

B.19

18



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

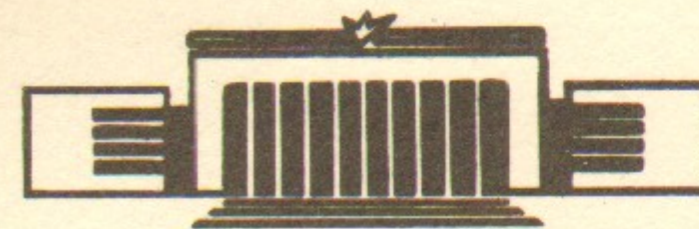
С.Б.Вассерман, И.И.Глазков, В.М.Радченко,  
Н.И.Сапутин, В.В.Широков

УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА  
ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА ЭЛИТ-3А

(конструкция и работа)

ПРЕПРИНТ 83-111

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
физики СО АН СССР  
ИЯФ, ЯФ



НОВОСИБИРСК

УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
ЭЛИТ-3А

(конструкция и работа)

С.Б.Вассерман, И.И.Глазков, В.М.Радченко,  
Н.И.Сапутин, В.В.Широков

АННОТАЦИЯ

Описана конструкция и подробно анализируется работа и опыт эксплуатации ускорительной трубки генератора электронного пучка ЭЛИТ-3А, входящего в позитронный источник накопителя ВЭШ-4.

С 1979 года ЭЛИТ-3А работает со следующими параметрами: энергия ускоренных электронов 1,6 МэВ  $\pm$  1%; амплитуда прямоугольного импульса тока пучка 57 А; длительность импульса тока 11,5 мкс; полная энергия в импульсе 1 кДж; частота следования импульсов 1 Гц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка ускорительной трубки генератора ЭЛИТ-3А [1], созданного для питания гирокон - ВЧ-генератора позитронного источника накопителя ВЭШ-4 [2], явилась одной из наиболее сложных задач при создании ускорителя. По условиям работы позитронного источника комплекса ВЭШ-4 требовался генератор электронного пучка с энергией в импульсе 1 кДж при энергии ускоренных частиц 1,5-1,7 МэВ с током в импульсе 50-70 А при длительности импульса  $\sim$  10 мкс и частоте следования импульсов 1-2 Гц. Достаточно жесткие требования предъявлялись к монохроматичности пучка (разброс энергии не хуже  $\pm$  1%) и его эмиттансу. Общая вакуумная система ЭЛИТ-3А-гирокон-линейный ускоритель не должна была содержать паров органики. Эффективная круглосуточная эксплуатация комплекса ВЭШ-4 требовала обеспечения высокой надежности работы его элементов, в том числе, разумеется, и ускорителя ЭЛИТ-3А, стоящего в начале технологической цепи. К тому же, в связи с принципом устройства ускорителя и его расположением на комплексе устранение даже незначительной неисправности внутри установки требует больших затрат времени.

По сравнению с ранее созданными в Институте ускорителями типа ЭЛИТ [3] для ускорителя ЭЛИТ-3А необходимо было разработать ускорительную трубку с пучком, имеющим  $\sim$  в 3 раза большие импульсную мощность и длительность импульса и на порядок большую энергию в импульсе. О существовании сколь-нибудь близких по параметрам генераторов электронного пучка в других организациях страны и за рубежом информации нет.

Разработка ускорителя ЭЛИТ-3А была начата летом 1975 года. Сжатые сроки проведения экспериментов по позитронной программе и ввода в эксплуатацию накопителя ВЭШ-4 потребовали форсированного проведения работ. С этой целью наладочные работы на генераторе ЭЛИТ-3А и эксперименты по позитронной программе (1976-1977 г.г.) проводились с использованием временной ускорительной трубки на основе органических материалов. Параллельно велась разработка новой трубки. В начале 1978 года трубка была изготовлена, и после кратковременных испытаний с ней ускоритель был установлен на комплексе ВЭШ-4. Доработка конст-

рукции ускорительной трубки происходила в процессе эксплуатации.

В настоящей работе подробно описаны конструкция и расчеты трубки, анализируется опыт эксплуатации. Следует отметить, что анализ процессов, происходящих в ускорительной трубке, связан с серьезными трудностями. Некоторые явления можно трактовать по-разному, и не всегда точки зрения даже авторов настоящей работы совпадают. Тем не менее обсуждение таких вопросов может способствовать лучшему их пониманию, постановке задач по проведению дополнительных экспериментов и т.п.

Подробное изложение вопросов оптики ускорительной трубки ЭЛИТ-3А предполагается сделать в отдельной работе.

В процессе эксплуатации позитронного источника накопителя ВЭШ-4 были установлены следующие параметры ускорителя ЭЛИТ-3А в номинальном режиме: энергия ускоренных электронов 1,6 МэВ, импульсный ток пучка 57 А, длительность прямоугольного импульса тока 11,5 мксек, частота следования импульсов 1 Гц.\* Осциллограммы напряжения на ускорительной трубке и тока пучка в ней приведены на рис.1.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

### 2.1. Общая компоновка и размеры

Как видно на рис.2 и 3 трубка помещена внутри высоковольтной колонны ускорителя и электрически связана с ней [4]. Последняя определяет высоту трубки (1400 мм) и количество секций - 37. К нижним двум секциям прикладывается напряжение от генератора коррекции, обеспечивающее монохроматичность ускоренного пучка электронов. К остальным 35 секциям приложено высокое напряжение от трансформатора Тесла.

Диаметр трубки (средний диаметр изоляторов равен ~ 300 мм) был выбран из совокупности различных требований (условия охлаждения электродов и изоляторов, удобство размещения магнитных линз, малая вероятность попадания рассеянных электронов на поверхность изоляторов, хорошее токопрохождение, достаточная ско-

\* После осуществления модернизации накопителя ВЭШ-4 (ВЭШ-4М) планируется работа "Позитрона" с частотой следования импульсов 2 Гц.

рость вакуумной откачки и др). Принятый размер конечно не является единственно возможным, но следует отметить, что с ростом диаметра трубки в разумных пределах решение многих проблем упрощается.

Трубка состоит из четырех частей-модулей, причем верхний (пушечный) - содержит 7 изоляторов и имеет некоторые отличия в конструкции по сравнению с остальными тремя одинаковыми модулями, имеющими по 10 изоляторов.

Модульная конструкция ускорительных трубок применяется довольно широко; ее достоинства очевидны: облегчение сборки, различных испытаний, транспортировки, ремонта.

В месте стыка электроды двух модулей трубки ЭЛИТ-3А имеют одинаковый потенциал, и в образуемом ими эквипотенциальном пространстве расположены фокусирующие линзы из постоянных магнитов. Отсутствие в этой области электрических полей упрощает конструкцию линзы и позволяет уменьшить либо полностью исключить влияние полей постоянных магнитов на электрическую прочность трубки. Последнее обстоятельство подробно обсуждается ниже при анализе электрической прочности вакуумных зазоров в процессе эксплуатации.

Недостаток модульной конструкции - потеря части длины трубки по изоляторам, занимаемой фланцами модулей в месте их стыковки, - в трубке ЭЛИТ-3А не играет роли, поскольку при заданной длине трубки градиенты электрического поля на поверхности изоляторов получаются небольшими (см.ниже).

Диаметр катода электронной пушки (материал  $LaB_6^*$ ) равен 30 мм. При таком размере катода (мощность, потребляемая пушкой  $\leq 600$  Вт), удалось достаточно просто решить проблему охлаждения верхней части ускорительной трубки. В то же время рабочая плотность тока электронного пучка на поверхности катода  $\sim 10$  А/см<sup>2</sup> по имевшемуся опыту эксплуатации катодов

\* В процессе подготовки препринта к печати появились данные о возможности успешного использования в ускорителе ЭЛИТ-3А металло-сплавных эмиттеров [16], (см.раздел 3).

этого типа и по литературным данным являлась вполне приемлемой для обеспечения длительной работы пушки.

## 2.2. Основные материалы трубки; соединение изоляторов с электродами

В современных ускорительных трубках [5-8] применяются преимущественно 2 типа изоляционных колец: высокоглиноземистая керамика и высокосортное боросиликатное стекло, электроды — из титана или нержавеющей стали.

Изоляторы из высокоглиноземистой керамики соединяются с титановыми электродами либо пайкой [5], либо (по-видимому, в основном) диффузионной сваркой при высокой температуре под давлением с применением алюминиевых прокладок в стыке [7]. В работе [7] также отмечается, что надежных сварных соединений стеклянных изоляторов с электродами получить пока не удается, и в течение ряда лет применяется разработанная фирмой NVES (США) конструкция ускорительной трубки, в которой стеклянные изоляторы соединяются с электродами из нержавеющей стали поливинилацетатным клеем (ПВА). Хотя клей ПВА имеет относительно низкое давление паров, проблема устранения органики в трубках этого типа не решается.

В ИЯФ в период с 1967 по 1974 г.г. велись разработки сварных трубок на основе керамики марки 22 ХС (ВК-94). Ускорительные трубки этого вида не содержат органики и имеют весьма высокие электрические характеристики. При испытании на стендах трубка с высотой 40 см и со средним диаметром изоляторов 90 мм выдержала без пробоев импульсное напряжение 1,5 МВ в течение 2 часов при частоте следования импульсов 50 Гц, а трубка с высотой 12 см — 500 кВ постоянного напряжения в течение часа [9]. Однако, возможности применения трубок этого типа оказались ограниченными. Во-первых, имеющееся оборудование Института не позволяет осуществлять высококачественную сварку изоляторов с электродами при диаметре керамики заметно больше 100 мм и, во-вторых, достаточно сложной оказалась проблема контроля качества керамики, в частности, гарантированного сохранения вакуумплотности материала в процессе эксплуатации.

С учетом реальных возможностей Института и большого опыта в разработке трубок для импульсных ускорителей из органических материалов оборной конструкции (с уплотнениями между изоляторами и электродами из вакуумной резины) в 1974-75 г.г. была разработана и испытана в ускорителе ЭЛИТ-2 экспериментальная трубка оборной конструкции из неорганических материалов [10]. Трубка высотой 800 мм была собрана из керамических изоляторов марки УФ-46 диаметром  $\sim 200$  мм и, хотя уплотнение с электродами по-прежнему осуществлялось вакуумной резиной, благодаря использованию индиевых прокладок с вакуумной стороны стыков — пары резины либо совсем не попадали внутрь трубки либо их количество резко уменьшалось. По сравнению с такой же трубкой из органических материалов вакуум в экспериментальной трубке был на порядок лучше, и в целом испытания прошли успешно.

По этому пути было решено идти и при разработке ускорительной трубки для генератора ЭЛИТ-3А. В качестве материала для изоляторов было выбрано стекло марки ЛК-5. Хотя в СССР стеклянные изоляторы для ускорительных трубок не выпускаются, по данным, имеющимся в НИИЭФА (группа А.В.Сивковой), некоторые типы оптических боросиликатных стекол, в частности, ЛК-5, могут быть вполне подходящими для применения в ускорительных трубках.

В таблице I приведены некоторые свойства стекла ЛК-5 по данным [11] и керамики УФ-46.

Малая величина  $\epsilon$  и прозрачность стекла — важнейшие достоинства этого материала, особенно при работе с импульсными и переменными напряжениями. Стекло существенно легче, чем высокоглиноземистая керамика и УФ-46, поддается механической обработке. Что касается хрупкости стекла и низкой прочности на растяжение и изгиб, то, как показывает практика, проблемы, которые могут возникать в связи с этими недостатками, — преодолимы. Под действием радиации стекло быстро "окрашивается", однако, другие свойства его не меняются, по крайней мере, до доз порядка  $10^9$ – $10^{10}$  рад [12]. Промышленность позволяет получать заготовки изоляторов из стекла марки ЛК-5 любых желаемых размеров.

Высокая электрическая прочность боросиликатных стекол, превышающих 1 МВ/см, в сочетании с легкостью контроля структу-

Таблица 2-1

	Стекло ЛК-5	Керамика УФ-46
Прочность на разрыв, кг/см <sup>2</sup>	250-1000	> 500
Прочность на сжатие, кг/см <sup>2</sup>	5000-8000*	6000-8000
Прочность при статическом изгибе, кг/см <sup>2</sup>	250-1000	2900
Удельная ударная вязкость, $\frac{\text{кг}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$	1,5+2	2,6
Модуль Юнга, кг/см <sup>2</sup>	$0,7 \cdot 10^6$	
Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ )	4	8+9
Объемное сопротивление, Ом·см	$3 \cdot 10^{15}$	$10^{12}-10^{14}$
Температурный коэфф. лин.расшир.	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$5+5,5 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность, кал/см.сек. <sup>°C</sup>	0,0021	0,003
Теплоемкость кал/г. <sup>°C</sup>	0,2	

\* При плохой обработке поверхностей может падать до  $700 \text{ кг/см}^2$

ри материала и низким  $\epsilon$  позволяют значительно снизить вероятность пробоя изоляторов по телу при работе ускорительных трубок, что происходило в ряде случаев с керамическими изоляторами.

Как и в других ускорителях типа ЭЛИТ [10], с вакуумной стороны изолятор имеет ребристую поверхность (рис.4). Торцевые плоскости изолятора полируются, что обеспечивает прозрачность изолятора, улучшает механическую прочность стекла и повышает надежность работы вакуумных уплотнений.

В приведенной на рис.4 геометрии и отсутствии зазора между электродом и изолятором при испытании на стенде тренировочные пробои по поверхности изолятора обычно начинались при напряженности  $\sim 50 \text{ кВ/см}$ , и максимальная пробивная напряженность достигала  $80 \text{ кВ/см}$  и выше.

Важной характеристикой материала изолятора для ускорительной трубки является стойкость изолятора к разрядам по поверхности в вакууме. Для проверки стекла в период разработки трубки был проведен следующий эксперимент. Образец изолятора высотой 36 мм с ребрами той же геометрии, которая была принята и для трубки (рис.4), был оттренирован пробоями в импульсном режиме до максимального напряжения (290 кВ) с ограниченным энерговыделением в импульсе ( $< 1 \text{ Дж}$ ) при частоте следования импульсов 1 Гц. Затем параллельно образцу были подключены конденсаторы с суммарной емкостью 2400 пФ и были продолжены испытания с повышенным энерговыделением в разряде. После ряда пробоев напряжение перекрытия с 290 кВ упало до 120 кВ, однако, механических повреждений на поверхности стекла не появилось, в то время как на электродах в местах, примыкающих к изолятору, появились следы значительной эрозии. После протирки поверхности изолятора спиртом и замены электродов весь цикл испытаний был проведен вторично, и картина повторилась, т.е. каких-либо изменений в поведении изолятора не обнаружилось. Более того, тренировка той же системы (электродов с изолятором) после отсоединения емкости 2400 пФ позволила почти полностью восстановить максимальное напряжение перекрытия (до 270 кВ вместо 290 кВ).

Следует, однако, отметить, что использованная в эксперименте и трубке геометрия ребер была выбрана [10] только из соображений получения максимального напряжения перекрытия. Длительное ( $> 20$  час) испытание описанного образца в режиме  $U_{исп} = 250 \text{ кВ}$  при частоте повторения 50 Гц (без дополнительной емкости) после нескольких серий пробоев (точная величина количества пробоев в то время не фиксировалась) привело к уменьшению электрической прочности и снижению испытательного напряжения до 200 кВ. Как выяснилось, в этой ситуации часть ребер была разрушена. В период эксплуатации трубки в ускорителе ЭЛИТ-3А было несколько аварийных случаев, когда на отдельных изоляторах возникали весьма большие перенапряжения; при этом

также иногда происходило разрушение ребер. Таким образом, при весьма высокой стойкости стекла ЛК-5 к поверхностным разрядам, — в экстремальных условиях принятая геометрия ребер является слабым местом изолятора. По-видимому, при большем шаге между ребрами и (или) меньшем отношении высоты ребер к шагу стойкость поверхности изолятора к мощным разрядам может быть повышена, хотя напряжение перекрытия будет ниже. Полезно также в этом плане полировка ребристой поверхности. Более конкретные соображения могут появиться только после проведения специальных исследований.

Указанный выше уровень пробивной напряженности ( $\geq 80$  кВ/см) является обычным в подобной геометрии; он мало зависит от материалов изоляторов и электродов, а также — высоты изолятора в довольно широких пределах [10], и по нашим данным не выходит, как правило, за пределы  $70+100$  кВ/см. Наличие зазора между изолятором и электродом порядка 0,1 мм, обусловленного индиевой прокладкой, несмотря на экранирование стыка, находящегося внутри угла электрода, приводит к некоторому снижению напряжения перекрытия ( $\sim$  на 10%). В ускорителе ЭЛИТ-3А рабочее напряжение на одном изоляторе составляет 50 кВ (17кВ/см), что существенно ниже даже уровня (типичного) начала тренировочных пробоев. Как отмечалось выше, градиент рабочего напряжения вдоль трубки был задан колонной высоковольтного емкостного накопителя.

Основным материалом электродов трубки взята нержавеющая сталь, широко применявшаяся и в более ранних разработках [3].

Как и в упоминавшейся экспериментальной трубке между стеклянными изоляторами и электродами разжимается индиевая проволока, а за ней (снаружи) помещается "страхующий" уплотнитель из вакуумной резины (рис.4). Хотя индиевые уплотнения в вакуумной технике применяются довольно широко, делать трубку только на индиевых уплотнениях с учетом отмеченных во введении требований к надежности ускорителя было нежелательно по нескольким причинам. Во-первых, опыта работы ускорительных трубок с такими уплотнениями не было, а условия работы уплотнений в трубке достаточно специфичны. Особенно рискованно было бы полагаться на надежность индиевых уплотнений в пучечном модуле, в котором температура электродов в районе уплотнений достигает  $90-100^\circ\text{C}$ ;

при изменениях температуры даже небольшие деформации электродов могут оказаться достаточными, чтобы в каких-то местах стыка ввиду малой упругости индия появились микрощели. Кроме того, при каждом изменении температуры происходит взаимное перемещение изолятора и электрода (по сравнению со стеклом ЛК-5 даже ковар имеет в 2 раза больший коэффициент линейного расширения) и соответственно каждый раз происходит "размазывание" (сдвиг) индия с возможностью появления отмеченных неприятностей со временем. Во-вторых, для надежной (в смысле предотвращения механических повреждений) работы стеклянных изоляторов желательно иметь в них минимальные механические напряжения. При использовании резиновых уплотнителей предварительная стяжка трубки должна обеспечить только их сжатие, что требует значительно меньших усилий, чем сжатие индия. В то же время в рабочем состоянии внешнее давление азота обеспечивает необходимое для обеспечения вакуумплотности ( $\geq 50+60$  кг/см<sup>2</sup> [13]) равномерное давление на индиевые прокладки.

Недостатком использования стяжек с малым усилием является то, что при отсутствии внешнего давления газа индий перестает уплотняться, и остаточный газ в трубке содержит пары резины. Это необходимо учитывать при разработке вакуумной системы и эксплуатации трубки (см.ниже).

Следует также отметить, что появившийся опыт эксплуатации ускорительных трубок с чисто индиевыми уплотнениями в ускорителях ЭЛИТ-Л [14], правда, с масляным охлаждением электродов, говорит о принципиальной возможности такого решения по крайней мере для "холодных" трубок.

### 2.3. Конструкция модулей трубки

По условиям работы в трубке выделенным является верхний модуль (рис.5а), и поэтому в основном речь будет идти о нем.

#### 2.3.1. Тепловой режим

В верхнем модуле установлена электронная пушка, потребляющая мощность до 600 Вт и излучающая  $\sim 400$  Вт на электроды трубки. Отвод этой мощности с обеспечением приемлемых темпера-

тур в месте расположения уплотнений трубки и - допустимых механических напряжений в изоляторах - основная проблема при конструировании верхнего модуля.

Наибольшие успехи в разработке ускорительных трубок достигнуты для применений в электростатических ускорителях и в электронных ускорителях с непрерывным пучком и током не превышающим нескольких сот мА. Серьезных проблем с охлаждением трубок в этих случаях не возникает.

В ускорителях ЭЛИТ (в том числе и в ЭЛИТ-3А в период работы с трубкой из оргстекла) использовалось и используется масляное охлаждение электродов с подводом масла извне ускорителя по изоляционным трубкам. Охлаждение ускорительной трубки окружающим изолирующим газом (без использования масляного охлаждения) в отдельных случаях также применялось, но - при мощности пушки не более 250+300 Вт. Хотя системы, обеспечивающие циркуляцию масла, и элементы конструкции масляного охлаждения внутри ускорителя работают достаточно надежно, вероятность отказов и аварий все-таки существует и поэтому использование этой системы в ЭЛИТ-3А было нежелательно.

При указанной мощности электронной пушки в ЭЛИТ-3А необходимую эффективность теплоотвода окружающим газом для верхнего модуля удалось обеспечить благодаря двум мерам: а) достаточно хорошим распределением тепловых потоков между большей частью электродов и изоляторов и б) наличием радиаторов на электродах.

Для лучшего распределения теплового излучения катода по электродам в последних вокруг центрального отверстия сделано много малых отверстий с диаметрами 10+15 мм. Важную роль в выравнивании температур вдоль изоляторов и электродов верхнего модуля играет также излучение наиболее нагретых частей верхних электродов. Следующая оценка поясняет это. Допустим, через верхний электрод (2, рис.5а) за счет его теплопроводности выводится наружу трубки  $\frac{1}{4}$  излучения пушки внутрь трубки, т.е. ~ 100 Вт. При толщине электрода 2 мм, высоте и диаметре эквивалентного цилиндра соответственно 10 и 15 см и коэффициенте теплопроводности нержавеющей стали  $\lambda = 3,6 \cdot 10^{-2}$  кал/см.сек.град. перепад температуры вдоль конической части электрода (эквивалентного цилиндра) составил бы

$$\Delta t = \frac{Q \cdot l}{\lambda \cdot S} = \frac{0,24 \cdot 100 \cdot 10}{3,6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2 \cdot \pi \cdot 15} = 700^\circ.$$

При площади центральной части этого электрода 100 см<sup>2</sup> (на две стороны 200 см<sup>2</sup>), температуре 700°C и интегральном коэффициенте черноты электрода  $k \sim 0,5$  мощность излучения центральной части электрода должна была бы составлять

$$P = k \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 973^4 \cdot 200 \approx 500 \text{ Вт.}$$

Полученная величина значительно превышает возможную, и, следовательно, фактическая температура электрода ниже. Реальные тепловые потоки, отводимые верхним и другими электродами, в свою очередь, заметно меньше принятой выше величины 100 Вт; излучение наиболее горячих частей электродов обеспечивает передачу части излучаемой катодом мощности на изоляторы и нижерасположенные электроды. Следует отметить, что несмотря на значительно меньшую теплопроводность стекла по сравнению с нержавеющей сталью, благодаря большой площади для теплового потока  $\sim \frac{1}{3}$  общей мощности отводится через изоляторы.

На рис.6 приводится установившаяся температура электродов верхнего модуля при испытании на стенде внутри бака, заполненного элегазом при давлении 9 атм. Мощность, потребляемая пушкой, составляла 500 Вт. Измерения производились снаружи трубки в местах, примыкающих к изоляторам. Температура элегаза равнялась  $\sim 25^\circ\text{C}$ . Как видно из рисунка, максимальная температура электродов соответствует эквивалентному равномерному распределению теплового потока примерно на  $\frac{2}{3}$  высоты модуля. Более низкая температура электрода I объясняется отсутствием прямого излучения катода на него.

Анализ измерений дает величину мощности, отводимой электродом 2,  $\sim 50$  Вт. При этом на участке электрода, расположенном между изоляторами, перепад температуры составляет  $\sim 15^\circ\text{C}$ , и температура в месте расположения индиевого уплотнения получается  $\sim 100^\circ\text{C}$ . По данным [13] индиевое уплотнение допускает прогрев при температуре до  $140^\circ\text{C}$  ( $t_{\text{плавл.}} = 156,4^\circ\text{C}$ ).

Охлаждение элегаза в ускорителе ЭЛИТ-3А осуществляется первичной обмоткой трансформатора Тесла (рис.2), имеющей водя-

ное охлаждение, и стенками бака. Движение элегаза происходит за счет естественной конвекции.

### 2.3.2. Механические напряжения

Наличие сжатого газа в ускорителе вызывает напряжения сжатия в изоляторах трубки. Нагрев электродов и изоляторов верхнего модуля трубки из-за различных коэффициентов линейного расширения ( $16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) приводит в общем случае к смещению их относительно друг друга и к изменению механических напряжений в изоляторах.

Основные данные для расчета:

- разность температур в горячем и холодном состоянии  $\Delta t \approx 80^\circ\text{C};$
- давление элегаза в баке  $p = 11 \text{ атм};$
- площадь трубки, воспринимающая давление газа и создающая сжимающее усилие вдоль оси трубки,  $S = 800 \text{ см}^2;$
- ширина, до которой по измерениям расплющивается проволока из индия  $\phi 0,9 \text{ мм}, a \approx 8 \text{ мм};$
- длина индиевой проволоки  $l = 93 \text{ см}.$

Для механического расчета необходимо также знать предел текучести индия на сдвиг. Этой величины в справочниках обнаружить не удалось. Нами были проведены измерения, давшие величину  $\sigma_{сдв}$  при комнатной температуре —  $30+31 \text{ кг/см}^2$ , при  $t = 60^\circ\text{C}$  —  $20+25 \text{ кг/см}^2$ . Для простоты будем считать, что усилие, создаваемое изоляционными стержнями, стягивающими модуль, компенсируется реакцией сжатой резины и на сжатие индия не влияет.

Среднее давление на индиевые прокладки от сжатия трубки газом

$$p_{ср} = \frac{p \cdot S}{a \cdot l} = \frac{11 \cdot 800}{0,8 \cdot 93} = 120 \text{ кг/см}^2.$$

Если коэффициент трения хотя бы одной из пар: индий-стекло или индий-нержавеющая сталь достаточно мал, и сила трения меньше предела текучести индия на сдвиг, то при нагревании происходит

поверхностное скольжение с минимальным влиянием на механические напряжения в стекле. Взаимное радиальное перемещение электрода и изолятора при этом может составлять

$$\frac{l}{2\pi} (\lambda_{нерж.} - \lambda_{стекла}) \cdot \Delta t = \frac{93}{2 \cdot \pi} (16 \cdot 10^{-6} - 3,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 80 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}.$$

Данных по величинам упомянутых коэффициентов трения нет, однако, из опыта известно, что с чистыми поверхностями индий сцепляется достаточно прочно, и поэтому необходимо рассматривать более тяжелый случай, когда скольжения в стыках не происходит. Так как полученная выше величина взаимного радиального перемещения изолятора и электрода (0,15 мм) ~ в 2 раза превышает толщину индиевого уплотнения (0,08 мм), с самого начала нагрева трубки в индии будет происходить сдвиг слоев. На изолятор сверху и снизу будут действовать силы, вызывающие напряжения растяжения

$$\sigma_{раст} = \frac{2 \cdot \sigma_{сдв} \cdot a \cdot l / \pi}{2 \cdot h_{из} \cdot b_{из}} = \frac{2 \cdot 31 \cdot 0,8 \cdot 93 / \pi}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 122 \text{ кг/см}^2,$$

где  $h_{из}$  и  $b_{из}$  — соответственно высота и ширина изолятора. Давление элегаза на внешнюю цилиндрическую поверхность изоляторов вызывает в стекле напряжения сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{p \cdot D_{из}}{2 \cdot b_{из}} = \frac{11 \cdot 32}{2 \cdot 2} = 88 \text{ кг/см}^2.$$

Суммарные напряжения от растягивающих и сжимающих усилий в стекле при нагревании составляют  $122 - 88 = 34 \text{ кг/см}^2$ . При охлаждении модуля те и другие усилия складываются, и суммарные напряжения сжатия составляют  $210 \text{ кг/см}^2$ . В стационарном тепловом режиме работы напряжения, обусловленные сдвигом индия, практически отсутствуют. Как видно из приведенных расчетов, в любом режиме возникающие в стекле механические напряжения совершенно безопасны для изоляторов и не могут объяснить имевших место в первый год работы ускорителя поломок стекла. Последние были связаны с напряжениями изгиба в изоляторах от неплоскостности



электродов и других причин, существовавших в то время. В основном аварии происходили в верхнем модуле, в котором в той или иной мере при нагреве электродов возникают поводки материала, усугубляющие возможность появления критических напряжений. Вид изломов также подтверждал предположение о имевших место напряжениях изгиба [15].

### 2.3.3. Выбор вакуумных зазоров

Выбор зазоров между электродами в верхнем модуле (рис.5а) определяется требованиями оптики с обеспечением необходимой электрической прочности. В номинальном режиме (при энергии электронов 1,6 МэВ) в верхнем зазоре средняя напряженность электрического поля составляет  $\sim 50$  кВ/см, в следующих пяти - около 43 кВ/см. В остальных модулях (рис.5б) где оптика допускает меньшие напряженности, зазоры между электродами увеличены, и напряженность электрического поля составляет  $\sim 30$  кВ/см.

На рис.7 приведены кривые зависимости электрической прочности вакуумных зазоров в равномерном электрическом поле между образцами электродов из нержавеющей стали при различной длительности импульсов. Каждая точка на графике соответствует пробивному напряжению, величина которого соответствует уровню, достигнуемому в процессе тренировки, когда он стабилизируется (последние 150+200 пробоев происходят при практически одинаковых напряжениях). Эксперименты проводились на лабораторном стенде. Вакуумный объем содержал органические материалы (оргстекло, вакуумная резина); откачка осуществлялась магниторазрядным насосом с азотной ловушкой.

Приведенные выше средние напряженности электрического поля в зазорах трубки ЭЛИТ-3А (даже с учетом неоднородностей поля) существенно ниже максимальных пробивных напряженностей по рис.7. Однако это обстоятельство не устраняет полностью вероятность пробоев в трубке в процессе эксплуатации, что зависит от различных факторов и подробно обсуждается ниже. Здесь отметим только, что энергевыделение при пробое зазора ограничивается резисторами, соединяющими электроды с полками высоковольтной колонны. Эквивалентное сопротивление  $\sim 300$  Ом. Для снижения нежелательных последствий выделения значительной энергии при

пробое зазора в аварийных случаях центральная часть всех электродов изготовлена из молибдена - одного из наиболее стойких материалов к электрическим разрядам.

Сборка модулей трубки производится в чистом помещении без использования специальных средств вакуумной гигиены. Электроды и изоляторы перед сборкой промываются дистиллированной водой с ультразвуком и протираются спиртом.

После сборки модуля на вакуумном посту и откачки изоляционные стяжки вначале подтягиваются, а затем полностью ослабляются, и уплотнение осуществляется вакуумной резиной "на присос". Индиевые уплотнения в таком состоянии не уплотняют, и поэтому проверка вакуумности гарантирует отсутствие течей в резиновых уплотнениях. Надежность индиевых уплотнений обеспечивается тщательностью сборки.

### 2.4. Защитные разрядники

Обычно снаружи трубки на каждой секции устанавливается несколько равномерно расположенных по окружности разрядников для эффективной защиты секции по всему периметру либо делается сплошной кольцевой разрядный промежуток.

В трубке ЭЛИТ-3А принят вариант защиты отдельными разрядниками, расположенными на секциях через  $120^\circ$ .

Конструкция разрядников показана на рис.8 и специальных пояснений не требует. Зазоры - по 1,8 мм. В качестве материала подвижных и неподвижных электродов взят молибден. Неподвижные электроды можно при необходимости во время профилактических работ поворачивать вокруг своей оси на любой угол, а подвижные - поворачивать на  $180^\circ$ .

Работа разрядников рассматривается в разделе 3.

### 2.5. Магнитные линзы

Между модулями ускорительной трубки установлены линзы из постоянных магнитов и непосредственно под трубкой - импульсная электромагнитная линза (рис.2). Все линзы создают аксиально-симметричные поля.

Конструкция линзы из постоянных магнитов показана на рис.9. Два блока магнитов, состоящих из пластин (в форме сегментов) материала 2Б4 (по 3 слоя), имеют встречное направление полей.

Азимутальная однородность поля обеспечивается размещением в каждом слое одинаково намагниченных пластин и установкой между слоями магнитов дисков из магнитомягкого материала (ст 10 или армо).

Получение необходимого фокусного расстояния (полей) каждой линзы достигается заменой одного или нескольких слоев пластин постоянных магнитов на диски из немагнитного или магнитомягкого материала, а также установкой цилиндрических экранов из магнитомягких материалов (см.рис.9), либо комбинацией перечисленных мер.

## 2.6. Вакуумная система

Для получения вакуума в ускорительной трубке используется электроразрядный магнитный насос НОРД-250 со сферической азотной ловушкой. Предварительная откачка трубки осуществляется от форвакуумной магистрали.

Азотная ловушка необходима при откачке трубки в периоды отсутствия давления сжатого газа в баке, когда усилие на индиевые уплотнения в трубке значительно уменьшается, и в вакуумный объем трубки попадают пары вакуумной резины. Ловушка полезна также при первой откачке трубки после вскрытия, когда остаточный газ может содержать пары воды.

Вакуумные системы с использованием электроразрядных магнитных насосов благодаря своей простоте и надежности широко используются в установках Института и хорошо себя зарекомендовали.

Следует, однако, отметить два недостатка вакуумных систем этого типа, обусловленных принципом работы электроразрядного насоса. Первый — связан с частичным попаданием ионов и нейтральных продуктов разряда в откачиваемый объем, которые могут вызывать различные нежелательные эффекты: снижение эмиссионной способности катодов, химические процессы на поверхности горячих электродов и др. Так, на одном из ускорителей типа ЭЛИТ наблю-

дались случаи отравления катодов из  $LaB_6$ , когда происходило размораживание азотной ловушки при включенном насосе, (даже у холодной пушки). Если размораживание ловушки происходило при выключенном насосе, то этого эффекта не было. Вторым недостатком связан с тем, что удаляемые из откачиваемого объема газы и продукты их разложения остаются в насосе. При различных неполадках в работе насоса и авариях они могут загрязнять откачиваемый объем. Эти недостатки должны приниматься во внимание прежде всего в установках, содержащих органику, но могут проявляться, по-видимому, и в других случаях. Использование некоторыми фирмами, в частности, для высоковольтных электронных ускорителей (например, динамитронов) более сложных вакуумных систем на основе турбомолекулярных насосов может объясняться и тем, что отмеченные недостатки электроразрядных насосов у турбомолекулярных — отсутствуют.

## 3. РАБОТА УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 3.1. Подготовка трубки к работе

В процессе подготовки ускорительной трубки к работе необходимо получить рабочий вакуум при включенной электронной пушке и прогретой трубке и провести ее тренировку для обеспечения необходимой электрической прочности. Обе операции проводятся при рабочем давлении газа в баке.

#### 3.1.1. Получение вакуума

Величина остаточного давления в трубке влияет на различные процессы в ней, рассматриваемые в этом разделе, и на работу эмиттера электронной пушки. При использовании эмиттера из  $LaB_6$  величина рабочего давления в трубке, при которой может начинаться работа, принята равной  $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст., для металлосплавных эмиттеров [16] —  $\leq 5 \cdot 10^{-7}$  мм рт.ст. Последняя величина будет уточняться, поскольку положительный опыт работы эмиттеров этого типа в ЭЛИТ-3А появился только в 1983 году.

Процесс обезгаживания пушки и трубки проводится после получения в холодной трубке вакуума не хуже  $(1+2) \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. при медленном увеличении мощности накала с тем, чтобы не допускать

слишком большого остаточного давления в трубке, при котором могут происходить заметное окисление подогревателя и других деталей пушки и электродов трубки, а также - отравление эмиттера. Для описываемой трубки в качестве предельно допустимого остаточного давления в процессе откачивания принята величина  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. (измерение вакуума производится с помощью лампы ЛМ-2, расположенной вблизи низа трубки). Первое после сборки (ремонта) трубки обезгаживание с получением приведенных выше величин рабочего вакуума требует по времени нескольких смен. В дальнейшем, например, после замены пушки - этот процесс может проходить как за несколько часов, так и за более длительное время, вплоть до нескольких десятков часов. Причины таких колебаний времени обезгаживания до конца не ясны. Очевидно только, что следует стремиться иметь минимум влаги в выпускаемом в трубку газе (обычно, азот), минимальное время нахождения трубки под атмосферой и не допускать значительной адсорбции газов на деталях электронной пушки в период между ее испытанием в вакуумной камере и постановкой в трубку. Весь процесс получения рабочего вакуума ведется с использованием вымораживающей азотной ловушки при перекрытом шибере, отсекающем вакуумный объем гироконя и линейного ускорителя.

### 3.1.2. Тренировка трубки

После сборки или ремонта ускорительной трубки необходимый уровень электрической прочности обеспечивается тренировкой при параллельном соединении секций (высоковольтная колонна при этом не ставится). Защитные разрядники (рис.9) находятся в раздвинутом состоянии, либо их неподвижные электроды снимаются. При этом достаточно для тренировки иметь 3-4 атм элегаза или азот при номинальном давлении. Возможные схемы соединений для параллельной тренировки показаны на рис.10. Сопротивления

$R = 1$  кОм предотвращают выделение энергии при пробое в секции из источников напряжения и других секций. Как отмечалось в 2.2, изоляторы в трубке ЭЛИТ-3А работают при относительно невысоких градиентах напряжения по поверхности в вакууме, поэтому основная задача состоит в тренировке вакуумных зазоров. Верхний зазор работает при напряжении  $\sim$  в 1,7 раза больше, чем на остальных зазорах, поэтому не может тренироваться параллель-

но с остальными. Тем не менее, как это видно из рис.10а, возможно проводить тренировку всей трубки за один цикл сборки-разборки ускорителя. В этом же цикле целесообразно вначале проводить и описанное выше обезгаживание пушки и трубки. Может использоваться и упрощенная схема (рис.10б) параллельной тренировки, когда параллельно верхнему зазору подсоединяются остальные (кроме нижнего), объединенные в пары.

Тренировка трубки должна производиться при выключенном накале пушки во избежание вытягивания значительного тока с эмиттера пушки напряжением на первом промежутке (в этом режиме пушка не заперта). Кроме того, частые пробои при тренировке неизбежно ухудшают вакуум, что нежелательно в горячей трубке (особенно для пушки).

При первом подъеме напряжения на некотором уровне наблюдаются небольшие кратковременные повышения остаточного давления, связанные, по-видимому, с микрозарядами [17, стр.86 и 179 \*]. Со временем эти толчки перестают быть заметными. Таким способом до некоторого напряжения тренировка идет без пробоев. Первые пробои обычно появляются при напряжении 30-40 кВ. За время порядка 1-2 часа пробивные напряжения становятся  $\geq 70$  кВ (на одну секцию трубки), и тренировка заканчивается.

В процессе работы ускорителя время от времени также может возникать необходимость тренировки трубки (из-за появления частых пробоев, после смены пушки и в др. случаях). Как правило, при этом требуется малое число тренировочных пробоев, и тренировка проводится в рабочей схеме ускорителя. Методика тренировки в зависимости от конкретной ситуации может быть разной: с включенной или выключенной пушкой. В первом случае также могут быть варианты: с рабочим током - путем некоторого снижения и последующего постепенного подъема напряжения - и с запертой пушкой.

### 3.2. Процессы в ускорительной трубке при нормальной работе

Во время нормальной работы ускорителя в трубке происходят либо могут, в принципе, происходить процессы, вызывающие раз-

\* В ряде случаев ссылки делаются на обзорные работы, которые содержат ссылки на первоисточники.

личные нежелательные эффекты: электрические пробой вакуумной изоляции (отдельных зазоров, канала по полному напряжению, поверхности изоляции в вакууме), электрический пробой изоляторов по телу, механические повреждения эмиттера и его отравления и др. Вторичные эффекты, происходящие при нарушении нормальной работы трубки (например, как следствие пробоя одного из вакуумных зазоров), рассматриваются в разделе 3.3.

### 3.2.1. Обсуждение некоторых эффектов

Опыт эксплуатации ускорительной трубки ЭЛИТ-3А показывает, что в ней в процессе работы время от времени происходят пробой вакуумных зазоров между соседними электродами. Других эффектов в нормальных условиях в этой трубке, по-видимому, не возникает.

Следов разрядов по поверхности изоляторов в вакууме (кроме упоминавшихся аварийных случаев) благодаря относительно невысоким градиентам за все время эксплуатации трубки практически не наблюдалось. Достаточного для возникновения разряда по поверхности изолятора накопления заряда от рассеянных электронов видимо тоже нет. В других ускорителях ЭЛИТ при частоте следования импульсов 100 Гц и среднем токе пучка электронов примерно на порядок больше, чем в ЭЛИТ-3А, периодически возникали одиночные пробой, которые можно было связывать с этим эффектом.

Следов разрядов в теле изоляторов (и при наличии пузырьков в стекле) также не наблюдалось. Единственным замечаемым видом старения стекла является его потемнение от излучения.

В высоковольтных ускорителях электронов и ионов с постоянным ускоряющим напряжением на трубке при напряжениях порядка 1 МВ и выше без принятия специальных мер (достаточно малый диаметр внутреннего отверстия электродов, наклонные электрические поля вдоль канала, поперечные магнитные поля и др. — см. например, [18]) по каналу и его границе (внутренние кромки электродов) развиваются процессы, приводящие к электрическому пробоя в трубке и препятствующие линейному росту рабочего напряжения трубки с увеличением ее длины. В ускорителях типа ЭЛИТ, разработанных до настоящего времени в ИЯФ, не фиксировалось случаев пробоев в трубках, которые можно было бы считать следствием явлений, происходящих в нормальных условиях (т.е. без какой-то

затравки) в канале. В частности, это относится к трубке ускорителя ЭЛИТ-1Б [19], которая испытывалась до напряжения 1,5 МВ со средним градиентом по каналу  $> 50$  кВ/см (диаметр канала 5 см). Скорее всего в наших трубках, работающих при импульсных напряжениях микросекундного диапазона, электрический пробой в канале развиться не успевает. В этом смысле (который, как правило, для ускорительных трубок считается основным [18]) эффект полного напряжения в разработанных трубках, по-видимому, отсутствует. Это не означает, что в указанных трубках рабочее напряжения обязательно растет пропорционально длине трубки, поскольку есть ряд причин, которые препятствуют либо могут препятствовать этому. К этим причинам можно отнести: неравномерность распределения напряжения по длине трубки; большая вероятность в длинных трубках наличия слабых мест и возрастание частоты пробоев с ростом числа секций, даже если выделенных слабых мест нет; обычно большая длительность импульса напряжения в ускорителях на большее напряжение; усложнение задачи предотвращения выделения большой энергии внутри трубки при пробоях в вакууме для ускорителей на большее напряжение и другие. Хотя последняя из перечисленных причин также связана с полным напряжением, это явление по принятому в литературе определению не входит в понятие "эффекта полного напряжения" для ускорительных трубок.

Следует отметить, что среди многочисленных работ, посвященных эффекту полного напряжения в ускорительных трубках и мерам по его устранению, по-видимому, пока отсутствуют работы, где бы изучалось развитие пробоя в канале во времени в зависимости от его геометрии, материала и шага электродов и градиента напряжения вдоль канала. Для разработки импульсных ускорителей эти данные были бы очень полезны.

Ускоряемые электроны в описываемой трубке на ее электрическую прочность не влияют. Хотя осаждение пучка на электроды составляет сравнительно заметную величину ( $0,5+1\%$ ), абсолютное значение среднего тока осаждения весьма мало ( $\sim 5$  мкА), и ни тепловых ни других ощутимых эффектов на электродах и изоляторах не возникает.

Можно отметить, что описываемый ниже длительный режим работы ускорителя с минимальной частотой пробоев в трубке проис-

ходил при повышенном уровне токоосаждения ( $\sim 2\%$ ). Следует также отметить, что в трубках с большим средним током проблема влияния ускоряемого пучка на электрическую прочность трубки весьма серьезна. Например, в ускорителе ЭЛИТ-2 [3] рост величины токоосаждения до  $1\%$  ( $\sim 70$  мкА) приводил к резкому увеличению частоты пробоев в трубке. Разумеется, абсолютная величина токоосаждения не является единственным параметром, определяющим влияние пучка на электрическую прочность ускорительной трубки. Эта проблема требует специального изучения, и такие работы в Институте ведутся.

В трубке ЭЛИТ-3А, как обычно, существует ионная бомбардировка эмиттера и сетки электронной пушки. Не приводя количественных оценок, можно тем не менее утверждать, что в описываемой трубке заметных механических повреждений в процессе нормальной работы от ионной бомбардировки не возникает. Даже в трубках с большей на несколько порядков плотностью выделяемой на пушке энергии ионов в единицу времени (средний ток электронов — на порядок больше, остаточное давление — на 1-2 порядка больше, сечение пучка ионов — много меньше) повреждение поверхности эмиттеров за несколько сот часов работы пушки не так уж велико. Поэтому в ЭЛИТ-3А наблюдаемые повреждения поверхности эмиттеров не связаны с постоянной ионной бомбардировкой, а обусловлены эффектами, обсуждаемыми ниже. Хорошим подтверждением отсутствия сколь-нибудь заметных следов от ионной бомбардировки в трубке ЭЛИТ-3А был вид металло-сплавного эмиттера, работавшего в трубке ЭЛИТ-3А в течение 2300 час в I-ой половине 1983 года, когда других воздействий на пушку, обсуждаемых ниже, было мало.

### 3.2.2. Пробой зазоров между электродами. Обсуждение возможных причин и механизмов; статистика

В отличие от поверхности изоляторов на электродах при разборке трубки видны следы пробоев. Практически все они сосредоточены в зазорах верхнего модуля. Нижние 3 модуля, в которых градиент напряжения в вакуумных зазорах  $\sim$  в 1,5 раза ниже и электроды — холодные, имеют значительный запас по электрической прочности. Если бы не было ограничений со стороны подключенной параллельно секциям трубки колонны емкостного накопите-

ля, напряжение на нижних модулях при использовании соответствующего делителя можно было бы заметно увеличить.

Рабочее напряжение в зазорах существенно меньше не только пробивных напряжений на образцах (рис.7), но и быстро достигаемого уровня при параллельной тренировке трубки. Возникающие тем не менее с той или иной частотой пробой зазоров в эксплуатации обусловлены процессами, происходящими при работе в трубке. Достаточно уверенно можно назвать два таких процесса:

а) сорбция газов и паров, особенно органики, на поверхности электродов;

б) напыление на электроды с эмиттера электронной пушки.

Отрицательное влияние органики на электрическую прочность вакуумных промежутков при постоянном напряжении отмечается во многих работах. Убедительные данные об аналогичном влиянии органики в импульсном режиме приведено в работе [20]. Опыт эксплуатации трубки ускорителя ЭЛИТ-3А также наглядно иллюстрирует этот факт.

В течение первых полутора лет работы ускорителя использовалась, как отмечалось во введении, органическая трубка. Рабочее напряжение составляло  $1,3+1,35$  МВ, средняя частота пробоев —  $1$  на  $500+1000$  имп.

После перехода на неорганическую трубку в течение первого года работы конструкция уплотнений еще не была отработана, и остаточный газ содержал значительное количество паров резины. Частота пробоев осталась примерно той же, но рабочее напряжение было поднято до  $1,4+1,45$  МВ.

Со второй половины 1979 года конструкция трубки приняла современный вид, индиевые уплотнения практически на 100% закрыли резиновые уплотнители, вакуум улучшился на порядок  $(2+3) \cdot 10^{-7}$  мм.рт.ст., а рабочее напряжение было поднято до  $1,6+1,65$  МВ. Количество пробоев в среднем сократилось на порядок. Исключение составлял период (в 1982 г.), когда из-за заводского дефекта в поставленном перед этим изоляторе была небольшая течь азота в объем трубки. В этот период частота пробоев была заметно больше. Во всех отмеченных случаях использовались электронные пушки с эмиттером из  $LaB_6$ .

Следует вместе с тем отметить, что при более коротких длительностях импульса напряжения (длина полуволны  $< 10$  мкс) опыт испытаний и эксплуатации трубок из органических материалов [10, 19] дал достаточно хорошие результаты. Влияние длительности импульса напряжения в микросекундном диапазоне на электрическую прочность зазоров показано в [21] и подтверждается нашими результатами (рис.7). Разумеется, по совокупности всех качеств трубка из неорганических материалов для длительной эксплуатации практически всегда предпочтительней.

О влиянии напыления на электроды трубки с эмиттера пушки можно судить по следующим фактам. После длительного (3+4 часа) перерыва в работе ускорителя, но с включенным на номительные параметры накалом пушки (с эмиттером из  $LaB_6$ ), при появлении первых импульсов напряжения обычно проходят один или несколько пробоев. Если во время перерыва пушку выключать или заметно снижать мощность канала, отмеченная особенность исчезает. Другой факт. Упомянутый выше опыт работы с пушкой, имевшей металлосплавный эмиттер, показал, что частота пробоев в трубке была в среднем  $\sim$  в 5 раз ниже ( $\sim I$  на 32000 имп), чем при использовании в тех же вакуумных условиях и том же режиме работы ускорителя пушек с боридлантоновым катодом. Скорее всего, это связано с малой скоростью распыления этого материала (на 2+3 порядка меньшей, чем у  $LaB_6$  при одинаковой температуре).

Кроме описанных могут быть и другие процессы в ускорительной трубке (особенно, если имеются непредвиденные нарушения в работе каких-то элементов), которые вызывают пробой вакуумных зазоров и другие нарушения в работе трубки.

На одном предполагаемом явлении такого рода следует остановиться особо. Речь идет о процессах, которые могут происходить в электронной пушке, если нет хорошего контакта в поверхностях вокруг таблетки эмиттера, через которые проходит рабочий ток электронов, ускоряемых в трубке. То, что такая опасность реально существует, видно из следующих наблюдений. В конце 1982 года после испытаний пушки с металлосплавным катодом на стенде в различных (рабочем и форсированных) режимах с большим количеством включений - отключений нагревателя оказа-

лось, что в холодном состоянии таблетка в узле крепления заметно болтается. Уверенности, что в горячем состоянии у такой пушки будет надежный контакт по периметру таблетки, конечно, нет.

При отсутствии надежного контакта прохождение достаточно большого импульсного тока может сопровождаться различными процессами вплоть до искрения.

Искрение в пушке может вызывать различные эффекты в трубке - как мгновенные, так и проявляемые со временем. Если место искрения открыто со стороны трубки, то образуемая плазма может служить дополнительным источником эмиссии, увеличивая рабочий ток или давая ток после рабочего импульса, а также являться своего рода поджигом, инициирующим пробой в вакууме в наиболее напряженном месте трубки. В любом случае часть продуктов эрозии может попадать на электроды в виде механической пыли или образовывать химические соединения и на работе трубки проявляться через какое-то время.

У упомянутой выше пушки с металлосплавным катодом, очень спокойно проработавшей в ускорителе в 1983 г. 2300 час, перед установкой был обеспечен плотный контакт в заделке таблетки, и в процессе эксплуатации давалось минимум (всего  $\sim 10$ ) термоциклов включения-отключения накала.

Первые попытки применения в ЭЛИТ-3А подобных пушек в 1980 г., когда таких мер не принималось, а место стыка вокруг таблетки было открыто, кончались неудачно: после нескольких сот часов работы при неконтролировавшемся количестве термоциклов становились частыми пробой в трубке и паразитные токи пучка. Были и есть разные предположения о причинах этих явлений - одно из них, сделанное после успешного опыта работы, изложено выше. Тот факт, что работа аналогичных по конструкции пушек с металлосплавным катодом и большими импульсными токами в других ускорителях Института (ЛУ "Позитрона" и ИЛУ-2, кроме случаев сильного распыления катода) не приводила к пробоям, можно объяснить меньшим (по крайней мере на 2 порядка) зарядом за импульс, приходящимся на единицу длины контакта в указанных ускорителях, и - соответственно меньшей эрозией контактируемых материалов за импульс. В упомянутых ускорителях: ЛУ "Позитрона"

- 0,8 мкК/см, ИЛУ-2 - 0,1 мкК/см и ЭЛИТ-3А - 65 мкК/см за импульс.

Независимо от того, насколько обоснованными являются приведенные соображения, есть общая точка зрения в том, что проблема обеспечения гарантированных контактов в пушке и их сохранения после десятков термоциклов требует серьезного внимания.

Выше почти не затрагивался вопрос о механизме (или механизмах) пробоев вакуумных зазоров трубки. Обсуждение этого вопроса представляет несомненный практический интерес. Особенно для пробоев, которые возникают при рабочем напряжении в процессе работы трубки.

Вначале кратко рассмотрим те механизмы, которые ограничивают предельный достигаемый уровень пробивного напряжения при тренировке трубки (или зазоров между отдельными электродами). Работы, посвященные изучению вакуумного пробоя, в подавляющем своем большинстве рассматривают именно этот вопрос, поэтому представить себе в общих чертах картину процессов относительно просто (см., например, [17]).

Для коротких импульсов и малых промежутков пробой наступает в результате взрыва микроострий на катоде, разогретых автоэмиссионным током. При этом происходит образование (регенерация) новых микроострий [22]. Условие возникновения пробоя — достижение критической напряженности поля на катоде. В этом случае пробивное напряжение растет линейно с длиной промежутка. Это видно, в частности, на рис.7, кривая 1. С ростом длины промежутка для относительно длинных импульсов наступает ситуация, когда вызываемый ускоренными автоэмиссионными электронами нагрев анода к процессам (имеет ряд гипотез и теорий), вызывающих пробой промежутка еще до достижения критической напряженности на катоде, до взрыва микроострий, причем тем меньшей, чем больше длина и соответственно — полное напряжение на зазоре. Электрическая прочность в этом случае растет нелинейно с длиной промежутка (эффект полного напряжения для зазора). Переход от катодного (линейная часть) к анодному механизму пробоя наглядно виден на кривой 3, рис.7.

Следует отметить, что существует также несколько количественных теорий — гипотез [17, стр.262], объясняющих эффект

полного напряжения для вакуумного зазора на основе механизма пробоя, инициированного микрочастицами. Сам факт влияния микрочастиц на электрическую прочность зазора экспериментально устанавливается неоднократно, однако их роль к концу тренировки зазора в большинстве случаев, по-видимому, падает, и определяющими становятся другие механизмы пробоя.

Пробой в трубке под действием рабочего напряжения в период эксплуатации можно пытаться объяснить либо ростом со временем микроострий на электродах, либо появлением микрочастиц.

Рост микроострий наблюдается обычно при одновременном воздействии высокой температуры (сотни градусов Цельсия) и непрерывно приложенного электрического поля с напряженностью много большей, чем в описываемой трубке [17, стр.30]. Наблюдаемые экспериментально (в электронном проекторе) времена роста острия составляют минуты-десятки минут, т.е. также несоизмеримы с длительностью импульса высокого напряжения на трубке (при скважности  $\sim 10^4$ ). Хотя описаны и отличающиеся от указанных условия роста микроострий, эта причина пробоев кажется маловероятной.

Что касается возможной роли микрочастиц в инициировании пробоев в вакуумных зазорах трубки в процессе работы, то ряд наблюдавшихся явлений говорит в пользу такого предположения. Отметим два из них.

Первое касается влияния постоянных магнитных полей, которые могут быть в высоковольтных зазорах вблизи магнитных фокусирующих линз, на электрическую прочность ускорительной трубки. В некоторых ускорителях типа ЭЛИТ отмечалось снижение электрической прочности при наличии таких полей в зазорах трубки и сохранение ее, если линзы делались хорошо экранированными. В свое время на этот счет были предположения о возможности зажигания в этих условиях разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях (пеннинговского или др.). И хотя приложение постоянного напряжения (от мегометра) действительно вызывало значительный ток разряда в соответствующих зазорах, от этого предположения в дальнейшем пришлось отказаться. За единицы или несколько десятков микросекунд при непрерывно меняющемся напряжении и при достаточно хорошем вакууме ( $p_{тр} < 10^{-5}$  мм рт.ст.)

разряд скорее всего не успевает сформироваться.

Кроме того, об отсутствии сформировавшегося разряда в скрещенных полях или его влияния на электрическую прочность в интересующих нас случаях говорят и следующие данные. Непосредственно под нижним электродом трубок ускорителей ЭЛИТ обычно расположена импульсная фокусирующая линза, создающая в период действия высокого напряжения квазипостоянное магнитное поле. Специально было проверено, что даже при относительно большой величине проникающих в высоковольтные зазоры полей (до нескольких сот Гс) какого-либо влияния их на электрическую прочность трубки (без пучка) не обнаруживается\*.

Различное влияние постоянных и квазипостоянных магнитных полей на электрическую прочность трубок можно объяснить следующим образом. При наличии постоянных полей на ферромагнитных наконечниках линз удерживаются частицы металлической пыли, и если наконечники являются одновременно электродами трубки (или вблизи линз из постоянных магнитов расположены ферромагнитные электроды), то удерживаемые на соответствующих поверхностях микрочастицы могут быть инициаторами пробоев, а удаление этих частиц с электродов в процессе тренировки затруднено из-за "прилипания" их к ферромагнитным поверхностям. Импульсные магнитные линзы указанного эффекта, естественно, не создают.

Следует отметить, что если, как это сделано в описываемой трубке (рис.2), линзы из постоянных магнитов вместе с полюсными наконечниками вынесены из электрического поля, а электроды трубки сделаны из немагнитного материала, то удержание микрочастиц на поверхности электродов практически отсутствует, и такая линза на электрическую прочность трубки не влияет. Это было проверено на трубке ЭЛИТ-3А экспериментально путем сравнения электрической прочности ее при установленных и снятых неэкранированных линзах.

Другое явление, подтверждающее предположение о возможной роли микрочастиц в иницировании пробоев в ускорительной трубке

\* Это не относится к случаю, когда в трубке (диоде) создается продольное магнитное поле. Этот случай здесь не обсуждается.

при характерных для ЭЛИТ-3А временах и градиентах в зазорах, — это — наблюдавшаяся потеря электрической прочности одного из зазоров трубки после тренировки пробоями соседнего — с возможностью попадания продуктов пробоя (через отверстия в электроде) в первый, который перед этим был оттренирован. Эффект проверялся несколько раз.

Представляет интерес сделать некоторые количественные оценки поведения микрочастиц в зазорах трубки ЭЛИТ-3А и сопоставить их с имеющимися теоретическими представлениями о том, каким образом микрочастица может иницировать пробой.

Заряд, приобретаемый проводящим шариком, лежащим на поверхности гладкого электрода, и отрывающая сила, действующая на него со стороны электрического поля между электродами, могут быть определены по формулам, полученным в работе [23], которые (после перевода в СИ) имеют вид:

$$q = 1,83 \cdot 10^{-10} \cdot E \cdot r^2 \quad (3-1)$$

и 
$$F = 1,52 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r^2, \quad (3-2)$$

где  $E$  — поле на поверхности электрода в том месте, где находится шарик (без учета его влияния), а  $r$  — радиус шарика. Сила, действующая на него, при любых разумных величинах  $E$  и  $r$  получается много больше веса шарика, и поэтому все слабо связанные с электродом микрочастицы при появлении напряжения отрываются от электрода и летят к противоположному. Кинетическая энергия, приобретаемая шариком после прохождения разности потенциалов между электродами  $U$ :

$$W_k = q \cdot U = 1,83 \cdot 10^{-10} \cdot E \cdot r^2 \cdot U. \quad (3-3)$$

Заменяя  $E = E_{cp} \cdot k$ ,  $U = E_{cp} \cdot d$ , где  $k$  — коэффициент увеличения поля в том месте, откуда стартует частица, и  $d$  — длина промежутка между электродами, и приравнявая правую часть  $mv^2/2$ , получаем выражение для скорости полета микрочастицы к электроду

$$v = 0,94 \cdot 10^{-5} \cdot E_{cp} \sqrt{\frac{d \cdot k}{r \cdot \gamma}}. \quad (3-4)$$



Как видно из последнего выражения, максимальную скорость подлета и минимальное время перелета имеют частицы малых размеров с низкой плотностью ( $\gamma$ ). Оценим максимальный размер частицы, успевавший подлететь к противоположному электроду, пока на зазоре сохраняется близкое к максимальному напряжение. Расчетное время для трубки ЭЛИТ-3А примем равным половине длительности рабочей полуволны напряжения, т.е.  $\sim 20$  нс. За это время успевают перелететь частицы со средними скоростями не менее 550 м/сек в зазорах верхнего модуля, кроме I-го от пунки, в которых  $d = 1,1$  см, и  $\sim 800$  м/сек в I-ом зазоре верхнего модуля и в зазорах остальных модулей ( $d \approx 1,6$  см). Считая для простоты величины максимальных скоростей в 2 раза больше средних, имеем соответственно 1100 и 1600 м/сек.

Из выражения (3-4) имеем

$$\tau = 0,88 \cdot 10^{-10} \frac{E_{cp}^2 \cdot d \cdot k}{v^2 \cdot \gamma}, \quad (3-5)$$

что для  $k = 10$  (учитывая возможность значительной неоднородности поля),  $\gamma = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> - графит (из проводящих материалов наиболее легкий) и известных  $v$  и  $E_{cp}$  дает:

- I-й зазор верхнего модуля -  $\tau \leq 6 \cdot 10^{-8}$  м
- следующие зазоры верхнего модуля -  $\tau \leq 7 \cdot 10^{-8}$  м
- зазоры остальных модулей -  $\tau \leq 2 \cdot 10^{-8}$  м.

Кинетическая энергия, набираемая такими частицами, получается в пределах  $10^{-14} + 2 \cdot 10^{-12}$  Дж. Металлические частицы, успевающие перелететь зазоры, в соответствии с (3-5) будут иметь в несколько раз меньший размер, чем графитовые, и согласно (3-3) будут иметь еще более низкие величины кинетической энергии.

Анализируя возможные механизмы инициирования вакуумного пробоя микрочастицами, И.Н.Сливков [17] приходит к выводу, что для образования при ударе частицы об электрод достаточного для зажигания газового разряда количества паров, микрочастица должна иметь энергию не менее  $10^{-8}$  Дж. Такой механизм в нашем случае исключается. Тем более не проходит механизм, когда пробой зазора инициируется разрядом между электродом и подлетающей частицей, так как он считается возможным при длительности

импульсов  $> 10^{-3}$  с, когда успевают подлетать достаточно крупные частицы.

Можно, видимо, строить предположения, что удары очень малых частиц о поверхность электрода, имеющую сложную структуру и рельеф (пленки, примятые микроострия и проч.) могут приводить к каким-то изменениям геометрии, разрыву пленок, освобождению микроострий и т.п. Верхние поверхности электродов, на которых преимущественно могут находиться микрочастицы, в период действия рабочей полуволны являются анодами, и удары частиц происходят соответственно в основном с катодом. Возможным следствием может быть процесс развития пробоя, связанный с автономией.

Чем больше на электродах имеется связанных с поверхностью микрочастиц, сорбированных и напыленных материалов, тем естественно больше вероятность при пробоях регенерации новых свободных или слабосвязанных микрочастиц, а также образования микроострий, и, как следствие - прохождения серии пробоев. Такие серии наблюдались сравнительно часто в начальный период работы трубки и редки в последний период.

### 3.3. Процессы, происходящие в трубке в результате пробоя вакуумного зазора

Пробой вакуумного зазора между электродами трубки вызывает перенапряжение на соседних секциях и сопровождается рядом других эффектов, которые анализируются и обсуждаются в этом разделе.

#### 3.3.1. Перенапряжения на секциях трубки

В упрощенном виде<sup>§</sup> оценка величины перенапряжений на секциях может быть сделана следующим образом. После закорачивания секции вакуумной дугой и прохождения переходных процессов в схеме системы накопитель-трубка (рис. II), которые носят апериодический характер с постоянной времени  $\sim 10^{-7}$  с, к двум секциям, примыкающим к закороченной, приложено то же напряжение, что до закорачивания пробоя было приложено к трем секциям. Т.е., при пробое одной из средних секций на двух примыкающих

<sup>§</sup> Детальный анализ процессов в схеме системы высоковольтный накопитель - трубка ускорителя ЭЛИТ-3А сделан в работе [24].

к ней устанавливается полуторная величина номинального напряжения с последующим спадом его вместе с общим напряжением на трубке. При пробое крайних секций трубки, как видно из рис. II, устанавливаются: на 2-ой секции - тройное - и на предпоследней - двойное напряжения.

В первый момент после резкого спада напряжения на межэлектродном зазоре перенапряжения обусловлены только емкостями схемы. Расчет соответствующих перенапряжений на секциях, прилегающих к пробитой, удобно провести методом наложения, суммируя напряжения от начального распределения с напряжениями, создаваемыми источниками э.д.с., включенными в пробитую секцию на незаряженную цепочку емкостей с той же величиной напряжения и обратным направлением по сравнению с напряжением на секции до пробоя. Секции колонны ввиду больших величин емкостей  $C_c$  ( $\gg C_{\text{э}}$ ) при расчете распределения напряжения от источника э.д.с. можно считать замкнутыми. Формулы для расчета распределения напряжения вдоль емкостной цепи даны в Приложении. В связи с большим количеством секций можно воспользоваться формулами для бесконечной цепи.

Доля напряжения на первом от источника продольном сопротивлении ( $\beta$ ) определяется выражением (II5) в Приложении:

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{C_d}{C_g}}} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{100}{17}}} = 0,33.$$

Расчетные величины приложенных к цепочке напряжений будут:

а) при закорачивании одной из средних секций -  $U_c/2$  (можно считать, что напряжения источника делится между цепочками в обе стороны от пробитой секции поровну),

б) при пробое верхней секции -  $2U_c$  и

в) при пробое нижней секции -  $U_c$ .

Соответственно величины перенапряжений в первый момент после пробоя для этих 3-х случаев будут:

а)  $1 + \frac{0,33}{2} = 1,165$ ; б)  $1 + 2 \cdot 0,33 = 1,66$ ; в)  $1 + 0,33 = 1,33$ .

Величины возможных перенапряжений при пробое одного вакуумного промежутка на разных стадиях переходного процесса при-

ведены в сводной таблице 3-1.

Таблица 3-1

Величина перенапряжений на соседней с пробитой секции			Время от момента пробоя, нс
пробой верхнего зазора	пробой нижнего зазора	пробой одного из остальных	
1,66	1,33	$\geq 1,17$	< 10
3	2	1,5	> 200+300

Очевидно, что в промежуточном между указанными в таблице 3-1 интервале времени величина перенапряжений на соседних секциях будет лежать в пределах рассмотренных крайних случаев. Таким образом, величина максимальных перенапряжений при пробоях любого, кроме верхнего и нижнего, зазора оставляет 1,5.

Как показал опыт эксплуатации, при существующих в трубке условиях, если предварительно проводилась тренировка, пробой одного из этих зазоров, несмотря на 50% увеличение напряжения на соседних, как правило, не приводит к развитию вакуумного пробоя в трубке. Поэтому настройка защитных газовых разрядников проводилась таким образом, чтобы при пробое одного из таких зазоров они не срабатывали и не приводили тем самым к пробоям в ускорителе по полному напряжению. Хотя пробой такого рода не приводит к явным последствиям, однако, сопровождаются в какой-то степени перенапряжениями на высоковольтном генераторе, наводками на элементах внутри и вне ускорителя, дополнительным выделением энергии в пробитой секции и соответственно большей эрозией электродов и большей порчей вакуума и поэтому, естественно, являются нежелательными. В связи с этими соображениями пробивное напряжение разрядников взято равным  $\sim 1,6+1,7$  от номинального напряжения одной секции.

Обычное соотношение между количеством пробоев отдельных зазоров и полных пробоев трубки  $\sim 10 : 1$ . Срабатывание разрядников происходит, по-видимому, в двух случаях: 1) когда пробивается верхний зазор и 2) когда рядом с пробившимся зазором оказывается секция, также находящаяся на грани пробоя, и в итоге пробитыми оказываются 2 секции с двойным перенапряжением

на соседних. Вероятность пробоя нижней секции трубки, приводящего также к двойному перенапряжению на соседней, очень мала и значительно возрастает только после вскрытий и последующих обезгаживаний пучком гирокон, что бывает обычно раз в год.

Подробно работа разрядников на трубке ЭЛИТ-3А и некоторые общие вопросы защиты ускорительных трубок газовыми разрядниками рассмотрены в работе [24].

### 3.3.2. Ухудшение вакуума

Газоотделение с электродов при разряде вызывает кратковременное ухудшение вакуума в трубке. По мере общего улучшения вакуума в трубке после ее вскрытия и - обезгаживания электродов в процессе длительной работы степень ухудшения вакуума при пробое зазора снижается, и рабочее давление восстанавливается быстрее (несколько секунд).

Скачки остаточного давления при пробое секции используются для регистрации таких пробоев и учета их количества. Полный пробой трубки регистрируется отдельно по крутому фронту спада напряжения.

### 3.3.3. Появление дополнительных токов заряженных частиц ("бород") в канале трубки

Образовавшаяся при пробое вакуумного зазора плазма расширяется (скорость движения границы  $\sim 2 \cdot 10^6$  см/сек [25]) и через промежуток времени  $\sim$  несколько мкс выходит в канал трубки. К этому времени напряжение, приложенное к трубке, практически не изменяется, и под действием электрического поля на границе плазменного облака из него эмиттируются электроны (вниз) и положительные ионы (вверх). При пробое зазора на обратной полуволне напряжения направление движения электронов и ионов соответственно обратное.

Ускоренные на рабочей полуволне из плазмы разряда электроны дают сигнал с пояса Роговского, установленного под трубкой, причем в отличие от рабочего импульса тока импульс тока электронов из плазмы имеет сильно изрезанный вид (рис.12). По этой причине указанный ток стали называть "бородой", этот термин

прижился и используется далее в тексте. В зависимости от момента времени пробоя зазора и - расстояния от места разряда до канала трубки борода может начинаться до и во время рабочего импульса тока и после него (последнее - чаще всего). Естественно, она может быть и в режиме холостого хода, когда рабочего пучка нет.

Специальных измерений амплитудных значений и суммарного заряда бород не проводилось, но некоторые данные из наблюдений можно привести. Амплитуда бород при грязных электродах или плохо откачанной трубке обычно  $\sim$  в 2 раза может превышать рабочий ток, т.е. достигает  $\sim 100$  А. По мере улучшения вакуумных условий амплитуда бород, как правило, уменьшается, и характерный уровень не превышает в установившемся режиме нескольких десятков А, а частота появления бород снижается с весьма частых на начальном этапе до 1-2 на 10000 имп.

Максимальная величина тока бороды при плохом вакууме ограничивается очевидно объемным зарядом, а по мере уменьшения давления в образуемой при пробое плазме - эмиссионными свойствами последней. Можно сделать очень грубые количественные оценки. Эффективную площадь эмиттирующей поверхности плазмы примем равной  $\sim 10$  см<sup>2</sup>; при этом плотность тока эмиссии должна быть  $\sim 10$  А/см<sup>2</sup>. Воспользовавшись формулой, связывающей эмиссионную способность плазмы с ее плотностью и температурой, (см., например, [26, стр.15]):

$$j = 2,1 \cdot 10^{-16} \cdot n_e \cdot \sqrt{T_e} \text{ А/см}^2$$

и приняв  $T_e \geq 10^4$  К [27, стр.393], можем оценить плотность плазмы  $n_e$ , достаточную для обеспечения соответствующей эмиссии.

$$n_e \approx \frac{10^5}{2,1 \cdot 10^{-16} \cdot \sqrt{10^4}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3,$$

что соответствует давлению в ней  $\sim 10^{-4}$  мм рт.ст. Считая, что при выходе в канал трубки плазма занимает  $\sim 10^{-2}$  общего объема трубки и вакуумной системы, получаем величину ухудшения вакуума после полного заполнения газом объема -  $\Delta p \sim 10^{-6}$  мм рт.ст. Эта величина вполне согласуется с наблюдаемым

отклонением стрелки вакуумметра после бороды в начальный период работы трубки после напуска атмосферы. В установившемся режиме работы по вакууму его отклонения после бород становятся заметно меньше, соответственно можно ожидать снижения плотности и эмиссионной способности плазмы, что подтверждается уменьшением тока бород.

Длительность бороды обычно ограничивается длительностью действия высокого напряжения. Энергия, уносимая бородой, может в неблагоприятных вакуумных условиях достигать значений, соизмеримых с энергией пучка в рабочем импульсе. На геометрию пучка бороды (электронов) влияют магнитные линзы, и в некоторых случаях могут быть нежелательные последствия. Например, в период наладки ускорителя, когда использовалась трубка из органических материалов, при выпуске ускоренного пучка через фольгу были случаи ее прожога или подгара бородами.

Пробои зазоров в трубке в период действия обратных полупериодов напряжения происходят значительно реже, чем в период действия прямой полуволны (у первых амплитуда ниже (рис. I)). Однако, такие пробои представляют, по-видимому, наибольшую опасность для пушки, так как при этом электронный пучок бороды идет вверх и может вызывать повреждения сетки и эмиттера. В начальный период эксплуатации ускорителя ЭЛИТ-3А, когда борода наблюдались особенно часто и имели постоянно большую амплитуду, после нескольких сот часов работы пушки на сетке обычно наблюдались подплавленные участки и значительная деформация; на катоде — значительная часть площади (иногда практически вся) имела также подплав и глубокие выбоины (до  $\sim 0,5$  мм) напротив ячеек сетки. В дальнейшем эти эффекты стали существенно слабее. Следует, однако отметить, что если в первые годы трещины в таблетках  $LaB_6$  от термических напряжений при выделении энергии бород появлялись очень редко, то при переходе на новые партии катодов, изготовленных в последние годы (одним из заводов МЭИ) трещины наблюдаются постоянно, что связано с ухудшением качества таблеток (условия работы только облегчились).

Выше обсуждались эффекты от электронных бород. Величина максимального ионного тока бороды, ограниченная объемным зарядом, будет (например, для ионов азота) в соответствии с за-

коном  $3/2$  по крайней мере на 2 порядка меньше, чем электронного, т.е.  $\sim 1A$ . Соответственно полная энергия пучка ионов будет  $\sim 10$  Дж. Если учесть, что в отличие от электронов ионы практически не фокусируются магнитными линзами, стоящими в трубке, то можно полагать, что заметных термических эффектов такой пучок дать не может. Что касается эффекта распыления материала катода [28], пропорционального общему количеству ионов, то оценки показывают, что при существующей частоте появления бород количество ионов, связанных с бородами, существенно меньше рождаемых в нормальной работе от ионизации электронным пучком остаточного газа трубки.

В заключение отметим, что при соблюдении приведенных выше правил эксплуатации трубки (тренировка, работа только при хорошем вакууме) никакой реальной опасности токи бород не представляют. Планируемый переход на использование только металлокерамических эмиттеров устранит единственное существующее опасение, связанное с повышенной хрупкостью ныне выпускаемых таблеток из  $LaB_6$ . После упоминавшегося успешного опыта работы металлокерамического катода в течение  $> 2000$  час повреждения эмиттирующей поверхности незначительны, и этот катод будет вновь эксплуатироваться без какой-либо доработки.

Из изложенного очевидно также, что в определенных условиях борода в ускорительных трубках могут быть опасными, и тогда может потребоваться настройка защитных газовых разрядников с минимальным запасом по электрической прочности (или другие меры) с тем, чтобы после вакуумного пробоя секции напряжение на трубке было снято предельно быстро.

#### 3.3.4. Возможность возникновения газового разряда в трубке

Повышение давления газа в трубке вблизи места вакуумного пробоя может создавать в соседних секциях, находящихся под относительно медленно меняющимся напряжением, условия для зажигания газового разряда, соответствующего левой ветви кривой Пашена [17, стр. 279 и 287]. В соответствии с кривой Пашена для воздуха при напряжении  $70+80$  кВ (полуторократное от номинального напряжения на секции) зажигание разряда происходит

при увеличении  $pd$  до  $\sim 0,08$  (мм рт.ст.) $\cdot$ см, что при зазоре  $\sim 1$  см соответствует возрастанию давления почти до  $10^{-1}$  мм рт.ст. Такое большое давление в заметном объеме чистой трубки, по-видимому, не может возникать. Более вероятно возникновение газового разряда под напряжением, приложенным к двум секциям, через имеющиеся в электродах отверстия. Следы таких разрядов, особенно в верхних двух зазорах, где расширение газа затруднено, а суммарное напряжение достигает  $\sim 150$  кВ, обычно видны на электродах. В этом случае  $pd \approx 0,06$  (мм рт.ст.) $\cdot$ см и при  $d_z \approx 3$  см  $p = 2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. Следы таких разрядов располагаются строго напротив отверстий по всей окружности электрода либо на ее части, где существовало необходимое давление газа. Следует отметить, что при работе в хороших вакуумных условиях эти следы едва заметны. Можно поэтому полагать, что после обезгаживания электродов и достижения стабильного вакуума газовый разряд в трубке не возникает вообще. Приведенные выше оценки плотности плазмы по ее эмиссионной способности подтверждают этот вывод. Следовательно, в трубке ЭЛИТ-3А можно не опасаться этого эффекта.

### 3.4. Контроль и защита ускорительной трубки в эксплуатации

#### 3.4.1. Измерения

Для контроля параметров и состояния трубки система датчиков и приборов обеспечивает измерение следующих величин: полное импульсное напряжение на трубке, импульсное напряжение коррекции, приложенное к нижним двум секциям трубки, импульсный ток пучка, средний ток пучка, средний ток осаждения на электроды, остаточное давление внутри трубки, давление элегаза снаружи, мощность, потребляемую электронной пушкой, количество импульсов высокого напряжения, количество пробоев отдельных зазоров трубки, количество полных пробоев трубки.

Наиболее важные параметры трубки контролируются автоматизированной системой управления и контроля источника позитронов на основе ЭВМ ОДРА-1325 [29] с выводом информации на алфавитно-цифровой дисплей и блоки цифровой индикации (БЦИ). Все измерения могут также независимо осуществляться осциллографами и др. измерительными приборами.

#### 3.4.2. Защита

Для исключения или снижения вероятности аварий в работе трубки предусмотрен ряд защит. Ускоритель прекращает работать, если остаточное давление в трубке превышает заданную величину, то же - при снижении давления в баке, превышении заданного напряжения на трубке, при трех пробоях трубки подряд, при прекращении питания пушки или превышении тока накала сверх допустимой величины. После пробоя трубки автоматически дается пауза в работе на 30 сек, после пробоя отдельного зазора - 5+10 сек.

Все защиты осуществляются специальными блоками. Имеется также возможность осуществлять защиту упомянутой автоматизированной системой управления, но этот способ пока является менее надежным.

В разработке ускорительной трубки и вакуумной системы принимали участие Г.С.Крайнов, В.М.Долгушин, В.В.Анашин, Л.А.Мироненко, Е.И.Похлебенин, А.М.Крочков, Н.В.Скородумов. Разработка электронных пушек для эксплуатации осуществлена Г.И.Ясновым и Г.И.Кузнецовым; в наладочных работах использовались пушки, разработанные Г.Ф.Балыковым. Разработка аппаратуры для контроля состояний и защиты трубки осуществлена В.А.Ведерниковым, Е.Н.Коккиным и Е.Н.Харитоновым.

В различных экспериментах принимали участие Б.И.Ястреба, И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.С.Ненчиков, Ю.Я.Чибуков, В.Н.Новиков.

Помощные обсуждения конструкции и работы ускорительной трубки состоялись с А.Н.Скринским, Л.М.Барковым, В.Е.Балакиным, Л.В.Анкудиновым, А.Н.Шарапой и др.

Серьезная помощь в различных работах оказывалась В.В.Петровым и Г.М.Тумакиным.

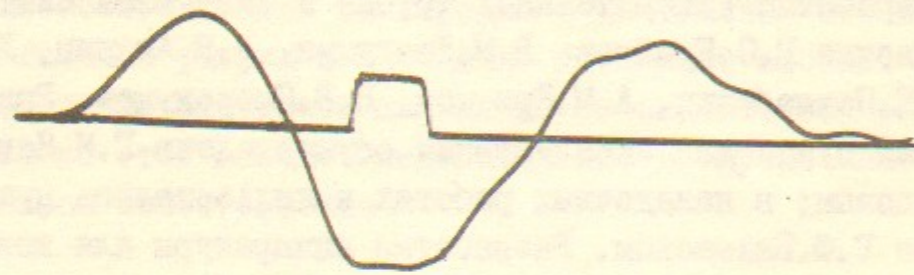


Рис.1. Осциллограммы высокого напряжения на ускорительной трубке и тока пучка (длительность импульса тока электронов 11,5 мкс).

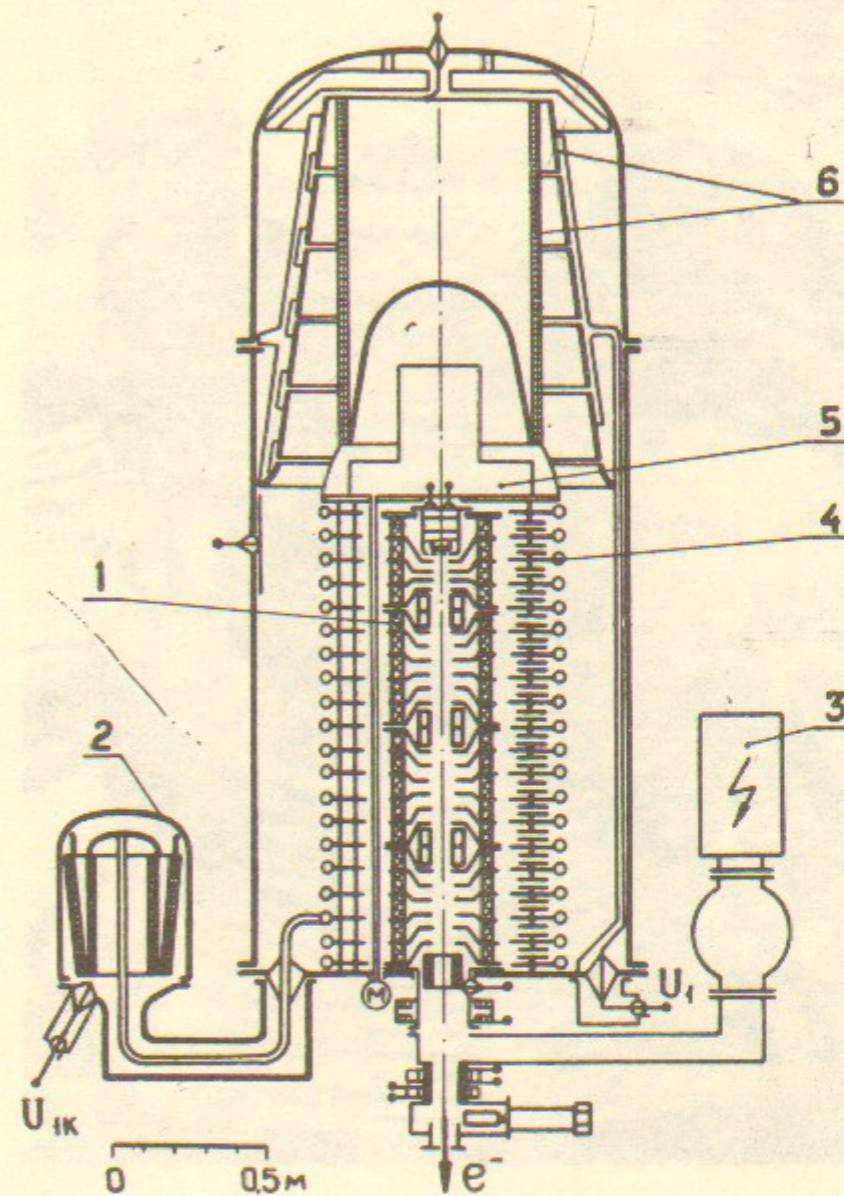


Рис.2. Конструкция ускорителя.

1 - ускорительная трубка; 2 - источник напряжения коррекции; 3 - электроразрядный вакуумный насос; 4 - высоковольтный накопитель; 5 - блок питания электронной пушки и управления током пучка; 6 - обмотки трансформатора Тесла.

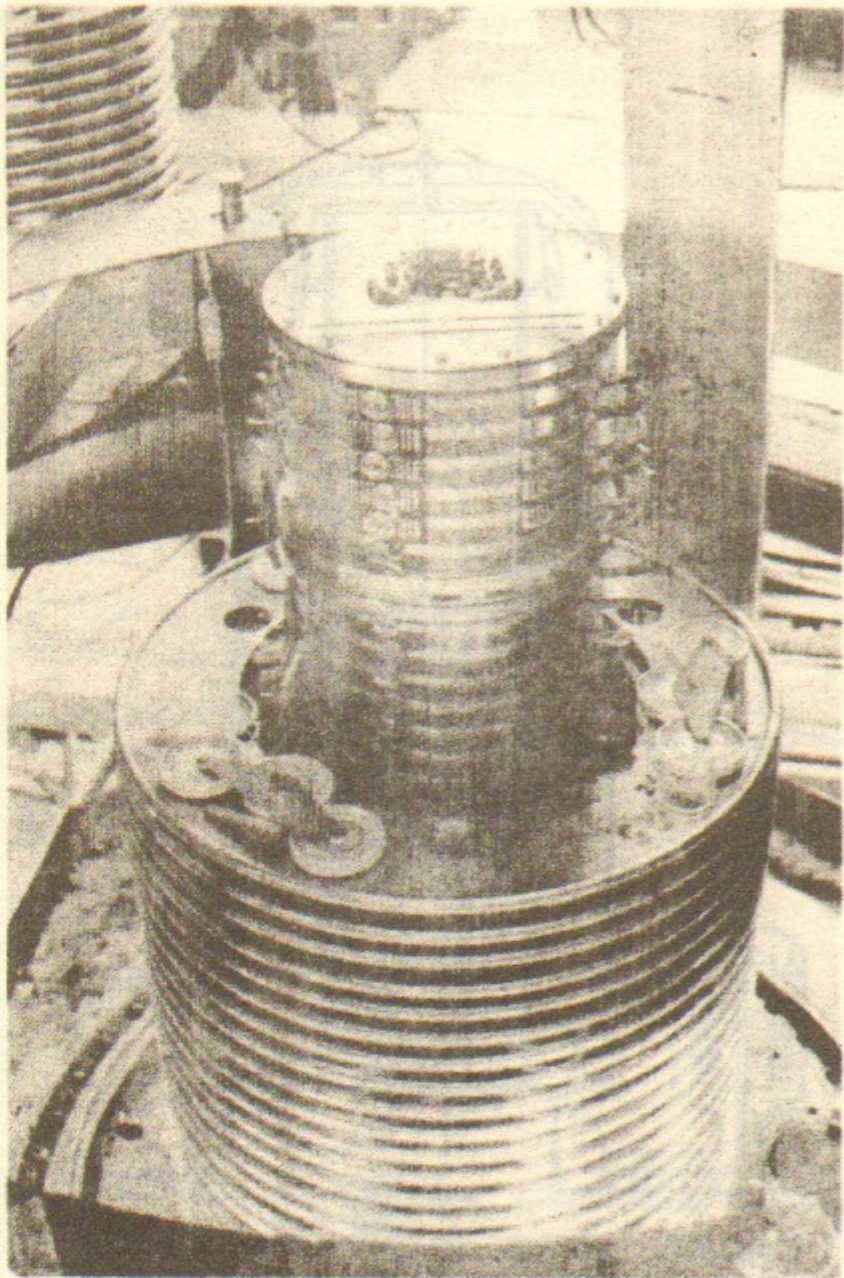


Рис.3. Ускорительная трубка и высоковольтная колонна емкостного накопителя (часть секций колонны снята).

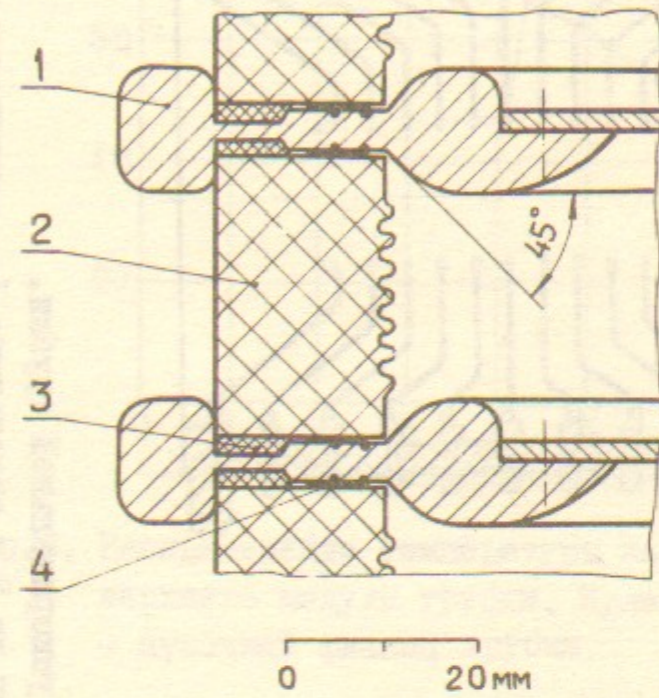


Рис.4. Элемент колбы ускорительной трубки.  
1 - электрод; 2 - изолятор; 3 - резиновый уплотнитель; 4 - гайка.

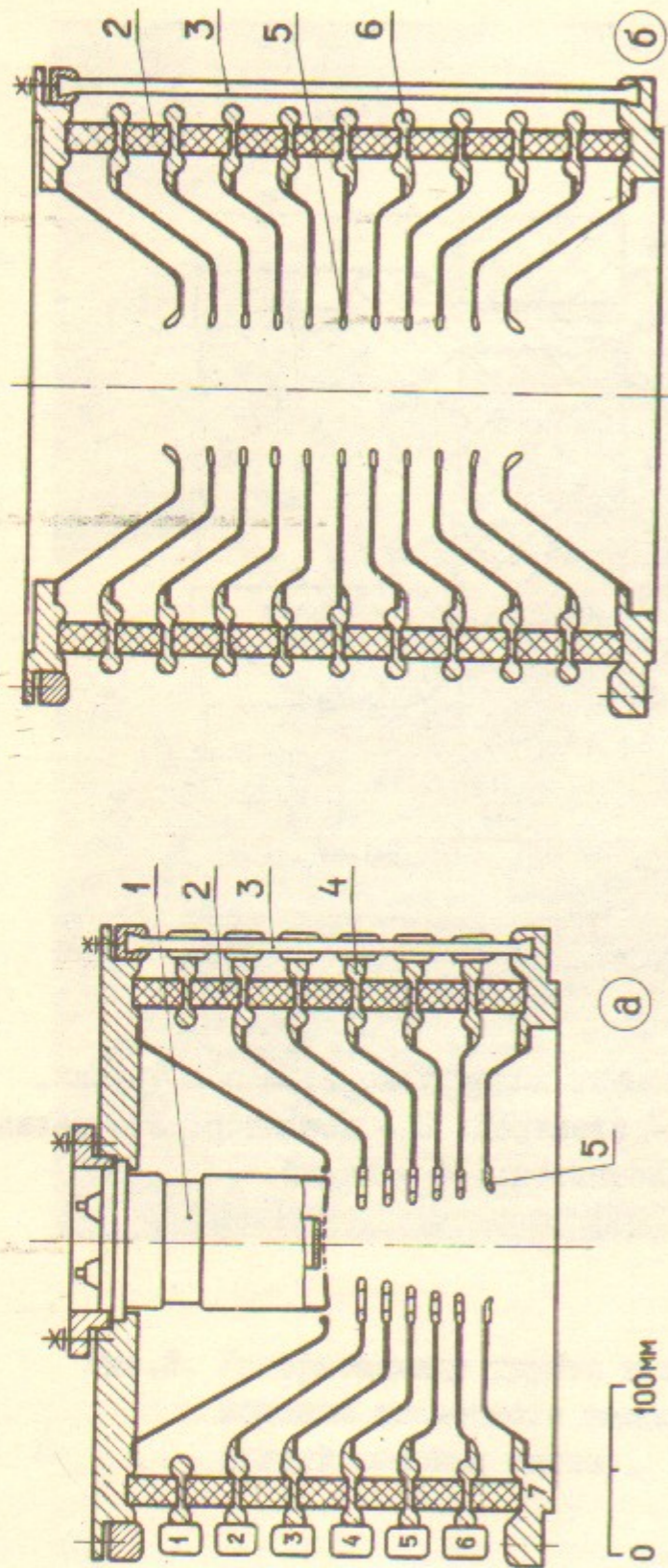


Рис.5. Конструкция модулей ускорительной трубки.

а - верхний; б - один из 3-х остальных; 1 - электронная пушка;  
 2 - изолятор; 3 - изоляционная стяжка; 4 - электрод с радиатором;  
 5 - молибденовый электрод; 6 - электрод без радиатора.

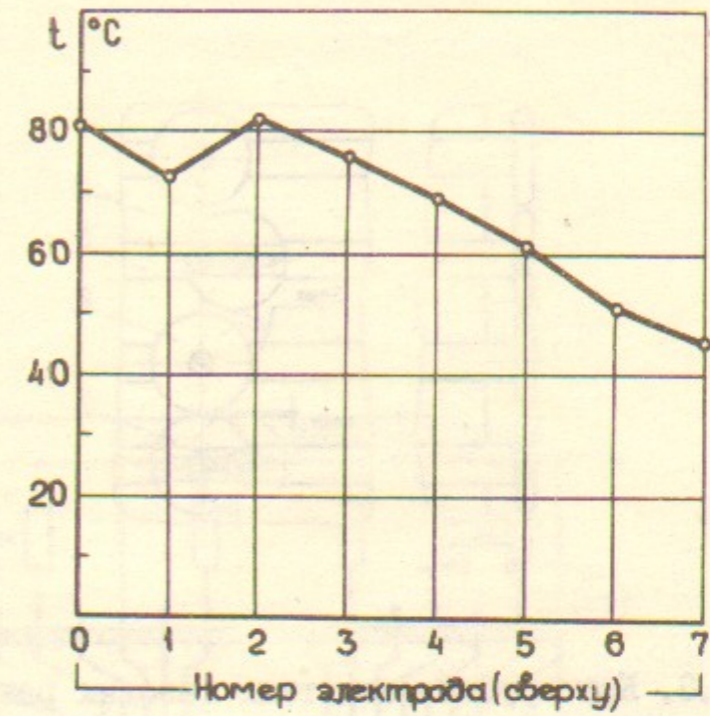


Рис.6. Распределение температуры по электродам верхнего модуля трубки. Нулевой электрод - пушечный фланец трубки.

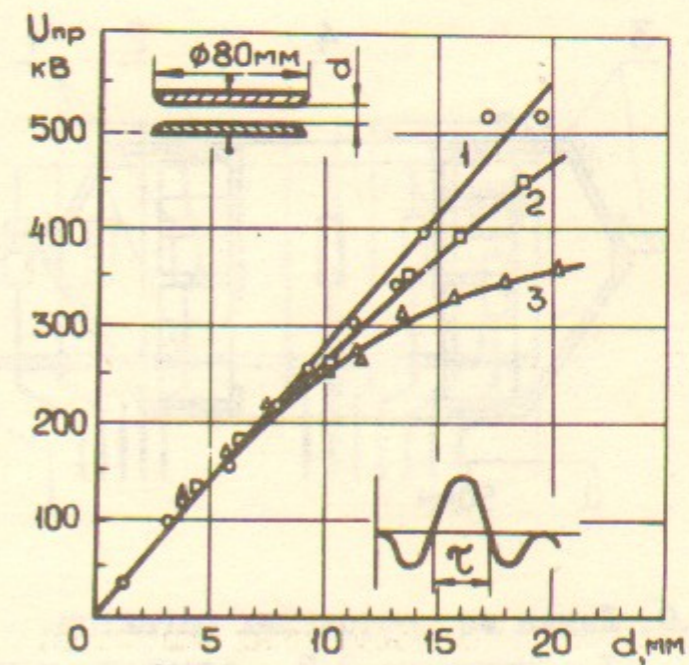


Рис.7. Пробивные напряжения вакуумного зазора при различных длительностях ( $\tau$ ) полуволны напряжения. 1-9 мкс; 2-26 мкс; 3-43 мкс.



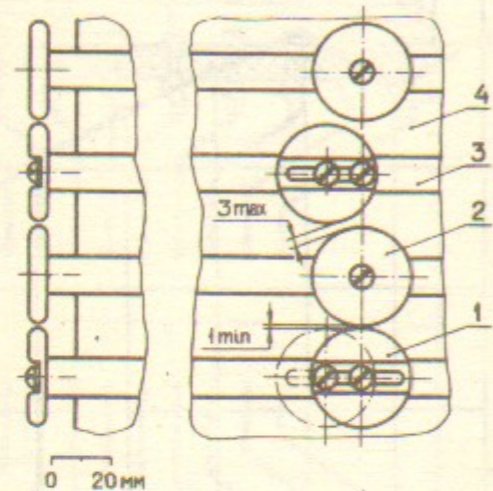


Рис.8. Конструкция защитных газовых разрядников трубки.

1 - подвижный электрод; 2 - неподвижный;  
3 - электрод трубки; 4 - изолятор.

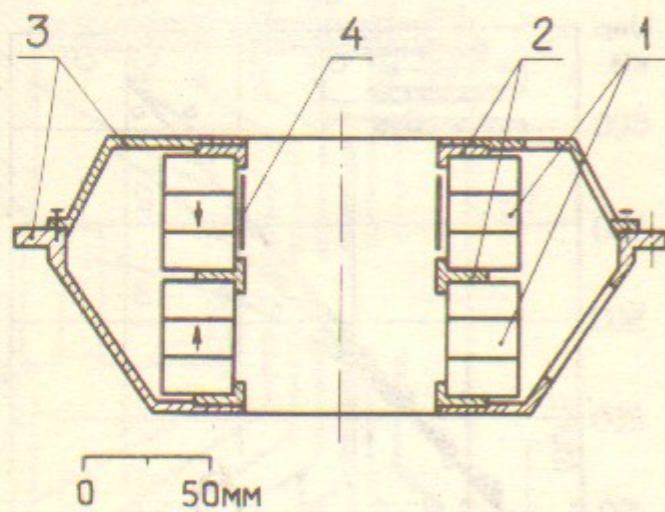


Рис.9. Линза из постоянных магнитов.

1 - магниты; 2,3 - элементы конструкции из  
армко (или Ст10); 4 ферромагнитный шунт.

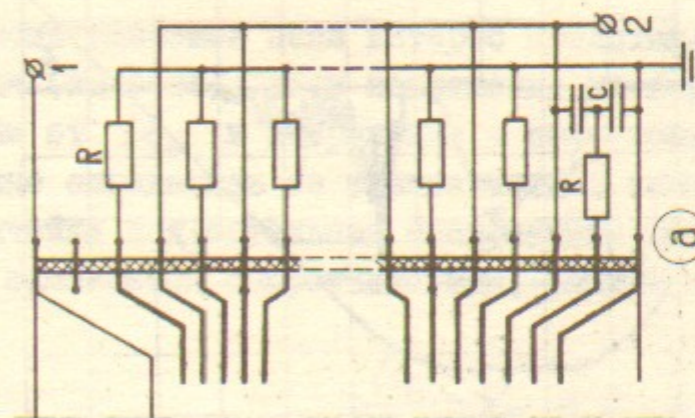
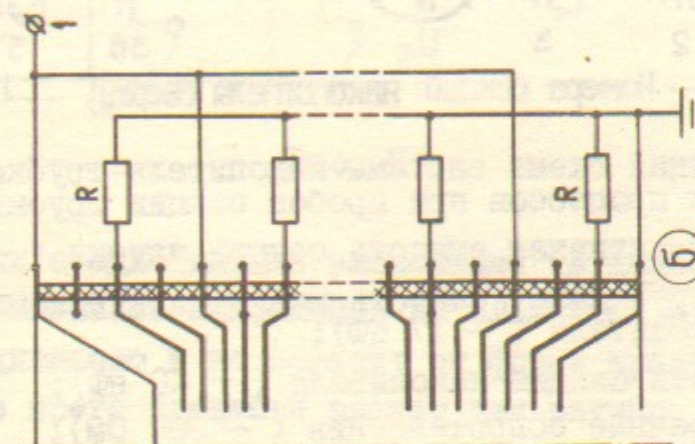


Рис.10. Схемы соединений для параллельной тренировки трубки.  
а - схема с использованием 2-х источников напряжения (основного и коррекции); б - схема с одним источником.  $R = 1 \text{ кОм (ТВО-10)}$ .

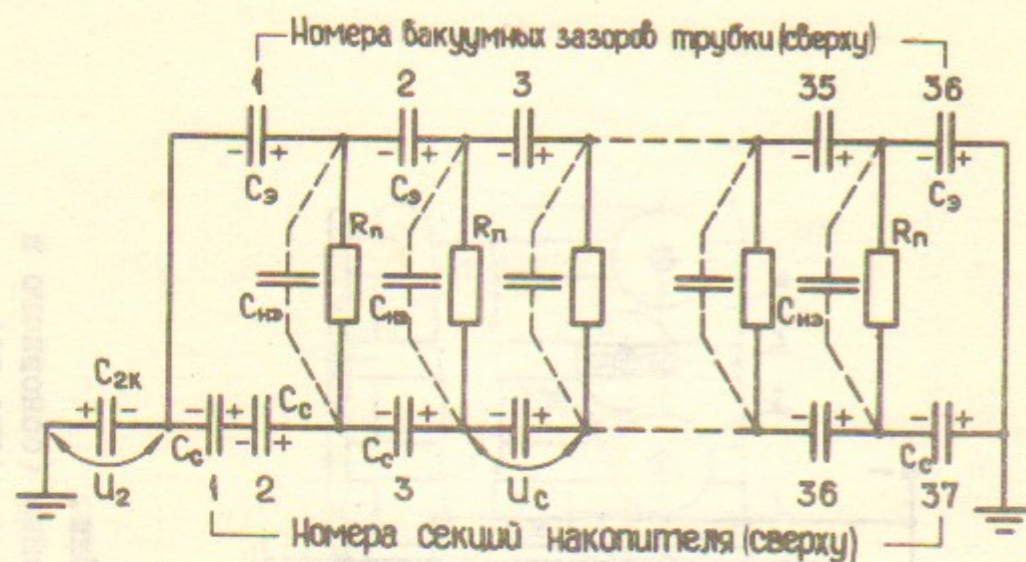


Рис. II. Эквивалентная схема системы накопитель-трубка для переходных процессов при пробое секции трубки.

- $C_э$  - конструктивная емкость секции трубки ( $\sim 100$  пФ);
  - $C_{на}$  - конструктивная емкость между электродами трубки и накопителя ( $\sim 17$  пФ);
  - $C_c$  - емкость секции накопителя ( $\sim 40$  нФ);
  - $R_n$  - поперечные сопротивления ( $\sim 300$  Ом);
  - $C_{2к}$  - конструктивная емкость ускорителя.
- Знаки напряжений соответствуют рабочей полуволне.

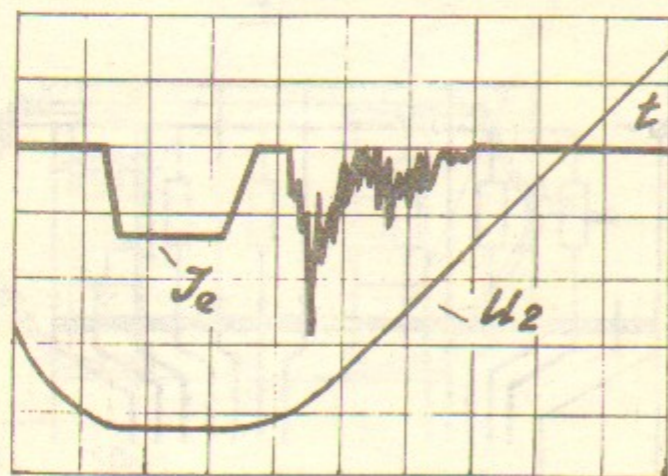


Рис. I2. Рабочий импульс тока электронов и ток, эмиттированный плазмой, ("борода").  
 $I_e$  - ток пучка;  $U_2$  - ускоряющее напряжение.

Приложение

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЧКАХ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ЕМКОСТЕЙ

Рассмотрим бесконечную цепь вида:

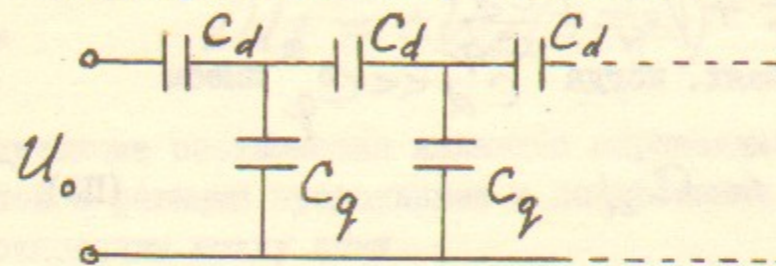
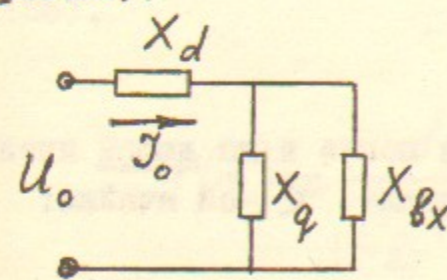


Рис. III

Для цепи с однотипными элементами (в данном случае - емкостями) соотношение напряжений на элементах в любой момент времени - одинаково и не зависит от формы приложенного напряжения. Проще всего провести расчет для случая, когда приложенное напряжение  $U_0$  - синусоидально, и можно использовать уравнения Кирхгофа в простейшем виде. Емкости в эквивалентной цепи образуют емкостные сопротивления

$$X = \frac{1}{\omega C}. \quad \text{При } \omega = 1 \quad X = \frac{1}{C}.$$

Для рассматриваемой цепи интерес представляют: входное сопротивление (емкость), доля напряжения на первом продольном сопротивлении от  $U_0$  и напряжение в цепи после  $k$ -ой ячейки.  $X_{вх}$  можно определить из эквивалентной схемы, в которой после 1-ой ячейки вся остальная бесконечная цепь из очевидных соображений заменяется сопротивлением, равным также  $X_{вх}$  (рис. I2).



$$\frac{U_0}{I_0} = X_{вх} = X_d + \frac{X_г \cdot X_{вх}}{X_г + X_{вх}},$$

откуда получаем:

$$X_{вх} = X_d \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X_г^2}{X_d^2}} \right) \quad (III)$$

Рис. I2

или  $\frac{1}{C_{bx}} = \frac{1}{C_d} \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{C_d}{C_q}} \right),$

откуда  $C_{bx} = \frac{C_d}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{C_d}{C_q}}} \quad (\text{П2})$

В предельных случаях, когда  $C_d \ll C_q$  имеем

$$C_{bx} \approx C_d \quad (\text{П3})$$

и при  $C_d \gg C_q$

$$C_{bx} \approx \sqrt{C_d \cdot C_q} \quad (\text{П4})$$

Доля напряжения от  $U_0$  на первом продольном сопротивлении  $X_d$

$$\beta = \frac{Y_0 \cdot X_d}{Y_0 \cdot X_{bx}} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X_q}{X_d}}} \quad \text{или}$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + C_d/C_q}} \quad (\text{П5})$$

Отношение напряжения на любом другом  $X_d$  к напряжению на входе в соответствующую ячейку также очевидно равно  $\beta$ . Напряжение после первой ячейки

$$U_1 = U_0 - \beta U_0 = U_0 (1 - \beta).$$

Множитель  $(1 - \beta)$  связывает напряжения после и до любой ячейки и поэтому можем записать напряжение после  $k$ -ой ячейки:

$$U_k = U_0 (1 - \beta)^k, \quad (\text{П6})$$

где  $\beta$  определяется выражением (П5). Можем определить также закон изменения падений напряжения на продольных емкостях.

$$\Delta U_k = \beta U_{k-1} = \beta \cdot U_0 (1 - \beta)^{k-1} = \Delta U_1 (1 - \beta)^{k-1}$$

или  $\Delta U_k = \Delta U_1 (1 - \beta)^{k-1} \quad (\text{П7})$

Полученные соотношения являются справедливыми для бесконечных цепей с равными продольными и поперечными емкостями при любом соотношении между ними.

### Цепь конечной длины

Рассмотрим цепь, состоящую из  $N$  ячеек, закороченную на конце (рис. П3).

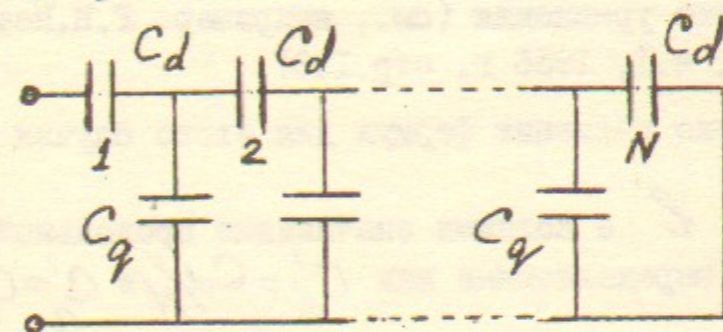


Рис. П3

Опуская громоздкие выкладки, проведем решение для этого случая.

$$U_k = U_0 (1 - \beta)^k \cdot \psi(k) \cdot A, \quad (\text{П8})$$

где  $\beta$  определяется, как и для бесконечной цепи, по формуле (П5),

$$\psi(k) = \frac{1 - (1 - \beta)^{2(N-k)}}{(C'_{bx} + C_q)(1 - \beta)^{2(N-k)} + C'_{bx}} \quad (\text{П9})$$

$$A = \frac{(C'_{bx} + C_q)(1-\beta)^{2N} + C'_{bx}}{1 - (1-\beta)^{2N}} = C'_{bx} \quad (\text{П10})$$

В (П9) и (П10)  $C'_{bx}$  - входная емкость для бесконечной цепи с такими же  $C_d$  и  $C_q$ , определяемая из (П2). Входная емкость цепи конечной длины определяется выражением (П10). При  $N \rightarrow \infty$  (П8) переходит в (П7).

В литературе, посвященной перенапряжениям в электрических машинах и трансформаторах, рассматривается важный частный случай, когда при большом количестве ячеек и  $C_d \gg C_q$  падения напряжения на I-ой и соответственно на следующих емкостях  $C_d$  малые, т.е. много меньше приложенного напряжения, и можно получить формулы для распределения напряжения вдоль цепи из решения дифференциального уравнения (см., например, Г.Н.Петров, Электрические машины, ч. I, 1956 г. стр.156).

Приведем несколько полезных формул для этого случая (мелкие ячейки).

Для цепи длиной  $l$  с полными значениями продольной и поперечной емкостей, определяемыми как  $C'_d = C_d/N$  и  $C'_q = C_q \cdot N$ ,

$$U_x = U_0 \frac{\text{Sh}(\alpha x)}{\text{Sh} \alpha} \quad (\text{П11})$$

причем  $l$  принята за 1,  $x$  отсчитывается от конца,

$$\alpha = \sqrt{C'_q / C'_d} \quad (\text{П12})$$

Другая форма той же, что и (П11), формулы:

$$U_z = U_0 \frac{\text{Sh}[\alpha_0(l-z)]}{\text{Sh}(\alpha_0 l)} \quad (\text{П13})$$

причем в этой формуле  $z$  отсчитывается от начала цепи,  $l$  и  $z$  - в м,

$$\alpha_0 = \sqrt{C_{q0} / C_{d0}} \quad (\text{П14})$$

где  $C_{q0}$  и  $C_{d0}$  емкости на 1 м длины, определяемые аналогично  $C'_q$  и  $C'_d$ . Если рассмотреть частный случай, когда  $l \rightarrow \infty$ , получим для бесконечной цепи

$$U_z = U_0 \cdot e^{-\alpha_0 z} \quad (\text{П15})$$

В заключение отметим, что все формулы для мелкоячейстых цепей могут быть получены и из общих формул (П6 и П8).

ЛИТЕРАТУРА

- I. I.I.Glazkov, G.S.Krainov, I.V.Kazaresov, E.N.Kokin, G.I.Kuznetsov, P.T.Nadtochii, V.M.Radchenko, N.I.Saputin, A.F.Serov, V.V.Shirokov, S.B.Vasserman, V.A.Vedernikov, B.I.Yastreba, G.I.Yasnov. High Voltage Pulsed Electron Generator ELIT-3A. Доклад на III Международной конференции по мощным электронным и ионным пучкам 1979 г., т.1, 208, Новосибирск, 1979. Также - Препринт ИЯФ 79-III, Новосибирск, 1979.
2. Г.И.Будкер и др. Источник позитронов для накопителя ВЭШ-4. Доклад на V Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1979. Труды совещания, т.1, 280, Москва, 1977.
3. С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, В.Ф.Куценко, В.М.Радченко, Н.Г.Хавин, Б.И.Ястреба. Высоковольтные импульсные ускорители электронов Института ядерной физики (Новосибирск) для промышленных и экспериментальных целей. Доклад на IV Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц 1974 г. Труды совещания, т.1, 285, 1977.
4. С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин, В.М.Радченко. Высоковольтный емкостной импульсный накопитель энергии, Препринт ИЯФ 80-219, Новосибирск, 1980.
5. R.G.Herb, IEEE Trans. NS-18, 71 (1979).
6. H.R.McK. Hyder et al. Revue de Physique Appliquée, N 10, 1331 (1977).
7. T.Joy, The Development of High Gradient, High Vacuum Accelerator Tubes at Daresbury, Preprint of Daresbury Lab., DL, NUC/P 132A (1981).
8. D.A.Eastham et al. Voltage Tests of the Daresbury Ceramic Tube Submodule. Доклад на VII Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме, Новосибирск, 1976, стр.395.
9. С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов, Е.И.Похлебенни, В.В.Широков. Керамическая ускорительная трубка усовершенствованной конструкции, ПТЭ, № 5, 27 (1976).
10. S.B.Vasserman, I.V.Kazaresov, E.I.Pokhlebenin, V.M.Radchenko, N.I.Saputin, N.R.Skorodumov, V.V.Shirokov. Vacuum Tubes for ELIT Type High Voltage Pulse Accelerators. Доклад на VII Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме, Новосибирск, 1976, стр.366.
11. Н.М.Павлушкин и др., Стекло. Справочник. М., Стройиздат, 1973.
12. Г.В.Бургановская и др., Действие излучений на неорганические стекла. М., 1968.
13. А.В.Арефьев, Уплотнение индием разъемных соединений сверхвысоковакуумных систем, ПТЭ, № 4, 138 (1964).
14. В.Е.Балакин, Ю.Г.Бамбуров, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, И.В.Казарезов, Е.Н.Кокин, Г.И.Кузнецов, В.Ф.Куценко, Н.Г.Хавин, Г.И.Яснор. Генератор электронного пучка для макета СВЧ-генератора ВЛЭШа. Доклад на VI Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям, Харьков, июнь, 1981.
15. С.С.Солнцев, Е.М.Морозов, Разрушение стекла. М., "Машиностроение", 1978.
16. С.Е.Рожков и др. Электронная техника, сер.16, "Генераторные, модуляторные и рентгеновский приборы", №2, 81, (1968).
17. И.Н.Сливков, Электроизоляция и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1972.
18. R.J. Van de Graaf et al. Nature, 195, 1292 (1962).
19. Ю.Г.Бамбуров, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, В.Ф.Куценко, Н.Г.Хавин, Б.И.Ястреба. Импульсный ускоритель электронов ЭЛИТ-1Б, "Атомная энергия", 40, вып.4, 308, 1976.
20. А.Т.Попов и др. О тренировке электродов пробоем в вакууме, ЖТФ, XL, 325 (1970).
21. Н.Ф.Олендзская и М.А.Сальман. Временные характеристики электрического пробоя в вакууме, ЖТФ, XL, 333 (1970).
22. Д.И.Проскуровский и В.Ф.Пучкарев, ЖТФ, 49, 2611 (1979).
23. И.Н.Лебедев и И.П.Скальская, ЖТФ, 32, 375 (1962).

## СОДЕРЖАНИЕ

24. В.М.Радченко, диссертация (готовится к защите).
25. Г.А.Месяц, Г.К.Карцев, В.П.Ротштейн, Г.Н.Фурсей, ЖТФ, 40, 1551 (1970).
26. Ю.Е.Крейндель, Плазменные источники электронов. М., Атомиздат, 1977.
27. Н.А.Капцов, Электрические явления в газах и вакууме. М.-Л., 1950.
28. А.И.Акишин, Ионная бомбардировка в вакууме. М.-Л., 1963.
29. А.С.Калинин и др. Автоматизированное управление и контроль источника позитронов для накопителя ВЭШ-4. Доклад на VI Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978.

1. ВВЕДЕНИЕ .....	3
2. КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ .....	4
2.1. Общая компоновка и размеры .....	4
2.2. Основные материалы трубки; соединение изоляторов с электродами .....	6
2.3. Конструкция модулей трубки .....	II
2.3.1. Тепловой режим .....	II
2.3.2. Механические напряжения .....	14
2.3.3. Выбор вакуумных зазоров .....	16
2.4. Защитные разрядники .....	17
2.5. Магнитные линзы .....	17
2.6. Вакуумная система .....	18
3. РАБОТА УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	19
3.1. Подготовка трубки к работе .....	19
3.1.1. Получение вакуума .....	19
3.1.2. Тренировка трубки .....	20
3.2. Процессы в ускорительной трубке при нормальной работе .....	21
3.2.1. Обсуждение некоторых эффектов .....	22
3.2.2. Пробои зазоров между электродами. Обсуждение возможных причин и механизмов; статистика .....	24
3.3. Процессы, происходящие в трубке в результате пробоя вакуумного зазора .....	33
3.3.1. Перенапряжение на секциях трубки .....	33
3.3.2. Ухудшение вакуума .....	36
3.3.3. Появление дополнительных токов заряженных частиц ("бород") в канале трубки .....	36
3.3.4. Возможность возникновения газового разряда в трубке .....	39
3.4. Контроль и защита ускорительной трубки в эксплуатации .....	40
3.4.1. Измерения .....	40
3.4.2. Защита .....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	51
ЛИТЕРАТУРА .....	56

С.Б.Вассерман, И.И.Глазков, В.М.Радченко,  
Н.И.Сапутин, В.В.Широков

УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА ЭЛИТ-ЗА  
(конструкция и работа)

Препринт  
№ 83- III

Работа поступила - 31 августа 1983 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов  
Подписано к печати 14.09-1983 г. МН 03350  
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.3,3 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № III.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90