

34

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов, В.Г.Черепков

# УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 45

Новосибирск

## УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА

Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов, В.Г.Черепков

### А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описывается конструкция ускорительной трубки на напряжение до 1,5 МВ при напряженности 1,0 МВ/м. Экспериментально показано, что поток электронов  $\sim 10^{-4}$  мкА/см<sup>2</sup> достаточно быстро заряжает керамику и вызывает пробой изолятора. Показано, что электрическая прочность ускорительной трубки определенным образом зависит от конфигурации электрического поля отрицательного края трубки формирующей поток вторичных частиц. Найдена оптимальная конфигурация этого поля. Приводятся результаты испытаний трубки в ускорителе ЭМВ-2.

Существующая конструкция ускорительных трубок ускорителей серии ЭЛВ /1,2/ имеет ряд недостатков. К ним в первую очередь относятся высокая трудоемкость и сложность изготовления и ремонта. Рост числа ускорителей, поставляемых Институтом, потребовал удешевления и упрощения технологии изготовления трубок. Именно с этой целью в конце 1977 г. была начата работа по созданию ускорительной трубки упрощенной конструкции.

Ниже приводятся результаты, полученные в ходе работы над трубкой, которые являются общими как для трубок ускорителей серии ЭЛВ, так и для трубок других типов ускорителей прямого действия. Из них наиболее существенные следующие:

1. Высокие пробивные напряженности на отдельных зазорах при сравнительно простой и дешевой заделке электродов в керамику;
2. Прямое наблюдение эффекта заряда вакуумной поверхности керамики электронами;
3. Некоторое понимание зависимости электрической прочности ускорительной трубки от конфигурации электрического поля вблизи крайних электродов;
4. Результаты испытания трубки с пучком при различных материалах мишени.

Схема ускорительной трубки показана на рис.1.

Управляющий электрод 1 и катод 5 образуют электронную пушку Пирса. Ток пучка регулируется изменением потенциала управляющего электрода. Экранирующий электрод 2 служит для того, чтобы при изменении потенциала управляющего электрода не изменялась конфигурация поля между электродами 2 и 3. Ускорительная трубка конструктивно встроена в высоковольтную колонну выпрямителя ЭЛВ, где имеется переменное магнитное поле напряженностью до 100 эрстед и частотой 400 Гц. Чтобы избежать нагрева элементов пушки и её фланцев вихревыми токами, верхняя часть ускорительной трубки заэкранирована короткозамкнутым кольцом 6. Остальная часть ускорительной трубки от магнитного поля не экранируется. Для равномерного распределения потенциала вдоль вакуумной поверхности изолятора 7 в пазы керамической трубы с шагом 20 мм вставлены металлические электроды. Ширина электродов составляет 30 мм. Равномерное распределение напряжения по электродам задается омическим делителем, расположенным на внешней стороне изолято-

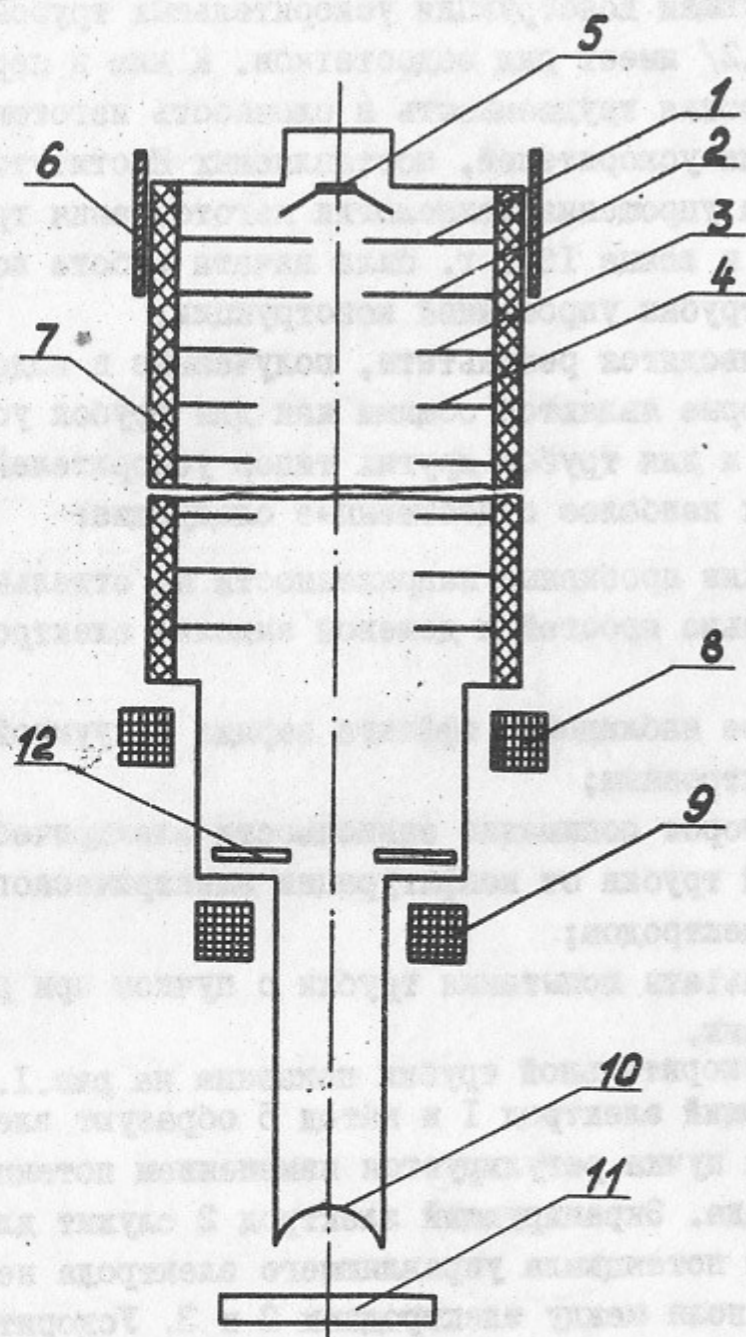


Рис.1. Схема ускорительной трубки и системы выпуска электронов в атмосферу.

1 - управляющий электрод, 2 - экранирующий электрод, 3,4 - электроды ускорительной трубки, 5 - катод, 6 - короткозамкнутое кольцо, 7 - изолятор трубки (керамика), 8 - магнитная линза, 9 - отклоняющие электромагниты, 10 - фольга, 11 - мишень, 12 - диафрагма.

ра и соединенного с электродами через отверстия в керамике диаметром 2 мм.

Ускорительная трубка собирается из одинаковых модулей длиной 300 мм. Стыки кусков герметизируются резиновыми уплотнениями, расположенными на внешней стороне изолятора. Внутренний диаметр керамики составляет 180 мм, диаметр апертуры трубки - 120 мм.

На выходе ускорительной трубки имеется магнитная линза с регулируемым фокусным расстоянием. Отклоняющие электромагниты 9 служат для равномерного распределения тока по поверхности фольги 10. Размеры выпускного окна - 70x980 мм. Вакуум  $\sim 10^{-6}$  торр обеспечивается двумя магниторазрядными насосами со скоростью откачки 2x250 л/с. Пучок поглощается в мишени II из различных материалов. Диафрагма 12 служит для определения положения и размеров пучка, а также для измерения токов текущих во внутреннем пространстве трубки.

#### ЗАДЕЛКА ЭЛЕКТРОДОВ В КЕРАМИКУ

При установке металлических электродов в изоляторы ускорительных трубок определяющим является место контакта металл-изолятор. Различные авторы по-разному решают эту проблему. До настоящего времени в ускорительных трубках, разработанных А.А.Авдженко [3] для ускорителей серии ЭЛВ, электроды из сплава В-95 "вмораживались" в керамическую трубу. Нами был выбран вариант заделки, когда вообще отсутствует прямой контакт металла с керамикой. Для этой цели на внешнюю кромку металлического электрода, изготовленного из листа стали Х16Н9Т толщиной 1 мм, одеваются разрезанная по образующей фторопластовая трубка диаметром 2 мм. Внешний диаметр электрода составляет 181 мм. Электрод имеет форму кольца, разрезанного по радиусу. В пазах керамики электроды держатся за счет собственной упругости.

Испытания отдельных зазоров, описанной выше конструкции, показали, что они надежно выдерживают градиенты потенциала до 30 кВ/см без пробоев в течение часа. Кратковременно можно поднимать напряженность до 50 кВ/см. Испытывались секции трубки с

величиной зазора между электродами 10, 20 и 40 мм. Изолятор трубки был изготовлен из керамики марки УФ-46. Особое внимание уделялось вопросу: не снижают ли пробой между электродами электрическую прочность секций, т.к. пробой в ускорителе неизбежны. Оказалось, что после многих десятков пробоев на повышенном напряжении прочность остается не ниже 30 кВ/см. Прочность зазоров, в которых используется описанная выше заделка вдвое выше по сравнению с вариантом "вмораживания" при трудоемкости в 2-3 раза ниже.

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИКИ

В ходе работы над ускорительной трубкой нами были использованы электроды в виде проволоки диаметром 2 мм, утопленные в канавки керамики глубиной 5 мм и расположенные по изолятору с шагом 40 мм. Таким образом, в этом варианте вакуумная поверхность керамики была полностью открыта для электронов, рассеянных из пучка или отраженных от мишени.

При пропускании тока по такой ускорительной трубке наблюдались отклонения пучка от оси системы. Отклонения носили скачкообразный характер. Амплитуда отклонений росла со временем, причем скорость роста зависела от условий прохождения пучка в области от нижнего края трубки до мишени. Если пучок в начале эксперимента идет по оси системы и не касается стенок выпускного устройства, то при токе  $I \approx 3$  мА отклонение достигает 3 см на выходе из трубки через время порядка 10 мин. Если же весь ток величиной 0,1 мА направить на медную диафрагму 12 (см. рис. 1) то пучок отклоняется от оси трубки на те же 3 см за  $I \approx 2$  мин.

Эти отклонения естественно объяснить появлением поперечного электрического поля  $E_{\perp}$  в ускорительной трубке. Оно вызывается неоднородным азимутальным распределением зарядов, накапливающихся на вакуумной поверхности керамики. Максимальная величина поперечного электрического поля, наблюдавшаяся нами составляла  $E_{\perp} \sim 0,1$   $E_{\parallel} \sim 1$  кВ/см. Дальнейший рост  $E_{\perp}$  приводит к прямому попаданию пучка на керамику и пробой трубки. Оценка величины тока, который отражаясь от мишени или диафрагмы и по-

падая в трубку, может заряжать керамику, дает величину  $I \sim 0,1$  мкА. Для возникновения указанных выше  $E_{\perp} \sim 1$  кВ/см в нашей геометрии требуется зарядить поверхность керамики до потенциалов  $\sim 10^5$  В. Зная емкость керамики на электроды, можно оценить время за которое она зарядится до указанного потенциала  $\sim 10^5$  В. Это время оказывается порядка нескольких минут, что согласуется с наблюдаемым.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что токи  $\sim 10^{-4}$  мкА/см<sup>2</sup> могут зарядить керамику до высоких напряженностей. При этом удельное сопротивление керамики не ниже  $10^{14}$  ом·см.

Явление зарядки явилось причиной того, что электроды в трубке делаются в виде широких колец, которые экранируют пучок от неравномерного распределения потенциала на поверхности керамики.

Другой эффект наблюдавшийся при работе с трубкой, в которой внутренняя поверхность керамики была не экранирована электродами, состоял в появлении электронов на выходе из трубки при подъеме на ней напряжения. При каждом подъеме напряжения на диафрагме регистрировался ток, величина которого была пропорциональна скорости подъема напряжения. Полный заряд, который попадал на диафрагму, был пропорционален конечному напряжению, поднятому на трубке и составлял  $\sim 10^{-9}$  К/кВ. Тот факт, что этот эффект полностью исчез, когда в трубку были вставлены экранирующие электроды, говорит о том, что источником электронов являлась поверхность керамики. Отсюда можно сделать вывод о том, что то распределение потенциала, которое задается электродами не является равновесным. Равновесное распределение устанавливается лишь после протекания некоторого тока из поверхности керамики.

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТРУБКИ

Известно, что на ускорительных трубках и при отсутствии пучка наблюдается эффект "полного напряжения", проявляющийся в том, что электрическая прочность трубки растет непропорционально увеличению её длины. Этот эффект проверялся нами на трубке с

магнитной фокусировкой пучка и с диаметром апертуры 20 мм [4]. У этой трубки при  $E = 10$  кВ/см до полного напряжения 1,5 МВ эффект "полного напряжения" отсутствовал, т.е. прочность трубки росла пропорционально длине и определялась прочностью самого слабого зазора.

В описываемой нами конструкции диаметр отверстия в электродах существенно больше и здесь эффект "полного напряжения" мог бы проявиться. Поэтому мы последовательно проверяли прочность трубки, начиная с длины равной 300 мм.

Таблица I

$L$ мм	300	600	900	1200	1500
$U$ кВ	500	900	1200	800	800

В таблице I указаны напряжения на трубке длиной  $L$ , которые она выдерживает без пробоев в течение времени не менее одного часа. Естественно, что кратковременно на трубку можно подавать и большие напряжения.

Как видно из таблицы I трубки длиной 1200 и 1500 мм имеют меньшую прочность чем трубка длиной 900 мм. Этот эффект многократно проверялся. Причем каждый из модулей длиной 300 мм проверялся на напряжениях не ниже 400 кВ. Как видим, здесь электрическая прочность снизилась не из-за полного напряжения  $U$  на трубке, а из-за роста длины  $L$ . Поэтому наблюдаемый эффект естественно назвать "эффектом полной длины". Нами было предположено, что причиной снижения электрической прочности является попадание отрицательных частиц, эмитируемых с электрода 2 (рис. I), на нижние электроды. В этом случае с ростом длины доля частиц, попадающих на электроды растет, а прочность снижается. В этом случае естественно ожидать, что выбором правильной конфигурации поля вблизи эмитирующей поверхности электрода 2 можно все частицы сфокусировать на выход трубки. Эксперименты, результаты которых приведены в таблице I, проводились при некотором, как выяснилось, не оптимальном распределении поля вблизи электрода 2. Чтобы понять как прочность трубки зависит от конфигурации поля и найти оптимальное распределение потенциала по электродам, нами был сделан следующий эксперимент.

Разность потенциалов  $U_{2-3}$  между электродами 2 и 3 (рис. I) регулировалась оперативно, не вскрывая ускоритель. Все остальные потенциалы на трубке при этом не изменились. Смотрелась зависимость пробивного напряжения на трубке длиной 150 см от  $U_{2-3}$ .

Эта зависимость показана на рис. 2. По оси абсцисс отложено отношение  $U_{2-3}$  к средней разности потенциалов между двумя электродами трубки  $\bar{U}$ , по оси ординат — пробивное напряжение трубки  $U_{пр}$ . Напряжения, подаваемые на трубку, ограничивались выпрямителем ЭЛВ-2 на уровне 2 МВ.

Как видно из рисунка 2, максимальная электрическая прочность достигается при  $U_{2-3}/\bar{U} = 0,6$ . Качественно это соответствует фокусировке частиц, вылетающих из электрода 2, на выходе из трубки.

Это наше предположение проверялось Н. Г. Хавиним численным счетом на ЭВМ [5]. Счет показал, что конфигурация поля в трубке при распределении потенциала  $U_{2-3}/\bar{U} = 0,6$  в точности соответствует фокусировке частиц в нижней части трубки, т.е. их наилучшему прохождению по каналу трубки.

Из результатов этого эксперимента и его согласия с расчетом можно сделать следующие выводы:

1. Для того чтобы ускорительная трубка имела высокую электрическую прочность необходимо, чтобы все частицы, которые могут родиться на высоковольтном электроде, покинули её не касаясь электродов.

2. При соблюдении условия (I) "эффект полного напряжения" отсутствует вплоть до 2 МВ.

Общепринятым считается, что чем меньше диаметр апертуры в трубке, тем выше её прочность. Возможно, что при очень малых диаметрах это так и есть. Но, если площадь оквзного канала не очень мала, то условие (I) трудно выполнить при малых диаметрах канала, т.к. диапазон допустимых геометрий электрического поля вверху трубки сужается как  $R/L$  и при малых  $R/L$  он может стать нулевым, особенно, если учесть начальные поперечные импульсы частиц, вылетающих сверху. Поэтому увеличение диаметра канала в некоторых случаях может способствовать увеличению электрической прочности ускорительной трубки.

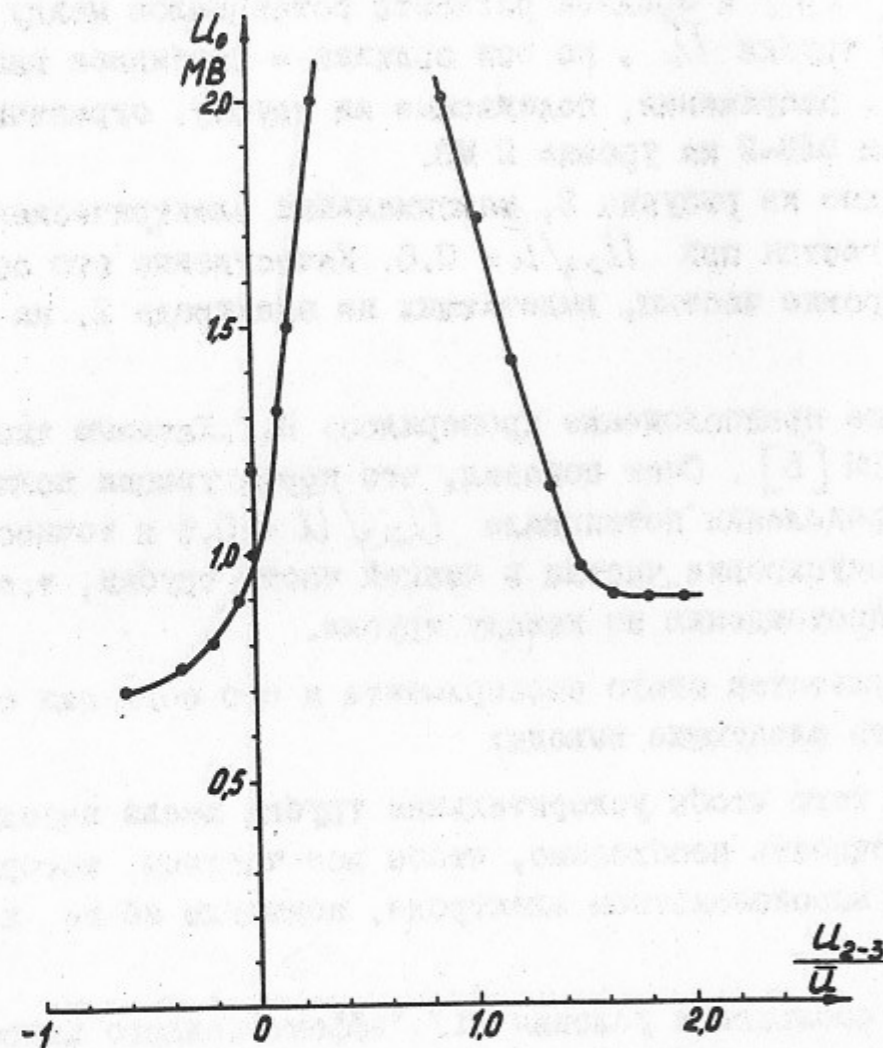


Рис. 2. Зависимость электрической прочности ускорительной трубки  $U_{пр}$  от отношения  $U_{2-3}/U$ .

Дальнейшие испытания трубки с пучком проводились при оптимальном отношении  $U_{2-3}/U = 0,6$ . Выше уже говорилось, что попадающие на керамику электроны заряжают её до высоких потенциалов. Это может приводить к пробоям по трубке. При наличии экранирующих электродов поперечные поля полностью экранируются, потоки электронов на керамику сильно уменьшаются, но не исчезают полностью. Основная часть электронов, способных зарядить керамику, идет из области мишени. Нами было замечено, что частота пробоев трубки, описываемой конструкции, при работе с пучком зависит от материала мишени. Чтобы получить достоверные результаты, нами были сделаны специальные испытания трубки в непрерывном режиме в течение более 100 часов при работе на различные мишени. При испытаниях энергия электронов в пучке составляла 1,5 МэВ, мощность пучка - 22 кВт. Результаты испытаний приведены в таблице 2, где указаны среднее время между пробоями и среднеквадратичный разброс.

Таблица 2.

материал мишени	Al	Cu	H <sub>2</sub> O <sup>100</sup>
интервал между пробоями в часах	3,7±1,1	1,2±0,7	6,5±2,3

На каждой мишени было не менее 10 пробоев. Материал мишени чередовался в том порядке как показано в таблице.

Из таблицы видно, что материал мишени сильно влияет на интервал между пробоями. Хотя мы думаем, что дело здесь в количестве отраженных от мишени электронов, но не исключено, что пробой могут вызываться также и тормозным излучением, которое также возрастает с увеличением заряда ядер материала мишени. Этот вопрос предполагается проверить в будущем.

При эксплуатации ускорителей в технологических линиях материал мишени по заряду ядра обычно близок к воде. Поэтому мы считаем, что полученная частота пробоев около одного в смену вполне удовлетворительна.

В заключение авторы выражают благодарность академику А.Н.Скринскому и зав.лаб. В.Е.Балакину за интерес к работе.

## Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И. и др. Ускоритель электронов ЭЛВ-1 для промышленного использования. Атомная энергия, том 40, вып. 3 стр.216.
2. Ауслендер В.Л., Салимов Р.А. Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства. Атомная энергия 1978 г., том 44, вып.5, стр.403.
3. Авдненко А.А. и др. "Промышленные ускорители электронов типа ЭЛВ". Препринт ИЯФ 76-108, Новосибирск 1976.
4. Н.К.Куксанов. Разработка мощных ускорителей непрерывного действия для применения в радиационной технике. Диссертация Новосибирск 1976.
5. В.Я.Иванов, Н.Г.Хавин . Численный метод расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. Препринт ИЯФ 77-114, Новосибирск 1977.



1. Юнко В.А. и др. Устройства электродов СВЧ для плазмы  
и их характеристики. Доклад на семинаре, том 40, стр. 118.

2. Юнко В.А., Сидоров В.А. Устройства электродов СВЧ  
для плазмы. Доклад на семинаре, том 40, стр. 118.

3. Юнко В.А. и др. Устройства электродов СВЧ для плазмы  
и их характеристики. Доклад на семинаре, том 40, стр. 118.

4. Юнко В.А. и др. Устройства электродов СВЧ для плазмы  
и их характеристики. Доклад на семинаре, том 40, стр. 118.

5. Юнко В.А. и др. Устройства электродов СВЧ для плазмы  
и их характеристики. Доклад на семинаре, том 40, стр. 118.

Работа поступила - 31 мая 1979 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ  
Подписано к печати 7.06.1979г. МН 02851  
Усл. 0,7 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно  
Заказ № 45

---

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР