найти величину отрицательного смещения, необходимую для получения максимального упрочнения промежутка с металлическим барьером.

При сравнении максимального коэффициента упрочнения $K_{\text{макс}}$ межэлектродного промежутка с металлическим барьером (с оптимальным отрицательным смещением) с максимальным коэффициентом упрочнения $K_{\text{I макс}}$ для данного промежутка с диэлектрическим барьером нетрудно заметить, что $K_{\text{макс}} \approx 1,2 K_{\text{I макс}}$, т.е. металлические барьеры с отрицательным смещением достаточно хорошо упрочняют межэлектродный промежуток.

Во втором разделе настоящей главы приводятся данные исследования прочности межэлектродных промежутков с металлизированными лавсановыми барьерами. Металлизированный лавсановый барьер можно рассматривать как комбинированный барьер, состоящий из лавсановой основы (диэлектрический барьер) и металлизированного слоя (проводящий барьер). Полученные зависимости $K' = f(S_1)$ (рис. 4) по характеру изменения сходны с зависимостями $K = f(S_1)$ для промежутков с диэлектрическими барьерами.

Применение металлизированных лавсановых барьеров приводит к увеличению прочности межэлектродных промежутков по сравнению с прочностью промежутков, в которых используются чисто металлические барьеры. Металлизированный лавсановый барьер с определенным значением отрицательного смещения значительно увеличивает прочность межэлектродного промежутка (на 35 + 45%) по сравнению с прочностью промежутка с диэлектрическим барьером.

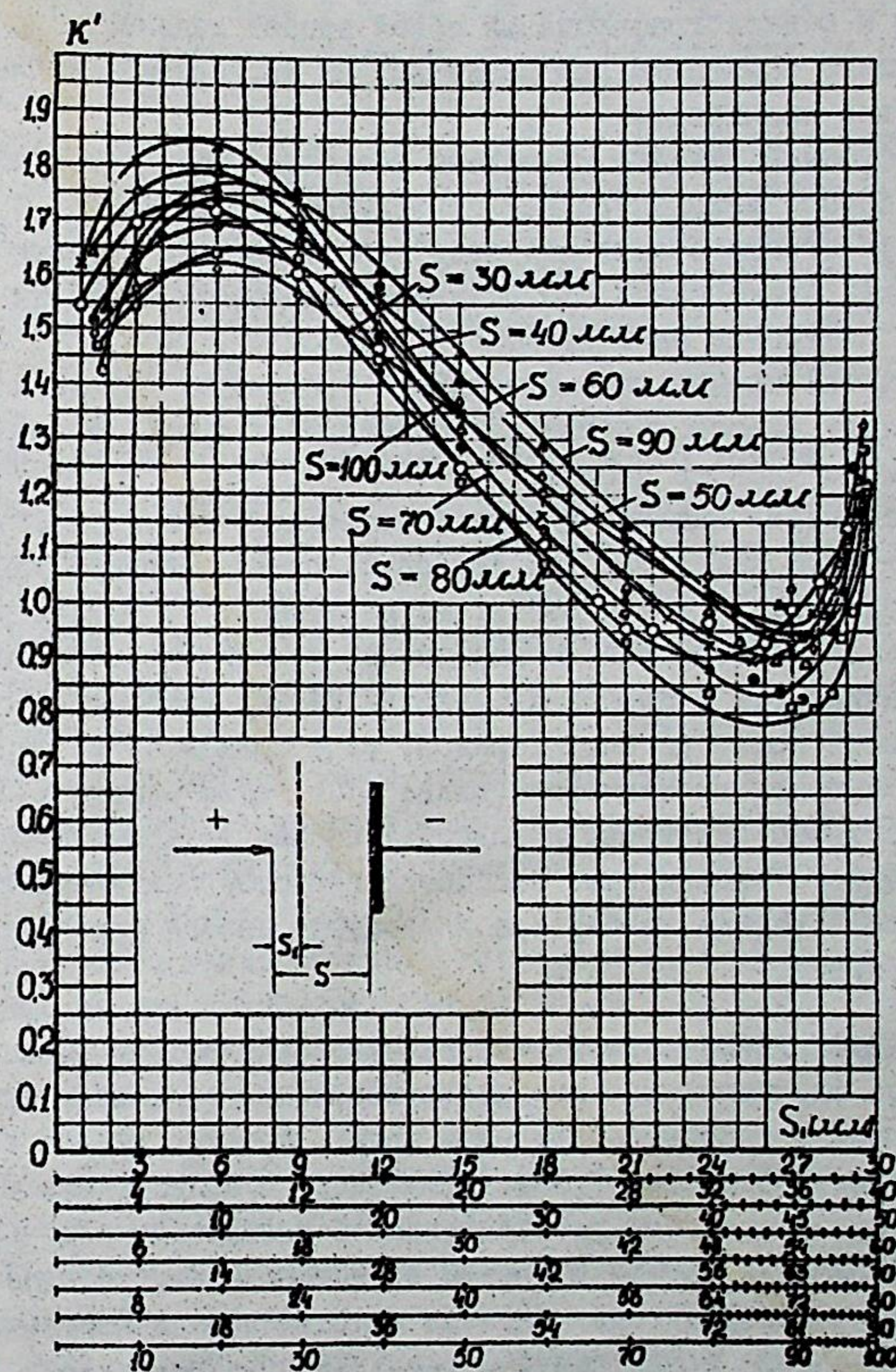
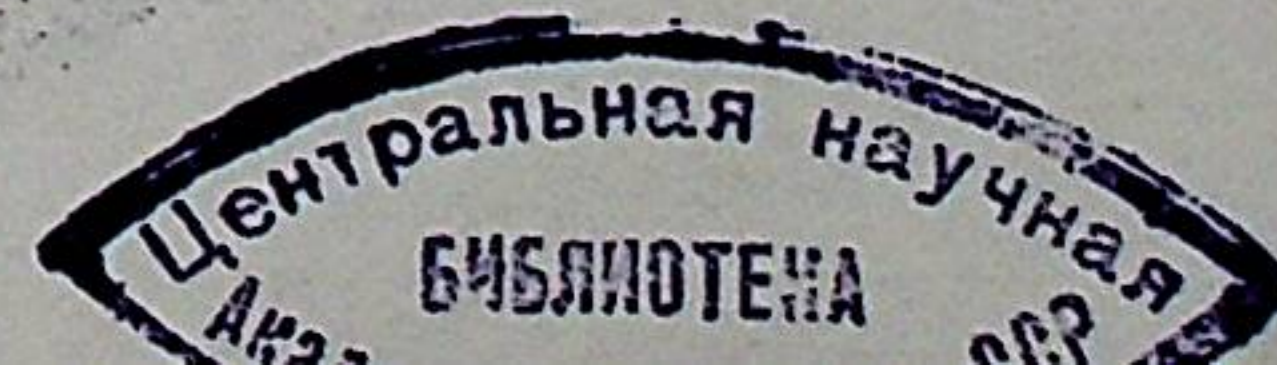


Рис. 4. Зависимости коэф. упрочнений межэлектродных промежутков, от месторасположений барьера относительно электродов (барьер-металлизированная лавсановая пленка).



ШЕСТАЯ ГЛАВА посвящена вопросам фотографирования процесса пробоя с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки и осциллографирования токов пробоя межэлектродных промежутков с барьерами при различных их месторасположениях относительно электродов.

В настоящем разделе приведены фотокопии покадровой съемки процесса пробоя межэлектродных промежутков с барьерами. В результате фотографирования получены данные времени развития пробоя между электродами при различных месторасположениях барьера и построена зависимость t пробоя = $f(S_i)$. Время развития пробоя межэлектродного промежутка определялось по количеству кадров, на которых фиксируется пробой в процессе развития и по частоте съемки.

На основании анализа данных фотографирования процесса пробоя нетрудно заметить, что при расположении барьера вблизи плоского электрода (в частности, на расстоянии 10 мм при расстоянии между электродами 50 мм) пробой межэлектродного промежутка начинается с пробоя промежутка барьер-плоскость, где напряженность поля, за счет зарядов, распределенных на барьере, достигает пробивного значения (глава IV). Затем разряд начинается с острого электрода и завершается полным пробоем всего межэлектродного промежутка. Это обстоятельство подтверждает решающую роль заряда на барьере в процессе пробоя межэлектродного промежутка.

В СЕДЬМОЙ ГЛАВЕ приводятся данные исследования влияния барьеров на электрическую прочность межэлектродных промежутков в равномерном и слабонеравномерном полях, а также данные исследования двойных барьеров (диэлектрического и проводящего с отрицательным смещением, расположенных в межэлектродном промежутке острие-плоскость, с учетом их максимальных упрочнений). В качестве диэлектрического барьера использовалась кабельная бумага, в качестве проводящего - металлизированная лавсановая пленка. На основании анализа опытных данных выявлено, что пробивные напряжения межэлектродных промежутков с двумя барьерами примерно в 2,75 раза выше пробивных напряжений промежутков без барьеров при прочих равных условиях (т.е. $K_{упр} \approx 2,75$).

Далее приводятся данные по исследованию эффекта отрицательного смещения на модели проходного изолятора.

Поперечный разрез и общий вид модели проходного изолятора с воздушной полостью приведены на соответствующих рисунках настоящей работы.

Между фланцем ($r_a = 24,4$ мм) и внутренним электродом ($r_i = 9$ мм) устанавливались цилиндрические барьеры из медной фольги ($r = 21,5$ мм, 22,5 мм и 23,5 мм). На указанные цилиндрические барьеры подавались различные значения отрицательного смещения и определялись пробивные напряжения промежутка фланец-внутренний электрод в зависимости от радиуса цилиндрического барьера и величины отрицательного смещения.

Пробивное напряжение между электродами данной модели проходного изолятора при отсутствии барьера составляло 34,5 кв против расчетного 36 кв. Максимальное пробивное напряжение между электродами модели - 57 кв имело место при расположении в межэлектродном пространстве проводящего цилиндра ($r = 23,5$ мм) с отрицательным смещением.

Таким образом, с установкой между цилиндрическими электродами проводящего барьера вблизи электрода с большим радиусом и при подаче на последний определенного отрицательного смещения, прочность данного промежутка увеличивается примерно в 1,6 раз. Очевидно, что $K_{упр} = 1,6$ для данной модели проходного изолятора нельзя считать критерием из-за сложности изготовления тонких цилиндрических барьеров различных радиусов в лабораторных условиях (с точки зрения определения рационального месторасположения барьера относительно электродов).

В ВОСЬМОЙ ГЛАВЕ приводится расчет неоднородного поля межэлектродного промежутка с барьером.

Расчет поля межэлектродного промежутка игла-плоскость при напряжении близком к пробивному сложен из-за наличия в промежутке объемного заряда, образующегося в результате процесса ионизации и искажающего картину поля.

Поле межэлектродного промежутка с барьером в работе рассматривается как поле, состоящее из двух слагающих:

I. Поле между электродами игла-плоскость (без барьера)

$$E_i = f(S_i).$$

2. Поле созданное барьером с распределенным на его поверхности зарядом $E_2 = f(S_1'')$.

При рассмотрении первой составляющей E_1 не учитывается искажение поля, вызванное объемным зарядом в промежутке, влияние которого в предразрядный период велико. Однако фактор влияния объемного заряда учитывается при определении второй составляющей поля E_2 , т.к. последняя учитывает поле, созданное зарядом распределенным на барьере. При определении E_2 принимается, что в предразрядный период весь объемный заряд, образованный в результате ионизации, оседает на барьере и распределяется по его поверхности.

I. Определение зависимости $E_1 = f(S_1')$.

Поле между иглой и заземленной плоскостью представляется как поле между электродами, образованными гиперboloидами вращения (т.е. поле между очень узким гиперboloидом вращения и вторым очень широким гиперboloидом, превращенным в плоскость).

Уравнение гиперboloида вращения относительно оси X, образованного вращением около этой оси каждой из ветвей гиперболы:

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{y^2}{b^2 - A^2} = 1, \quad \text{имеет вид}$$

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{y^2 + z^2}{b^2 - A^2} = 1 \quad (4)$$

Поверхности иглы будет отвечать параметр A близкий к b .

Выражение для определения распределения потенциала вдоль оси X для частного случая двухполостных гиперboloидов вращения, полагая $b = c$, $K = 1$ (т.к. $K = \frac{b}{c}$ вращение относительно оси X) имеет вид:

$$U = \frac{A}{2} \ln \frac{b+A}{b-A} + B \quad (5)$$

При $x = 0$, $A = 0$. Полагая в (5) $A = 0$, найдем, что $B = 0$ (плоскость заземлена). Если игла имеет потенциал U_0 , то нетрудно определить $\frac{A}{2}$.

Подставив в выражение (5) значение $\frac{A}{2}$ получим:

$$U = U_0 \frac{\ln \frac{b+A}{b-A}}{\ln \frac{b+A_1}{b-A_1}} \quad (6)$$

$U = f(A)$ характеризует распределение потенциала вдоль промежутка без барьера

Учитывая, что $E = \frac{dU}{dA}$, найдем

$$E_1 = \frac{2U_0 b}{(b^2 - A^2) \ln \frac{b+A_1}{b-A_1}} \quad (7)$$

Полагая, что ось вращения гиперboloидов совпадает с осевой линией межэлектродного промежутка и подставляя соответствующие значения в (7) получим:

$$E_1 = \frac{2U_0 b}{(b^2 - S_1'^2) \ln \frac{b+S}{b-S}} \quad (8)$$

где

$$b = \frac{A_1}{\cos \alpha} = \frac{S}{\cos \alpha},$$

Угол α принимается небольшой с расчетом для узкого гиперboloида вращения (электрод с малым радиусом кривизны).

S_1' - расстояние от электрода с малым радиусом кривизны до точки поля, в которой определяется E_1 .

2. Определение зависимости $E_2 = f(S_1'')$

Распределение потенциала в поле, созданном распределенным на барьере зарядом, может быть определено [30]:

$$U_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} \int_0^l \frac{\rho \rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (9)$$

Для упрощения данного выражения предполагаем, что плотность зарядов ζ в любой точке поверхности барьера, ограниченной площадью окружности с радиусом $l = 60$ мм, мало отличается от некоторой средней плотности $\zeta_{\text{ср.}}$, с учетом этого выражение (9) принимает вид:

$$U_2 = \frac{\zeta_{\text{ср.}}}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} \int_0^l \frac{\rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (10)$$

После преобразования выражение (10) принимает вид:

$$U_2 = \frac{\zeta_{\text{ср.}}}{2\epsilon_0} (\sqrt{l^2 + z^2} - z) \quad (11)$$

При стремлении $z \rightarrow 0$, т.е. при определении потенциала вблизи поверхности барьера с распределенным зарядом, U_2 стремится к своему максимальному значению, равному $\frac{\zeta_{\text{ср.}}}{2\epsilon_0} l$.

Зная зависимость $U_2 = f(z)$, нетрудно определить $E_2 = f'(z)$.

$$E_2 = -\frac{dU_2}{dz} = -\frac{\zeta_{\text{ср.}}}{2\epsilon_0} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} - 1 \right) \quad (12)$$

Подставляя в (12) соответствующие значения получим:

$$E_2 = -\frac{q_{\text{ср.}}}{2\epsilon_0} \left(\frac{S_1''}{\sqrt{l^2 + S_1''^2}} - 1 \right) \quad (13)$$

где $q_{\text{ср.}}$ — среднее значение зарядов на барьере, которое определяется из ранее известной картины распределения заряда на барьере,

S_1'' — расстояние от барьера до точки поля в которой определяется E_2 .

Очевидно, что максимальная напряженность поля, созданная второй составляющей E_2 , имеет место при $S_1'' = 0$.


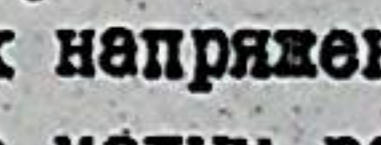
Общее выражение зависимости, характеризующей картину поля между электродами для межэлектродного промежутка с барьером имеет вид:

$$E = \frac{2U_0 b}{(b^2 - S_1'^2) \ln \frac{b+S}{b-S}} - \frac{q_{\text{ср.}}}{2\epsilon_0} \left(\frac{S_1''}{\sqrt{l^2 + S_1''^2}} - 1 \right) \quad (14)$$

На основании полученной зависимости (14) графически построена картина распределения поля межэлектродного промежутка с барьером.

Графическое изображение зависимости (14) дает ясное представление о картине распределения напряженности поля в межэлектродном промежутке с барьером в зависимости от его месторасположения относительно электродов.

ВЫВОДЫ

1. Зависимости пробивных напряжений от месторасположения барьеров в межэлектродных промежутках ($10 \text{ мм} \leq S \leq 25 \text{ мм}$) имеют прямолинейный характер как при \pm , так и при \pm . Максимальные значения пробивных напряжений соответствуют положениям барьеров у электрода с малым радиусом кривизны, минимальные — у плоскости.

Влияние полярности электродов межэлектродных промежутков с барьерами практически незначительно.

2. Кривые барьерного упрочнения, могут быть использованы для определения зоны упрочняющего действия барьера для данного межэлектродного промежутка.

3. Расчетная формула (3) может быть использована при практических расчетах (с точностью $\pm 2,5\%$) для определения пробивных напряжений межэлектродных промежутков ($10 \text{ мм} \leq S \leq 25 \text{ мм}$) в зависимости от месторасположения барьеров относительно электродов, создающих резко неоднородное поле.

4. На пробивные напряжения межэлектродных промежутков оказывает влияние только месторасположение барьера относительно электродов (т.е. величина и распределение зарядов на поверхности барьера). Материал барьера на пробивные напряжения практически не влияет.

5. Максимальный барьерный эффект для межэлектродных промежутков $S > 25$ мм имеет место при расположении барьеров на расстоянии $S_1 \approx 0,12 S$ от положительного электрода с малым радиусом кривизны.

6. Применение барьеров в качестве изоляции, для повышения прочности межэлектродных промежутков при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны при $S_1 > 0,25 S$ не имеет смысла, так как в этом случае наблюдается отрицательный барьерный эффект (снижение прочности промежутков).

7. Расчетная формула, характеризующая зависимость $q = f(S_1)$ может быть использована при практических расчетах (с точностью $\approx 3,5\%$) для определения максимальных значений зарядов на барьере при его различном месторасположении в межэлектродном промежутке.

8. Пробивные напряжения межэлектродных промежутков с металлическими барьерами, расположенными вблизи электрода с малым радиусом кривизны (т.е. в месте их максимальных упрочнений) на $35 \div 40\%$ ниже пробивных напряжений промежутков с диэлектрическими барьерами при всех равных условиях.

9. Металлизированные лавсановые барьеры (комбинированные барьеры), расположенные вблизи электрода с малым радиусом кривизны при прочих равных условиях оказывают большее влияние (на $15 \div 20\%$) на прочности межэлектродных промежутков, чем чисто металлические барьеры.

10. Максимальное пробивное напряжение межэлектродного промежутка с металлическим барьером с оптимальным отрицательным смещением примерно на 15% выше максимального пробивного напряжения данного промежутка с диэлектрическим барьером.

11. Максимальное пробивное напряжение межэлектродного промежутка с металлизированным лавсановым барьером с оптимальным отрицательным смещением на $35 \div 45\%$ выше максимального пробивного напряжения промежутка с диэлектрическим барьером.

12. Зависимость $U_{г} = f(S)$ может быть использована для определения оптимальных значений отрицательного смещения в зависимости от межэлектродных расстояний, с целью получения максимального эффекта отрицательного смещения.

13. Применение в межэлектродных промежутках двойных барьеров (проводящего с оптимальным отрицательным смещением и диэлектрического) приводит к повышению электрической прочности последних ($K_{упр.} \approx 2,75$).

14. Полученная зависимость (14) может быть использована для расчета напряженности поля межэлектродных промежутков с барьерами при их различных месторасположениях относительно электродов.

15. Упрочняющее действие металлических и металлизированных барьеров с отрицательным смещением может быть использовано в высоковольтной электроизоляционной технике с целью повышения электрической прочности изоляционной конструкции — или же, при том же уровне изоляции, уменьшения ее габаритов.

Отдельные разделы данной работы автором доложены:

1. На XIV научной сессии, посвященной итогам выполнения научно-исследовательских работ Ер.П.И., 1965 г., г.Ереван.
2. На XIII научной конференции проф.препод.состава вузов Закавказья, 1965 г., г.Тбилиси.
3. На XV научно-технической конференции проф.препод.состава Ер.П.И., 1966 г., г.Ереван.
4. На XVI научной научно-технической конференции проф.препод.состава Ер.П.И., 1967 г., г.Ереван.
5. На XVII научно-технической конференции проф.препод.состава технических вузов Закавказья, 1967 г., г.Баку.

Основное содержание работы опубликовано в
следующих статьях:

1. Э.А.Оганесов - Физика барьерного эффекта в воздухе при постоянном напряжении. Сб.аннотаций докладов, 1965, г.Тбилиси.
2. Э.А.Оганесов - К вопросу барьерного эффекта в воздухе при постоянном напряжении. Сб.науч.трудов Ер.П.И., т.24, 1967, г.Ереван.
3. Э.А.Оганесов - Металлические барьеры с отрицательным потенциалом для повышения разрядных напряжений в воздухе. Сб.науч.трудов Ер.П.И., том 24, 1967, г.Ереван.
4. Э.А.Оганесов - Исследование барьерного эффекта в воздухе при постоянном напряжении. Сб.аннотаций докладов, 1967, г.Баку.
5. В.Х.Петросян, Э.А.Оганесов, Р.А.Саркиоян, А.В.Арутюнян - Приближенный расчет напряженности поля межэлектродного промежутка с барьером. Сб.науч.трудов, том 25, 1968, г.Ереван.