

34

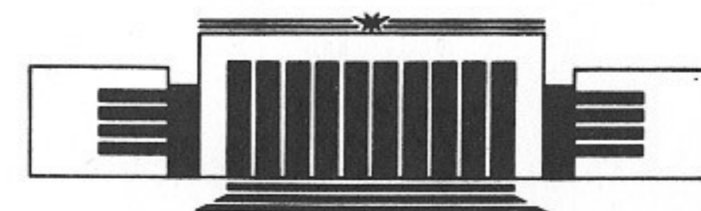


**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН**

**А.М. Крючков, И.Н. Сорокин, В.В. Широков**

**РАБОТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И  
СОЗДАНИЮ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

**ИЯФ 94-54**



**НОВОСИБИРСК**

# Работы по исследованию и созданию ускорительных трубок высоковольтных ускорителей заряженных частиц

Крючков А.М., Сорокин И.Н., Широков В.В.

Институт ядерной физики Новосибирск, 630090

## АННОТАЦИЯ

Представлены результаты работ по исследованию ускорительных трубок и их отдельных элементов, работающих на постоянном и импульсном напряжениях. Приведены ограничения достигнутых параметров в работе трубок. Рассмотрен вопрос применения полупроводящих покрытий в ускорительных трубках.

© Институт ядерной физики СО РАН

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1. Исследование работы единичного элемента ускорительной трубки .....	6
1.1. Зависимость электрической прочности единичного элемента от геометрии поверхности изолятора в вакууме .....	6
1.2. Зависимость электрической прочности единичного элемента от высоты, диаметра изолятора и величины межэлектродного вакуумного зазора .....	8
1.3. Зависимость электрической прочности единичного элемента в вакууме от величины щели между торцевыми поверхностями изолятора и электрода и угла экранировки стыка изолятор-электрод .....	9
1.4. Электрическая прочность изоляторов по поверхности в сжатом газе и по телу .....	9
1.5. Зависимость электрической прочности единичного элемента от материала электродов, энергии, выделяемой в пробое и материала изолятора .....	10
2. Исследование работы ускорительной трубки .....	11
2.1. Способы вакуумно-плотного соединения изоляторов и электродов .....	11
2.2. Защита ускорительной трубки от энергии, выделяемой в пробое .....	13
2.3. Распределение напряжения по секциям трубки .....	15
2.4. Тренировка трубки .....	16
2.5. Полупроводящие покрытия .....	18
2.6. Подготовка трубки к работе .....	19
3. Технологические вопросы по работе с элементами трубки .....	20
Заключение .....	21
Литература .....	22

---

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из условий надежной работы высоковольтного ускорителя заряженных частиц является условие надежной работы отдельных элементов, работающих под высоким напряжением. В данной работе приведены некоторые конструкторские решения, связанные с работой ускорительной трубки и ее элементов и излагаются результаты расчетов и экспериментов, проведенных на высоковольтных стендах лаб.4-0.

Общий вид ускорительной трубки, на котором обозначены основные элементы, показан на рис.1, где: 1-катодный узел, 2-сетка, 3-единичный элемент ускорительной трубки, 4-охранный электрод, 5-внутренние вставные электроды ускорительной трубки, 6-резистивный делитель напряжения.

Так как ускорительная трубка является устройством состоящим, в основном, из набора однотипных единичных элементов 3 (рис.1), необходимо выяснение зависимостей и характеристик, присущих единичному элементу, варианты которого показаны на рис.2а, 2б, 2в, где: 1-электрод "глухой" защиты (п.2.2), 2-керамический изолятор, 3-промежуточный электрод, 4-вставной электрод ускорительной трубки. Среди выясняемых зависимостей рассмотрены зависимости электрической прочности в вакууме от: 1-геометрии внутренней (вакуумной) поверхности изолятора, 2-высоты и диаметра изолятора и величины зазора между электродами, 3-высоты щели  $S$  между торцевыми поверхностями изолятора и электрода в колбе ускорительной трубки и угла экранировки стыка соединения изолятор-металл-вакуум, 4-материала изолятора, материала

электродов и энергии, выделяемой в пробое. Рассмотрены вопросы электрической прочности изолятора по поверхности в сжатом газе и объемной электрической прочности.

При рассмотрении работы ускорительной трубки как целого добавляются вопросы: 1-способы вакуумно-плотного соединения изолятора и электродов, 2-защита ускорительной трубки от энергии, выделяемой при полном пробое, 3-деление напряжения по секциям трубки резистивными делителями, 4-тренировка трубки, 5-осаждение электрического заряда на поверхности изоляторов и его влияние на электрическую прочность, 6-подготовка трубки к работе, 7-условия разрушения ускорительной трубки.

При исследовании моделей единичных элементов ускорительной трубки и самих единичных элементов на импульсном напряжении использовался генератор на основе трансформатора Тесла [1]. В экспериментах на импульсном напряжении в пробоях, кроме оговоренных случаев, выделялась энергия запасенная как в конструктивной емкости единичного элемента, так и в емкости вторичной обмотки трансформатора (210пФ). Форма импульса напряжения показана на рис.3. При исследовании ускорительных трубок и их элементов на постоянном напряжении использовался каскадный генератор аналогичный описанному в [2], но выполненный на напряжение холостого хода до 1.5МВ. В пробоях выделялась энергия, запасенная в конструктивной емкости исследуемого элемента ускорительной трубки или всей ускорительной трубки (емкость 34пФ). Энергия, запасенная в емкостях каскадного генератора, кроме оговоренных случаев, рассеивалась, в основном, в ограничительном сопротивлении. Откачка вакуума осуществлялась магниторазрядным насосом до давлений меньших, чем  $10^{**(-4)}$ Па. Измерение импульсных напряжений осуществлялось с помощью емкостного делителя, а постоянного напряжения - активными делителями каскадного генератора и трубки. Кроме показаний делителей, наличие пробоя фиксировалось по изменению вакуума и рентгеновской вспышке. В экспериментах с ускорительными трубками и изоляторами в виде колец в качестве изолирующего газа применялся элегаз под давлением до 1.2 МПа.

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЕДИНИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

### 1.1. Зависимость электрической прочности единичного элемента от геометрии поверхности изолятора в вакууме

Рассмотрены два варианта изменения геометрии поверхности изолятора: изменение угла наклона изолятора к поверхности металла при одной и той же высоте  $H=50$ мм. (рис.4а) и изменение количества и величины ребер и впадин при фиксированной высоте  $H=50$ мм. (рис.4б). Оба варианта исследованы на импульсном напряжении. Форма зависимости электрической прочности от угла наклона показана на рис.5 для изоляторов из органического стекла и электродов из нержавеющей стали. Несколько вариантов изменения геометрии поверхности по второму варианту с указанием напряжения пробоя для этих же материалов изоляторов и электродов показаны на рис.6. Требования к конструкции ускорительных трубок сильноточных ускорителей часто сводятся в том числе и к возможности прогрева ускорительной трубки при обезгаживании вакуумного объема, сохранению вакуумной плотности трубки при включении и выключении нагревателей катодов. При этом требования в качестве материалов изоляторов ускорительных трубок чаще всего применяют различные керамики или стекла. Осевые усилия, необходимые для вакуумно-плотного торцевого способа соединения изоляторов и электродов при имеющихся технологиях соединения с учетом циклических прогревов велики. Например, усилие сжатия для технологии высокотемпературной пайки под давлением (не самая напряженная технология — п.2.1) на наших диаметрах ускорительных трубок составляет около 3000кГ. Такие усилия приведут с большой вероятностью к разрушению острых кромок неорганических изоляторов при найденном оптимальном угле 135град. в геометрии рис.4а. Почти неизбежное наличие щели между металлом и изолятором (п.1-3) в данной геометрии, приводящей к усилению электрического поля в щели и пробоям ведет к тому же результату. Указанные замечания делают проблематичным применение геометрии рис.4а в прогревной колбе ускорительной трубки, несмотря на ее более высокие пробивные характеристики. Исследования геометрии с различными радиусами ребер и впадин (рис.4б) показали, что оптимальные радиусы ребер и впадин лежат в диапазоне от 0.5мм. до 1.0мм. При прочих равных условиях выигрыш в электрической прочности ребристых изоляторов относительно гладких составляет до 100% (рис.7 и п.1.2.). Разработанная технология обработки неорганических изоляторов позволила достаточно легко реализовать геометрию рис.4б. Для всех ребристых изоляторов радиус ребер и впадин был принят равным 0.75мм. Недостатком данной геометрии являются механически напряженные после обработки ребра, которые могут разрушаться при выделении энергии при поверхностном пробое изолятора в вакууме. Данный недостаток во многом устраняется применением "глухой" защиты (п.2-2).

## 1.2. Зависимость электрической прочности единичного элемента от высоты, диаметра изолятора и величины межэлектродного вакуумного зазора

Зависимость электрической прочности изолятора от высоты рассмотрена как для импульсных, так и для постоянных [3] напряжений и показана на рис.7. Данные зависимости снимались на кольцевых ребристых изоляторах из органического стекла внутреннего диаметра 180мм. с электродами из нержавеющей стали при уплотнении на вакуумной резине. Аналогичный характер зависимостей был получен и для керамик при вакуумно-плотном соединении с электродами на индии и термокомпрессионной сварке. Видно, что для гладкой геометрии внутренней поверхности изолятора (кривые III и IV) при импульсном (I и III) и при постоянном (II и IV) напряжении для единичного зазора оптимальна высота до 20мм., а для ребристой (кривые .. и ..) - больше. Высота изолятора 36мм. реализована в ускорительной трубке импульсного ускорителя ЭЛИТ-3А [4], а 25 мм — в ускорительной трубке импульсного ускорителя ЭЛИТ-Л2 [5]. В обоих случаях ребристые изоляторы изготавливались из боросиликатного стекла марки ЛК-5. Трубка ЭЛИТ-Л2 работала при градиентах до 32 кВ/см. В связи с имевшимися в промышленности типоразмерами заготовок различных керамик, для изоляторов керамических трубок на начальном этапе исследований выбрана высота 20мм, хотя для ребристой геометрии можно было бы использовать и большую.

Для изоляторов из оргстекла и электродов из дураллюминия в импульсном диапазоне напряжений показано, что при увеличении диаметра изолятора со 100 мм до 220 мм электрическая прочность упала с 248 кВ до 222 кВ, т.е. несущественно. При выборе диаметра изолятора ускорительной трубки обычно учитываются величина ускоряемого тока и допустимые электрические градиенты в вакуумных зазорах и зазорах с диэлектриком, поэтому возможность минимизации диаметра изолятора ограничена.

Зависимость электрической прочности вакуумного зазора от его величины для электродов геометрии Роговского диаметром 83 мм. из нержавеющей стали в импульсном диапазоне напряжений [6] показана на рис.8а и 8б, а для постоянного напряжения взята из [7] и показана на рис.9. Эти зависимости весьма конкретны и приведены для того, чтобы показать сильное влияние на вакуумную электрическую прочность промежутка длительности импульса напряжения, энергии, выделяемой в пробое (п.1-5 и рис. 8а и 8б).

Зависимость вакуумной электрической прочности зазора от площади

электродов (без учета изменения запасаемой энергии в конструктивной емкости электродов), при необходимости, следует искать, выясняя тип функции распределения пробивных напряжений для единичной площади электродов. Пробивное напряжение зазоров обратно пропорционально корню пятой или десятой степени (в зависимости от материала электродов) из площади электродов [7]. Практически всегда в конкретной конструкции ускорительной трубки площадь электродов в вакууме не является варьируемой величиной, а получается, исходя из других требований, как, например, межэлектродной электрической прочности при формировании электрического поля для ускорения пучка электронов и минимизации величины рассеянного заряда от пучка на изоляторе ускорительной трубки.

## 1.3. Зависимость электрической прочности единичного элемента в вакууме от величины щели между торцевыми поверхностями изолятора и электрода и угла экранировки стыка изолятор-электрод

Зависимость электрической прочности единичного элемента от величины щели была получена на изоляторах в виде колец из боросиликатного стекла ЛК-5 [8] в электродах из нержавеющей стали и сплава АМЦ и показана на рис.10, где: I-индиевое вакуумное уплотнение, II-изолятор, III-электрод. Для электродов из нержавеющей стали зависимость аппроксимируется формулой  $U=147*S^{0.5}+250$  (кривая А), а для АМЦ -  $U=67*S^{0.5}+164$  (кривая В), где высота щели  $S$  выражена в мм., а пробивное напряжение  $U$  в кВ. При наличии щели электрическая прочность единичного элемента может падать на 30% даже при экранированном стыке. Среди различных способов экранировки стыка [7] был выбран один из самых технологичных, показанный на рис.10. Зависимость электрической прочности изолятора из оргстекла в электродах из нержавеющей стали от угла экранировки стыка, снятая на импульсном напряжении, показана на рис.11 [9]. Вид зависимости характерен как для других материалов изоляторов и электродов, так и для других способов вакуумно-плотного соединения изоляторов и электродов, упомянутых в данной работе.

## 1.4. Электрическая прочность изоляторов по поверхности в сжатом газе и по телу

Для выяснения зависимости электрической прочности поверхности изоляторов в элегазе от давления газа были проведены эксперименты

на кольцевых изоляторах из керамики УФ-46 при постоянном напряжении. Изоляторы были с гладкими боковыми поверхностями. Наружный диаметр — 205 мм и внутренний — 184 мм. Электроды — из нержавеющей стали с 45 град. углом экранировки стыка. Результаты экспериментов для высот изоляторов 15 мм и 22.5 мм приведены на рис.12. Видно, что пробивные напряженности по газу при необходимых для работы генератора напряжения давлениях (0.8-1.0 МПа SF6) значительно превышают напряженности пробоя по вакуумной поверхности (п.2.3). В процессе экспериментов часть изоляторов были разрушены пробоями по телу при градиентах от 110 кВ/см до 170 кВ/см. Для неотбракованных по внутренним дефектам изоляторов из УФ-46 по данным НИИ ЭФА электрическая напряженность по телу изолятора в районе (50—60) кВ/см является критической при долговременной одновременной работе десятков единичных изоляторов.

При определении наличия включений и пустот в теле изолятора рассматривались рентгеновские методы контроля. Чувствительность рентгеновского метода с использованием установки Опытного завода при проверке нанесенных дефектов на поверхность керамики УФ-46 была не хуже, чем 0.2мм на 20мм толщины изолятора, что позволяет проводить первоначальную разбраковку заготовок изоляторов по наличию дефектов.

#### 1.5. Зависимость электрической прочности единичного элемента от материала электродов, энергии, выделяемой в пробое и материала изолятора

Тренировочные кривые, снятые при импульсном напряжении для вакуумного промежутка с электродами формы Роговского из молибдена, меди, сплава титана ВТ1-0, сплава АМЦ и нержавеющей стали в области малых выделяемых энергий (емкость 80пФ) имеют одинаковый характер. В области больших выделяемых энергий вид тренировочных кривых для всех упомянутых материалов электродов, кроме меди, аналогичен виду кривых, приведенных на рис.13 [6] для нержавеющей стали. Для медных электродов глубоких провалов в тренировочной кривой при большом энерговыделении не наблюдалось.

Известный ряд металлов, расположенный в порядке возрастания электрической прочности [7]: М1, АМЦ, Мо, 12Х18Н9Т, ВТ1-0, оказался справедлив только в области малых выделяемых в пробое энергий. Как показано на рис.14 [6] при вакуумном зазоре 5мм. для энергий в десятки джоулей эта зависимость меняется, причем в области больших выделяемых

энергий электрическая прочность промежутков с электродами из различных материалов стремится к постоянному значению. Максимальную электрическую прочность при больших энерговыделениях показывают вакуумные зазоры с электродами из нержавеющей стали и молибдена. На поверхностях всех металлов кроме М1 и АМЦ видны кратеры и застывшие капли расплавленного металла. На М1 кратеры слабо заметны, а поверхность АМЦ после пробоев покрыта мельчайшей пылью расплавленного металла.

Введение ограничительного сопротивления между большой накопительной емкостью и вакуумным промежутком улучшает вид тренировочной кривой (рис.15) и повышает конечное значение электрической прочности. По нашим данным оптимум величины ограничительного сопротивления находится между 30ом и 200ом.

В наших экспериментах при работе с различными материалами изоляторов, упомянутыми в данной работе, не обнаружено влияние материала изолятора на электрическую прочность в одной и той же геометрии эксперимента, если отсутствует щель между торцом изолятора и электродом. При наличии щели высотой 0.2мм. для одинаковых геометрий электродов и изоляторов электрические прочности для изоляторов из органического стекла и керамики ВК-94 соотносятся как 82кВ:42кВ.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

### 2.1. Способы вакуумно-плотного соединения изоляторов и электродов

Среди способов соединения изоляторов и электродов различаются разъёмные и неразъёмные. При разработке прогревной ускорительной трубки были выбраны неразъёмные способы соединения: высокотемпературная пайка и термокомпрессионная сварка, допускающие прогрев соединений до 400 град.С с целью удаления влаги, физически адсорбированных загрязнений и т.д. Материал изоляторов — стекла, либо керамики. Минимальными внутренними напряжениями в заготовках обладают боросиликатные стекла марок ЛК-5 или ЛК-105 [8]. Торцевое вакуумно-плотное соединение боросиликатного стекла с металлическими электродами получилось в ИЯФ в экспериментах Куклина Д.Е. только на диаметрах изоляторов 60 мм. Из-за больших механических напряженностей в стекле при больших диаметрах соединений данный способ в дальнейшем не рассматривался.

После консультаций с представителями Института электрокерамики (г.Москва), мы отказались и от пайки с металлизацией торцев керамики,

т.к. шансы на успех одновременной пайки 18 изоляторов с промежуточными электродами на диаметре 200мм. были очень сомнительны. Было принято решение паять колбу на основе технологии торцевого соединения керамики УФ-46 с промежуточными электродами из ковара через расплавляемую медную прокладку в среде водорода или под вакуумом при приложении осевого давления: технология высокотемпературной пайки под давлением. Данная технология была предложена в ИЯФ Даниловым В.А. и успешно внедрена Даниловым В.А., Куклиным Д.Е. и Бурмистровым А.С. Одним из недостатков данной технологии является необходимость пескоструйной обработки сильно загрязняемых в процессе пайки боковых поверхностей керамики. Последующее удаление песка является достаточно трудоемким и плохо контролируемым процессом. Колбы, спаянные по упомянутой технологии, допускают обезгаживающие общие прогревы до 400град. и работу с электронными пушками с мощностью нагревателей до 1.2 кВт. При разрушении колбы возможно использование части керамических колец для дальнейшего применения в других колбах. От необходимости пескоструйной обработки внутренних поверхностей изоляторов из керамики после торцевого соединения с электродами избавляет термокомпрессионная сварка. В ИЯФ данную технологию для керамических колец начали внедрять Крайнов Г.С., Каситский В.Ф., Бурмистров А.С. Технология успешно реализована для нескольких модификаций ускорительных трубок [10]. К сожалению, сварка колбы из керамических колец необходимого диаметра 205мм. ограничена в ИЯФ в том числе и габаритами термоводородной печи. Отсутствие оборудования мешает внедрению в ИЯФ прогрессивной, не загрязняющей поверхности изоляторов, технологии термокомпрессионной сварки керамики УФ-46 с электродами из сплава титана ВТ1-0, происходящей при пониженной температуре: около 600град [11]. При обсуждении работ по сварке колб ускорительных трубок по данной технологии, внедренной в НИИ ЭФА (Санкт-Петербург), обсуждены возможные перспективы по применению в свариваемом узле сплошных электродов, включающих как промежуточные электроды колбы, так и вставляемые отдельно внутренние электроды ускорительной трубки (поз.3 и поз.4 рис.2). Это позволило бы резко улучшить вакуумную гигиену сборки ускорительных трубок. Успешные модельные эксперименты по способу сварки керамики УФ-46 и металлических прокладок из ВТ1-0 упрощенной конструкции на кольцевых изоляторах диаметром 60мм были проведены в ИЯФ Куклиным Д.Е. Приведенные ниже результаты работы с ускорительными трубками получены в геометрии трубки, приведенной на рис.1. Материал изоляторов трубки — УФ-46, материал всех электродов, кроме упомянутых вариан-

тов — нержавеющей сталь, способ соединения — высокотемпературная пайка под давлением.

## 2.2. Защита ускорительной трубки от энергии, выделяемой в пробое

Пробой ускорительной трубки (рис.1) начинается с пробоя отдельной секции (средней емкостью около 30пФ). При рабочем напряжении на единичной секции в 70кВ, что соответствует напряжению на трубке в 1.12МВ. в пробое выделяется энергия около 0.07 Дж., что, согласно рис.13 и рис.14, не приводит ни к провалам в прочности при тренировке, ни к ухудшению электрической прочности зазоров. При последовательном вакуумном пробое в отдельных элементах трубки может выделяться энергия, предварительно сосредоточенная в конструктивных емкостях установки, достаточная для снижения электрической прочности трубки или разрушения изолятора. Для уменьшения аварийных последствий последовательного вакуумного пробоя на электрическую прочность ускорительной трубки применяется способ перевода пути тока пробоя из вакуумной части трубки в газовую, что позволяет значительно увеличить уровень беспробойного напряжения и срок службы трубки.

Характерные времена задержки пробоя вакуумных зазоров составляют от десятков микросекунд до десятков наносекунд (в зависимости от перенапряжения) [7]. Для газовых зазоров время задержки определяется временем продвижения стримера через промежуток и для интересующего нас давления в 10ати составляет около 7 нс. [12]. Для пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме время задержки согласуется с временем продвижения свечения от катода к аноду со скоростью  $(1-6) \cdot 10^7$  см/сек. для напряженности от 100 кВ/см. до 200 кВ/см [7]. Наши изоляторы работают при градиентах около 30 кВ/см, поэтому указанные скорости примем за верхний предел. Для высот изоляторов 20 мм время задержки пробоя составит 200 нс. Установка газовых разрядников на каждой секции трубки, с учетом времен задержки пробоя и правильно выбранной величине газового зазора, переводит высоковольтный разряд из вакуума в газовый промежуток защитных разрядников ускорительной трубки. Заметно сокращается время пребывания твердой изоляции под повышенным напряжением, и, следовательно, увеличивается срок службы твердой изоляции. При пробое вакуумного промежутка время пробега волны напряжения вдоль электрода, на который прошел пробой, составляет около 3нсек, что может составлять заметную часть от времени задержки пробоя по поверхности в вакууме или в газе и, если газовый разрядник отстоит от места вакуумного пробоя достаточно далеко, то перевода пробоя из вакуума в газ не происходит, а пробивается

следующий вакуумный зазор по поверхности изолятора. Для предотвращения этой ситуации газовые разрядники должны находиться в каждой точке азимута каждого электрода, т.е. должна быть реализована "глухая" защита [11]. Вариант установки разрядников, примененный в наших трубках, показан на рис.2, поз.1.

При выборе величины зазора  $\sigma$  разрядников в геометрии, показанной на рис.2 проведены исследования по влиянию количества разрядников с одинаковым зазором, включенных последовательно на их электрическую прочность. Материал разрядников — нержавеющая сталь. Результаты показаны на рис.16. Цифрами указано количество разрядников. При этом выяснялся вид функции распределения вероятности пробоя [13]. Экспериментальные данные по пробую единичного зазора, приведенные на различных вероятностных бумагах, показаны на рис.17а, 17б, 17в. 17а соответствует нормальной функции распределения пробоев, 17б — двойной экспотенциальной, 17в — функции Вейбулла. Крайние правые кривые даны для 1 разрядника, левее — для 2, далее для 7 и 14. По отклонению от среднего и отклонению в области малых квантилей видно, что для описания вероятности пробоев наиболее подходит экстремальная функция Вейбулла вида  $F(u) = 1 - \exp(-(u/361)^{11})$ , которая дает для 63% квантиля значения электрических прочностей при 2 разрядниках — 334 кВ, при 7 — 304 кВ, при 14 — 282 кВ. Экспериментальные данные показали, что при прочности одного разрядника 361 кВ, прочность двух составила 319 кВ, прочность 7 — 302 кВ и прочность 14 одновременно включенных разрядников — 284 кВ. Видно хорошее совпадение экспериментальных данных с величинами, вычисляемыми из предложенной функции распределения вероятности пробоя, что позволяет определять пробивное напряжение защиты в зависимости от количества разрядников, зная характеристики единичного разрядника.

Напряженная площадь электродов ( $E_{\max} > E > E_{\max} \cdot 0.1$ ) одного разрядника составляет 50 кв.см. Зависимость электрической прочности зазора разрядников от их площади, построенная на основе опубликованных экспериментальных данных [14] с нанесенными данными, полученными нами для площадей, соответствующих 1, 2, 7 и 14 разрядникам при соответствующих давлениях, показана на рис.18. Для давления газа в 0.9 МПа аппроксимация проведена нами. Величина зазора "глухой" защиты трубки выбиралась по результатам экспериментов с 16 разряжниками трубки и составляет  $2.1 \pm 0.2$  мм для полного напряжения на трубке 1.1 МВ. Выяснено, что в исследованном диапазоне зазоров "глухой" защиты для средних зазоров единичного разрядника от 0.876 мм до 2.5 мм отсутствует эффект полного напряжения (рис.19).

### 2.3. Распределение напряжения по секциям трубки

При выборе номиналов сопротивлений для делителя трубки исходили из соображений максимально допустимой рассеиваемой мощности в делителе при минимальном количестве сопротивлений делителя. Этим требованиям удовлетворяют сопротивления СЗ-14, каждое номиналом в 100 МОм, мощностью 1 Вт и на напряжение 10 кВ. В одной цепочке делителя установлены последовательно 7 сопротивлений, жестко соединенных между собой медными трубками с закругленными кромками (поз.6 рис.1).

В зоне работы "глухой" защиты, делителей трубки и экранирующих электродов на отдельных металлических поверхностях в газе возникают напряженности, близкие к пробивным для данных площадей электродов (рис.18). Некоторые результаты расчетов полей для одного из последних вариантов разрядников приведены на рис.20. Цифры указывают величину поля для данных точек поверхностей электродов для случая расположения боковой земляной стенки бака на расстоянии от охранных электродов, превышающем высоту трубки, установленной на днище бака. Первоначальный вариант конструкции электродов защиты и делителя в газе при всех исследованных способах крепления внутренних электродов в вакууме не позволил поднять уровень устойчивого беспробойного напряжения выше 740 кВ., хотя кратковременно поднимались и до 1100 кВ. Вид различных функций распределения вероятности пробоев для изоляторов ускорительной трубки показан на рис.21, где 21а — нормальная функция, 21б — двойная экспотенциальная, 21в — Вейбулловская. Наиболее подходящей функцией распределения вероятности пробоя для полученных данных по электрической прочности является двойное экспотенциальное распределение. Для данной функции значение 63% квантиля для 16 изоляторов на 22% меньше, чем для одного изолятора. Следует отметить, что одновременно включенные под одно и то же постоянное напряжение 13 изоляторов ускорительной трубки при параллельной тренировке выдержали напряжение 110 кВ. Под этим напряжением изоляторы отстояли 7 часов без единого пробоя, что для единичных изоляторов приводит к прочности, по крайней мере, на 22% большей. При условии сложения этих напряжений для последовательного включения 16 изоляторов трубки мы должны были иметь беспробойное напряжение не менее 1760 кВ., что не наблюдалось. Потребовалось изменить подход к перераспределению напряжения по секциям трубки с учетом короны в газе и вакууме. Пересмотрев и изменив конструкции внутренних, внешних электродов и конструкцию делителя, удалось без развакуумирования трубки поднять уровень беспробойного (в течение



часа) напряжения с 740 кВ до 1200 кВ. Дальнейший подъем напряжения ограничивала прочность конденсаторов каскадного генератора при тренировочных пробоях трубки. Чтобы понять ограничения в электрической прочности, из 16 рабочих изоляторов трубки 4 были закорочены и продолжен подъем напряжения. Если пересчитать полученные данные на 16 рабочих изоляторов, то, пройдя промежуточную вероятность в 0.5 пробоев в минуту на 1330 кВ, и, продолжив тренировку, на 1440 кВ пробил один из изоляторов трубки по телу с потерей вакуумной плотности. Это соответствовало прочности в 45 кВ/см для статического распределения напряжения.

Для расчета величины, на которую возрастает напряжение на единичных секциях в трубке, соседних с той, в которой прошел пробой, воспользуемся формулами, приведенными в [4]. В рассматриваемой трубке средняя емкость секции составляет около 30 пФ, а емкость электрода секции на бак — около 1.5 пФ. Тогда при перекрытии поверхности одного изолятора в трубке по вакууму или газу на ближайших секциях напряжение возрастает в 1.2 раза. При рабочем напряжении на трубке в 1090 кВ и при последовательном пробое трубки напряженность на отдельных изоляторах очень быстро становится сравнимой с напряженностью разрушения изолятора и поэтому наряду с применением "глухой" защиты требуются меры по отбраковке изоляторов (п.1-4).

#### 2.4. Тренировка трубки

Процесс тренировки трубки последовательными пробоями при малой выделяемой энергии в единичном пробое преследует 2 цели: 1-убрать те дефекты в ускорительной трубке, которые в дальнейшем могут привести к пробое с большим выделением энергии в единичной секции, 2-убрать те дефекты, которые могут являться источниками автоэмиссионного тока достаточного для перераспределения напряжения по секциям трубки с последующим пробоем трубки. В случае выделения в вакуумном пробое большой и ничем не ограничиваемой энергии, запасенной в конструктивной емкости трубки, возможна детренировка. На рис.22 показана часть тренировочной кривой для одного из вариантов тренировки трубки. На этом графике виден участок на котором происходила детренировка трубки. По горизонтали указан номер пробоя. Характер поведения тренировочной кривой аналогичен характеру кривой, приведенной на рис.13. Для того, чтобы проводить тренировку трубки при малом напряжении и избежать разрушения изоляторов, соединяют все, например,

нечетные электроды с высоковольтным электродом через ограничительные сопротивления а четные — с земляным электродом или (при изменении полярности тренировки) наоборот. Типичный вид тренировочной кривой показан на рис.23. При уверенности в работе "глухой" защиты возможна тренировка пробоями при подъеме напряжения на ускорительной трубке до уровня рабочего при последовательном включении изоляторов. При этом необходимо соблюдать условие подъема давления газа так, чтобы достигнутый уровень напряжения на трубке составлял не менее 0.9 от напряжения срабатывания разрядников "глухой" защиты (рис.19). В этом варианте тренировалась одна из ускорительных трубок при свежизготовленных внутренних фокусирующих электродах и электродах "глухой" защиты. В процессе сборки трубки была допущена ошибка, которая привела к тому, что зазор сетка пушки — ближайший электрод трубки (рис.1) был уменьшен в 2 раза — т.е. на высоковольтном конце трубки получился вакуумный разрядник. Тренировка трубки прошла до ограничения в 1000 кВ, а при разборке были обнаружены основные следы пробоев на электродах данного зазора, немного на электродах следующего, а все остальные электроды и поверхности изоляторов в вакууме были чисты. На электродах "глухой" защиты были обнаружены многочисленные следы пробоев. Энергия, запасаемая в конструктивных элементах ускорительной трубки и выделяемая без ограничения в пробоях, составляла при 1 МВ — 17 Дж. Энергия, запасаемая в элементах стенда и ограниченная при пробое сопротивлением 20 Ом составляла 320 Дж. В данном эксперименте была продемонстрирована эффективность работы "глухой" защиты.

Общие эффекты при испытании трубок: броски тока на диафрагму и в коллектор начинаются примерно с 200 кВ, а пробой с 350-400кВ. Длительность бросков тока на диафрагму — десятки миллисекунд. В процессе тренировки порог бросков тока в коллектор поднимается с ростом пробивного напряжения так, что при пробивном напряжении в 1.2 МВ броски начинались с 950 кВ. Даже в режиме без пробоев существовала постоянная подгрузка автоэмиссионным током в диапазоне до десяти наноампер (пересчет показаний рентгенометра) не приводившая к немедленному пробое. Подъем напряжения до 1 МВ требовал до 1 тысячи пробоев, а от 1 МВ до 1.2 МВ — около 1500 пробоев. Первые ускорительные трубки перед началом тренировки прогревались при температуре 400 град. в течение нескольких часов. Одинаковый уровень электрической прочности без прогрева трубки достигается за несколько большее время, чем с прогревом и увеличивается время выхода на высокий вакуум. В дальнейшем от прогрева при проведении высоковольтных экс-

периментов отказались, т.к. это достаточно трудоемкий процесс. Вопрос влияния высокотемпературного прогрева трубки на работу оксидного катода нами не рассматривался.

## 2.5. Полупроводящие покрытия

При создании высоковольтных ускорителей заряженных частиц для увеличения электрической прочности вакуумных зазоров представляет интерес применение полупроводящих и диэлектрических покрытий. Известны ссылки на работы по применению таких покрытий [7]. Использование диэлектрических покрытий на электродах ускорительных трубок, особенно при больших ускоряемых токах, может привести к накоплению заряда на поверхности покрытия, пробоем его, а затем и основного вакуумного зазора. Применение полупроводящих покрытий на электродах устраняет этот эффект. Интересно и применение полупроводящих покрытий для стекания рассеянного осажденного заряда с вакуумной поверхности изолятора колбы ускорительной трубки. В этом варианте покрытие дополнительно служит активным делителем ускорительной трубки при постоянном напряжении [10]. Аналогичный делитель можно получить и при нанесении полупроводящего покрытия на газовую поверхность изолятора колбы.

В результате исследования возможности повышения электрической прочности вакуумных зазоров с электродами, имеющими технологичные полупроводящие ванадиево-теллуратные стеклопокрытия [15] получены данные, что электрическая прочность вакуумных зазоров при применении покрытий повышается примерно на 40%. Поверхностная электрическая прочность керамики в вакууме не снижается при применении покрытий. Рассчитаны и экспериментально подтверждены значения удельных мощностей, выделяемых на поверхности керамики с покрытием при прохождении тока по покрытию в вакууме и сжатом газе. Для элегаза данные приведены на рис.24. В связи с сильной зависимостью сопротивления покрытия от температуры перед Научно-исследовательским институтом электровакуумного стекла (г.Москва) была поставлена задача поиска покрытий с слабой данной зависимостью. На рис.25 показаны зависимости сопротивления ванадий-теллуратного (1) покрытия и сопротивления найденного покрытия класса "восстановленное свинцовое стекло" (2) от температуры. Задача плавного (по сопротивлению) соединения покрытия на керамике с электродом решалась с помощью аквадага на керамике УФ-46 диаметром 270 мм и высотой 100 мм склеенной с электродами. Испытания этого узла в элегазе при давлении 3 атм до напряжения в 200 кВ показали независимость сопротивления от напряжения и отсутствие подгаров

и разрушений покрытий в местах стыковки. При решении дальнейшей задачи по созданию делителя на поверхности керамики обнаружилось сложность. При нанесении покрытия на газовую поверхность 3-х секционной колбы ускорительной трубки неоднородность в величинах сопротивлений для отдельных секций составила 50% относительно среднего. Требуется дальнейшая проработка технологии получения покрытия на поверхности керамики.

В экспериментах с вакуумными зазорами в трубке стеклопокрытие было нанесено на катодные стороны 15 электродов (общая площадь 2800 кв.см.) ускорительной трубки. Зависимости мощности дозы радиации, связанной с автоэмиссионными токами, измеренной в определенной точке для ускорительной трубки в холостом режиме от напряжения показаны на рис.26. 1 — для чистометаллических электродов, 2 — для электродов со стеклопокрытием, 3 — для электродов со стеклопокрытием после серии пробоев на уровне 900 кВ–1МВ. Энергия, запасаемая в конструктивных элементах и выделяемая в пробоях, достигала десятков джоулей. Достаточно резкое увеличение мощности дозы в диапазоне 800–900 кВ. для покрытых электродов (кривая 2) связано с разрушением покрытия на внутренних кромках прикатодных электродов, что потребует несложной модернизации геометрии электродов. Пробои в регулярной части трубки при той же выделяемой энергии не привели к разрушению покрытия.

Паяная колба из керамики УФ-46 с нанесенным на внутреннюю вакуумную поверхность керамики покрытием общей площадью 1800 кв.см. отстояла без пробоев 3 часа под напряжением 1 МВ (градиенты по керамике — 31кВ/см.). В процессе тренировки прошло около 300 пробоев с выделением энергии в одном пробое в десятки джоулей. Разрушений покрытия не обнаружено. Отмечено сильное гажение покрытия при первоначальном подъеме напряжения.

С учетом приведенных в работе данных, для единичной секции ускорительной трубки (одной из 16), на рис.27 показаны в зависимости от наружного давления: прочность поверхности керамики в газе — 1, вероятная зона начала разрушения керамики УФ-46 по телу — 2, прочность вакуумной поверхности керамики — 3, прочность разрядников "глухой" защиты — 4.

## 2.6. Подготовка трубки к работе

В процессе изготовления ускорительной трубки изоляторы и электроды подвергаются загрязнению. Наиболее типичные — органические и неорганические. Органические в свою очередь делятся на полярные

(растительные и животные масла) и неполярные (минеральные масла и смазки). Неорганические загрязнения можно разделить на химически связанные с поверхностью (окислы, сульфиды) и физически связанные (соли, пыль, остатки абразива). Кроме этих загрязнений при способе соединений керамических колец и коваровых электродов пайкой через медную прокладку под давлением появляются термохимические загрязнения. В процессе пайки на поверхностях керамики и электродов колбы образуется налет из осаждающихся паров меди расплавляемых медных прокладок и материалов, находящихся в зоне пайки. Ими могут быть либо материал контейнера, либо материал нагревателей печи, либо сама керамика УФ-46. Все наши попытки не допустить налета на поверхности керамики при прогреве ее в печи до температуры пайки даже при отсутствии меди были безуспешны. Методы очистки колбы и электродов ускорительной трубки выбирались соответствующие: обезжиривание в растворителях и водных моющих растворах, электрохимическая полировка, промывка в деионизованной воде для удаления остатков моющих растворов. Интенсификация мойки осуществлялась с помощью ультразвуковых колебаний. Термохимические загрязнения могли быть нами удалены только с помощью пескоструйной обработки внутренних и наружных поверхностей колбы ускорительной трубки с последующим тщательным удалением песка.

### 3. Технологические вопросы по работе с элементами трубки

При разработке ускорительной трубки одновременно с задачей надежности работы ставилась задача простоты сборки и дешевизны изготовления. Рассматривались несколько способов крепления внутренних электродов трубки к промежуточным электродам колбы. Схемы крепления показаны на рис.2(а,б,в). При явном удобстве установки внутренних электродов, использующих в узлах крепления упругие проволочки (рис.2а), недостатком этих узлов является потеря упругости проволочек при обезгаживающем прогреве трубки и, как следствие, радиальное пробалтывание электродов. Кроме того, изготовление узлов крепления требует высокой квалификации изготовителя. Схема, показанная на рис.2в. надежна в сборке, но трудоемка в изготовлении и сборке. После опробования данных схем мы вернулись к модернизированному байонетному решению (рис.2б.), но при этом потребовалось ввести в технологию изготовления колбы расточку внутреннего диаметра ее промежуточных электродов. Во всех упомянутых трубках, работавших при напряжении свыше одного миллиона вольт, использовался данный способ крепления электродов.

Повторное использование керамических колец от пришедшей в негодность колбы ускорительной трубки ограничено и возможно после растворения коваровых электродов в концентрированной азотной кислоте. Остающаяся на торцевых поверхностях смесь меди и ковара по результатам нашей работы убиралась только шлифовкой. При этом высота керамического кольца уменьшается на десятые доли миллиметра.

### Заключение

По результатам работы:

1. Выбран профиль и внедрена технология обработки вакуумной поверхности неорганических изоляторов ускорительной трубки с радиусами ребер и впадин в 0.75 мм. Профиль дает выигрыш в электрической вакуумной прочности отдельных изоляторов по сравнению с гладкой геометрией в 2 раза.
2. Показаны оптимальные высоты для ребристых и гладких изоляторов при работе на импульсном и постоянном напряжениях.
3. Рассмотрено влияние на электрическую прочность в вакууме величины щели при торцевом соединении изоляторов и электродов и угла экранировки.
4. Выяснена зависимость электрической прочности вакуумных зазоров от энергии, выделяемой в пробое и материала электродов.
5. Оценены различные способы вакуумно-плотных неразъемных прогревных соединений изоляторов и электродов.
6. Рассмотрен вопрос распределения напряжения по секциям ускорительной трубки при работе на постоянном напряжении.
7. Рассмотрен вопрос защиты электрической и механической прочности ускорительной трубки от пробоя по полному напряжению при применении "глухой" защиты. Рассмотрены статистические характеристики работы защиты.
8. Рассмотрены и экспериментально проверены различные способы крепления внутренних электродов ускорительной трубки, "глухой" защиты, охранных колец, цепочек резистивного делителя.
9. Рассмотрен вопрос и определены условия применения полупроводящих покрытий в ускорительных трубках.

10. Рассмотрен вопрос технологической подготовки изоляторов, электродов и ускорительной трубки к работе.

11. Рассмотрены вопросы тренировки трубки. На основании найденных решений изготовлены ускорительные трубки, выдерживающие постоянное напряжение больше 1000кВ в течение нескольких часов без пробоев. Ограничением по увеличению рабочего напряжения в трубках является объемная электрическая прочность керамики УФ-46.

Авторы выражают благодарность за постоянную заинтересованность в работе Балакину В.Е. Полезные критические замечания были сделаны Крайновым Г.С. Плодотворные обсуждения результатов работ на импульсном напряжении состоялись с Вассерманом С.Б., Долгушиным В.М. и Казарезовым И.В. Активное участие в данной работе принимал механик лаб.4-0 Костякин Г.Я. Большое участие в работе приняли механик Симоненко В.М. и лаборант Гамзенок Д.И.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вассерман С.Б. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-110. Новосибирск, 1977.
2. Авдиенко А.А.Б Булушев А.Ф., Боровиков В.М. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1985. Вып.1 С.62.
3. Широков В.В. ПТЭ. 1990. N5. С.38.
4. Вассерман С.Б., Глазков И.И., Радченко В.М. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-111 Новосибирск, 1983.
5. Балакин В.Е., Долгушин В.М., Казарезов И.В. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-78 Новосибирск, 1984.
6. Широков В.В. ПТЭ. 1990. N5. С.148.
7. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М. : Энергоатомиздат, 1972.
8. Павлушкин Н.М. и др. Стекло. Справочник. М., Стройиздат, 1973.
9. 7 International symposium on discharges and electrical insulation in vacuum. Novosibirsk, 1976. p.366.

10. Валяев Ю.Д., Казарезов И.В., Крючков А.М. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-143 Новосибирск, 1988.

11. T.Joy. Daresbury Laboratory. Preprint DL/NUC/P 132A. 1981.

12. Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза, М., Энергоатомиздат. 1988.

13. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

14. Бортник И.М. Электричество. 1974. N12. С.20.

15. Петровых Н.В., Сорокин И.Н., Широков В.В. ПТЭ. 1992. N4. С.131.

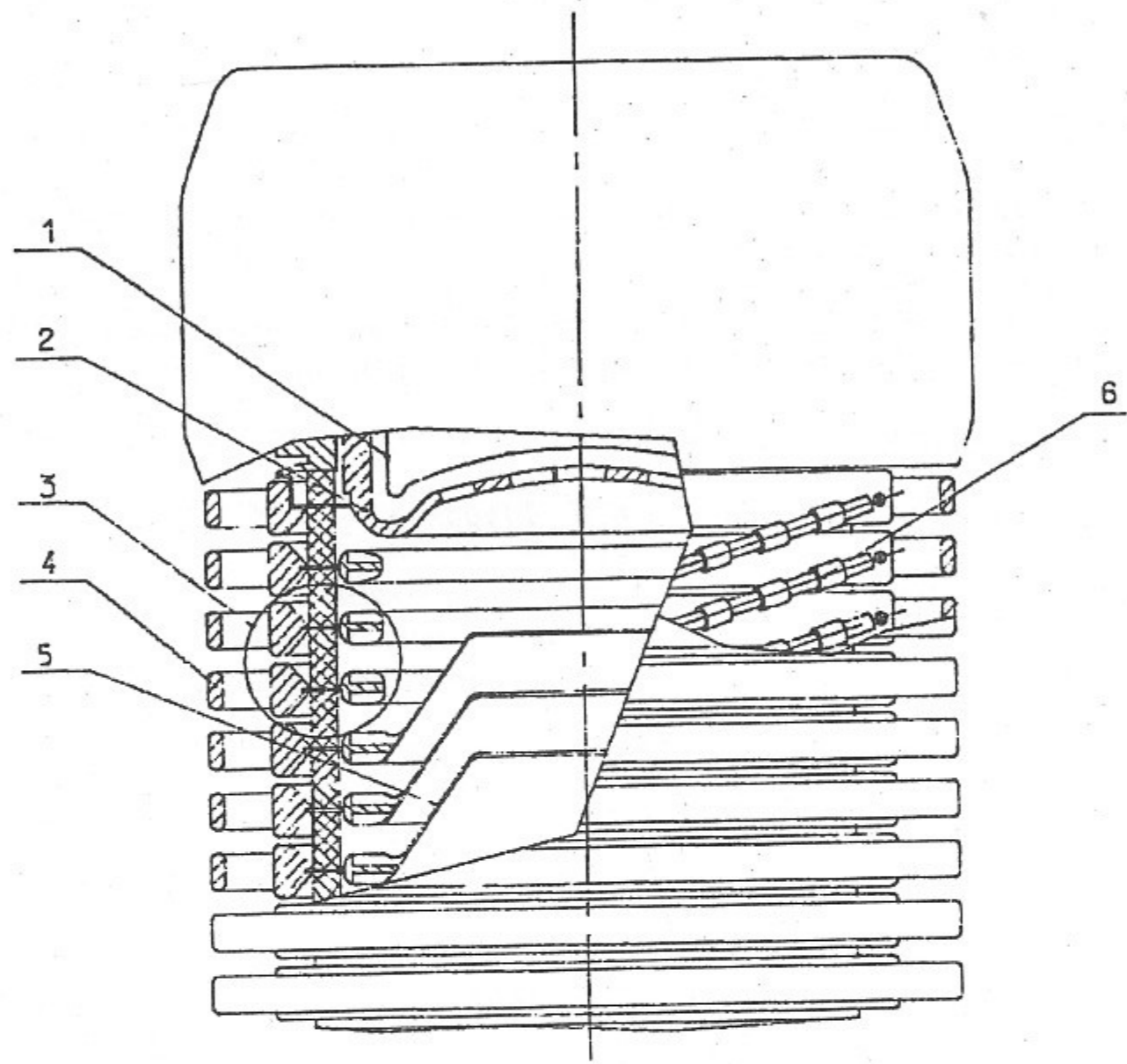


Рис. 1.

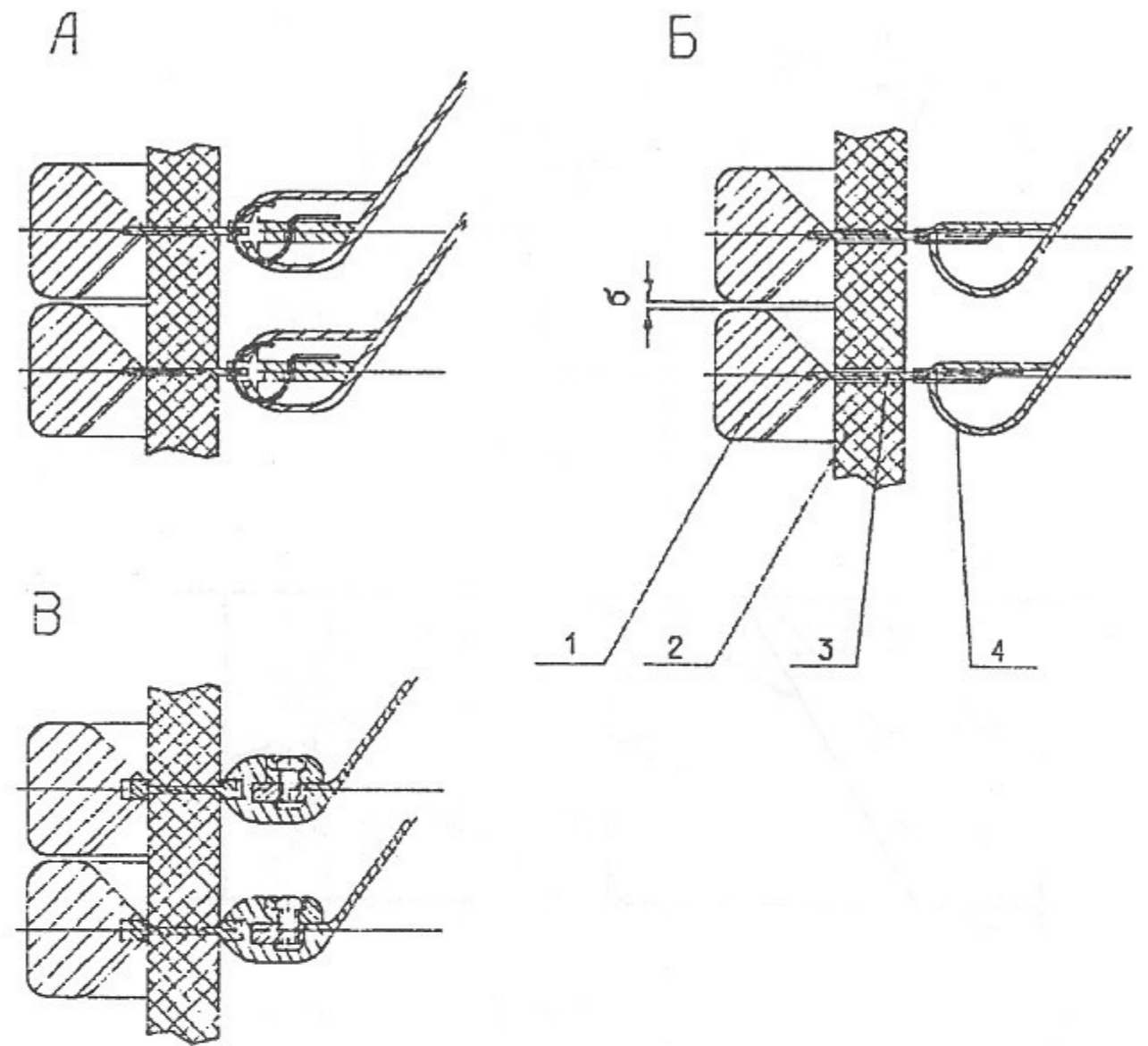


Рис. 2.

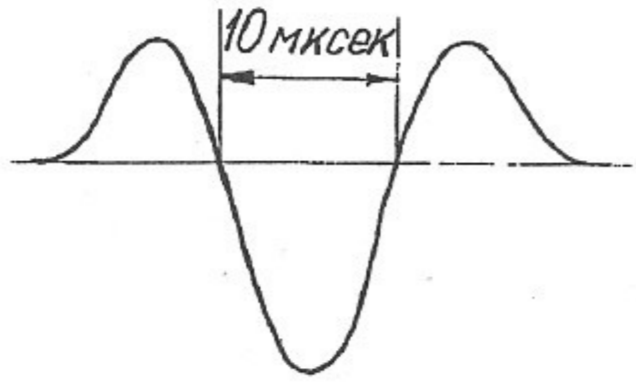


Рис. 3.

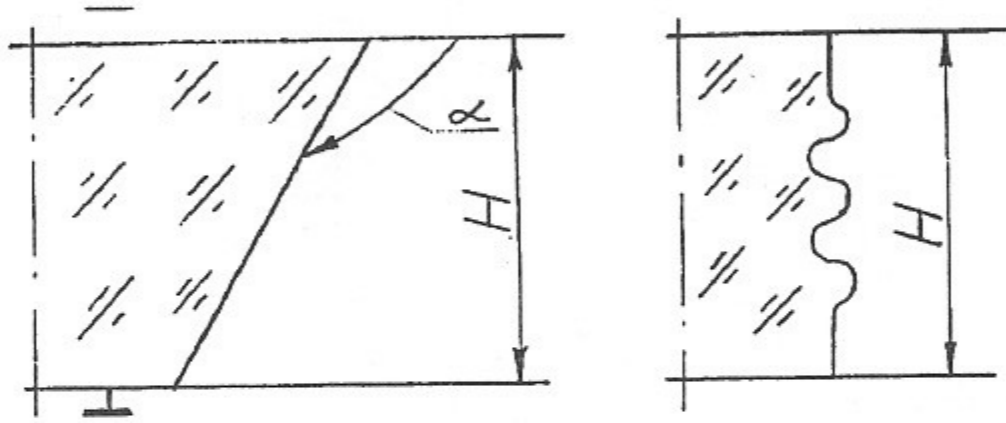


Рис. 4.

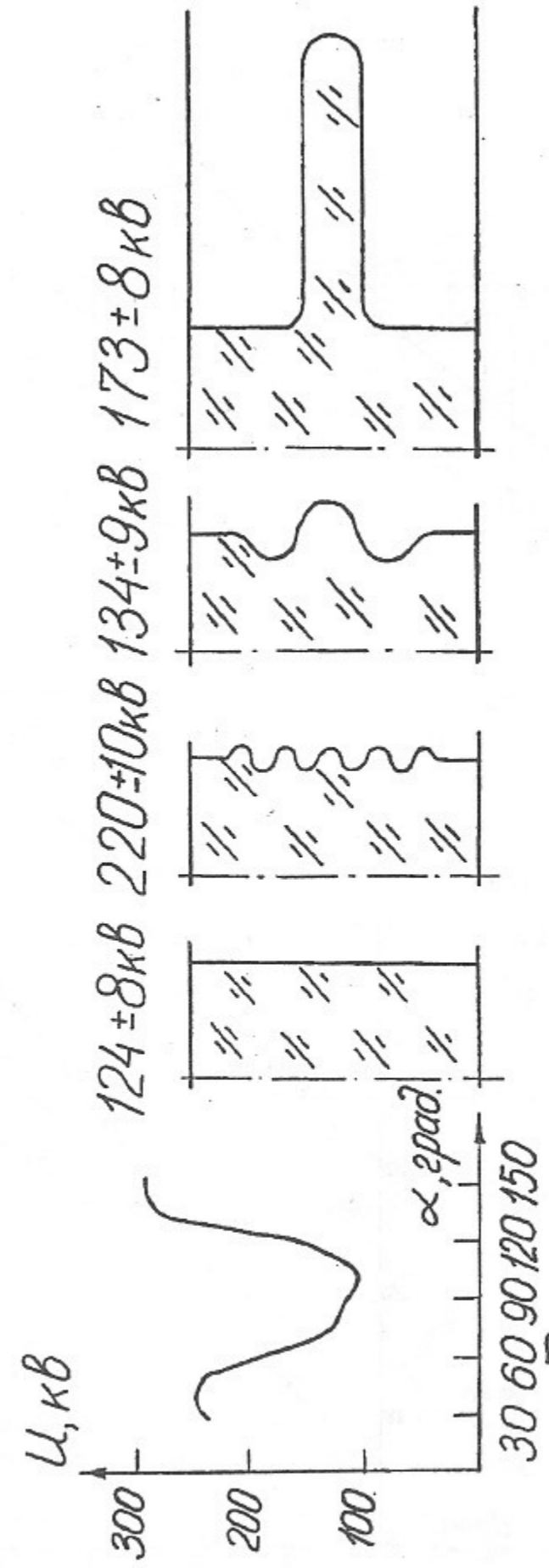


Рис. 5.

Рис. 6.

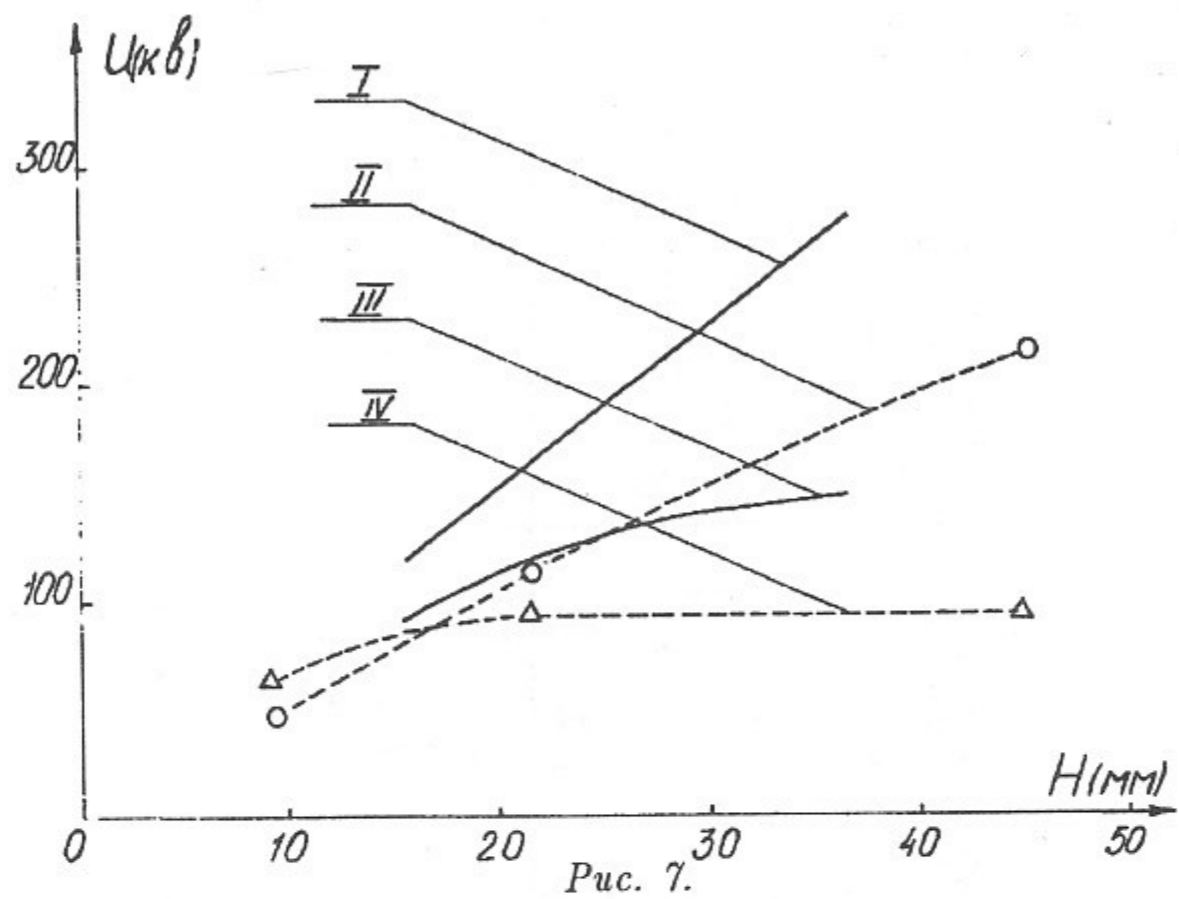


Рис. 7.

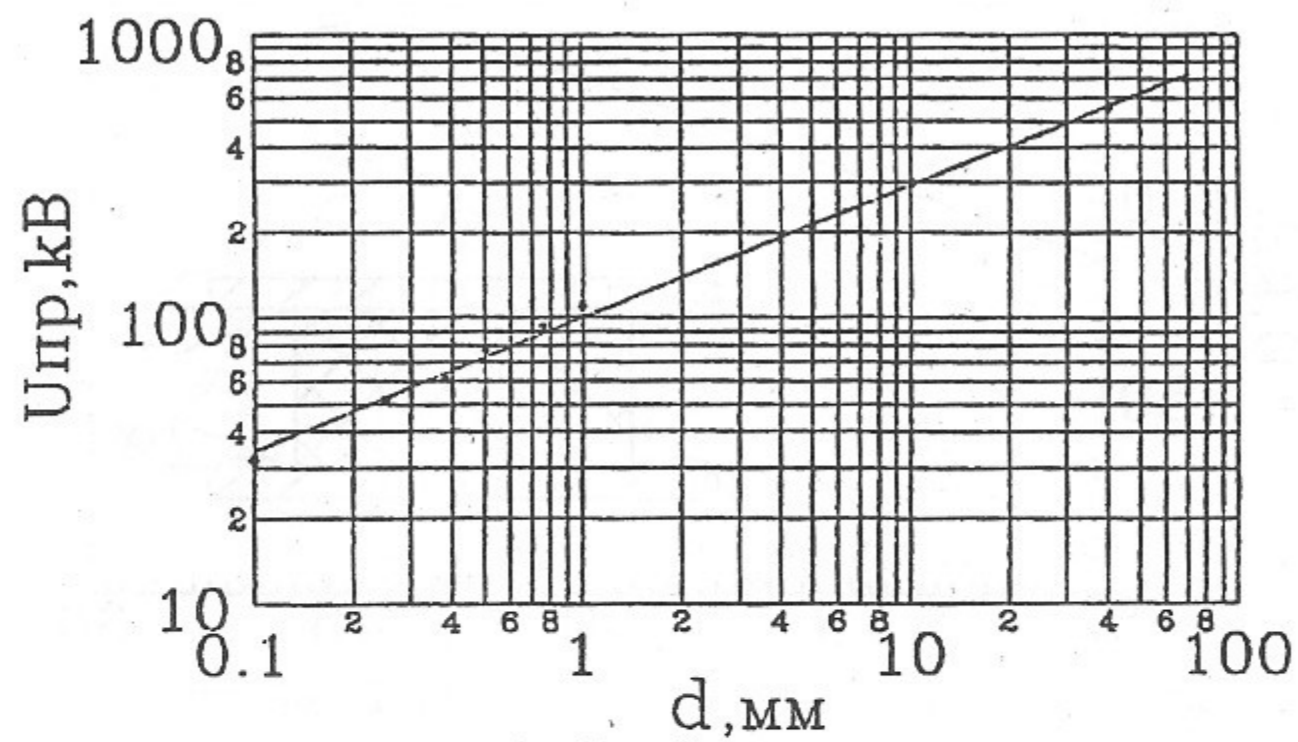


Рис. 9.

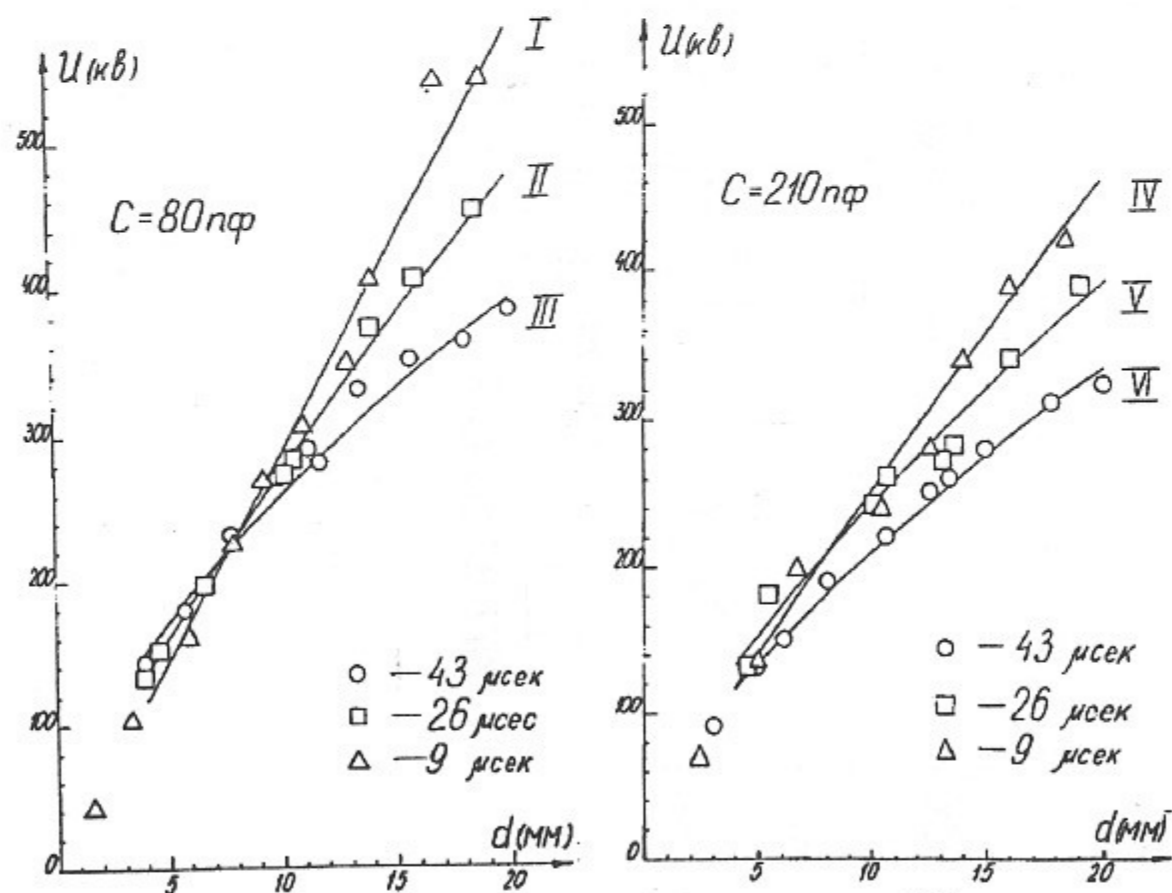


Рис. 8.

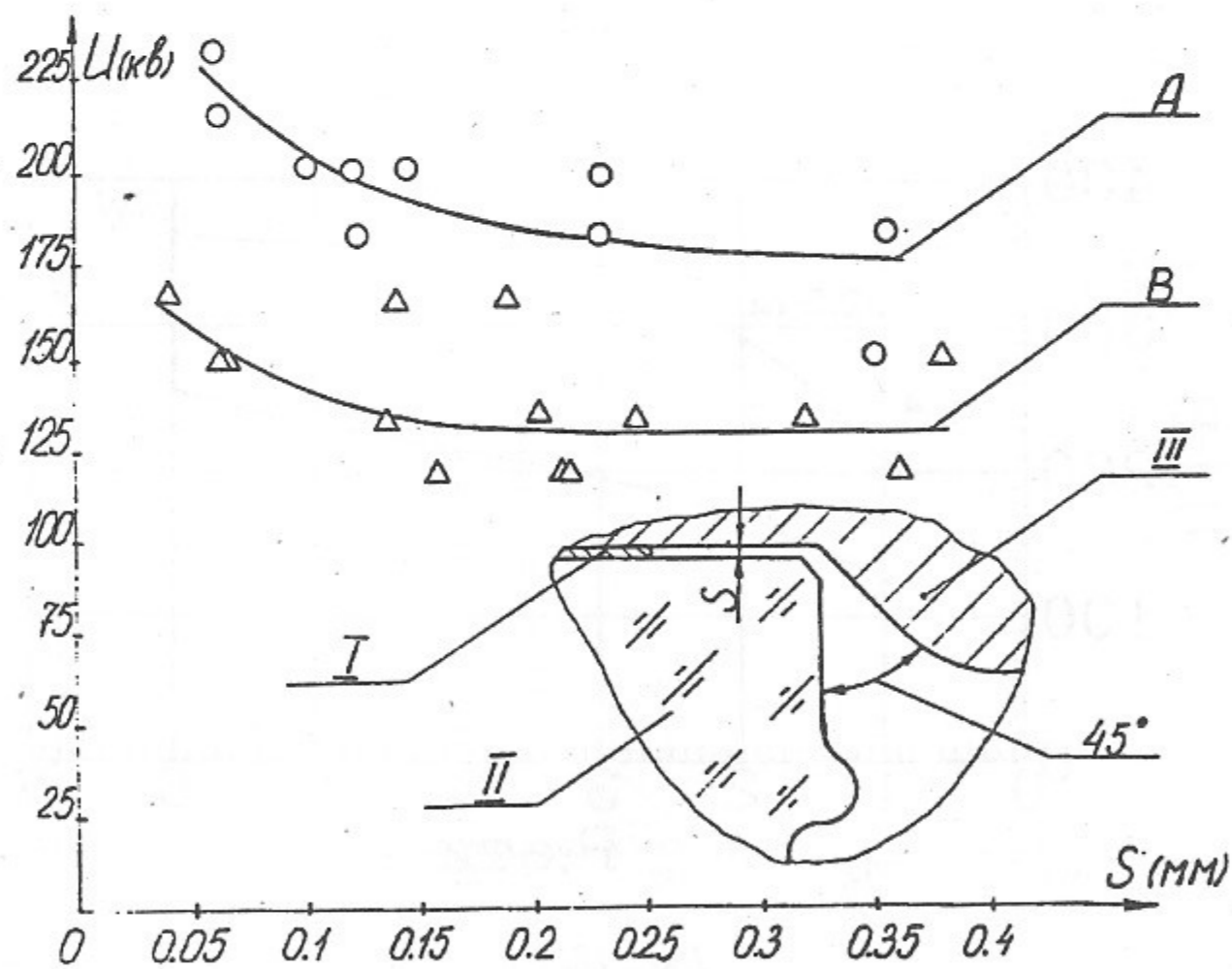


Рис. 10.

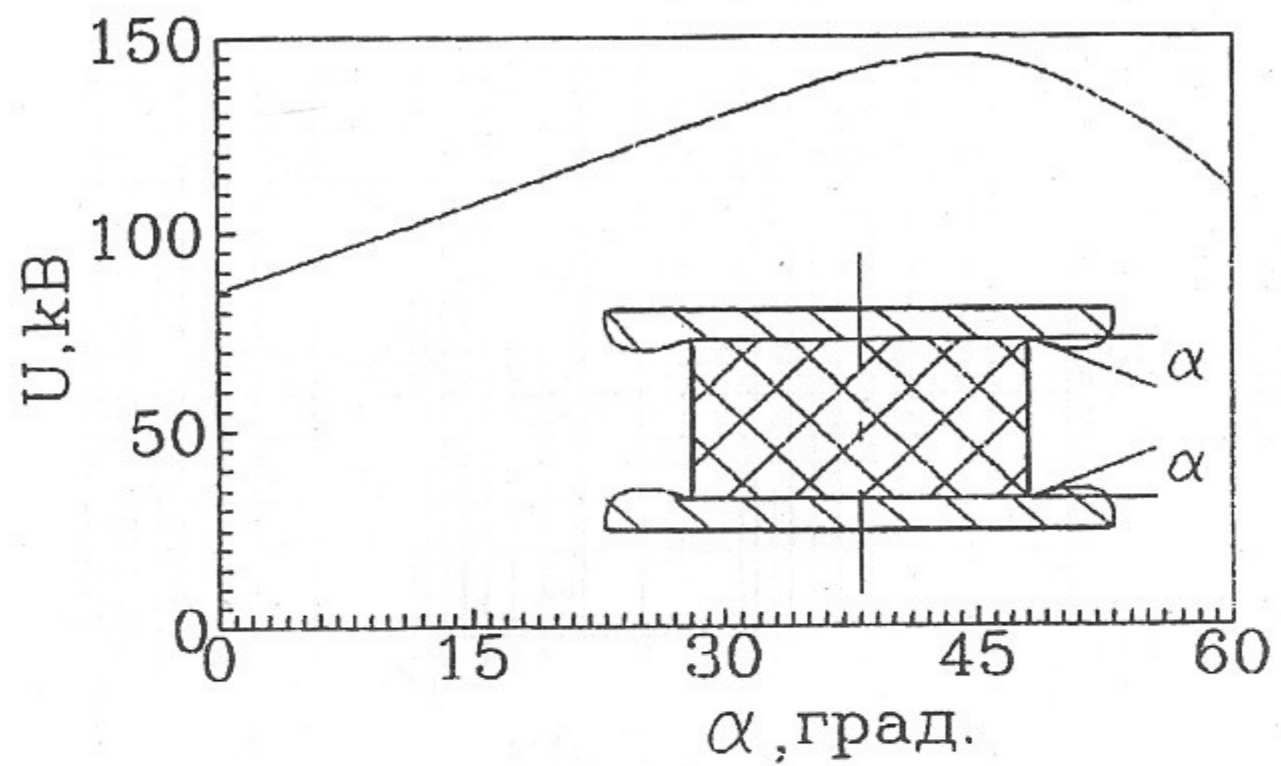


Рис. 11.

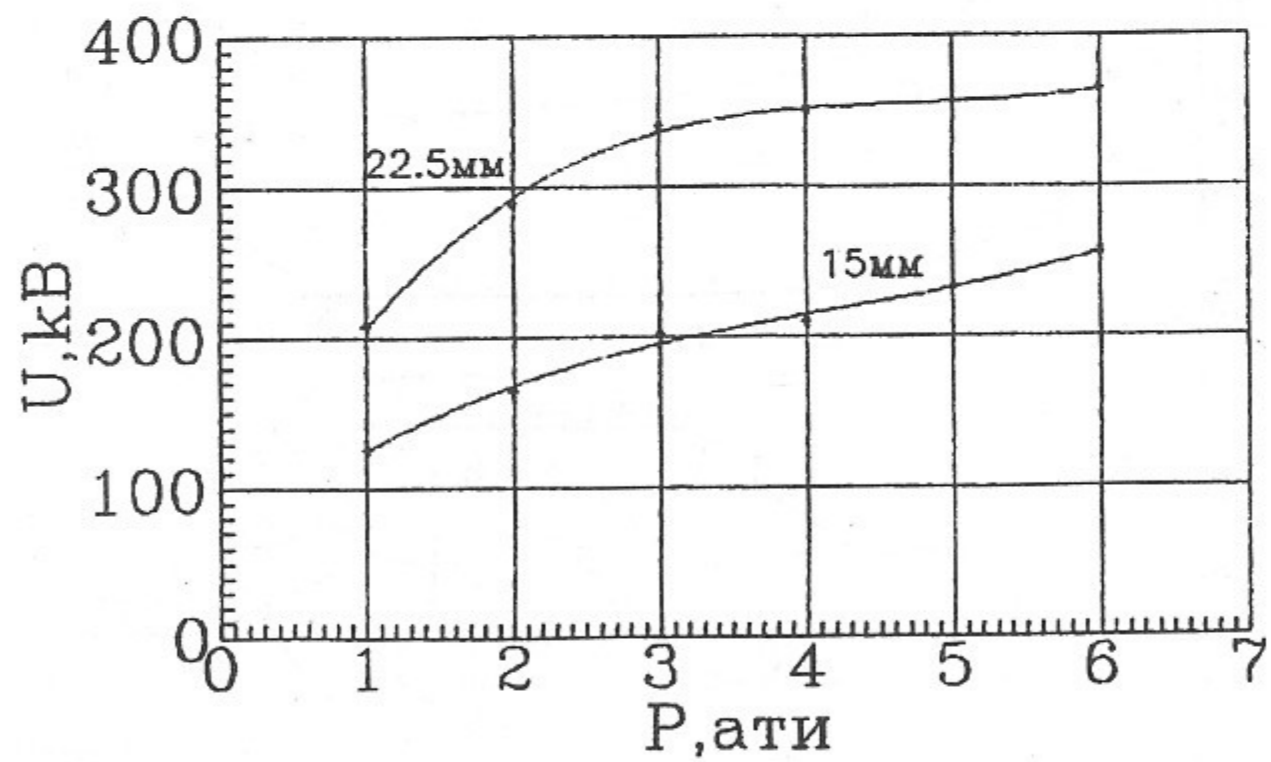


Рис. 12.

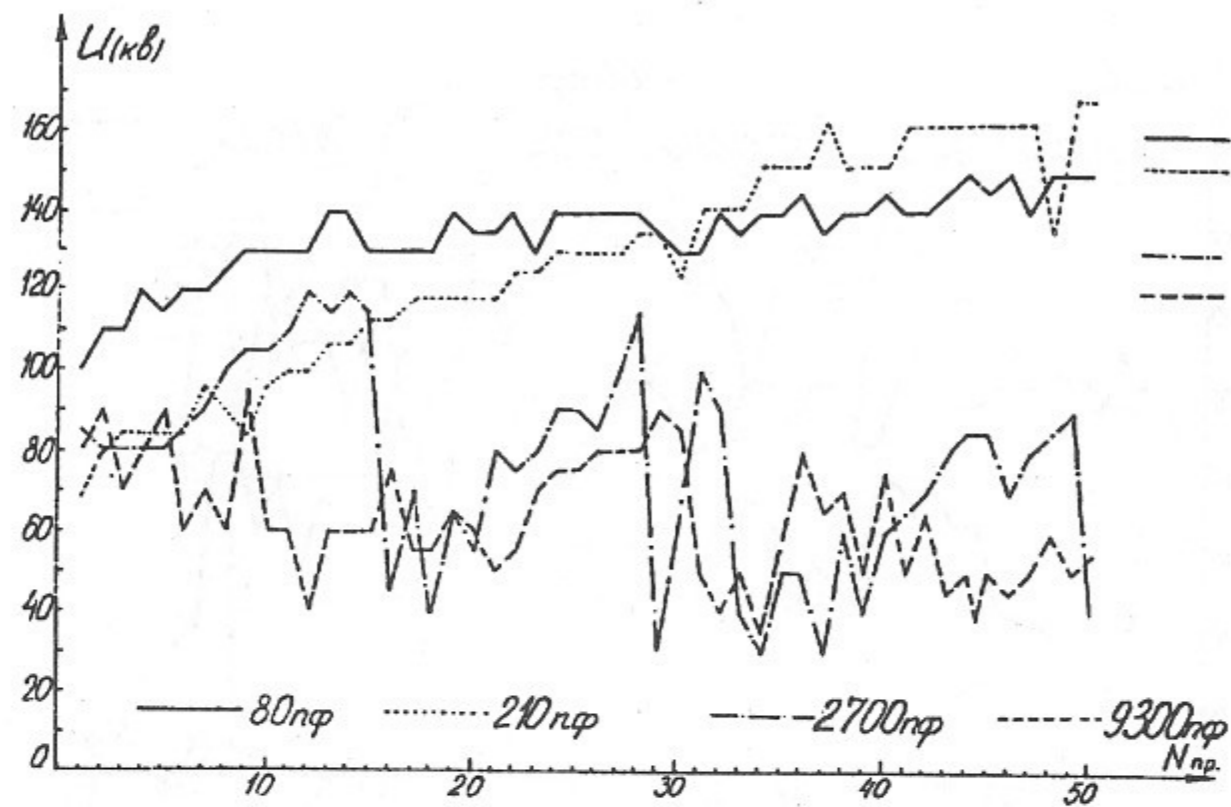


Рис. 13.

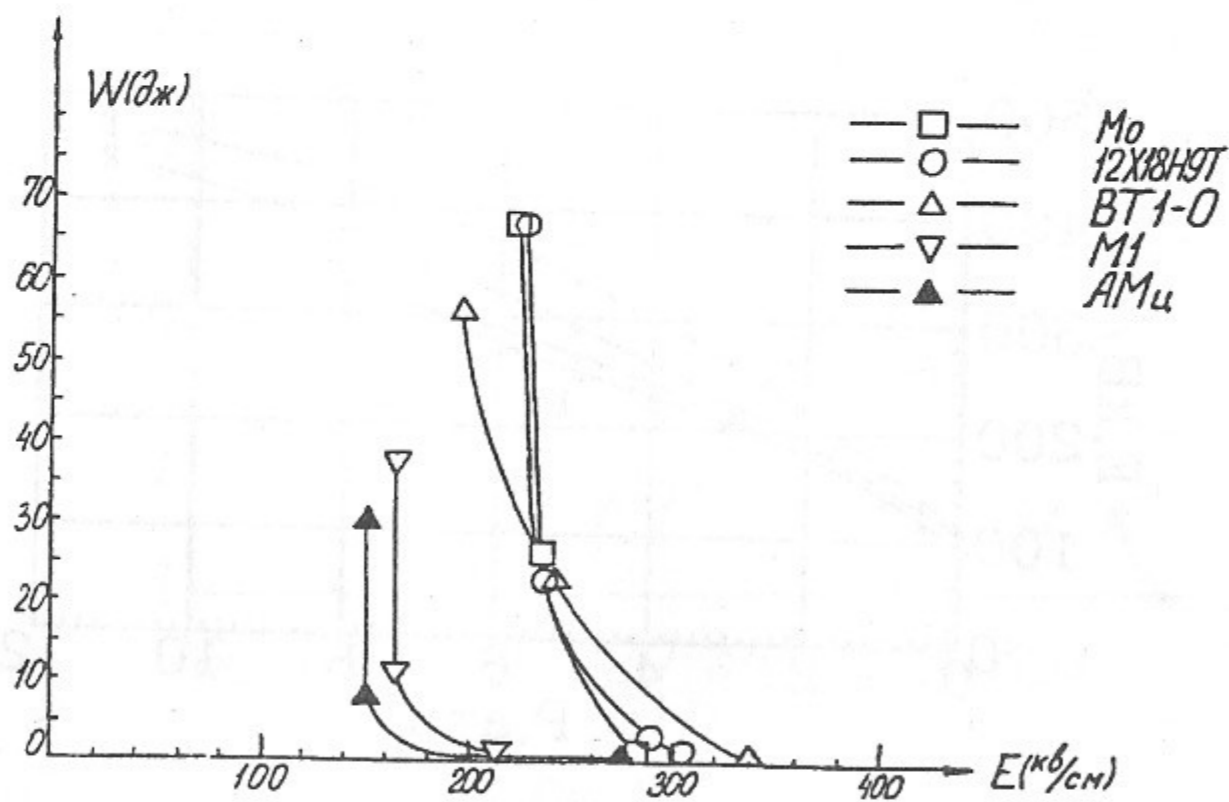


Рис. 14.



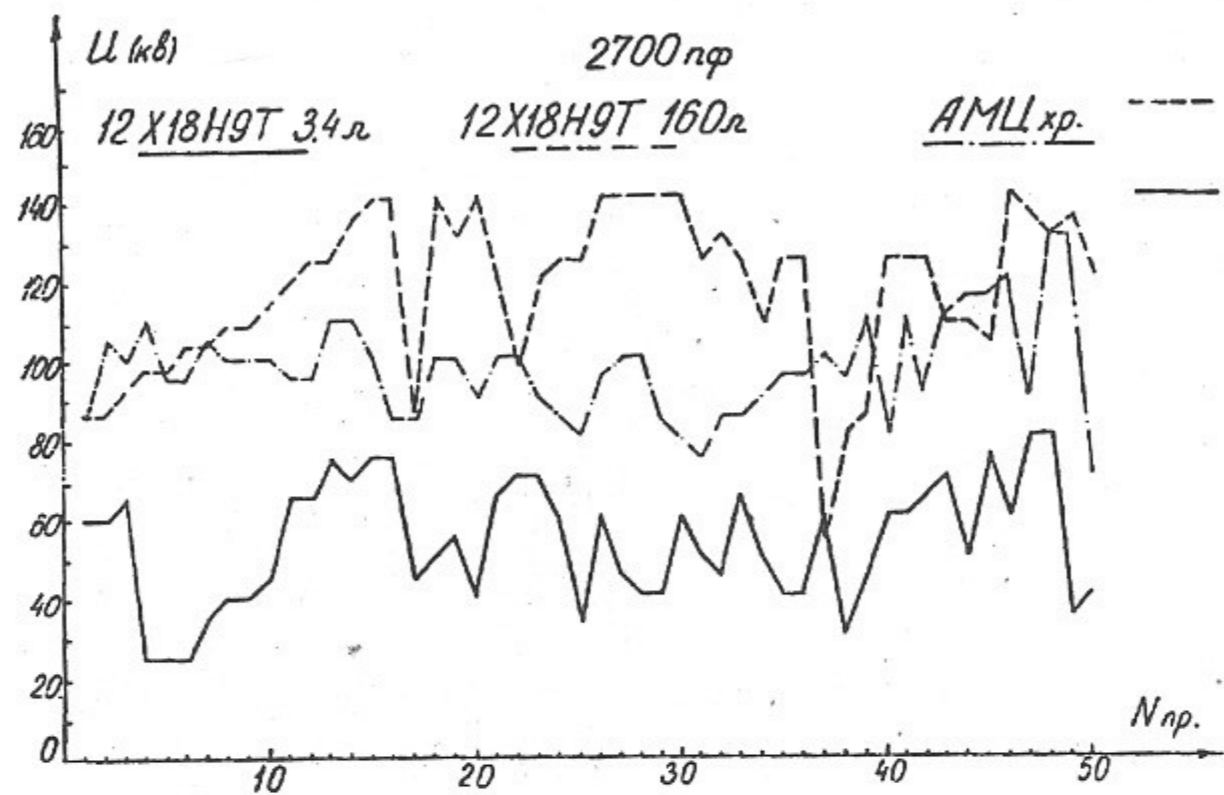


Рис. 15.

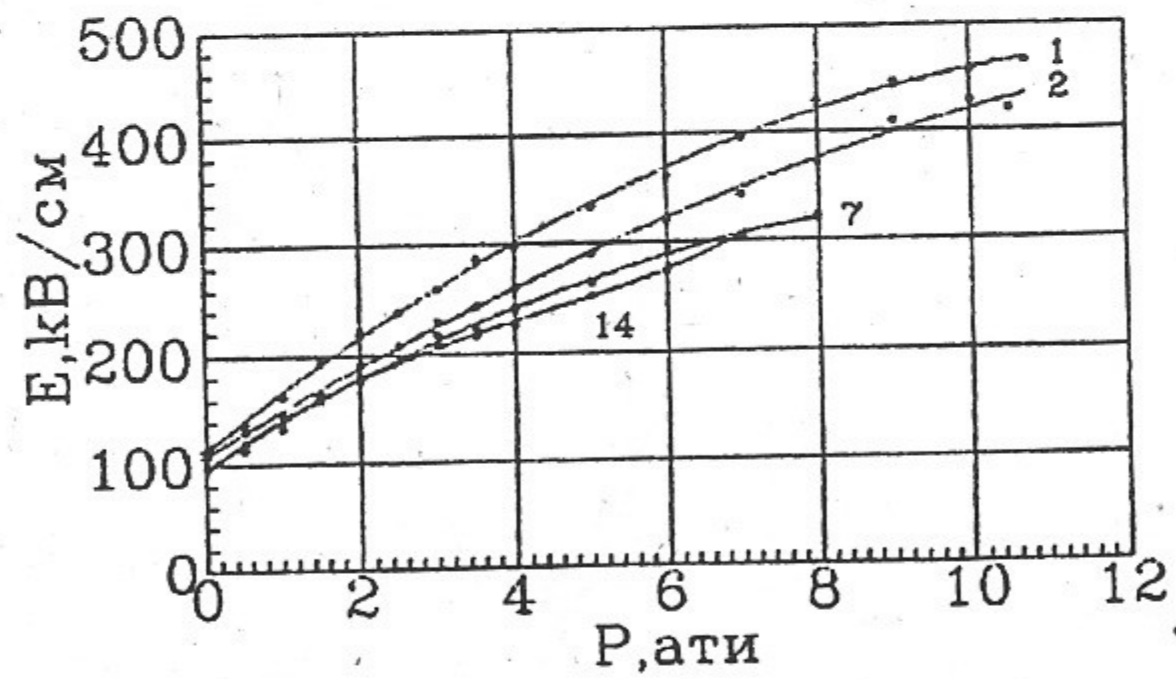


Рис. 16.

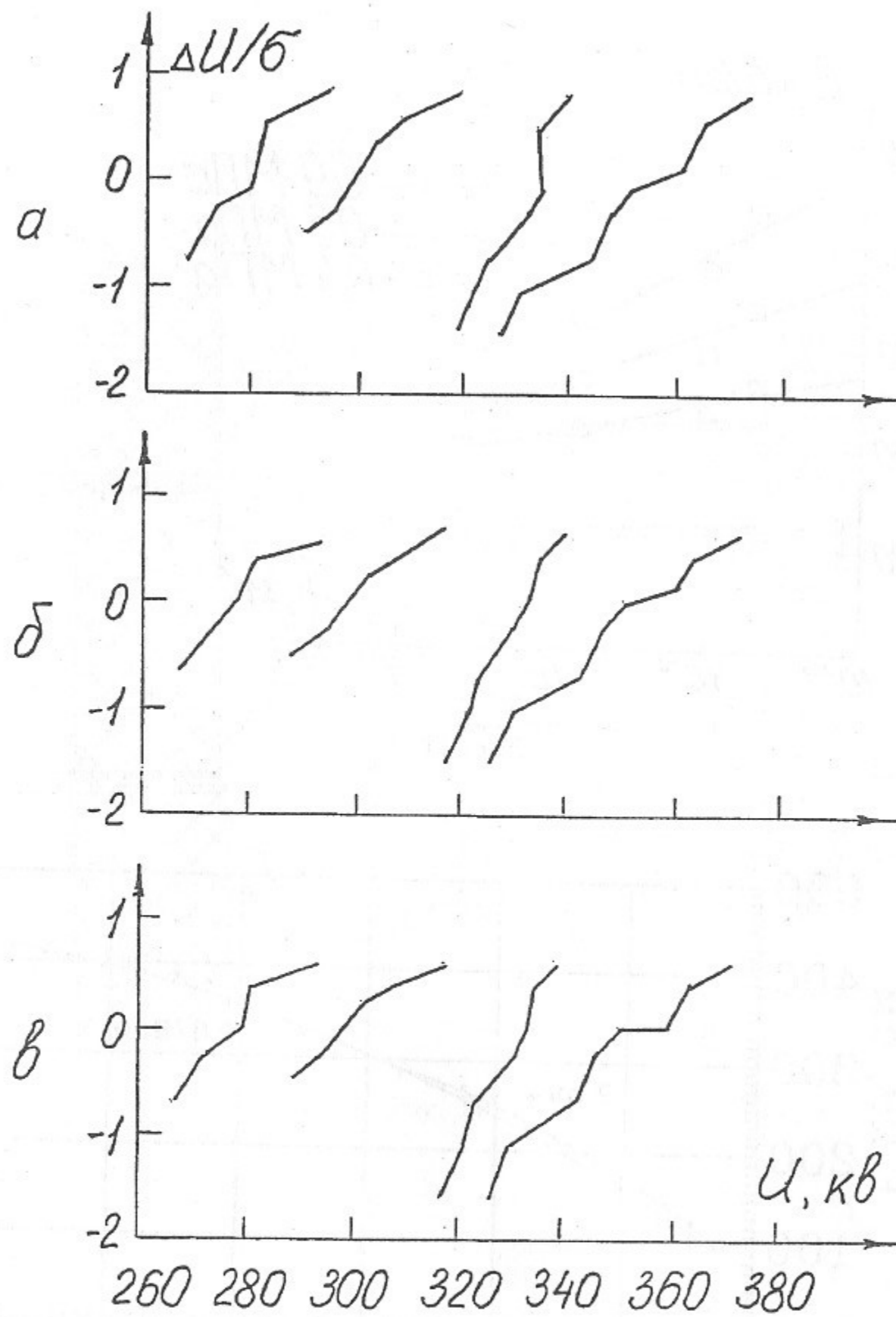


Рис. 17.

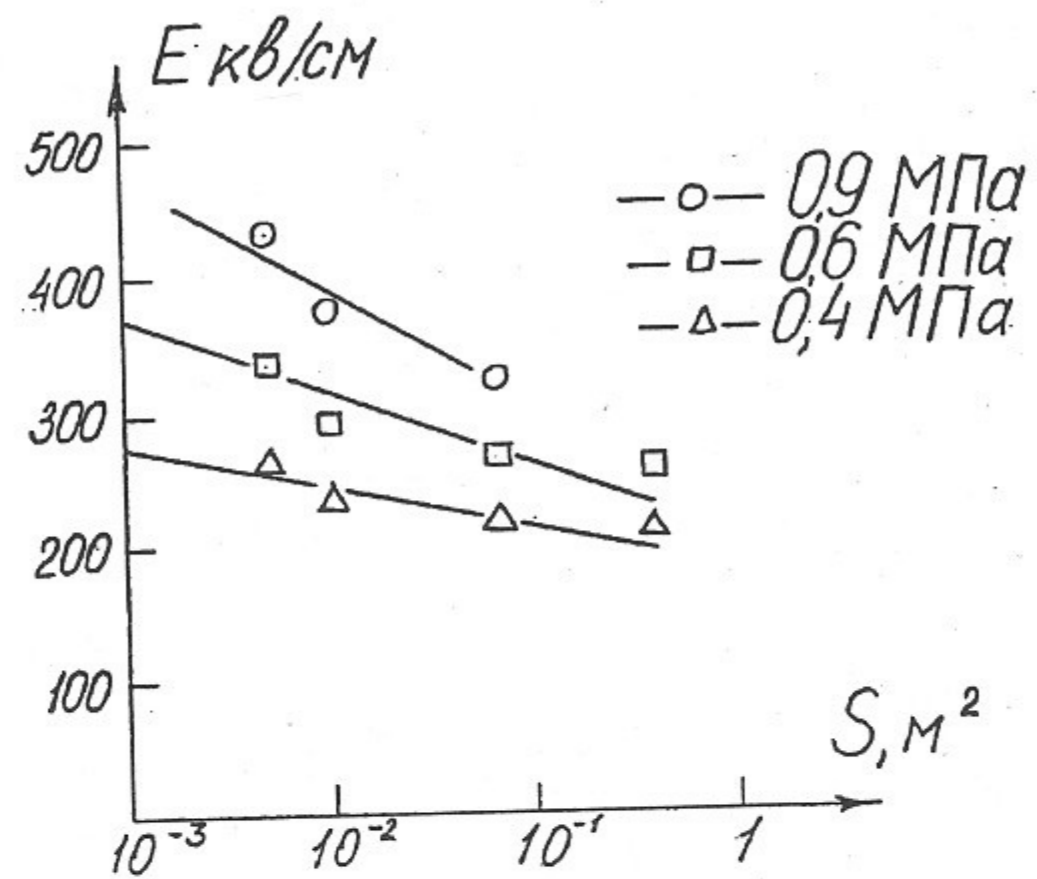


Рис. 18.

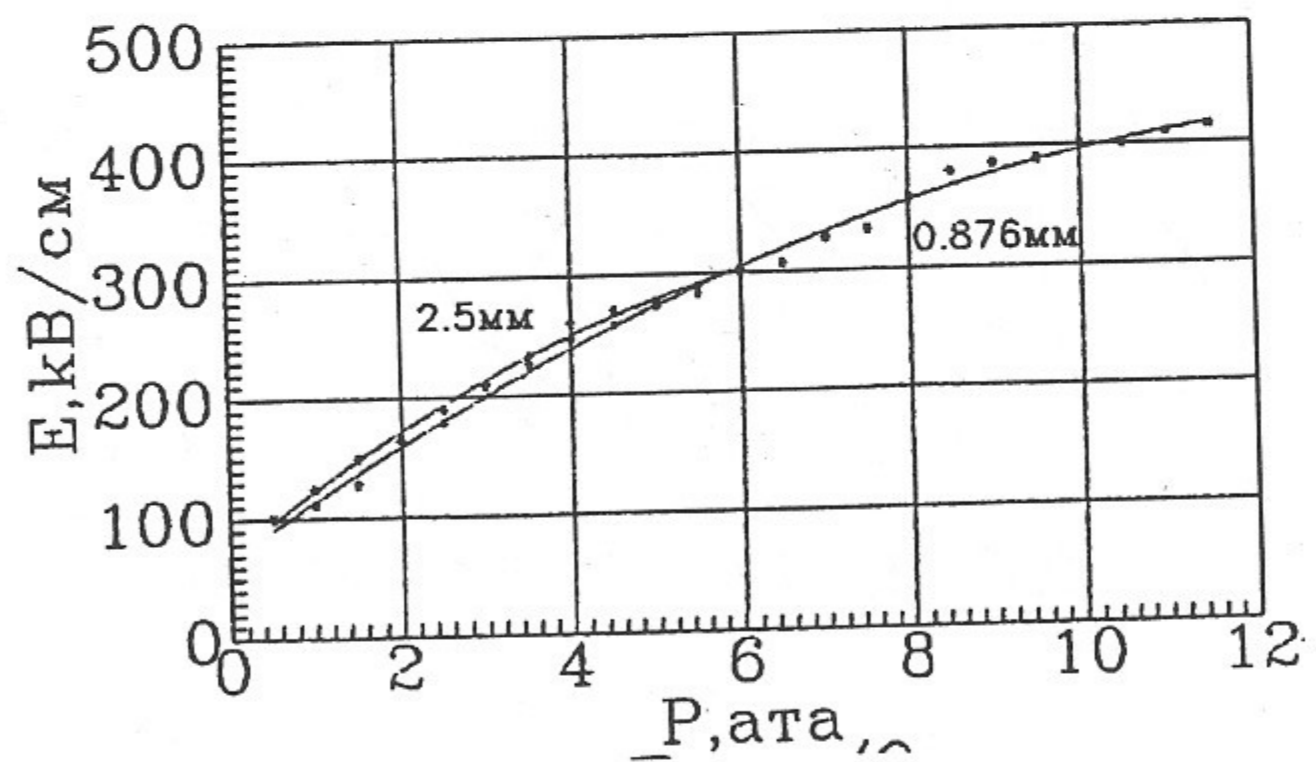


Рис. 19.

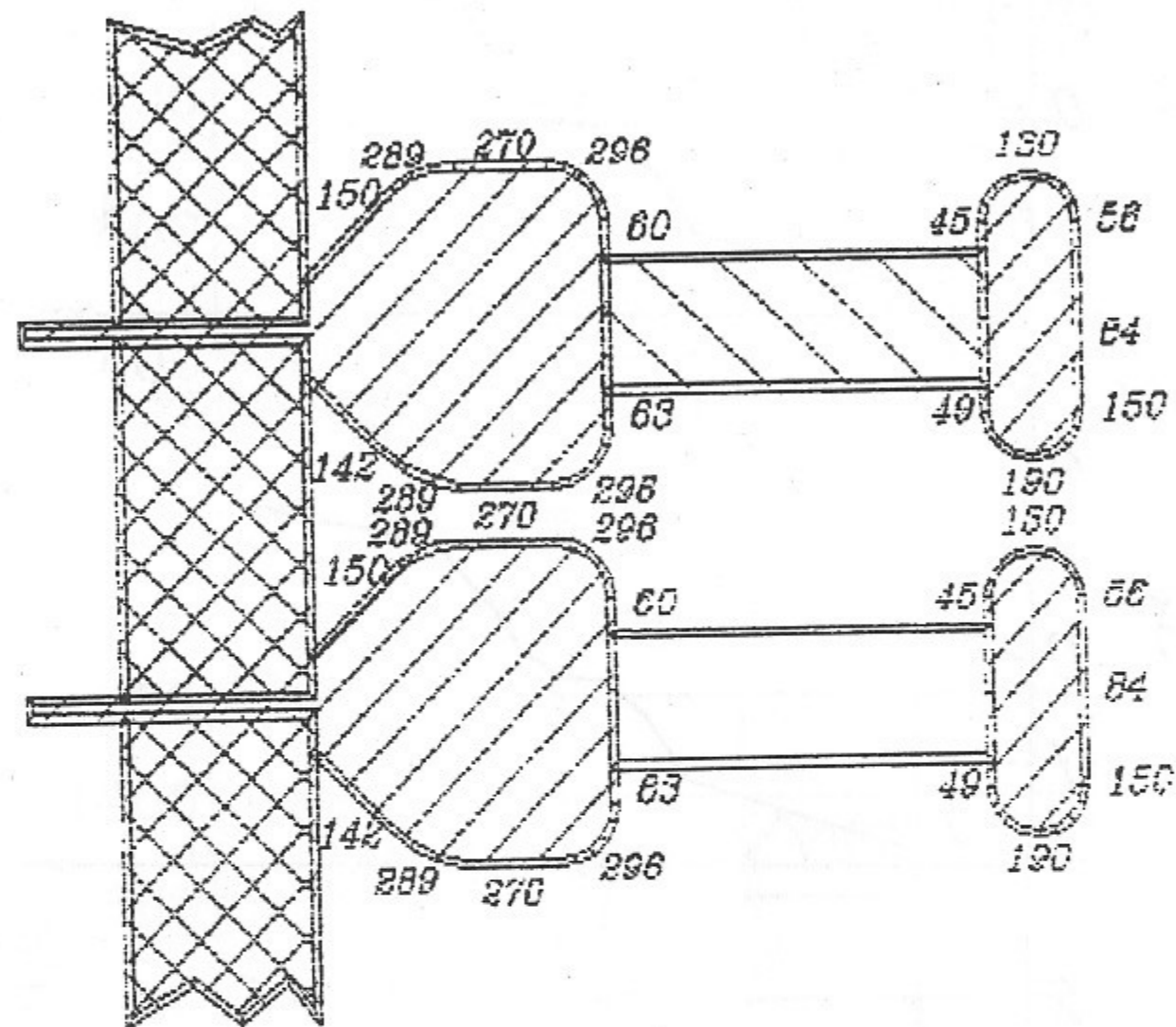
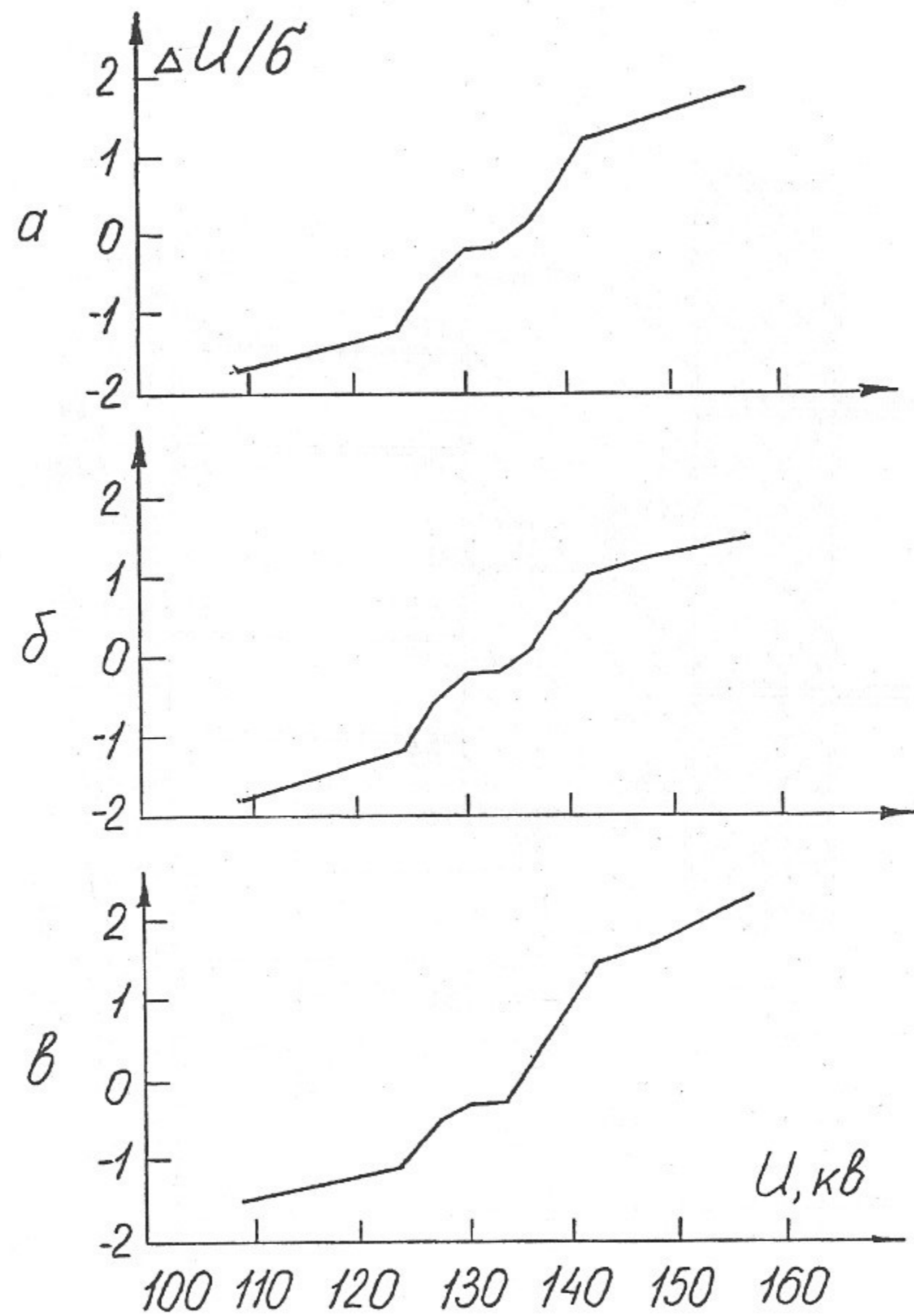
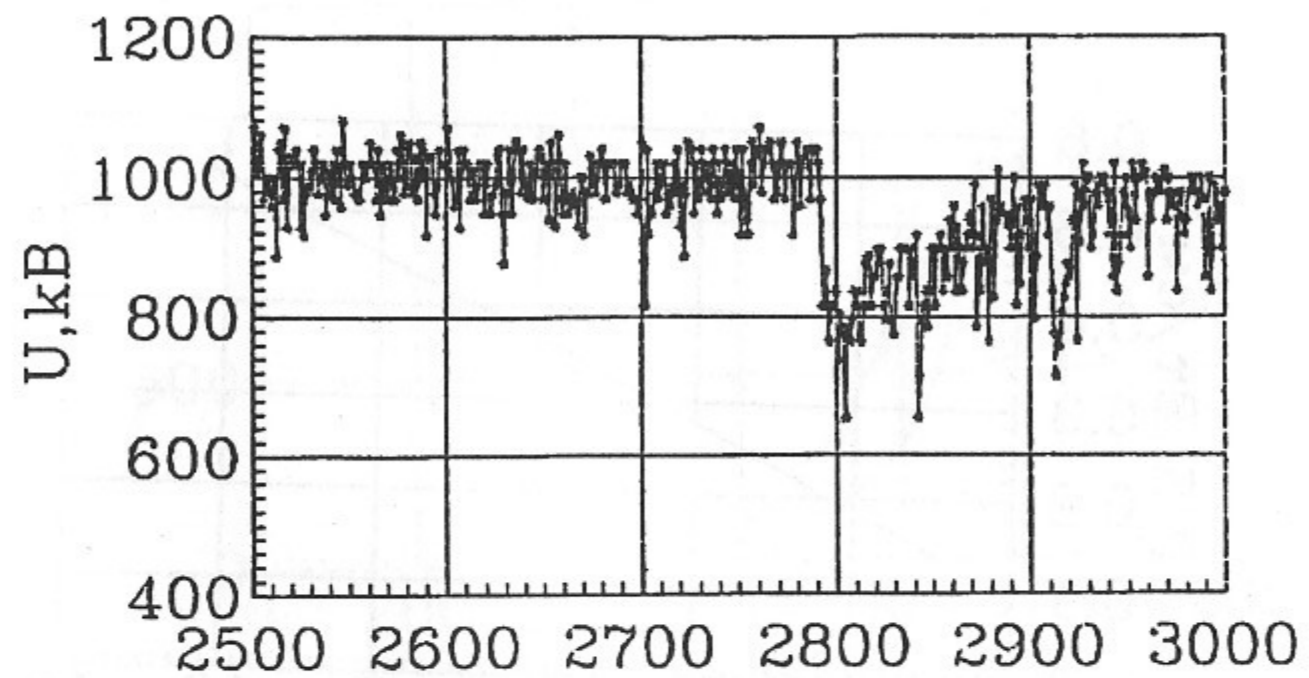


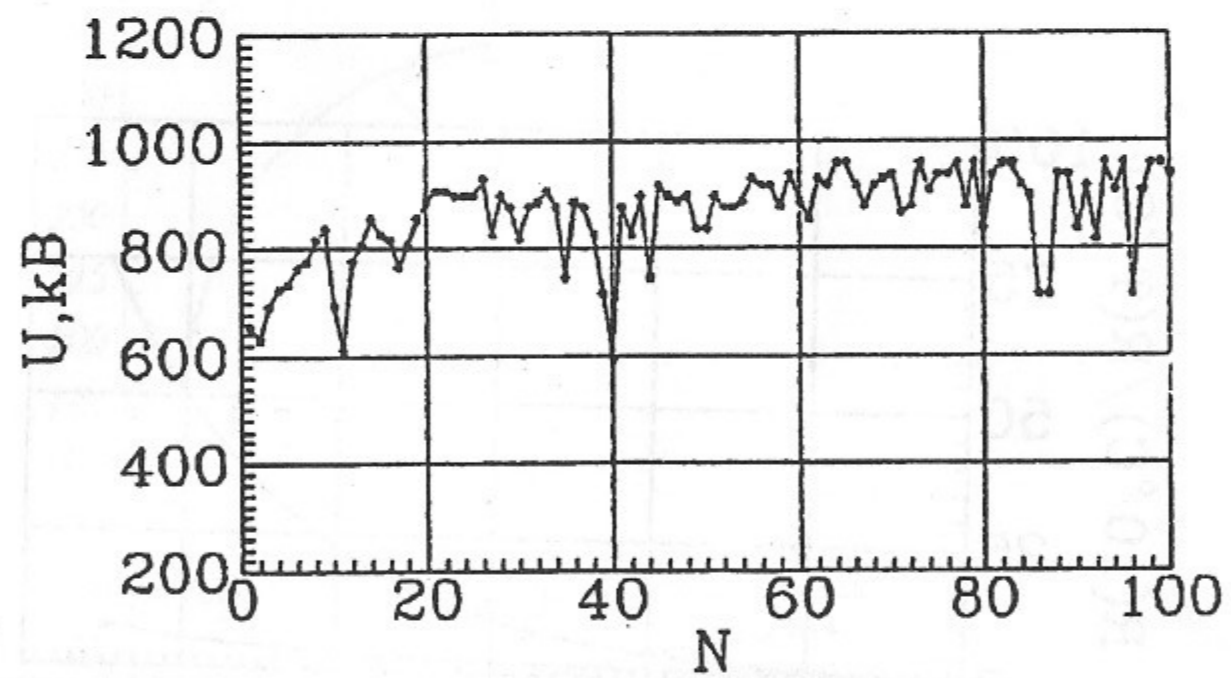
Рис. 20.



*Рис. 21.*



*Рис. 22.*



*Рис. 23.*

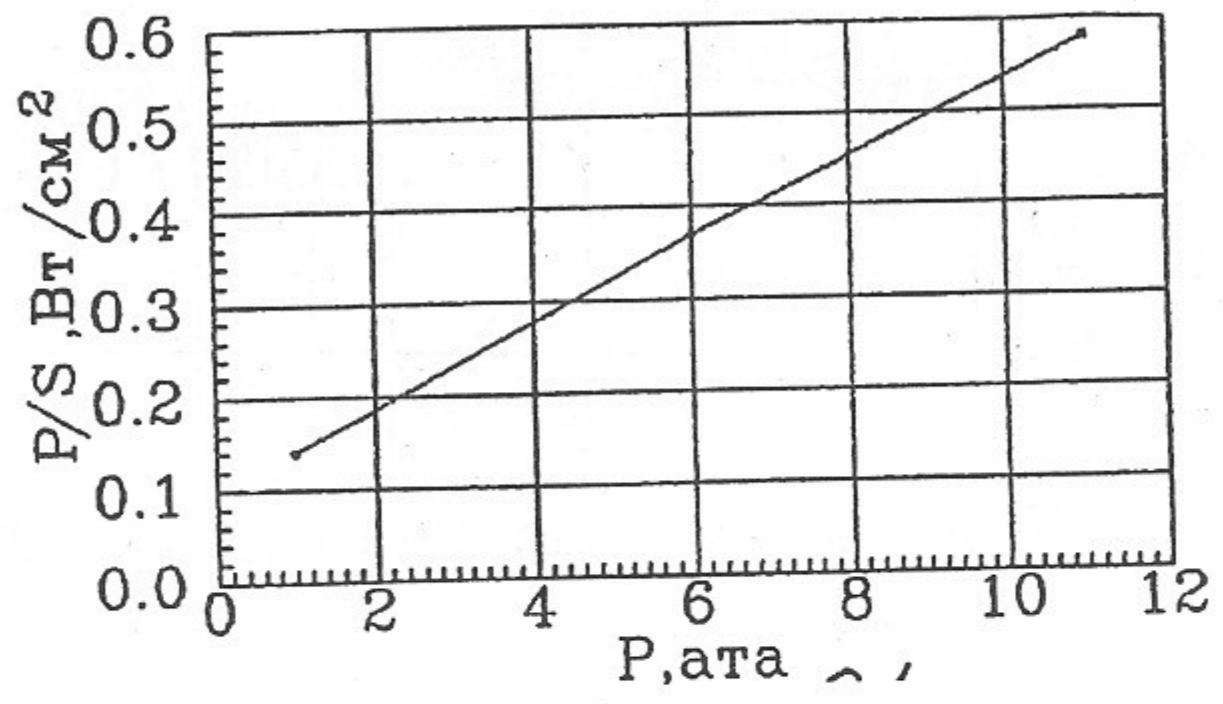


Рис. 24.

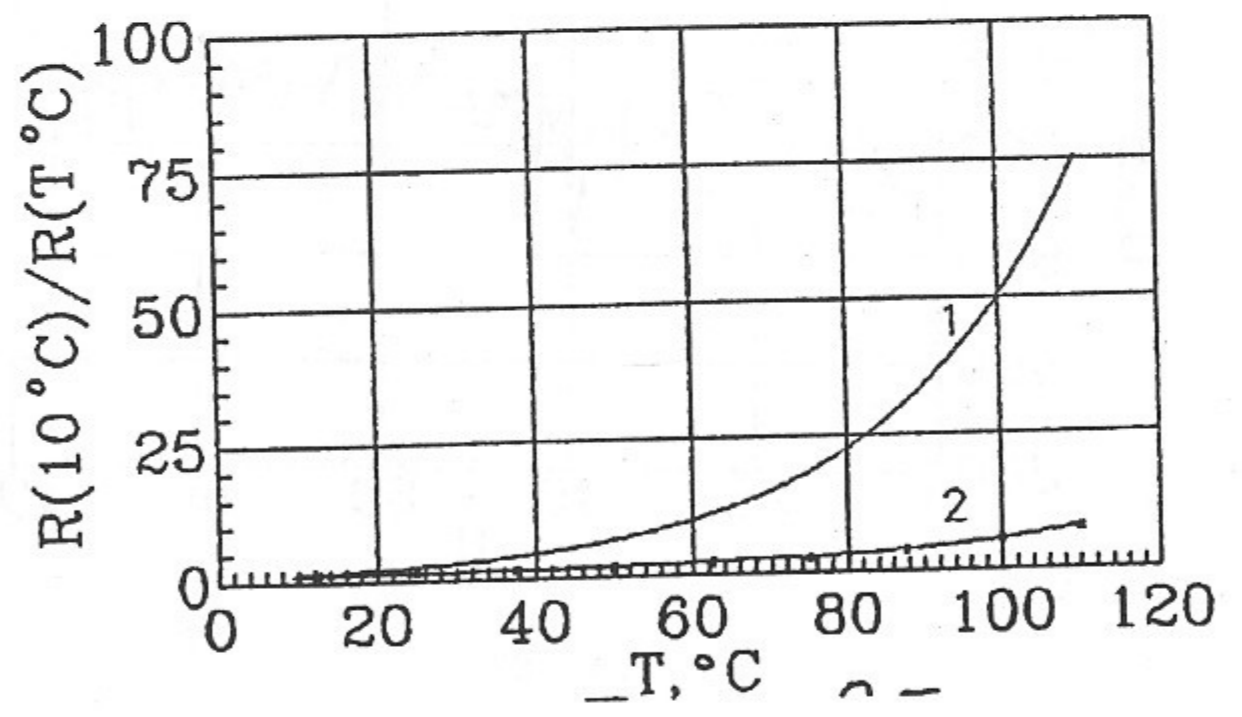


Рис. 25.

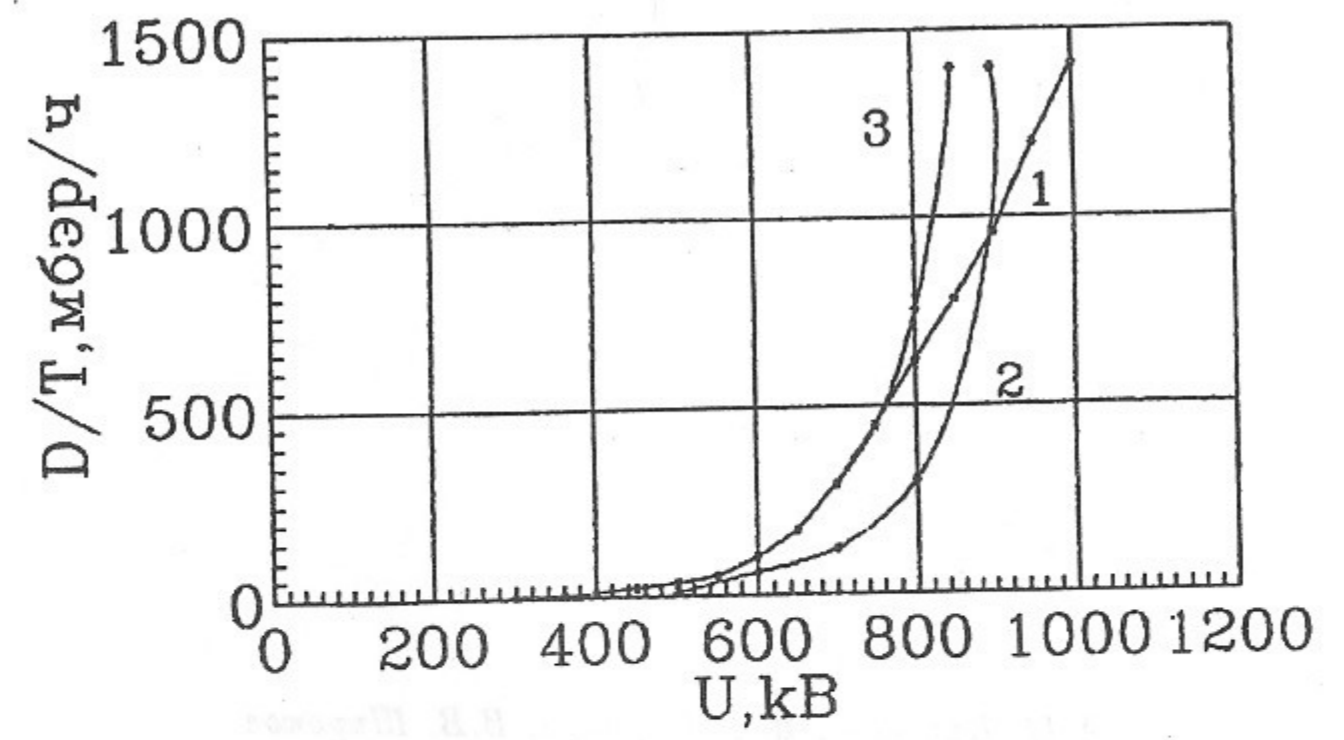


Рис. 26.

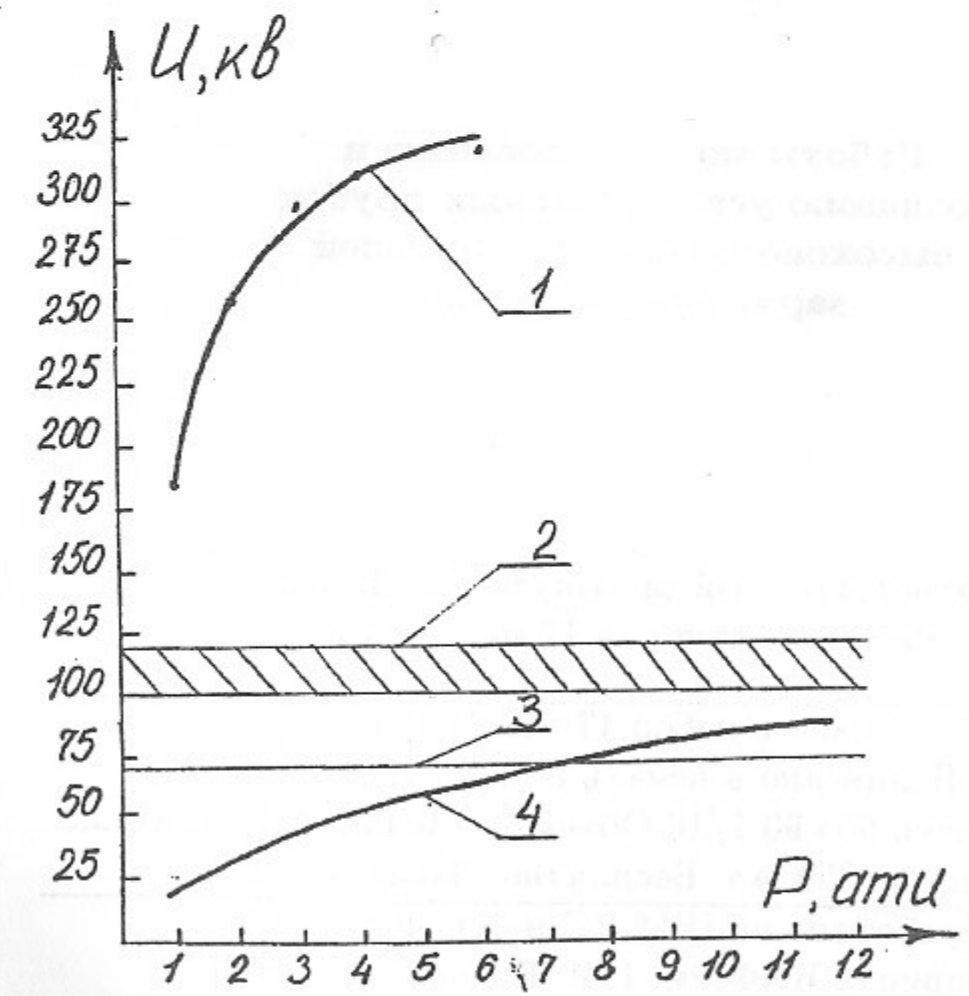


Рис. 27.

*А.М. Крючков, И.Н. Сорокин, В.В. Широков*

**Работы по исследованию и  
созданию ускорительных трубок  
высоковольтных ускорителей  
заряженных частиц**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов  
Работа поступила 17 мая 1994 г.

---

Сдано в набор 17 мая 1994 г.

Подписано в печать 8 июня 1994 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 54

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.