

A.18

20

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

И Я Ф 81 - 70

А.А.Авдиенко, А.П.Лысенко

**ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПРОБОЙ ИЗОЛЯТОРОВ В
ВАКУУМЕ НА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ**

Новосибирск

1970

А.А.Авдиенко, А.П.Лысенко

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПРОБОЙ ИЗОЛЯТОРОВ В ВАКУУМЕ НА НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе исследуется зависимость пробивного напряжения изоляторов из разных материалов, разных форм и конструкций от размеров, от магнитного поля, от длины прямоугольных импульсов. Показана важная роль газов и паров, выделяющихся с поверхности изолятора в формировании пробоя.

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № _____

Исследованию пробоя по поверхности изоляторов в вакууме как на постоянном напряжении (1-4), так и на импульсном (5,6), посвящено много работ. Обзор этих работ дан в (7).

Поведение изоляторов при импульсном напряжении имеет ряд особенностей в механизме пробоя, а также в выборе критерия пробоя.

Воздействие на изолятор импульса напряжения отличается от случая постоянного напряжения тем, что распределение потенциала по поверхности изолятора для импульса определяется соотношением между характерным временем импульса τ и RC изолятора, а для постоянного напряжения только поверхностными утечками. Кроме того, начинается зарядка поверхности электронами, эмиттируемыми с катода и движущимися за счёт отражения и вторичной электронной эмиссии диэлектрика к аноду. Особенный случай представляет изолятор, размеры которого сравнимы с фронтом импульса, поскольку при этом работает на полном напряжении не вся длина, а только часть её.

В данной работе изучался пробой изоляторов различной формы и конструкции в вакууме при воздействии прямоугольных наносекундных импульсов. Основная часть испытаний проводилась на установке рис.1, описанной подробно в (8). Импульс напряжения с фронтами порядка 2 нсек и длительностью 40 нсек формируется разрядом двух кабелей РК-75-9-12 на два других, один из которых идёт к вакуумной камере 1, а другой к согласованной нагрузке. Второй ввод камеры также соединен с согласованной нагрузкой. Вакуумный объём откачивался диффузионным насосом ЦВЛ-100С до давления $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Вымораживание не оказало заметного влияния на пробивное напряжение и в дальнейшем не применялось.

Для регистрации процессов пробоя использовался осциллограф ОК-19м с разрешающим временем $\sim 0,7$ нсек. Часть испытаний проводилась на установке рис.3. Импульс длиной 80 нсек с фронтами 1 нсек формировался разрядом кабеля РК-50-18-22 через трехэлектродный разрядник, управляемый тиратроном ТГИ 600/25, на другой такой же кабель. При напряжении, недостаточном для пробоя, импульс многократно отражается от изолятора и зарядного устройства.

Для испытаний было взято несколько различных изоляторов из керамики, капрона и тефлона, однако основное количест-

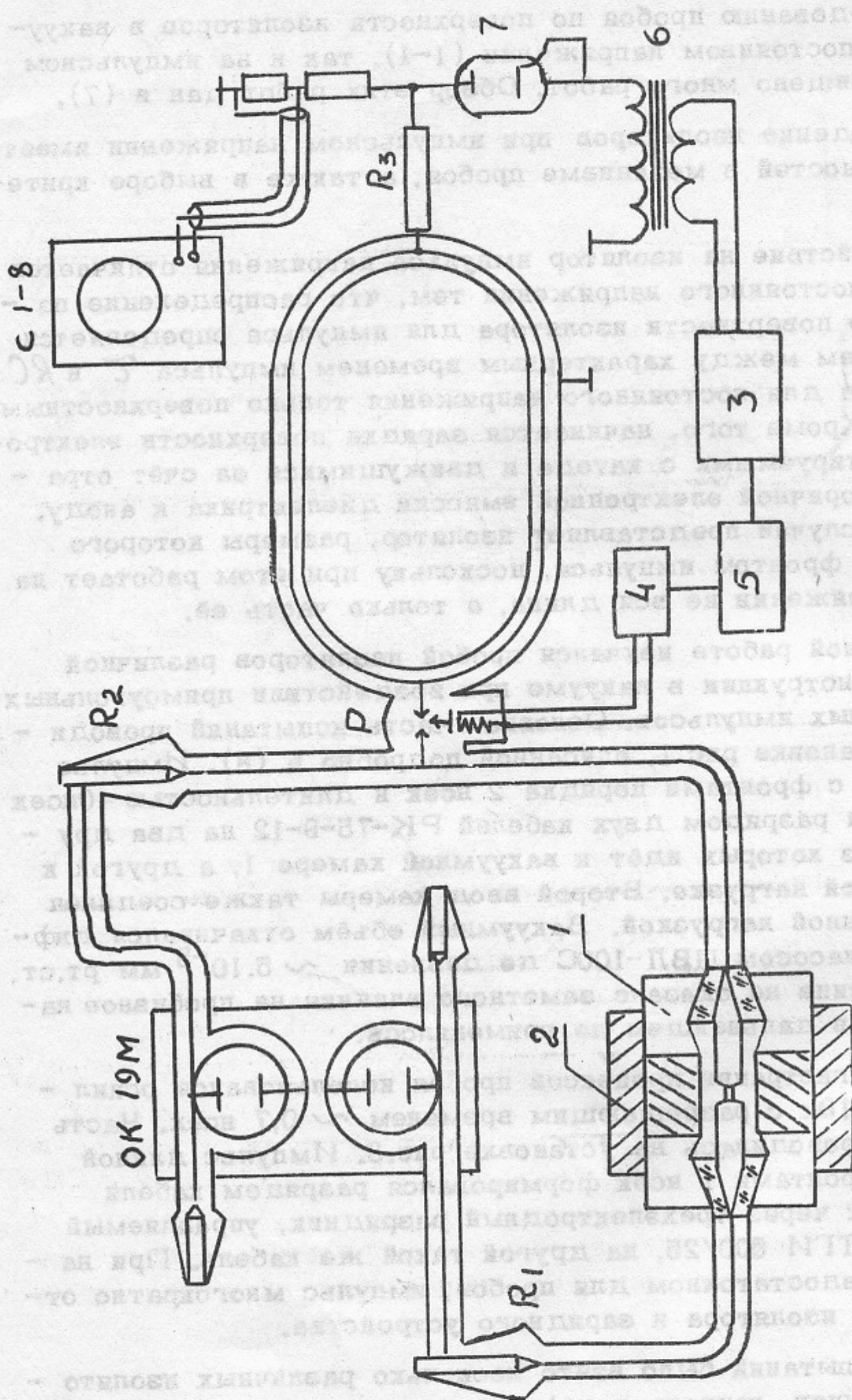


Рис. 1. Общая схема установки. 1-вакуумная камера, 2-полюса магнита, 3-генератор импульсов, 4-блок запуска разрядника, 5-задающий генератор, 6-повышающий трансформатор, 7-затягивающий диод, R_1, R_2 - 75 ом оконечные нагрузки и делители, R_3 - зарядное сопротивление, P - разрядник.

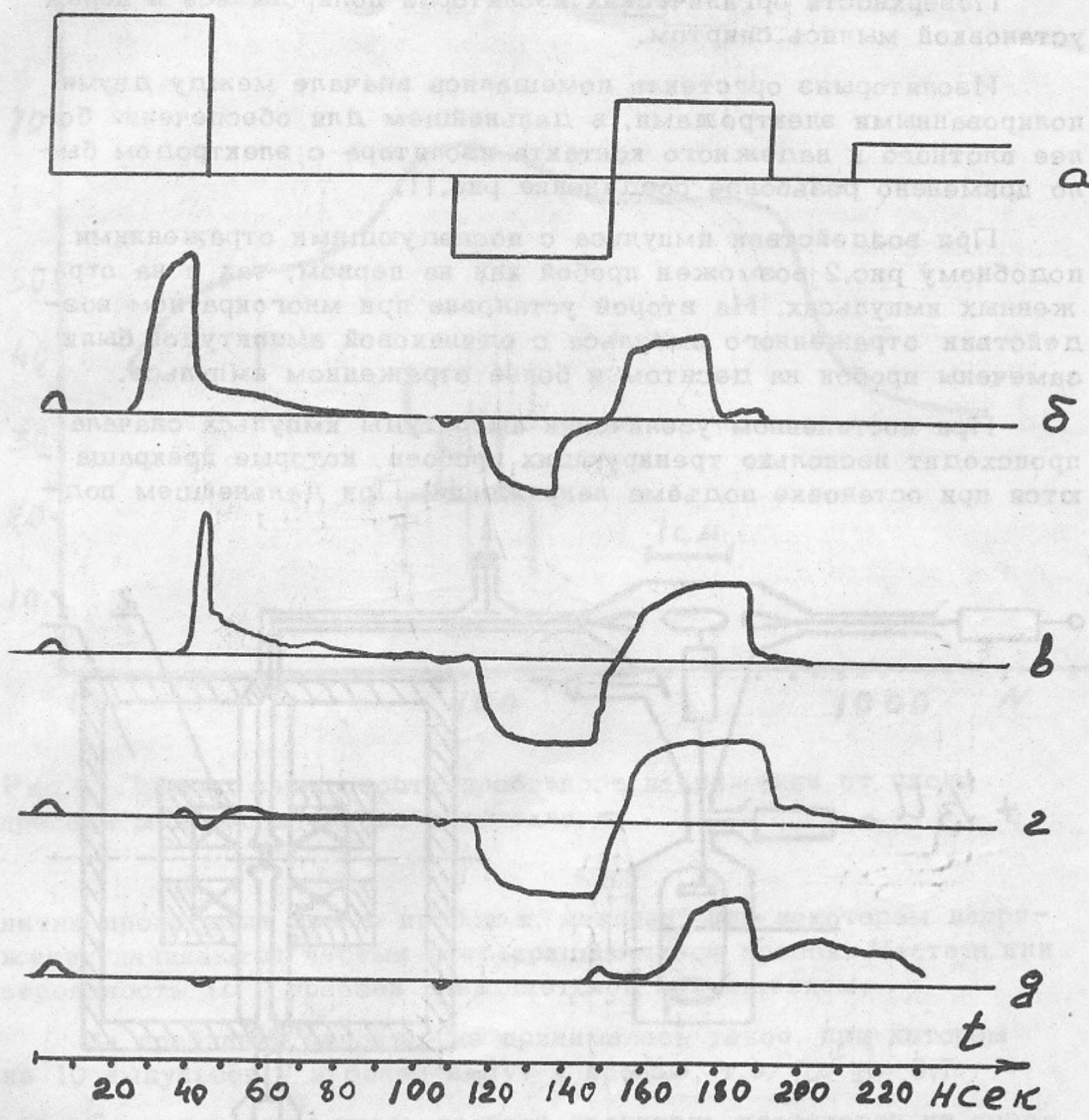


Рис.2. Форма напряжения на изоляторе при отсутствии пробоя и осциллограммы тока через изолятор при различных задержках пробоя.

во испытаний было проведено на изоляторах из оргстекла.

Поверхности органических изоляторов полировались и перед установкой мылись спиртом.

Изоляторы из оргстекла помещались вначале между двумя полированными электродами, в дальнейшем для обеспечения более плотного и надежного контакта изолятора с электродом было применено резьбовое соединение рис.11.

При воздействии импульса с последующими отражениями подобному рис.2 возможен пробой как на первом, так и на отраженных импульсах. На второй установке при многократном воздействии отраженного импульса с одинаковой амплитудой были замечены пробои на десятом и более отраженном импульсе.

При постепенном увеличении амплитуды импульса сначала происходит несколько тренирующих пробоев, которые прекращаются при остановке подъема напряжения. При дальнейшем под-

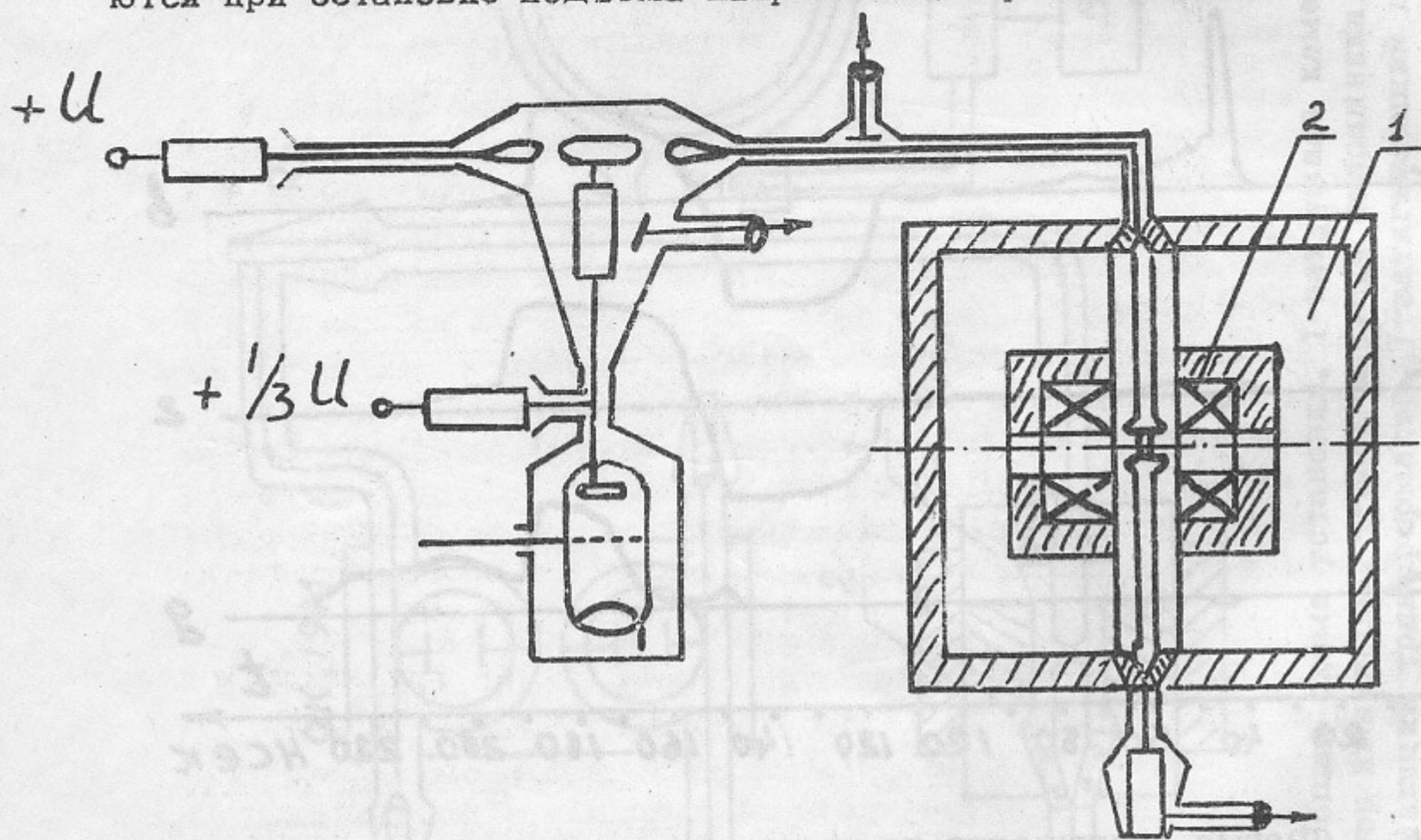


Рис.3. Схема установки для пробоя изоляторов в сильных магнитных полях. 1 - вакуумный объем, 2 - импульсный магнит на 100 кгс.

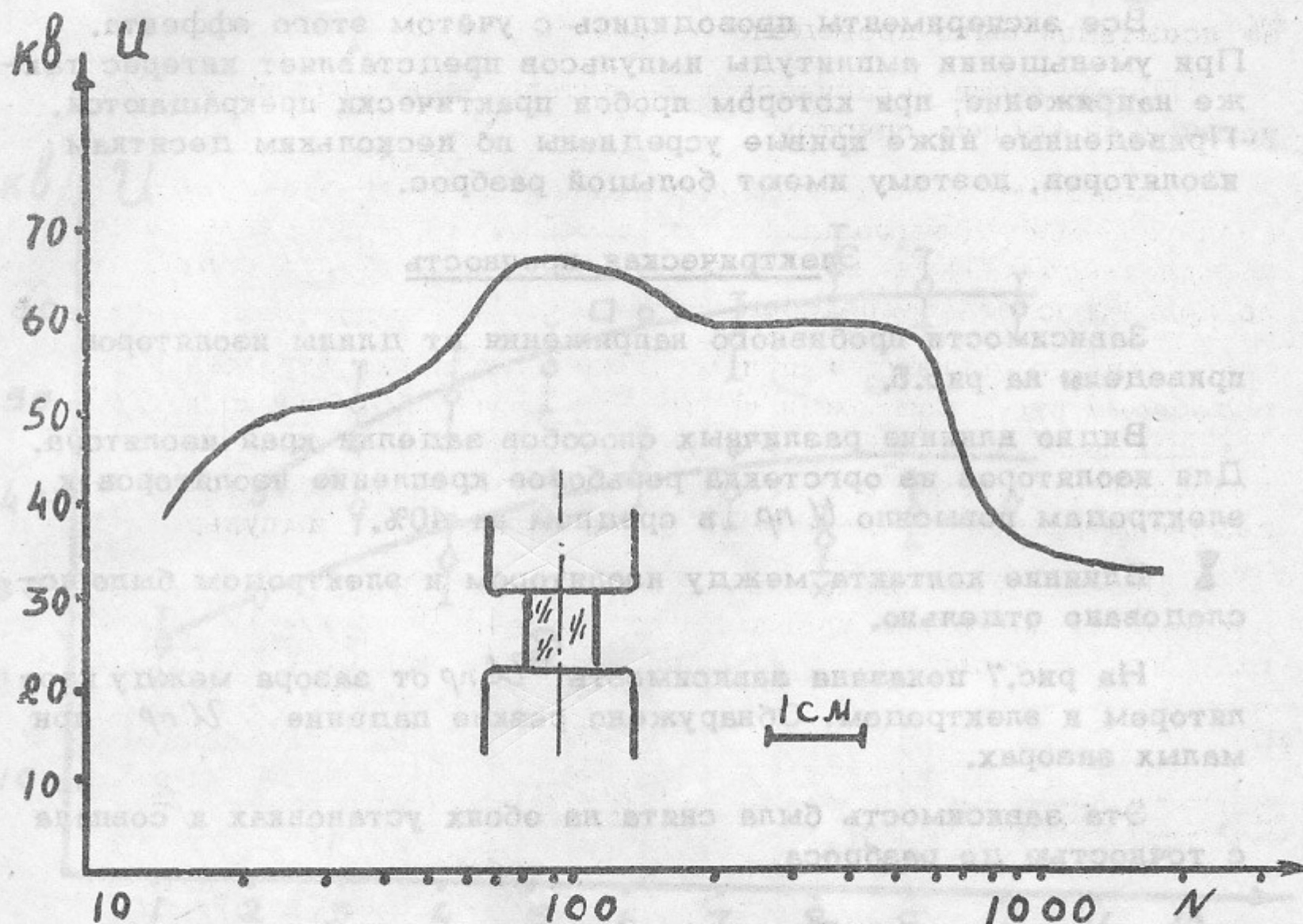


Рис.4. Пример зависимости пробивного напряжения от числа пробоев для изолятора из оргстекла.

нятии происходят новые пробой и, наконец, при некотором напряжении начинают частые непрекращающиеся пробой. Частота или вероятность ω пробоев повышается с напряжением.

За пробивное напряжение принималось такое, при котором из 10 импульсов 7 и более ведут к пробую, т.е. $\omega \geq 0,7$.

С увеличением числа пробоев прочность изоляторов из органических материалов необратимо ухудшается. Пример такого снижения для изолятора из оргстекла длиной 8 мм представлен на рис.4.

Пробивное напряжение изоляторов из керамики при числе пробоев до 10^4 не снижалось.

Все эксперименты проводились с учётом этого эффекта. При уменьшении амплитуды импульсов представляет интерес также напряжение, при котором пробой практически прекращаются. Приведенные ниже кривые усреднены по нескольким десяткам изоляторов, поэтому имеют большой разброс.

Электрическая прочность

Зависимости пробивного напряжения от длины изоляторов приведены на рис.5.

Видно влияние различных способов заделки края изолятора. Для изоляторов из оргстекла резьбовое крепление изоляторов к электродам повысило $U_{пр}$ в среднем на 40%.

Влияние контакта между изолятором и электродом было исследовано отдельно.

На рис.7 показана зависимость $U_{пр}$ от зазора между изолятором и электродом. Обнаружено резкое падение $U_{пр}$ при малых зазорах.

Эта зависимость была снята на обеих установках и совпала с точностью до разброса.

Временные характеристики

Типичные осциллограммы тока при пробое изолятора показаны на рис.2.

Фронт пробоя для всех испытанных изоляторов совпадал $\tau_{фр} \sim 1$ нсек, с точностью до разрешения осциллографа.

При первых пробоях изоляторов наблюдается большой разброс времени задержки пробоя. При этом нередки случаи, когда пробой происходит на отраженных импульсах (рис.2 г, д). На осциллограмме рис.2д к концу первого импульса заметно лишь незначительное нарастание тока, но отраженный импульс вдвое меньшей амплитуды и обратной полярности прошел через изолятор, как через короткое замыкание. Такой же эффект наблюдается при пробое вакуумного промежутка (8).

С повышением напряжения задержка пробоя уменьшается и

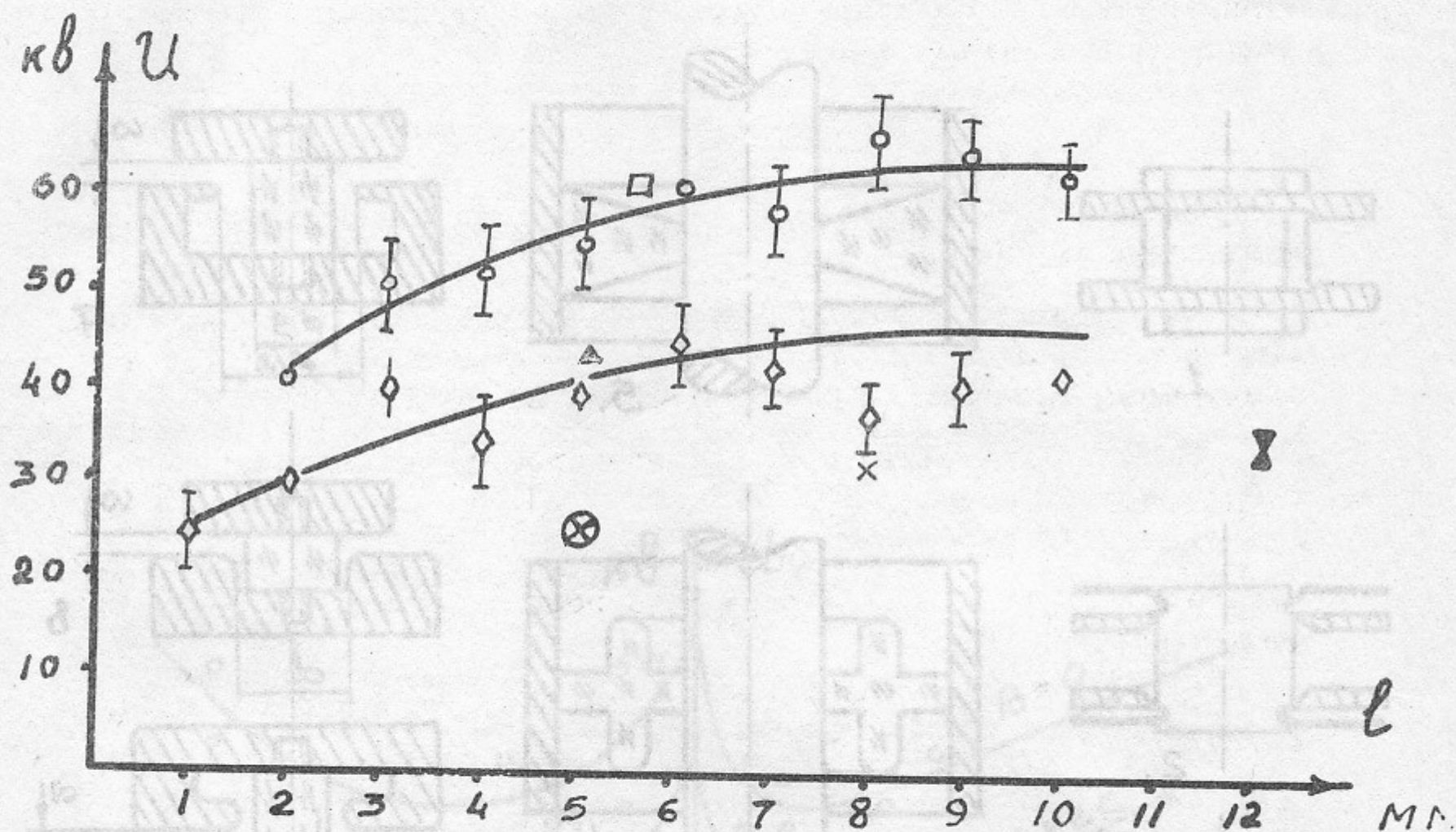


Рис.5. Зависимость пробивного напряжения от длины изоляторов.

- - изоляторы из оргстекла с резьбовым креплением, электроды медные (рис.11).
- ◇ - изоляторы из оргстекла без резьбы, электроды медные (рис.4).
- ▲ - керамический между медными электродами.
- - керамический, зажатый в медные шайбы (рис.6 (2)).
- × - трубчатый керамический, электроды медные, диффузионная сварка в водороде (рис.6 (1)).
- ⌘ - керамический, электроды титановые, активная пайка (рис.6 (3)).
- ⊗ - керамический, торцы напыленные серебром и медные электроды (рис.6 (4)).

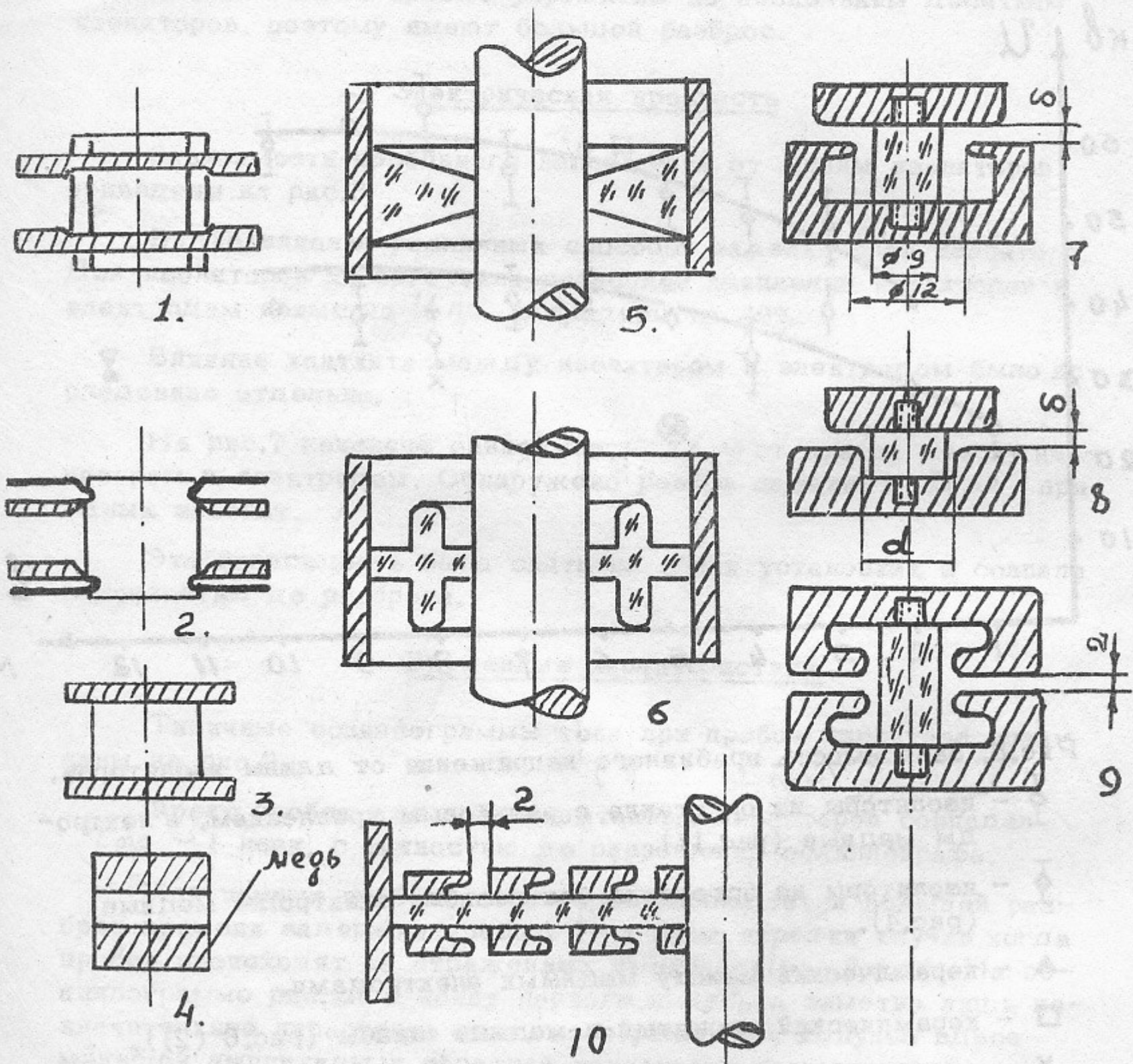


Рис. 6. Конструкции изоляторов

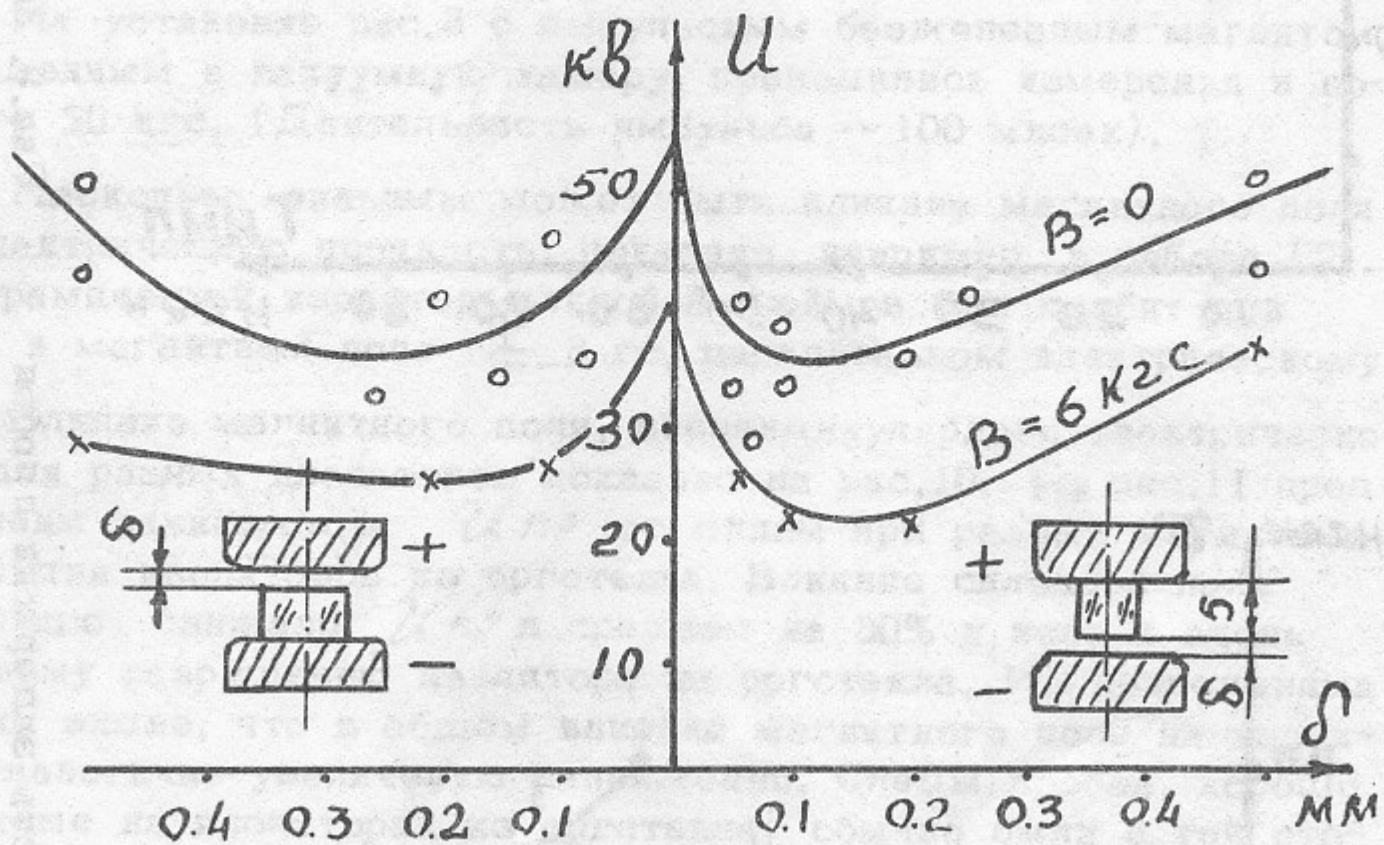


Рис.7. Зависимость пробивного напряжения от зазора между изолятором и электродом. Изолятор длиной 5 мм из оргстекла, электроды медные.

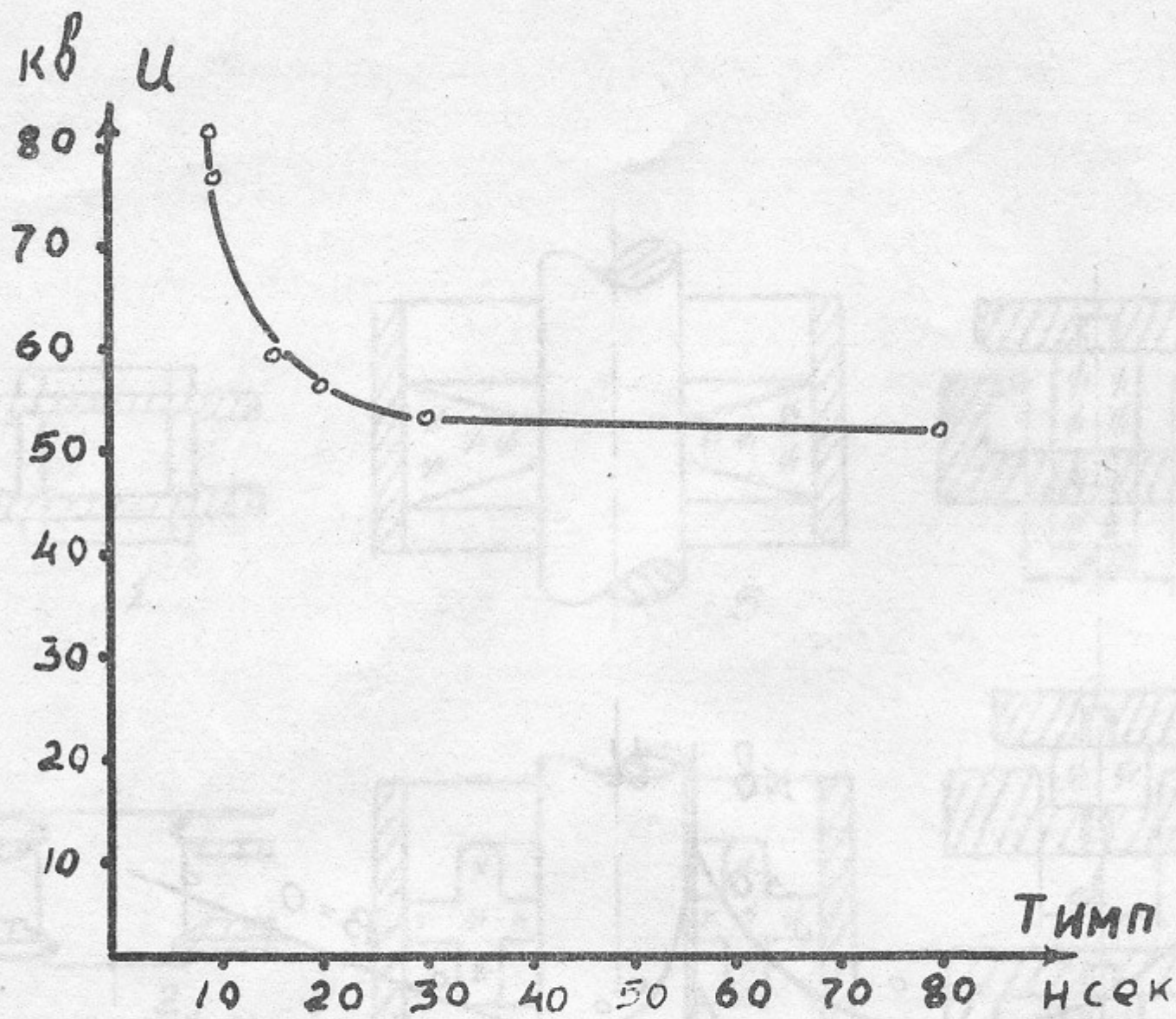


Рис.9. Зависимость пробивного напряжения от длительности импульса.

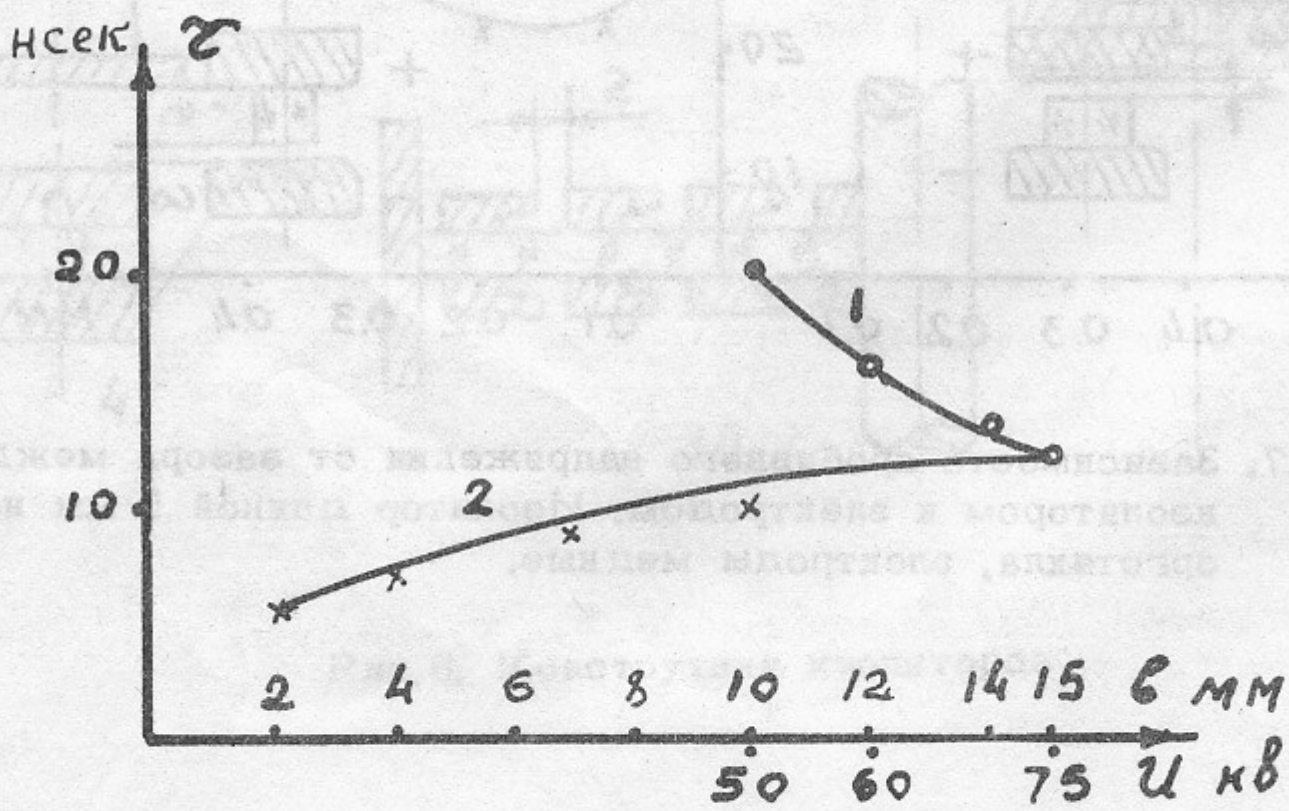


Рис.8. Зависимость задержки пробоя от напряжения (1), и $\tau_{заг}$ от длины (2).

после нескольких десятков пробоев достигает некоторой установившейся минимальной величины. Например, для изолятора из оргстекла длиной 15 мм зависимость задержки от напряжения показана на рис.8, кривая 1.

Зависимость минимальной задержки от длины изолятора слабая, рис.8, кривая 2.

На рис.9 приведена зависимость пробивного напряжения от длительности импульса для керамического изолятора

Влияние магнитного поля на пробивное напряжение

Изучение влияния магнитного поля на $U_{пр}$ проводилось на установке рис.1 с постоянным электромагнитом 2. Магнитное поле регулировалось от 0 до 7 кгс.

На установке рис.3 с импульсным безжелезным магнитом, помещенным в вакуумную камеру, проводились измерения в полях ~ 20 кгс. (Длительность импульса ~ 100 мксек).

Насколько сильным может быть влияние магнитного поля на электрическую прочность, показано, например, в работе (2).

Керамический изолятор длиной 8 дюймов был пробит при 40 кв в магнитном поле ~ 3 гс, параллельном электрическому.

Влияние магнитного поля, перпендикулярного электрическому, для разных изоляторов показано на рис.10. На рис.11 представлены зависимости $U_{пр}$ от длины при разных магнитных полях для изоляторов из оргстекла. Влияние сильного поля ~ 20 кгс снижало $U_{пр}$ в среднем на 30% и вело к очень быстрому разрушению изолятора из оргстекла. Из приведенных кривых видно, что в общем влияние магнитного поля на изолятор аналогично увеличению напряжения. Следы пробоя, хорошо заметные на изоляторах из оргстекла, обычно были с той стороны, где скорость дрейфа $V = e \frac{E \times H}{|E| |H|}$ перпендикулярна к поверхности изолятора.

Зависимость от формы изоляторов

Было исследовано большое количество изоляторов разных форм и конструкций.

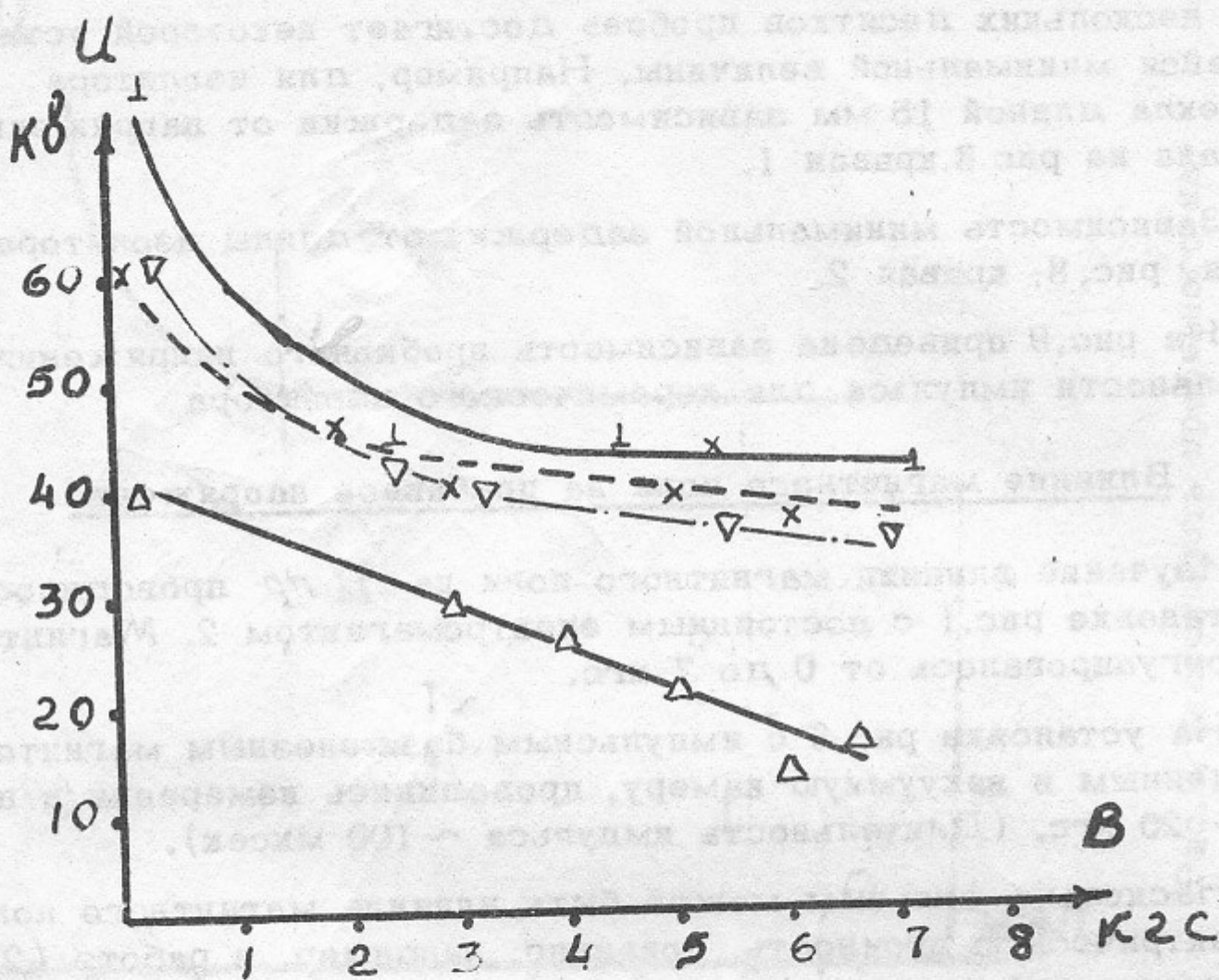


Рис.10. Зависимость $U_{пр}$ от магнитного поля.

Δ керамический изолятор между медными электродами.

X керамический изолятор, зажатый в медные шайбы (рис.6 (2)).

▽ изолятор из тефлона $l = 2$ мм.

┌ изолятор из капрона $l = 4$ мм.

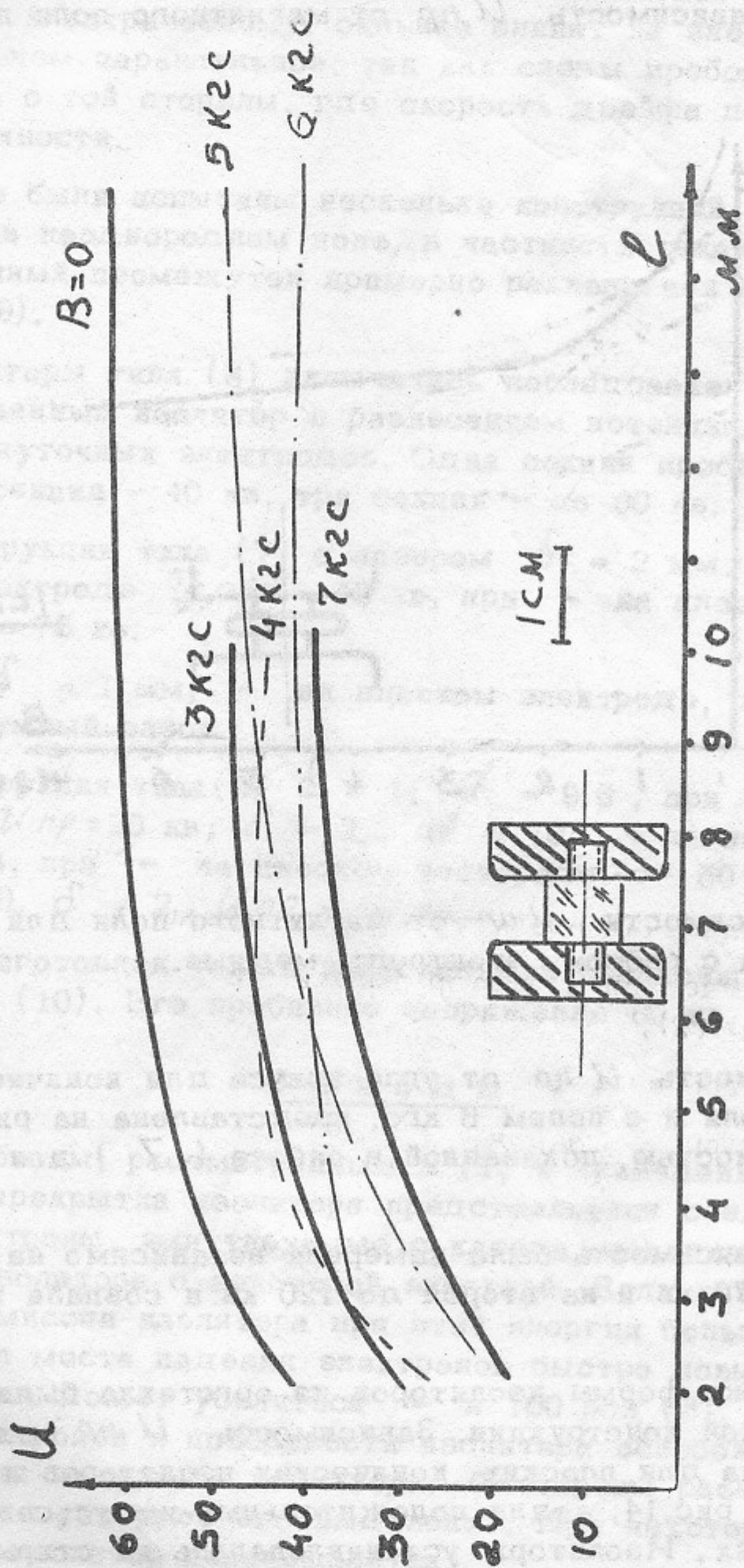


Рис.11. Зависимость U от длины изолятора при разных магнитных полях. Изолятор из оргстекла, электроды медные.

Изоляторы с ребром были испытаны только без резьбового крепления. Зависимость $U_{пр}$ от магнитного поля показана на рис.12.

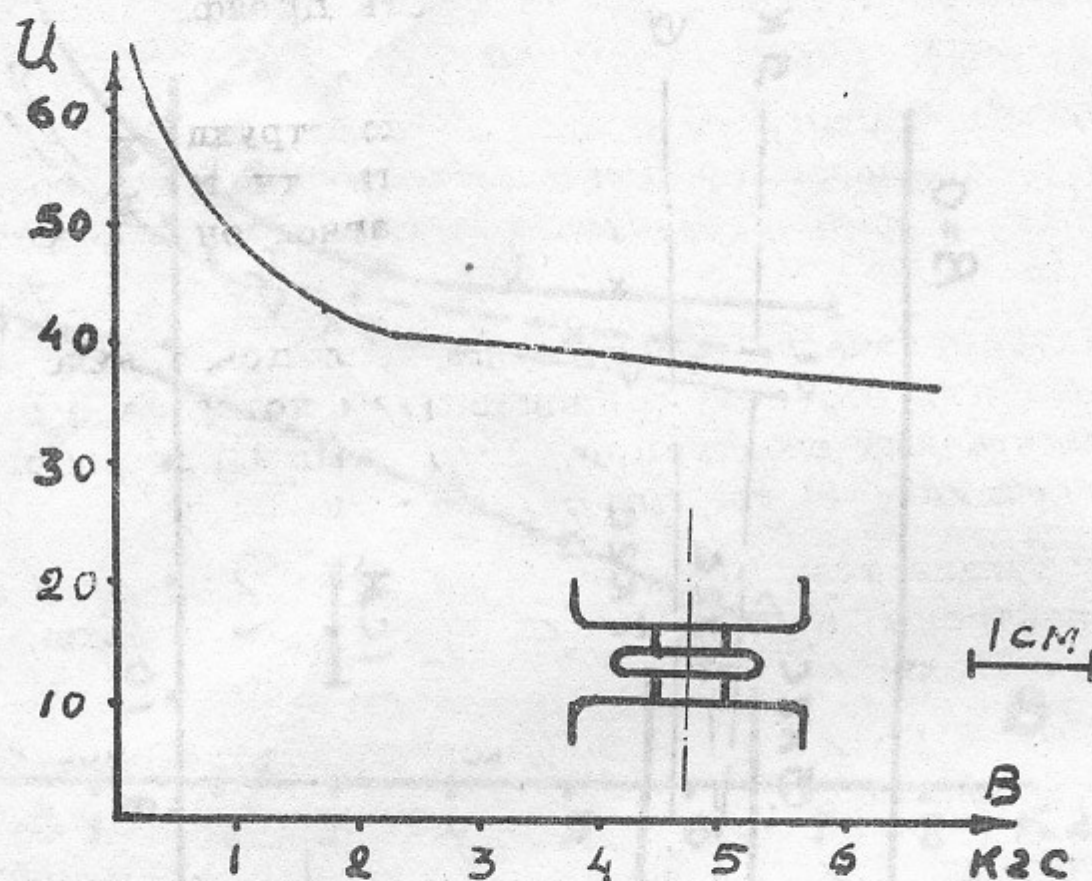


Рис.12. Зависимости $U_{пр}$ от магнитного поля для изолятора из оргстекла с ребром, электроды медные.

Зависимость $U_{пр}$ от угла конуса для конических изоляторов без поля и с полем 6 кгс, представлена на рис.13 и сходна с зависимостью, показанной в работе (7) для постоянного напряжения.

Эта зависимость была измерена независимо на первой установке до 70 кВ и на второй до 120 кВ и совпала в пределах разброса.

Такие же формы изоляторов из оргстекла были испытаны в коаксиальной конструкции. Зависимость $U_{пр}$ от магнитного поля показана для плоских, конических изоляторов и изоляторов с ребром на рис.14, а-для положительных импульсов, б - для отрицательных. Изоляторы устанавливались на открытом конце коаксиала.

Для изоляторов данной геометрии магнитное поле, перпендикулярное электрическому, сильнее влияет на электрическую прочность, чем параллельное, так как следы пробоя, как правило, находились с той стороны, где скорость дрейфа перпендикулярна к поверхности.

Далее были испытаны несколько конструкций, где изолятор находился в неоднородном поле, в частности такая конструкция, где вакуумный промежуток примерно равнопрочен с изолятором рис.6 (7,8,9).

Изоляторы типа (8) включались последовательно, образуя секционированный изолятор с разнесением потенциала по ёмкостям промежуточных электродов. Одна секция пробилась при 20кв, две секции - 40 кв, три секции - до 60 кв.

Конструкция типа (7) с зазором $\delta = 2$ мм, при + на плоском электроде $U_{пр} = 45$ кв, при - на плоском электроде $U_{пр} = 75$ кв.

При $\delta = 1$ мм, + на плоском электроде, при 40 кв пробился вакуумный зазор.

Конструкция типа (8) $\delta = 1$; $d = 9,6$, при + на плоском электроде $U_{пр} = 20$ кв; $\delta = 2$, $d = 10$; + на плоском электроде 55 кв, при - на плоском электроде ~ 50 кв. Конструкция типа (9) $\delta = 2$, $U_{пр} = 60$ кв.

Был изготовлен также коаксиальный секционированный изолятор рис.6 (10). Его пробивное напряжение 60 кв.

В ы в о д ы

По работам, рассмотренным в (7) и приведенным экспериментам, перекрытие изолятора представляется следующим образом. Электроны, эмиттируемые с катода, попадают на поверхность изолятора с некоторой энергией. Если коэффициент вторичной эмиссии изолятора при этой энергии больше единицы, то потенциал места падения электронов быстро повышается и поле у катода может усилиться \sim в 100 раз (3). За счёт энергии электронов с поверхности изолятора освобождается газ, а также пары материала изолятора. Электроны размножаются в этом газе и ускоряют его выделение. При некотором количестве газа изолятор перекрывается.

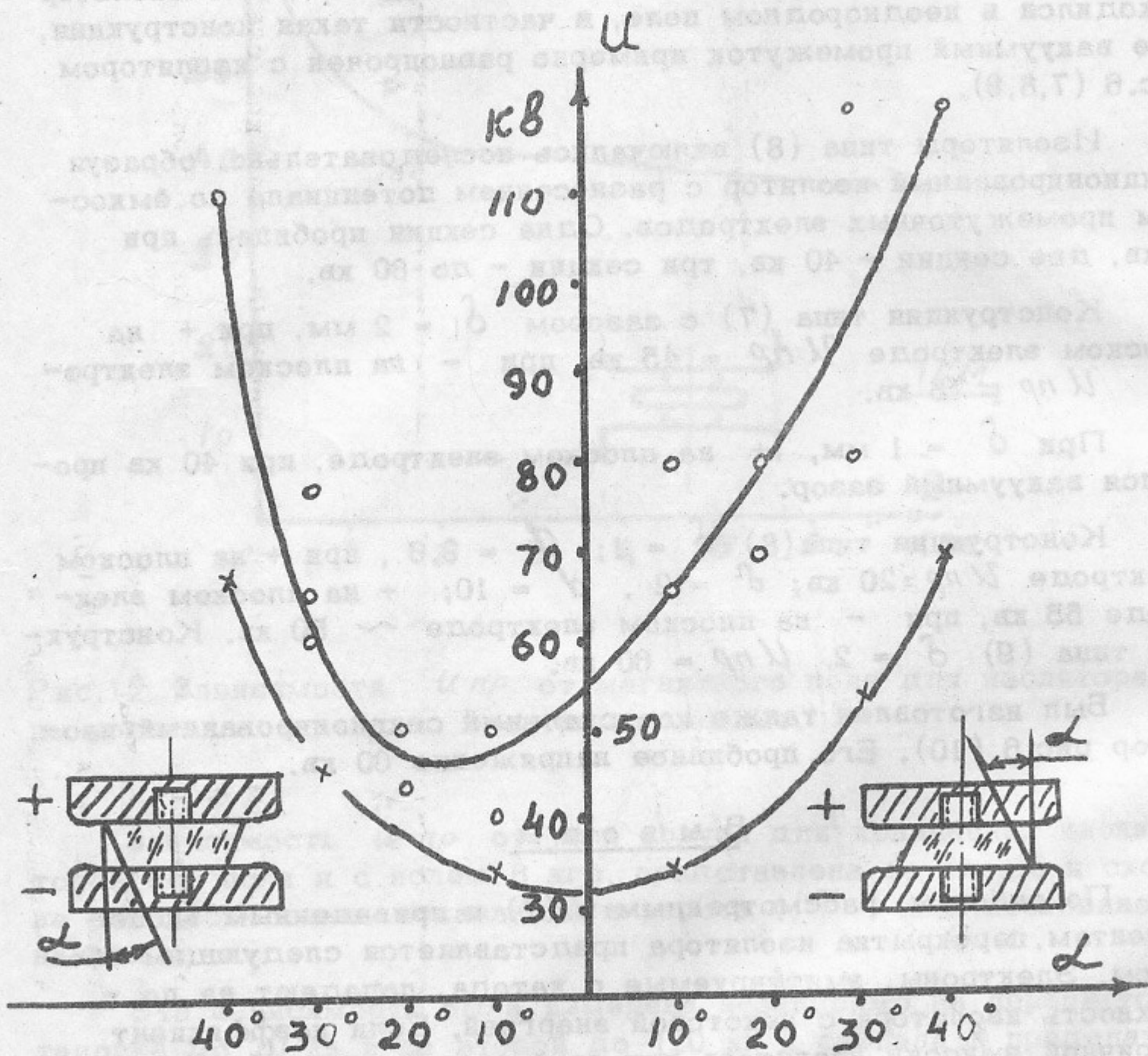


Рис.13. Зависимость $U_{пр}$ от угла конуса изолятора

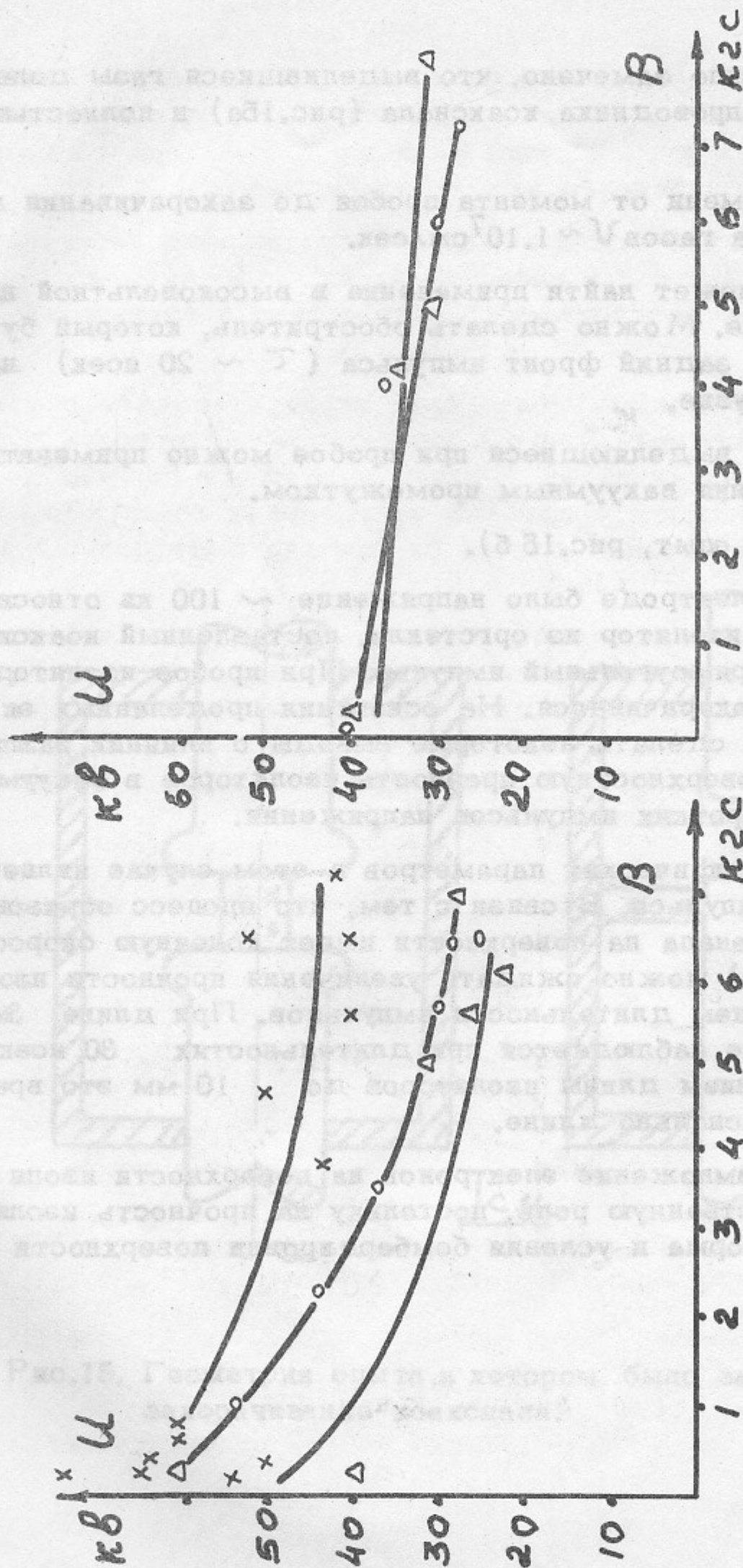


Рис.14. Зависимость U от магнитного поля для коаксиальных изоляторов.

а) положительные импульсы, б) отрицательные импульсы.

○ - плоские коаксиальные изоляторы,

△ - конические, рис.6 (5),

× - изоляторы с ребром, рис.6 (6).

Более того, было замечено, что выделившиеся газы долетают до внешнего проводника коаксиала (рис.15а) и полностью его закорачивают.

Оценка по времени от момента пробоя до закорачивания дает скорость разлёта газов $V \sim 1 \cdot 10^7$ см/сек.

Это явление может найти применение в высоковольтной наносекундной технике. Можно сделать обостритель, который будет формировать и задний фронт импульса ($\tau \sim 20$ нсек) на согласованной нагрузке.

Пары и газы, выделяющиеся при пробое можно применить также для управления вакуумным промежутком.

Был проделан опыт, рис.15 б).

На верхнем электроде было напряжение ~ 100 кв относительно экрана. На изолятор из оргстекла, поставленный коаксиально, подавался прямоугольный импульс. При пробое изолятора верхний коаксиал закорачивался. На основании проделанных экспериментов можно сделать некоторые выводы о влиянии различных факторов на поверхностную прочность изоляторов в вакууме при воздействии коротких импульсов напряжения.

Одним из специфических параметров в этом случае является длительность импульса. В связи с тем, что процесс образования проводящего канала на поверхности имеет конечную скорость ($V \sim 1 \cdot 10^7$ см/сек) можно ожидать увеличения прочности изолятора с уменьшением длительности импульсов. При длине 3мм заметное увеличение наблюдается при длительностях 30 нсек (рис.9). С увеличением длины изоляторов до 10 мм это время растёт пропорционально длине.

Поскольку размножение электронов на поверхности изоляторов играет существенную роль, постольку на прочность изоляторов влияет его форма и условия бомбардировки поверхности

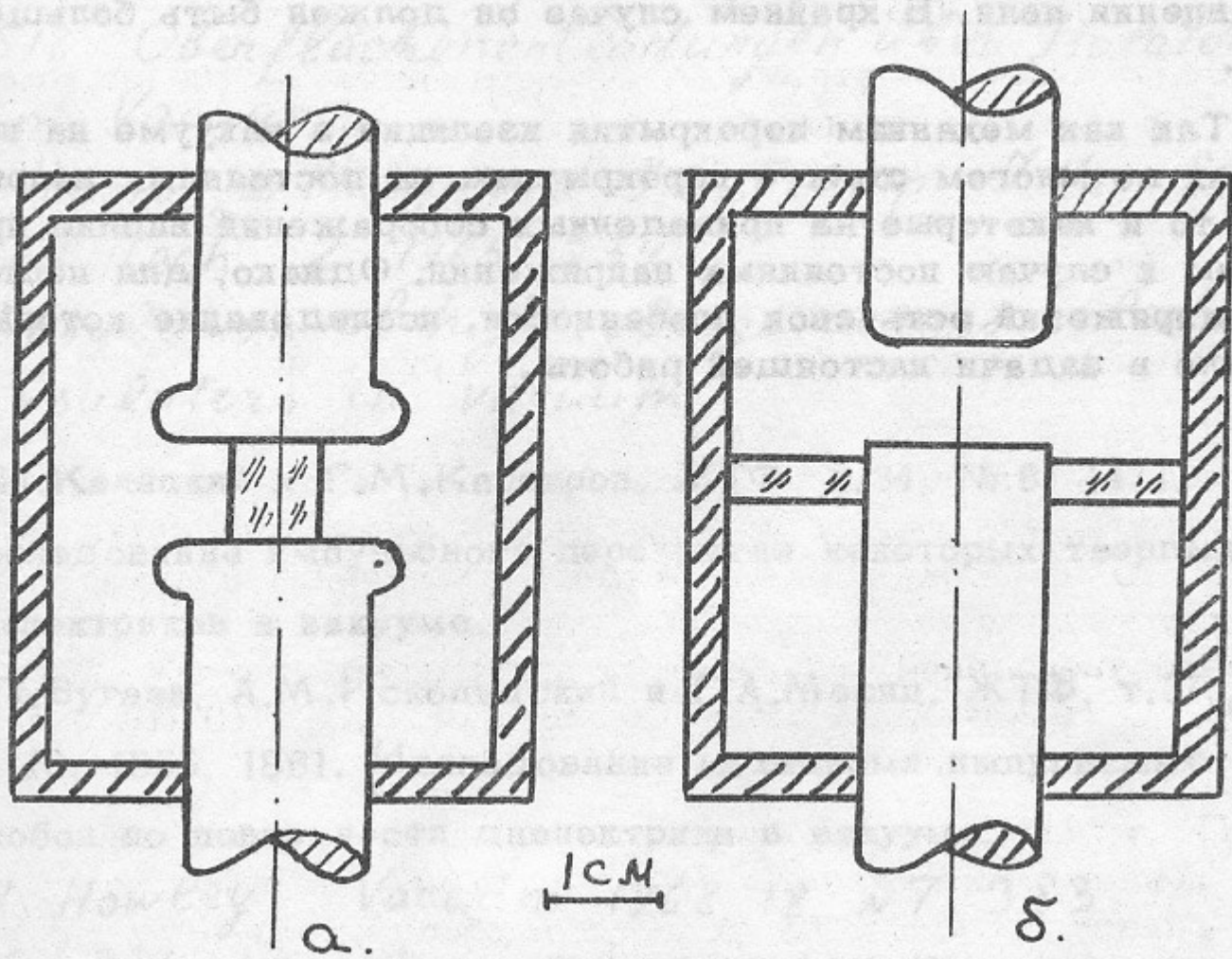


Рис.15. Геометрия опыта, в котором было замечено закорачивание коаксиала.

электронами. Как показывают результаты опытов, изготовление изоляторов конической формы при определенных углах конуса повышает прочность их в 2 раза. В то же время наличие ребра на поверхности существенного выигрыша не даёт.

Наличие магнитного поля в месте расположения изоляторов снижает прочность в $\sim 1,5$ раза при полях 2 кэс за счёт увеличения процессов столкновения электронов с поверхностью изолятора.

К уменьшению бомбардировки края изолятора ведёт плотное механическое соединение его с электродом. Прочность при этом может быть увеличена на 40%. По этой же причине недопустим зазор между поверхностью изолятора и электродом в направлении поля. В крайнем случае он должен быть больше 2 мм.

Так как механизм перекрытия изоляции в вакууме на импульсах во многом схож с перекрытием на постоянных напряжениях, то и некоторые из приведенных соображений вполне применимы к случаю постоянных напряжений. Однако, для постоянных напряжений есть свои особенности, исследование которых не входило в задачи настоящей работы.

Л и т е р а т у р а

1. P. Gleichauf *J. Appl. Phys.* 22, 1951, p515, 766
Electrical breakdown over insulators
in high vacuum
2. M. Kofoid *Power Apparatus and Systems*
№ 6 1960 p.991, p.999. Phenomena at
the metal-dielectric junction of high-
voltage insulators in vacuum and magnetic f.
3. H. Boersch, H. Hamisch, *Z. angew. Phys.* 15 1963
518. Oberflächenentladungen über Isolatoren
im Vacuum.
4. J. Shannon, S. Philip and J. G. Trump *J. Vac. Sci
and Tech.* 2 1965 234
Insulation of high voltage across solid
insulators in vacuum.
5. И.И.Каляцкий и Г.М.Кассиров, *ЖТФ*, т.34, № 8, 1471.
Исследование импульсного перекрытия некоторых твердых
диэлектриков в вакууме.
6. С.П.Бугаев, А.М.Искольдский и Г.А.Месяц, *ЖТФ*, т.37,
№ 10, 1855, 1861. Исследование механизма импульсного
пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме.
7. R. Howley *Vacuum* 1968, 18, № 7 383
Solid insulators in vacuum.
(Перевод. Экспресс-информ. Электроника № 44, 1968).
8. А.А.Авдиенко, А.В.Киселев. Временные характеристики ва-
куумного пробоя. Препринт ИЯФ, 1969.

Ответственный за выпуск А.А.Авдиенко

Подписано к печати **25.9.70.**

Усл. **1** печ.л., тираж **150** экз. Бесплатно.

Заказ № **81** . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.