

37

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

ПРЕПРИНТ 349

А.А.Авдиенко, А.В.Киселёв

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО  
ПРОБОЯ**

Новосибирск

1969



А.А.Авдиенко, А.В.Киселёв

## ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ПРОБОЯ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Исследовались временные характеристики пробоя вакуумных промежутков 0,1 - 0,6 мм при воздействии постоянного и импульсного напряжения. Импульсы прямоугольной формы длительностью  $\sim 30$  нсек и с фронтом  $\sim 2$  нсек. Измерения проводились при различных материалах электродов и способах их обработки. Общее число импульсов  $\sim 5000$ .



Настоящая работа проделана с целью набора достаточного количества статистических данных для изучения времени и характера развития вакуумного пробоя при постоянном напряжении и при подаче на исследуемый промежуток наносекундных импульсов для различных материалов электродов и способов их обработки.

Изучение проводилось с помощью экспериментальной техники, которая, в отличие от известных работ /1-5,7/, имела следующие методические преимущества:

1. Стабильность величины и формы прямоугольного высоковольтного импульса, вызывающего пробой вакуумного промежутка.

2. Минимально возможную эрозию электродов после каждого пробоя, что снижало влияние её на последующие разряды и позволяло набирать большую статистику.

3. Отсутствие хвоста послеимпульсов и греющих токов через разрядный промежуток, что позволило устанавливать результат воздействия только основного короткого импульса путем последующей подачи дозированных зондирующих сигналов.

4. Фотографирование осциллограмм всех последовательных пробоев для наблюдения динамики постепенного изменения их формы, а также для надежной фиксации статистически редких явлений.

5. Возможность сравнительного изучения поведения вакуумного разрядного промежутка в широкой области перенапряжений.

#### Методика измерений

Общая схема экспериментальной установки изображена на рис.1. Генератор вырабатывает прямоугольные импульсы с амплитудой 0,5 - 45 кв на согласованной нагрузке 37 ом, длительностью от  $5 \cdot 10^{-9}$  сек до нескольких сотен наносекунд и передним фронтом  $\sim 2$  нсек. Длительность импульса во всех опытах была  $33 \cdot 10^{-9}$  сек.

Частота следования может быть изменена от одиночных импульсов до 60 гц. Среднеквадратичный разброс запаздывания выходного импульса по отношению к запуску  $\sim 10^{-4}$  сек.

Формирующая линия генератора, изготовленная из двух от -



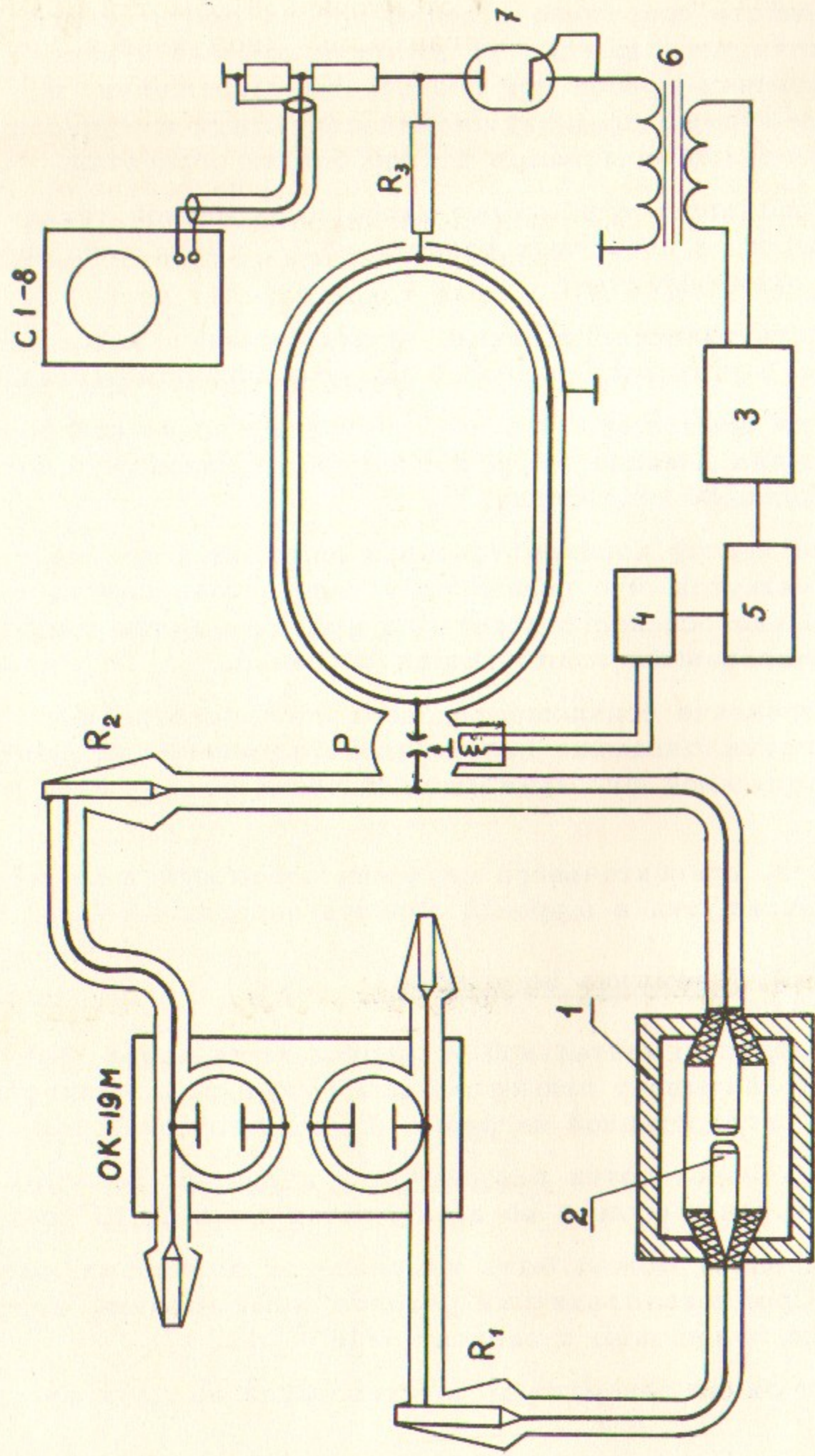


Рис.1. Общая схема установки.  
 1 - вакуумная камера; 2 - исследуемый промежуток, 3 - тиратронный генератор импульсов; 4 - блок запуска разрядника; 5 - задающий генератор; 6 - повышающий трансформатор; 7 - задерживающий диод,  $R_1$ ,  $R_2$  -75-ом оконечные нагрузки и делители,  $R_3$  - зарядное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

резков кабеля РК-75-9-12 заряжается от вторичной обмотки повышающего трансформатора 6 через задерживающий диод и зарядное сопротивление  $R_3 \approx 30$  ком большим током, что устраняет нестабильность высоковольтного импульса за счёт токов утечки. На первичную обмотку трансформатора подаётся колоколообразный импульс стабилизированной амплитуды 30 - 600 в от специального тиратронного генератора 3. Применение задерживающего диода позволяет запускать генератор после окончания зарядного импульса, что избавляет от колебаний послеимпульсных токов за счёт разряда собственной ёмкости трансформатора.

Разрядник генератора (рис.2) обеспечивает коммутацию формирующей линии на два кабеля РК-75-9-12 при любом напряжении на ней за счёт оперативного изменения межэлектродного зазора в пределах 0 - 3 мм при давлении азота 1 - 20 ат. Запуск разрядника механический. Запускающий электрод 7 - вольфрамовая проволока  $\varnothing 1$  мм, выдвигающаяся до 0,6 мм из отверстия в неподвижном электроде 3 в момент запуска. Колебательная система сделана таким образом, что совершает при запуске одноапериодическое колебание, причём скорость электрода в момент появления его из отверстия максимальна. Для повышения износоустойчивости подвижный электрод 5 имеет вольфрамовый вкладыш.

Вакуумный объём откачивался насосом Н2С. Пары масла вымораживались ловушкой с холодным барьером, охлаждаемой жидким азотом. Рабочий вакуум  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.

Вводы в вакуумный объём и электродная система со встроенным микрометрическим винтом для установления величины зазора с точностью  $\pm 0,001$  см имели волновое сопротивление 75 ом, что обеспечивало согласование с одним из выводов генератора. Электроды профиля Роговского  $\varnothing 22$  мм полировались в зависимости от целей опыта либо механически пастой ГОИ, либо электролитически, после чего мылись этиловым спиртом.

На рис.3а, б представлены эпюры напряжения на исследуемом промежутке в случае отсутствия пробоя и тока через него при неполном пробое.

Для регистрации процессов пробоя использовался осциллограф ОК-19 м с разрешающим временем  $0,7 \cdot 10^{-9}$  сек и лентопротяжным устройством, с регулируемой скоростью перематки фотоплёнки.



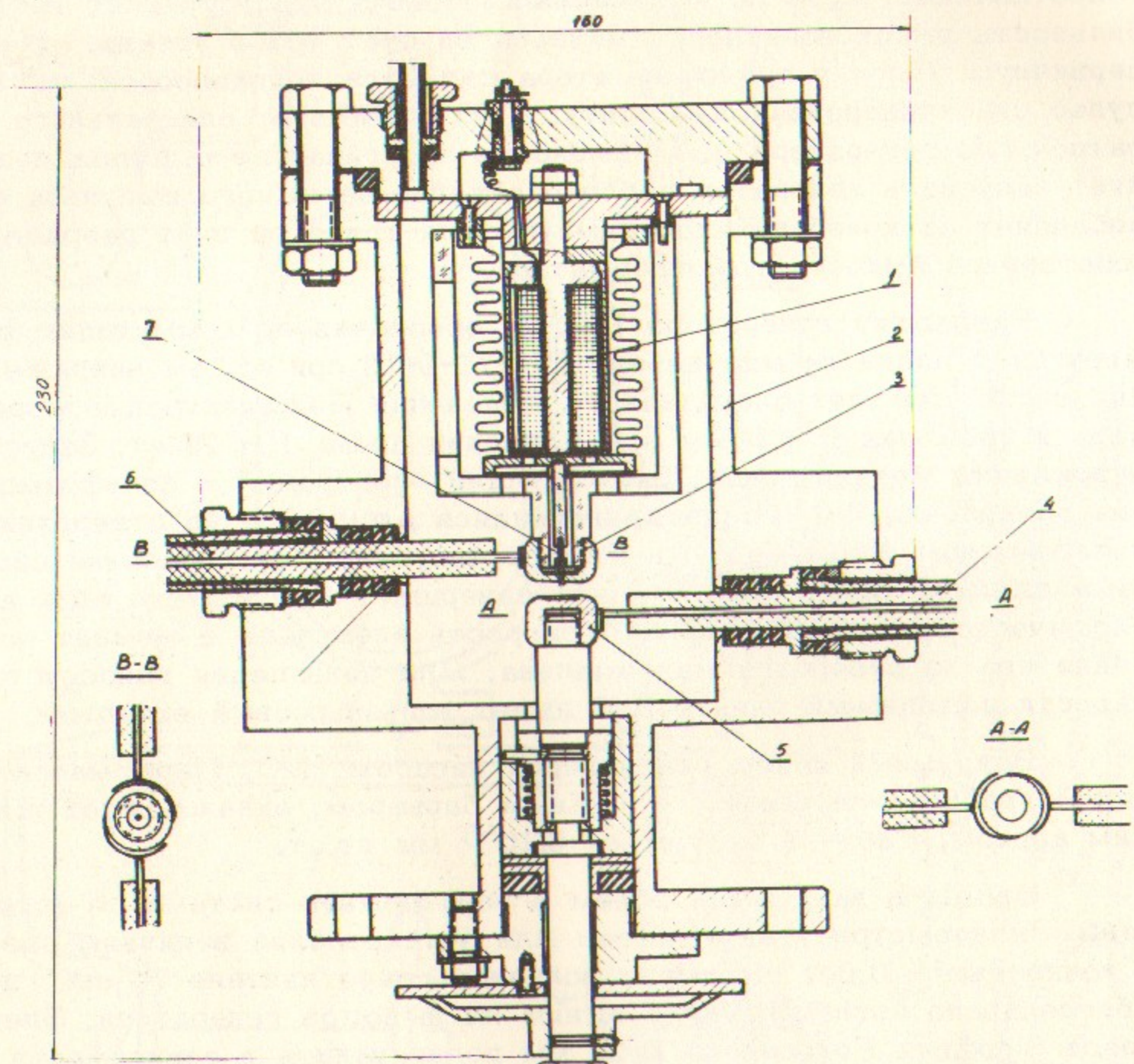


Рис.2. Разрядник.

1 - электромагнит, 2 - корпус, 3 - неподвижный электрод, 4 - формирующий кабель, 5 - подвижный электрод, 6 - кабель нагрузки, 7 - запускающий электрод.

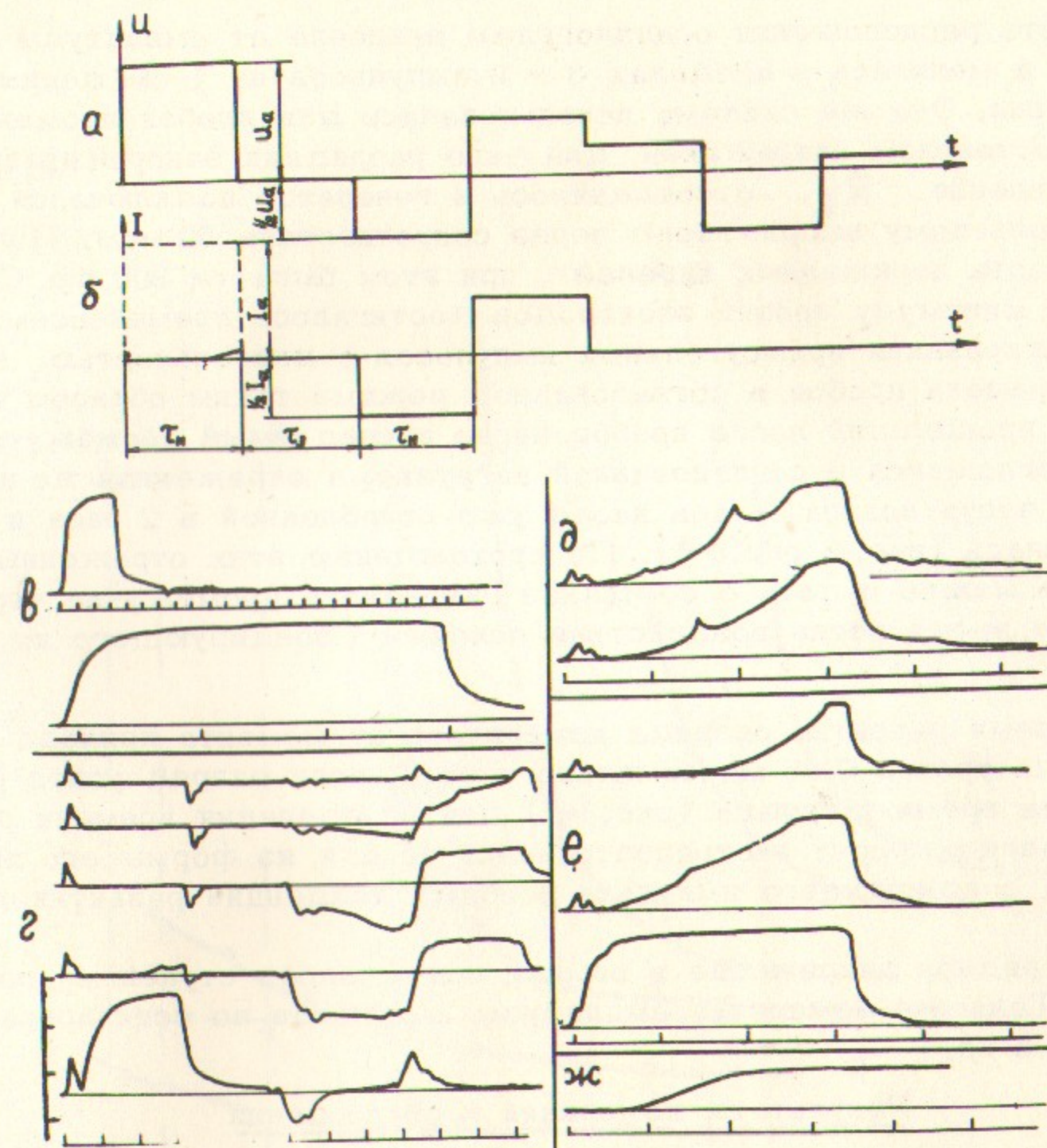


Рис.3. Эпюры напряжения и тока и характерные осциллограммы. а,б - эпюры напряжения на исследуемом промежутке в случае отсутствия пробоя и тока через него, в случае пробоя, незавершившегося за время зондирующего импульса; в - импульсы с делителя  $R_1$  при закороченном промежутке; г - осциллограммы, характеризующие потерю устойчивости (первая - в отсутствии пробоя, последняя - завершившийся пробой); д - типичные осциллограммы фронта пробоя с бросками тока; е - изменение формы фронта при увеличении перенапряжения; ж - осциллограмма пробоя на постоянном напряжении.

Калибровочные метки по оси времени на всех осциллограммах -  $1 \cdot 10^{-8}$  сек., по оси напряжения - 25 кв.



Плотность расположения осциллограмм зависела от амплитуды импульсов и менялась в пределах 3 - 6 импульсов на 1 см длины фотопленки. Эта же система использовалась для пробоя промежутка на постоянном напряжении, для чего разрядник закорачивался, сопротивление  $R_2$  отсоединялось и генератор подключался к высоковольтному выпрямителю через сопротивление 50 мом. Полная ёмкость заряженных кабелей при этом была  $\sim 900$  пф. Сведение к минимуму эрозии электродов достигалось применением для зондирования прямоугольных импульсов с длительностью порядка времени пробоя в согласованном режиме таким образом, чтобы ток, прошедший после пробоя через исследуемый промежуток сразу поглощался в согласованной нагрузке, а отраженная до пробоя его часть возвращалась назад уже ослабленной в 2 раза и тоже гасилась (рис.1, рис.3-6). По прохождению этих отраженных сигналов можно судить о состоянии разрядного промежутка через заданное время после воздействия основного зондирующего импульса.

Время развития разряда измерялось от момента прихода импульса до уровня 0,95 максимального тока, если разряд успел развиться за время импульса (рис.3-г) для определения времени развития разряда фронт экстраполировался исходя из формы его вблизи скола зондирующего импульса и общих тенденций развития фронта.

Зарядное напряжение в опытах поднималось ступенями по 0,5 кв. Точность измерения амплитуды импульсов по осциллограммам  $\pm 0,5$  кв.

#### Результаты измерений и обсуждения

В связи с тем, что в работе исследовались статистические закономерности развития вакуумного пробоя, было обращено внимание на влияние предыдущих разрядов. Для всех исследовавшихся металлов (М1, Д16Г, Х18Н9Г) время развития пробоя с ростом напряжения несколько падает, однако при перенапряжении  $> 1,5$  достигает постоянного значения  $\sim 1,5 \cdot 10^{-8}$  сек для зазора 0,04 см., которое не изменяется вплоть до 3-х кратного (рис. 4, 5).

Поскольку пробивное напряжение при длительной тренировке падает, время развития разряда при таком (до 1,5) перенапряже-

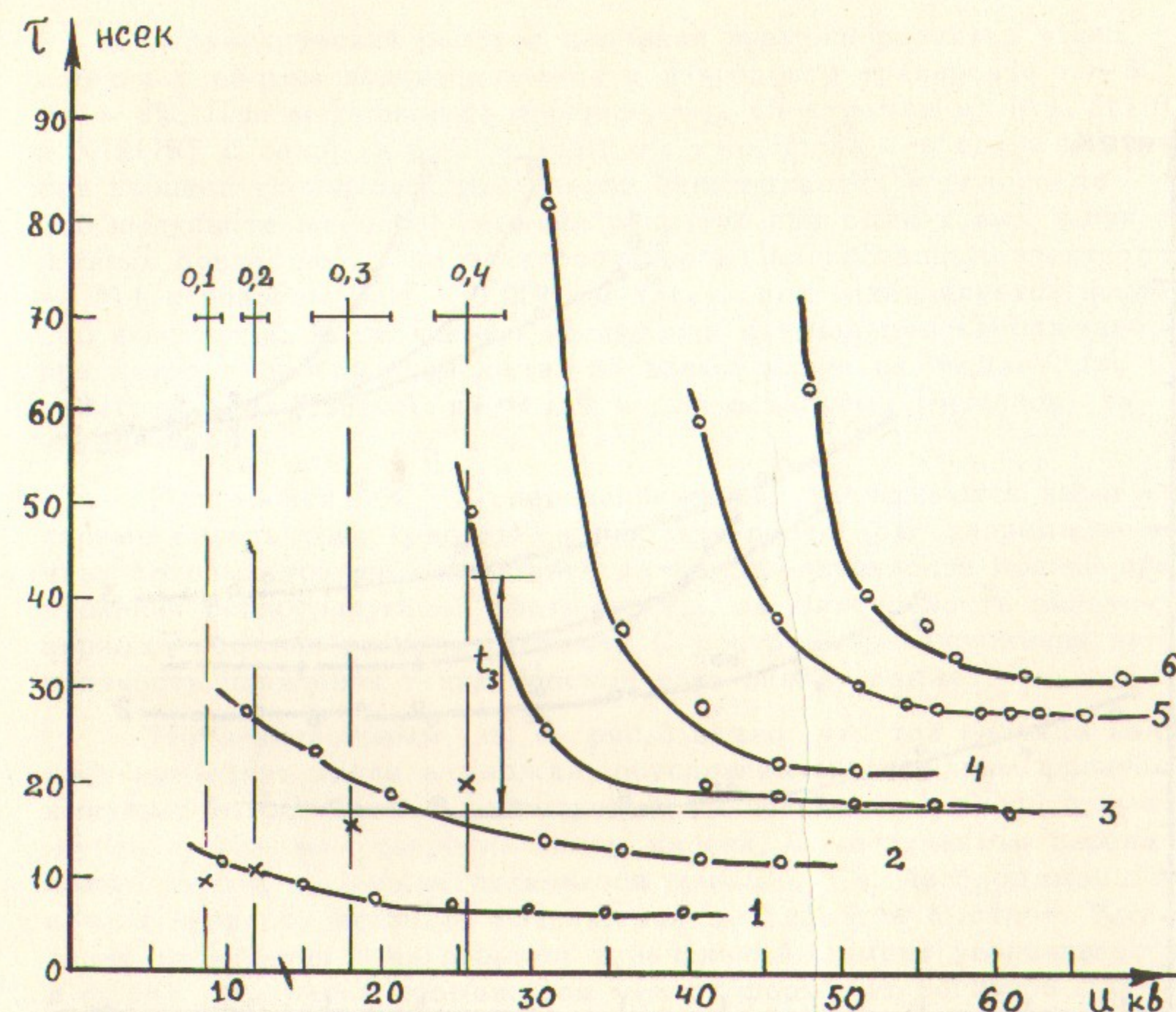


Рис.4. Зависимость времени развития пробоя от напряжения на промежутке для медных механически полированных электродов при зазорах  $d$  :  
 1 -  $d = 0,1$  мм; 2 -  $d = 0,2$  мм; 3 -  $d = 0,3$  мм; 4 -  $d = 0,4$  мм;  
 5 -  $d = 0,5$  мм; 6 -  $d = 0,6$  мм.



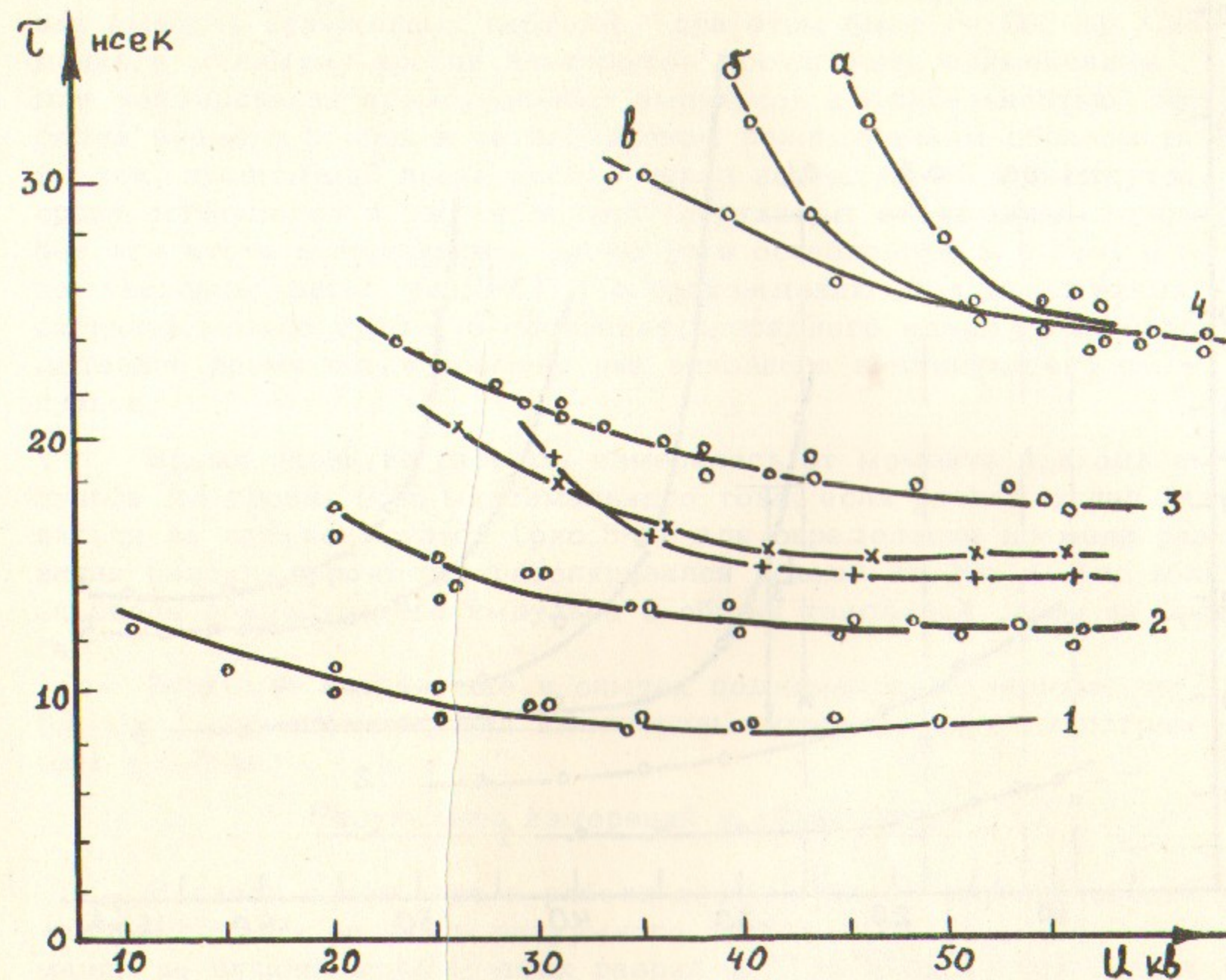


Рис.5. Зависимость времени развития пробоя от напряжения для различных металлов 1, 2, 3, 4 - медные электролитически полированные электроды при зазорах 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 мм соответственно. 4 а,б,в - 1-я, 2-я и 3-я сотни импульсов при тренировке.

—+—+— - электроды Х18Н9Т зазор 0,2 мм.

—x—x— - электроды Д16Т зазор 0,2 мм.

нии также заметно уменьшается (на 30% - 50%). При большом перенапряжении изменение времени развития с тренировкой не превышает статистического разброса измерений (рис.5).

Статистический разброс значений времени развития уменьшается с ростом перенапряжения и в процессе тренировки от ~50% до ~3%. Для механически полированных (электродов из М1, Д16Т и Х18Н9Т с зазором  $0,02 \pm 0,001$  см уже после 1-й сотни импульсов процесс тренировки фактически заканчивается и вплоть до 300 импульсов значения времени развития при одинаковых напряжениях совпадают. Для электролитически полированных электродов из М1 с зазором  $0,04 \pm 0,001$  см тренировка заканчивается после 200 импульсов. К окончанию тренировки наименьшее напряжение, при котором пробой происходит за время импульса, падает для электродов из Х18Н9Т на ~12% и для остальных металлов на ~35 - 45%.

При малых ( $< 1,5$ ) перенапряжениях наблюдаются нерегулярные броски тока (рис.3,д) на фронте роста тока разряда, величину которых трудно определить из-за ограниченности полосы пропускания регистрирующей системы, т.к. их длительность оказалась порядка времени реакции системы. С ростом перенапряжения вероятность появления таких бросков тока сильно падает.

Из осциллограмм д, е рис.3 видно, что ток разряда начинает нарастать после задержки, обусловленной передним фронтом импульса и  $RC$  - цепью, образуемой ёмкостью разрядного промежутка и волновым сопротивлением кабеля. С увеличением перенапряжения эта задержка становится меньше, т.к. необходимая для начала процесса величина напряжения достигается быстрее. Крутизна нарастания тока разряда в начальный момент увеличивается и фронт тока через промежуток меняет форму от вогнутой для малого перенапряжения до выпуклой при перенапряжении  $> 1,5$  (рис.4,е).

Результаты измерения времени развития разряда в зависимости от напряжения для разных зазоров и материалов электродов приведены на рис.4 и рис.5. Кроме того, на рис.4 отдельными точками и вертикальными линиями отмечены пробивные напряжения и длительности фронта пробоя на постоянном напряжении, измеренные на уровне 0,1 - 0,9. Каждая точка на графиках получена в результате усреднения 50-100 импульсов.



При сравнении осциллограмм фронта пробоя на постоянном напряжении (рис.3,ж) и на импульсном с малым перенапряжением, был замечен значительно меньший статистический разброс времени развития разряда в первом случае. Кроме того, на фронте нет нерегулярных бросков тока.

При очень малом перенапряжении на промежутке скорость нарастания тока столь мала, что к окончанию импульса он достигает незначительной величины, однако проходящий через некоторое время отраженный импульс половинной амплитуды (рис.3,б) встречает практически закороченный промежуток (рис.3,г). К моменту достижения током разряда величины  $\sim 10\text{a}$  в промежутке происходит необратимое изменение состояния таким образом, что снятие напряжения до нуля или быстрое изменение полярности его становится не существенным для процесса формирования проводимости промежутка (рис.3,г, рис.6). Такой характер формирования проводимости промежутка говорит в пользу того мнения, что закорачивание вакуумного промежутка происходит за счет взрывообразных эффектов с последующим распространением квазинейтральной проводящей среды от одного электрода к другому [4-6].

При тщательном рассмотрении процесса закорачивания вакуумного промежутка видно, что измерение времени запаздывания пробоя тем способом, как это сделано в работе [7], неверно. Действительно, при таком подходе, для осциллограмм 3 и 4 группы 2 рис.3 следовало бы считать время запаздывания пробоя больше длительности импульса и, как следствие, отсутствие пробоя при данной амплитуде импульса, в то время, как зондирующий импульс встречает уже проводящий промежуток.

Как видно на рис.4, 5, время развития разряда достигает некоторой постоянной величины с ростом перенапряжения. В связи с этим время запаздывания пробоя представляется как разность времени развития пробоя при заданном напряжении и асимптотической величиной его при больших перенапряжениях (рис.4).

Измерения времени развития пробоя по фронту его тока на уровне 0,1 - 0,9, в отличие от [5], показали, что при воздействии как импульсного, так и постоянного напряжений оно постоянно и не зависит от перенапряжения в пределах величины статистического разброса при одинаковых зазорах, материалах электродов и способах их обработки. Как и в работе [5] это время линейно

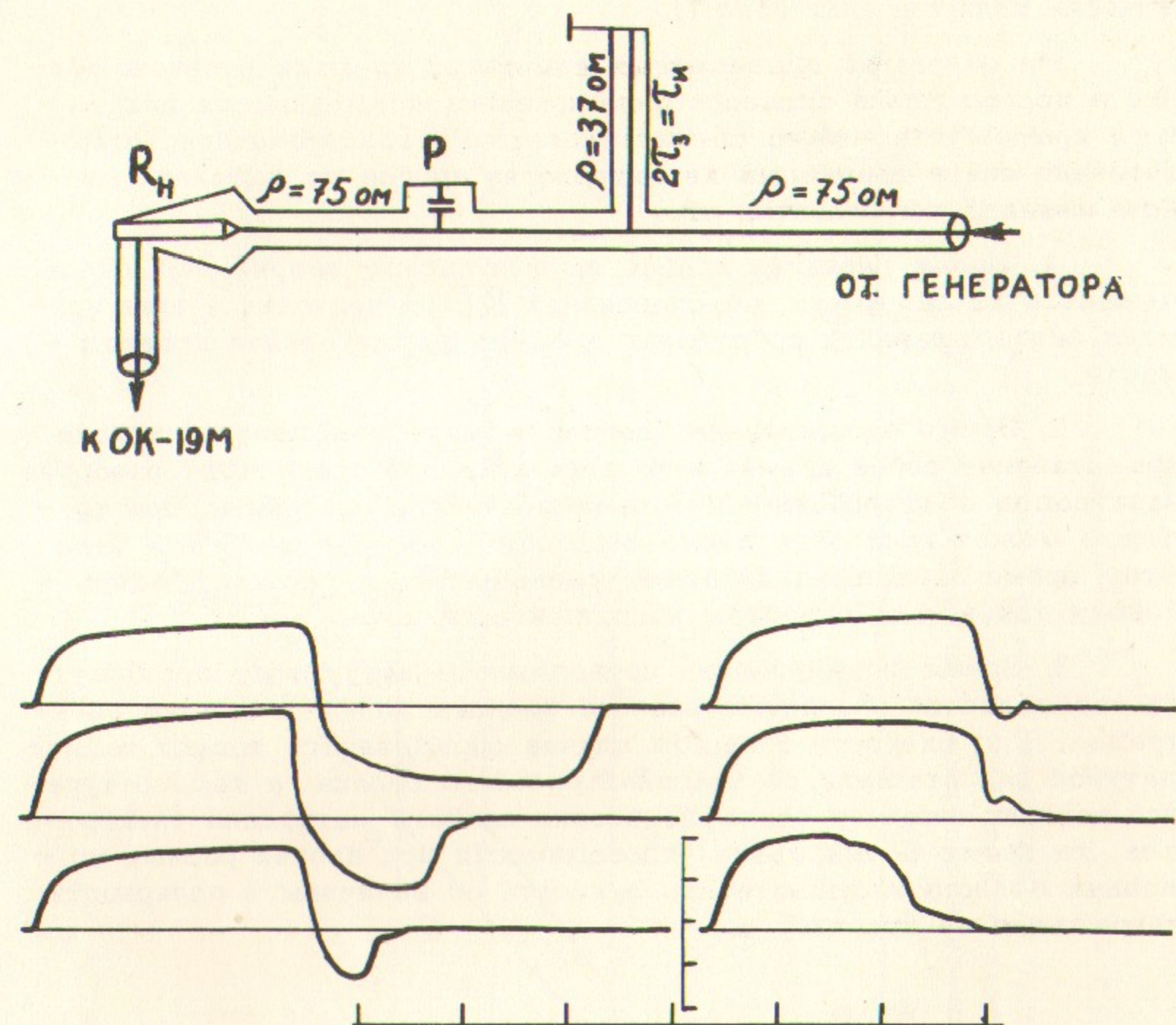


Рис.6. Схема опыта и осциллограммы, пробоя при быстрой смене полярности напряжения. Первая - отсутствие пробоя, последняя - пробой, завершившийся за время первого импульса. Метки по оси времени -  $1 \cdot 10^{-8}$  сек, по оси напряжений - 10 кв.



зависит от величины зазора. Для электролитически полированных медных электродов прямая была в 1,2 раза круче, чем для механически полированных (рис.7).

На основании проведенных измерений времени развития пробоя и исследования процесса формирования проводимости вакуумного промежутка можно сделать некоторые предположения относительно связи временных характеристик пробоя со взрывообразным механизмом развития его.

1. Время развития пробоя на импульсном напряжении складывается из задержки, обусловленной  $RC$  - постоянной цепи, времени запаздывания и собственно времени формирования проводимости.

2. Время запаздывания пробоя в вышеприведенном смысле представляет собой время, в течение которого происходит разогрев электродов предпробойными токами до такого состояния, при котором может произойти взрыв вещества электродов [3-6]. При этом время запаздывания будет уменьшаться с ростом предпробойных токов, т.е. с ростом напряженности поля.

3. Время формирования проводимости вакуумного промежутка определяется скоростью разлета взорвавшегося вещества электродов. Т.к. скорость в нашем случае определяется только температурой разлетающегося квазинейтрального облака, а температура его зависит лишь от теплофизических свойств материала электродов, то время формирования проводимости при прочих равных условиях должно несущественно зависеть от величины и полярности напряжения на промежутке.

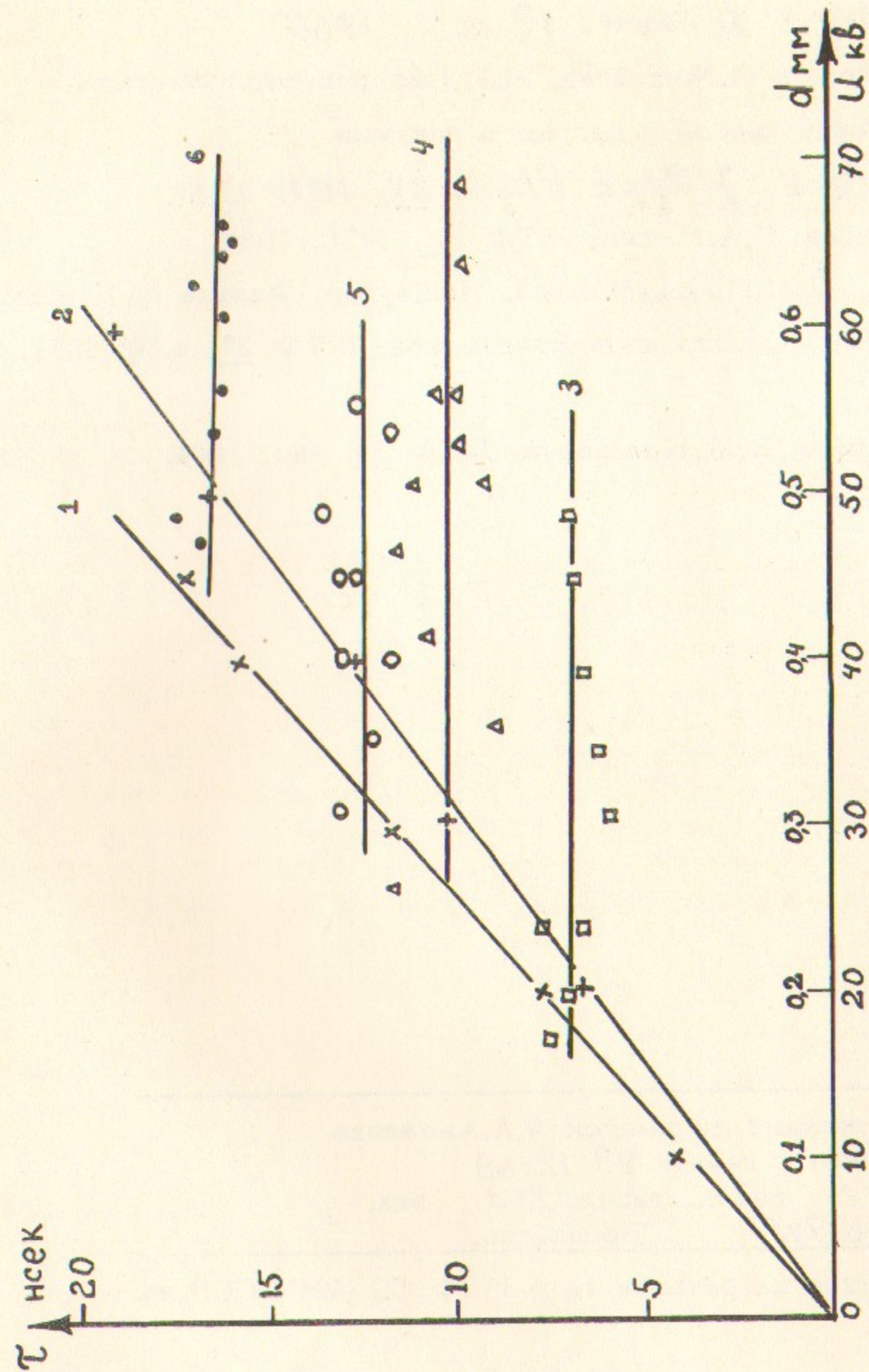


Рис.7. Зависимости длительности фронта на уровне 0,1-0,9 от зазора 1,2 и напряжения 3, 4, 5, 6.  
1 - М1 электролитически полированная, 2 - М1 механически полированная.  
3, 4, 5, 6 - зазоры 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 , соответственно.



Л и т е р а т у р а

- /1/ R. Hawley. *Vacuum* 10 №4 1960
- /2/ И.Н.Сливков, В.И.Михайлов, Н.И.Сидоров, А.И.Настюха.  
Электрический пробой и разряд в вакууме.
- /3/ A. Maitland *J. Appl. Phys.* 32 №11 1961
- /4/ Г.М.Кассиров, Г.А.Месяц. ЖТФ, 34, 1476, 1964.
- /5/ Г.А.Месяц, Д.И.Проскуровский. Изв.вузов. Физика №1, 1968г.
- /6/ Г.Н.Фурсей, П.Н.Воронцов-Вельяминов. ЖТФ 37, в.10, 1871,  
1967.
- /7/ Г.М.Кассиров, В.М.Ковальчук. ЖТФ 34, 484, 1964.

---

Ответственный за выпуск А.А.Авдиенко

Подписано к печати 29.12.69

Усл. 0,8 печ.л., тираж 150 экз.

Заказ № 349 . Бесплатно.

---

Отпечатано на ротаприте в ИЯФ СО АН СССР, нв.