

И Н С Т И Т У Т
Я Д Е Р Н О Й Ф И З И К И С О А Н С С С Р

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 108

*На доп. работе
о сов. эк. помощи
22/04-78*

А.А.Авдиенко, Г.И.Будкер, В.А.Гапонов,
Н.Ф.Гончаров, В.И.Кондратьев, Б.М.Корабельников
Г.С.Крайнов, С.А.Кузнецов, Н.К.Куксанов,
Р.А.Салимов, В.Г.Черепков, А.Н.Шарапа

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ
ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ЭЛВ**

Новосибирск

1976

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Препринт

А.А.Авдменко, Г.И.Будкер, В.А.Гапонов, Н.Ф.Гон-
чаров, В.И.Кондратьев, Б.М.Корабельников, Г.С.Край-
нов, С.А.Кузнецов, Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов,
В.Г.Черепков, А.Н.Шарапа

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ЭЛВ

Новосибирск
1976

ГЕНЕРАТОР УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Генератором ускоряющего напряжения установок типа ЭЛВ является секционированный высоковольтный выпрямитель на основе трансформатора (рис. 1, 2). Полное ускоряющее напряжение выпрямителя складывается из напряжения отдельных выпрямительных секций. Напряжение каждой выпрямительной секции получается преобразованием переменного напряжения вторичной обмотки в постоянное по схеме с удвоением. Рабочая частота трансформатора около 400 Гц. Первичной обмоткой трансформатора служит охлаждаемый водой соленоид из 30 витков. Высоты первичных обмоток ЭЛВ-1 и ЭЛВ-2 — 130 и 170 см соответственно. Между первичной обмоткой и котлом ускорителя помещается цилиндрический магнитопровод, который экранирует котел от переменного поля. Вторичной обмоткой трансформатора служат отдельные монолитные катушки, которые имеют по 3130 витков провода диаметром 0,35 мм. Катушка вторичной обмотки и смонтированная во внутреннем пространстве ее выпрямительная схема представляют собой отдельную конструктивную единицу — выпрямительную секцию.

Схема и вид выпрямительной секции показаны на рис. 3 и 4. Основанием секции, на котором устанавливаются все ее элементы, служит внутренний экран катушки. К нему прикреплены три опоры из стеклотекстолита, которые позволяют ставить секции друг на друга. В качестве выпрямительных элементов секции служат два диодных плеча. Плечо состоит из девяти выпрямительных столбов типа Д 1008. Фильтрующими емкостями секции являются конденсаторы КИ5-10 с емкостью 10000 пф. В секции ЭЛВ-1 блок фильтрующих емкостей состоит из 4-х конденсаторов К-15-10, соединенных последовательно — параллельно, в секции ЭЛВ-2 блок состоит из двух конденсаторов.

Для повышения электрической прочности внешней поверхности конденсатора КИ5-10 в газе эта поверхность покрывается слоем эпоксидного компаунда толщиной 0,5 мм. Слой компаунда

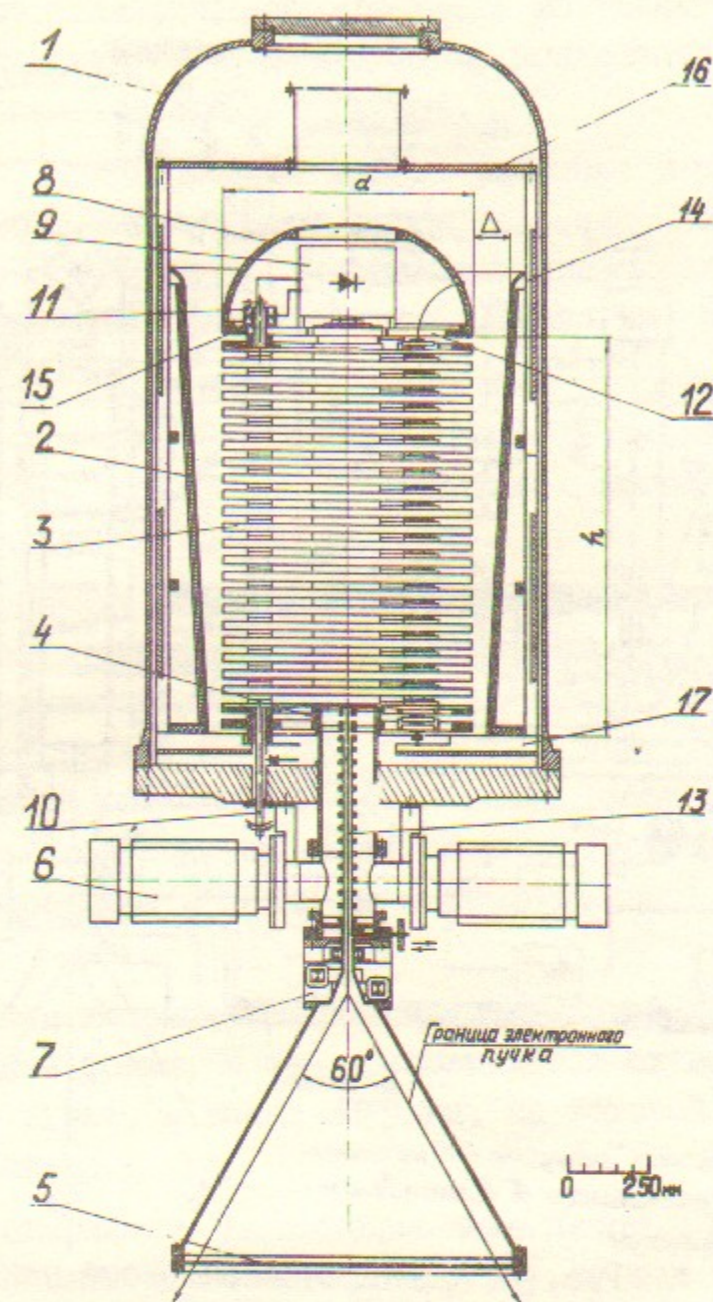
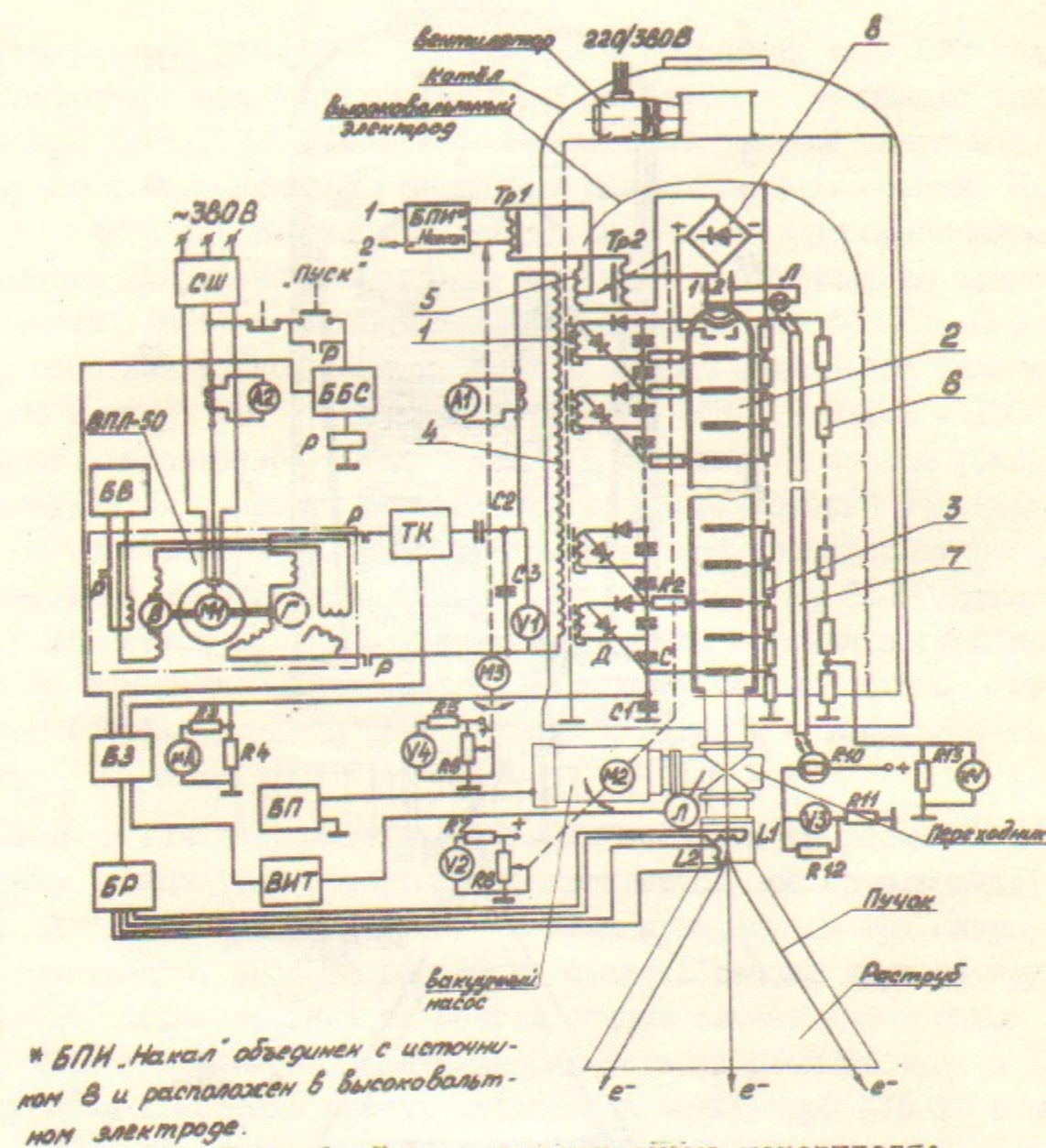


Рис. 1. Конструкция ускорителя ЭЛВ-1:

1 — котёл; 2 — первичная обмотка; 3 — выпрямительная секция; 4 — ускорительная трубка; 5 — фольга выпускного окна; 6 — вакуумные насосы; 7 — отклоняющие электромагниты; 8 — высоковольтный электрод; 9 — блок управления инжектором; 10 — вал управления; 11 — автотрансформатор; 12 — основание высоковольтного электрода; 13 — электропровод; 14 — магнитопровод; 15 — катушка питания; 16 — экран; 17 — дисковый магнитопровод;



* БПН "Накал" объединен с источником В и расположен в высоковольтном электроде.

Рис. 2. Электрическая схема ускорителя:

- 1 - выпрямительная секция; 2 - ускорительная трубка; 3 - делитель трубки; 4 - первичная обмотка; 5 - катушка питания; 6 - измерительный делитель; 7 - световод; 8 - источник анодного напряжения; БЗ - блок защиты; БР - блок разверток; ВПЛ-50 - преобразователь; ББС - блок блокировок и сигнализации; БВ - блок возбуждения; БП - блок питания насоса; ВИТ - вакуумметр; СШ - силовой шкаф; ТК - тиристорный ключ.

не только повышает электрическую прочность конденсатора, но и на нем не остается дорожки от пробоя. Поэтому конденсатор не снижает своей прочности после случайного пробоя.

Все элементы выпрямительной секции работают в переменном магнитном поле. Опыт эксплуатации высоковольтного выпрямителя показал, что переменное поле при номинальных индукциях порядка 60 Гс (400 гц) не оказывает существенного влияния на их работу.

Сложенные друг на друга секции образуют выпрямительную колонну. Колонна ускорителя ЭЛВ-1 состоит из 24 секций с шагом 50 мм. Колонна ЭЛВ-2 собрана из 37/и секций с шагом 42 мм. В колонне секции соединяются последовательно.

Из-за зазора между первичной обмоткой и выпрямительной колонной, а также из-за отсутствия в ней сердечника, распределение отдельных секций на колонне неравномерное и зависит от величины нагрузки. Напряжение спадает к концам колонны и имеет максимум примерно по середине. При оптимальном соотношении высот первичной обмотки и выпрямительной колонны неравномерность составляет около 10% от среднего значения и почти не меняется вплоть до номинальной нагрузки.

Выпрямительная колонна заканчивается высоковольтным электродом полусферической формы. В нем располагаются схемы накала катода, управления током пучка, а также катушка, на которой индуктируется напряжение их питания.

Генератор ускоряющего напряжения помещается в герметичный котел, который наполняется элегазом (SF_6) под давлением до 6 ата для ускорителя ЭЛВ-1 и 12 ата для ЭЛВ-2.

Генератор ускоряющего напряжения ускорителя ЭЛВ-1 был успешно испытан повышенным напряжением 1,1 МВ в течении 10 часов. Аналогичное испытание при напряжении 1,8 МВ выдержал генератор ускоряющего напряжения ЭЛВ-2.

Ускоряющее напряжение измеряется при помощи омического делителя, собранного из сопротивлений типа КЭВ-1. Делитель ус-

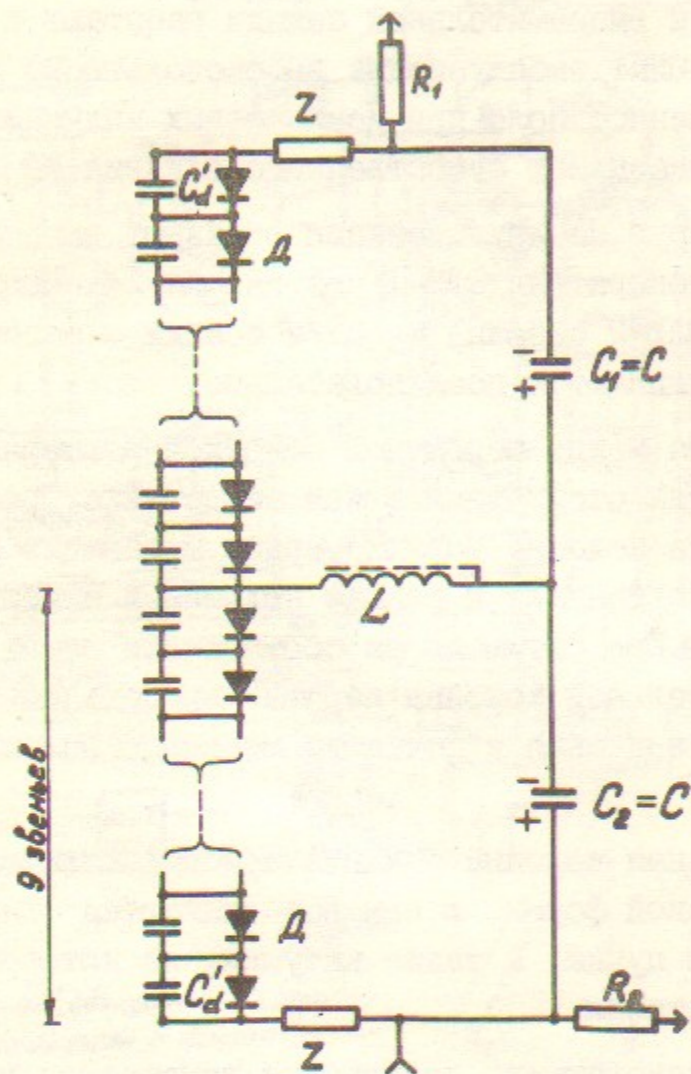


Рис. 3. Схема выпрямительной секции.

$C_1=C_2=C$ - фильтрующие емкости; Z - сопротивление дросселя; $Д$ - выпрямительный столб; R_1, R_2 - ограничительные сопротивления; C_α - шунтирующий конденсатор; L - катушка вторичной обмотки.

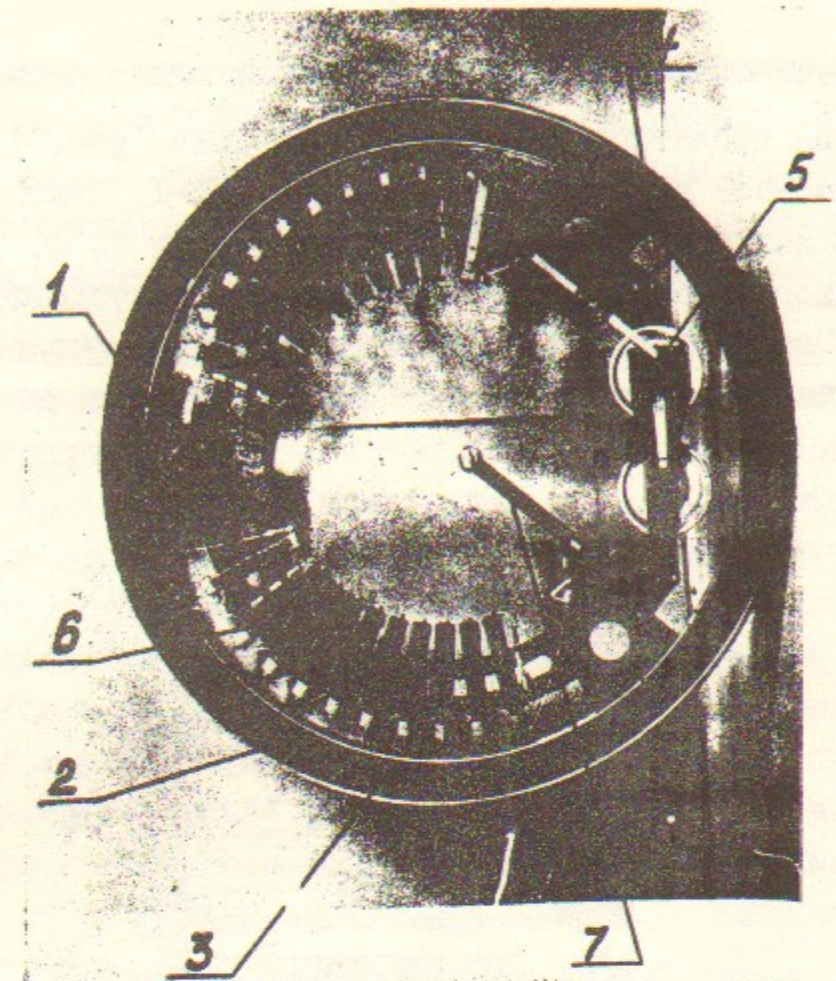


Рис. 4. Выпрямительная секция ЭЛВ-2:

1 - основание секции; 2 - катушка; 3 - наружный экран; 4 - провод; 5 - емкостной блок; 6 - диодное плечо; 7 - резистор R_2 .

танавливается внутри колонны рядом с ускорительной трубкой.

УСКОРИТЕЛЬНАЯ ТРУБКА

Ускорительная трубка в ускорителях типа ЭЛВ встроена в выпрямительную колонну. Верхний конец трубки закрыт фланцем, в котором устанавливается электронная пушка. Внизу ускорительная трубка оканчивается металлической горловиной, пропущенной через днище котла, и к которой присоединяется вакуумная система, состоящая из двух магнетронных насосов НМДО-025-1. Рабочий вакуум в ускорительной трубке составляет $\sim 10^{-6}$ мм рт.ст. Вакуумная система прикреплена к днищу котла ускорителя. Снизу к вакуумной системе под-

соединяется система выпуска ускоренных электронов в атмосферу.

Длина изолятора ускорительной трубки (рис.5) равна высоте выпрямительной колонны ($H=120$ см для ЭЛВ-1, $H=150$ см для ЭЛВ-2). Изолятор изготовлен из ультрафарфора марки УФ-46 [4]. Трубы необходимого размера из этого материала выпускаются промышленностью. Electroдами, расположенными внутри трубки, и кольцами, расположенными снаружи, изолятор разбит на секции с шагом 40 мм.

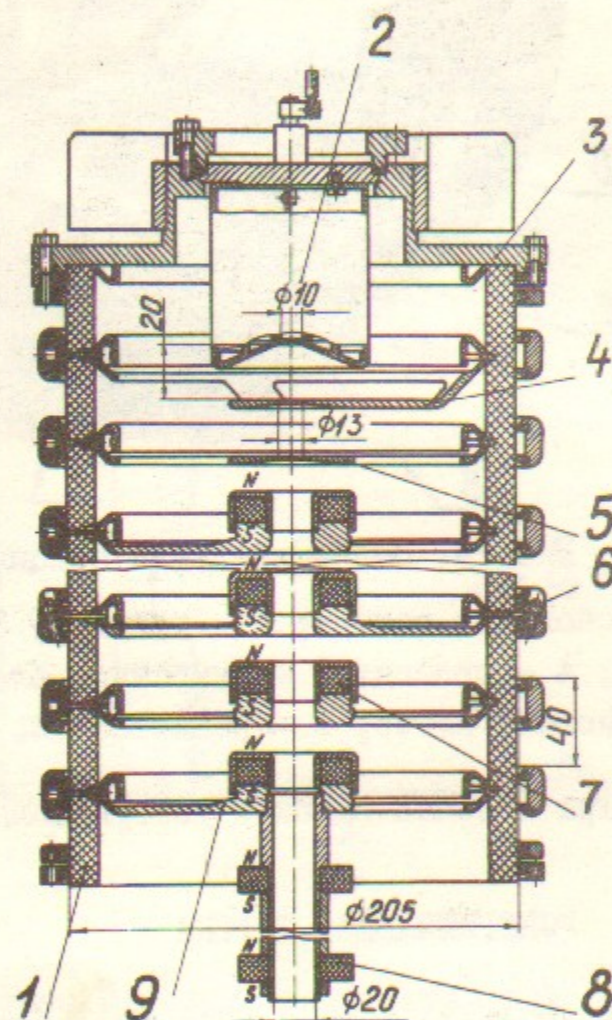


Рис. 5. Ускорительная трубка:

1 - изолятор; 2 - пушка; 3 - верхний фланец;
4 - первый анод; 5 - винт; 7 - постоянный магнит; 8 - канал МПФС.

Разнос потенциала по электродам осуществляется омическим делителем из резисторов типа КЭВ-1 с сопротивлением порядка 300 Мом на секцию. Ускорительная трубка через 4-5 секций подсоединяется к соответствующим секциям выпрямительной колонны с целью получения равномерного распределения напряжения по секциям трубки.

Для обеспечения надёжного, однородного и воспроизводимого контакта электрод-диэлектрик используется метод термической запрессовки электродов. Для того чтобы керамическая оболочка трубки не разрушилась при расширении электродов, последние выполнены в виде тарельчатых пружин с жесткостью много меньшей жесткости изолятора из ультрафарфора. Electroды изготовлены из алюминиевого сплава В95, а аноды межлинзовых зазоров, работающие при напряженности ~ 65 кВ/см - из нержавеющей стали Х18Н9Т. Использование в ускорительной трубке магнитных линз для фокусировки пучка осложнено возможностью горения разряда Пеннинга на одном из краёв линзы. Благодаря специальным мерам, принятым в конструкции магнитных линз, этот разряд не зажигается вплоть до вакуума $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. и межлинзового напряжения ~ 80 кВ.

Электрическая прочность каждой секции ускорительной трубки - 80 кВ в течении одного часа без пробоев. В ускорителе ЭЛВ-1 первые тренировочные пробои и заметное газоотделение у впервые поставленной трубки начинаются с напряжения на трубке в интервале от 350 кВ до 500 кВ. Рабочие параметры трубки достигаются тренировкой за время около 4-х часов при постепенном подъёме напряжения. В ускорителе ЭЛВ-2 тренировочные пробои начинаются с напряжения порядка 500 кВ. Время тренировки 5 часов. Электронно-оптическая система ускорительных трубок установок типа ЭЛВ состоит из электронной пушки, двух анодов и знакопеременной магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС). МПФС образовывается постоянными кольцевыми магнитами из феррита бария марки 2БА с размерами $D \times d \times h = 52 \times 23 \times 12$ мм. Магнитные линзы укрепляются на каждом электроде ускорительной трубки соосно друг другу. Апертура канала МПФС равна 21 мм. Период магнитного поля фокусирующей системы - 80 мм. Амплитуда поля на оси фокусирующей системы 800 Гс, а среднеквадратичная величина магнитного поля примерно равна 500 Гс.

Электронная пушка состоит из гексаборидлантанового катода диаметром 10 мм и двух анодов. Ток электронов определяется потенциалом первого электрода U_1 , по закону „трёх вторых“. Первонапуга составляет $\sim 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$. Потенциал U_1 регулируется автотрансформатором схемы, расположенной в высоковольтном электроде. Потенциал второго анода U_2 задается делителем трубки. Геометрия пучка на входе в канал МПФС определяется геометрией пушки и потенциалами U_1 и U_2 . Отношения потенциалов U_1/U_2 выбраны такими, чтобы обеспечить согласование пучка с каналом МПФС в интервале токов от 5 до 50 мА. Диаметр пучка на выходе из трубки в номинальном режиме около 10 мм.

Следует обратить внимание на две особенности работы ускорительной трубки. Это явление снижения эмиссионной способности (отравления) катода и влияния магнитного поля первичной обмотки на прохождение пучка.

Специально проведённое изучение снижения эмиссионной способности катода показало, что это нежелательное явление объясняется взаимодействием $LaBe$ с углеродосодержащими газами и парами.

Прогрев трубки и применение в качестве уплотнителей резины типа ИРП-2043 позволили избежать снижения эмиссии катода. Кроме того предотвратить снижение эмиссии при неблагоприятной атмосфере в трубке можно путём напуска углекислого газа CO_2 до давления $\sim 10^{-4}$ тор при нагретом катоде. Углекислый газ разрушает карбиды бора, забирая углерод, превращаясь в CO . Окись углерода откачивается потом вакуумными насосами. Такой способ удобен для предотвращения отравления катода в период обезгаживания вакуумной системы.

Второе явление связано с тем, что трубка помещена в переменное магнитное поле. От продольной составляющей переменного магнитного поля канал МПФС заэкранирован короткозамкнутыми электродами и кольцами трубки, но для поперечной составляющей экранировка почти отсутствует. Эта составляющая сильно зависит от соосности ускорительной трубки и первичной обмотки. Промеры поперечного переменного поля показали, что на оси трубки имеется поле с максимальной амплитудой около 2,0 Гс. Это поле необходимо

учитывать при расчёте фокусирующей системы ускорителей типа ЭЛВ.

СИСТЕМА ВЫПУСКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРУ

Для ускорителей типа ЭЛВ разработано две модификации выпуска, а именно: выпуск через фольгу и концентрированный выпуск. Выбор системы выпуска определяется технологическим процессом, в котором используется пучок электронов.

В концентрированном выпуске [5] сфокусированный пучок выходит в атмосферу через отверстие диаметром около 2 мм и расходится в воздухе с начальным углом $\leq \pm 2,5$ градуса. Выпуск через фольгу представляет собой коробку (раструб) из нержавеющей стали (см. рис.1). Толщина раструба около 70 мм. На вершине раструба имеет тонкие стенки и оканчивается верхним фланцем, который служит для стыковки раструба с вакуумной системой ускорителя. Под верхним фланцем располагаются отклоняющие электромагниты выпуска. Внизу раструба заканчивается прямоугольной формы выпускным окном, закрытым титановой фольгой толщиной 50 мкм. Окно может иметь размеры $980 \times 75 \text{ мм}^2$ и $1500 \times 70 \text{ мм}^2$. Для уменьшения механических напряжений фольге придается цилиндрическая форма с осью вдоль окна и выпуклостью в сторону вакуума. Потери энергии ускоренного электрона при прохождении им фольги в нашем случае всегда ≤ 50 КэВ. Тепло, выделяющееся в фольге, снимается струёй воздуха. Расход воздуха при номинальной мощности пучка составляет около $200 \text{ м}^3/\text{час}$.

На входе в выпуск пучок электронов имеет диаметр около 10 мм. По выпускному окну он рассредотачивается двумя электромагнитами, расположенными вне вакуума. В область прохождения пучка магнитное поле проникает через тонкие стенки раструба под верхним фланцем. Электромагниты питаются пилообразным током. Они заставляют пучок сканировать в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Частота сканирования вдоль окна 50 Гц, поперёк 1075 Гц. Изменением питающего тока зону облучения вдоль окна можно изменять в пределах от 1,5 м до 0,4 м. Наибольшая допустимая средняя плотность тока че-

рез фольгу составляет 200 мкА/см^2 . При этом фольга работает не менее 200 часов.

Выпуск через фольгу испытывался с пучком в течении 1500 часов без смены фольги при плотности тока $\leq 100 \text{ мкА/см}^2$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ

Упрощенная электрическая схема установки типа ЭЛВ показана на рис.2. Она одинакова для обеих модификаций ускорителей. В схеме имеются следующие блоки: силовой шкаф, "блок ВПЛ-50", конденсаторная батарея, пульт управления.

Ниже приводится краткое описание этих блоков.

Силовой шкаф питает всю установку напряжением 220/380 В, 50 Гц и обычно располагается рядом с пультом. От него напряжение подается на двигатель преобразователя ВПЛ-50. От генератора преобразователя напряжение частотой 400 гц через контакты магнитного пускателя, тиристорный ключ, и конденсаторную батарею подается на первичную обмотку ускорителя.

Конденсаторная батарея представляет собой две группы конденсаторов типа ЭСВ-08-24У3, включенных в цепь питания последовательно - параллельно. Она служит для согласования генератора ВПЛ-50 с высоковольтным выпрямителем. Величина емкости в обеих группах подбирается такой, чтобы при номинальной мощности электрического пучка напряжение и ток генератора ВПЛ-50 не превосходили своих номинальных значений.

Пульт управления имеет следующие функциональные блоки:

- 1) блокировок и сигнализации,
- 2) защиты,
- 3) разверток,
- 4) возбуждения.

Блок блокировок и сигнализации подготавливает цепь включения пускателя питания ускорителя и автоматически отключает его при размыкании контактов любой блокировки. На лицевую панель

блока выведена световая сигнализация о положении контактов отдельных блокировок.

Блок защиты служит для отключения питания за время около полупериода питающего напряжения 388 Гц. Он прекращает подачу управляющих на упоминавшийся выше тиристорный ключ в следующих аварийных ситуациях: при пробое в высоковольтной системе ускорителя, при ухудшении вакуума, при превышении некоторого уровня ускоряющего напряжения, при снижении давления в воздушной магистрали обдува фольги системы выпуска и др.

Блок разверток создает регулируемый пилообразный ток в катушках отклоняющих электромагнитов системы выпуска электронов в атмосферу, а также ^{содержит} два источника постоянного тока, которые предназначены для коррекции положения пучка относительно центра выпускного окна. На его передней панели расположены органы измерения и управления токами разверток и коррекции.

Регулировка энергии электронов осуществляется изменением первичного напряжения, которое в свою очередь регулируется изменением тока возбуждения генератора ВПЛ-50. В блоке возбуждения находятся схемы, позволяющие регулировать энергию ускоренных электронов в двух режимах: ручном - оператором с помощью ручки автотрансформатора, расположенного на пульте, и автоматическом - посредством отрицательной обратной связи по ускоряющему напряжению.

При ручном режиме оператору приходится ручкой автотрансформатора корректировать энергию электронов при любом изменении тока пучка. При автоматическом же режиме ему достаточно потенциометром на пульте задать уровень ускоряющего напряжения, который затем остается постоянным при любом токе пучка.

РАЗМЕЩЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ

Все оборудование ускорителя типа ЭЛВ размещается в четырех помещениях (рис.6):

- 1) генераторном зале,
- 2) технологическом зале,
- 3) пультовой,
- 4) электромашинном зале.

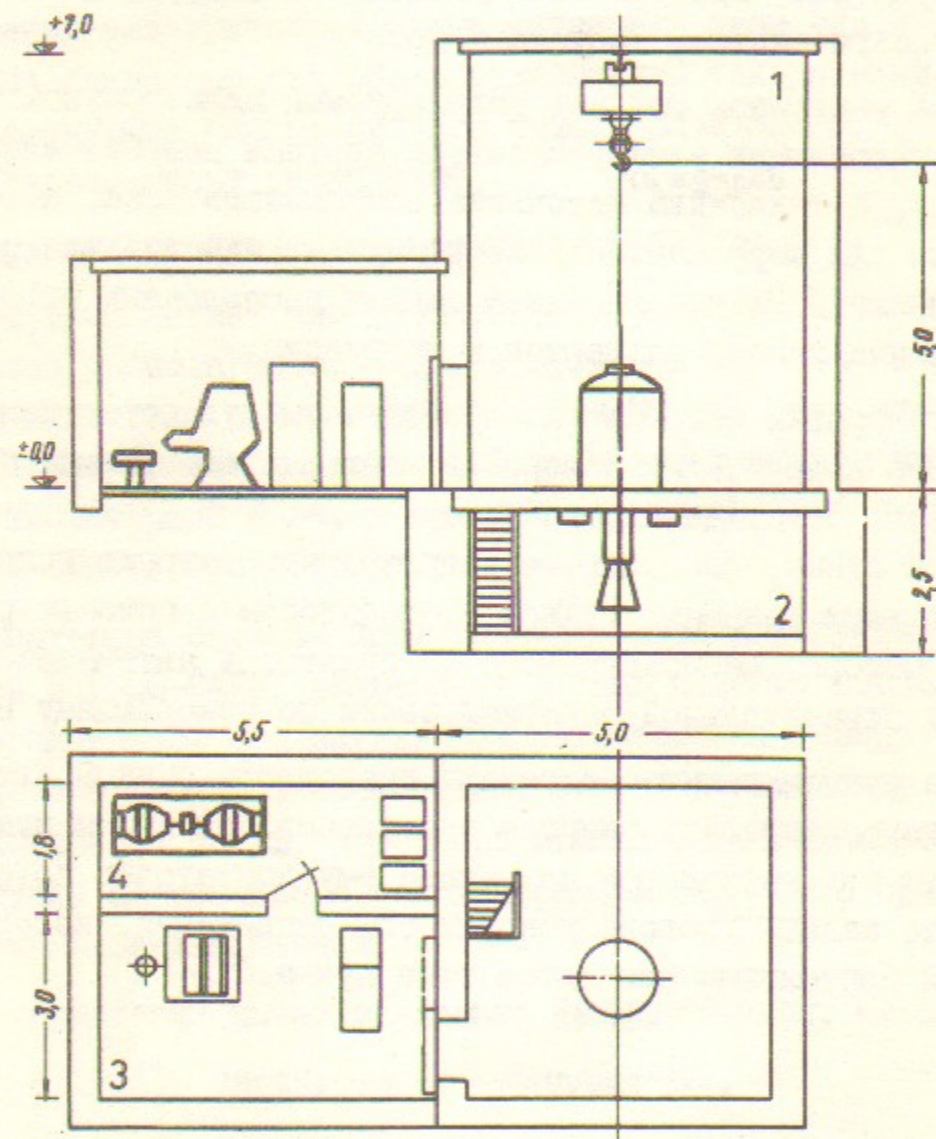


Рис. 6. План размещения ускорителя:

- 1 - генераторный зал; 2 - технологический зал;
3 - пультовая; 4 - электромашинный зал.

Ускоритель укрепляется в перекрытии между генераторным и технологическим залами. Технологический зал находится под генераторным залом. Рекомендуемые размеры генераторного зала в плане не менее 6х6 метров. Для монтажа и эксплуатации ускорителя генераторный зал должен быть оборудован краном с грузоподъемностью не менее 1 т и с предельной высотой крюка не менее 5,3 м от нижней плоскости основания ускорителя. Наиболее тяжелая деталь ускорителя весит 1 т.

В заключение авторы благодарят лаборантов ИЯФ СО АН СССР Губина М.И., Грачёва В.В., Образцова В.В., Балыкова Г.Ф., Дубука А.Ф., принимавших участие в запуске и наладке ускорителей типа ЭЛВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Материалы Всесоюзной конференции (3-5 сентября 1975г. Томск) стр. 134.
2. Будкер Г.И., Гапонов В.А., Корабельников Б.М., Крайнов Г.С., Кузнецов С.А., Куксанов Н.К., Кондратьев В.И., Салимов Р.А. Ускоритель электронов ЭЛВ-1 для промышленного использования. Атомная энергия, том 40, вып.3; стр.216.
3. Крайнов Г.С. Ускоритель электронов для прикладных целей (конструкция и расчёт). Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Институт ядерной физики Сибирского отделения, Новосибирск, 1975 г.
4. Г.А.Выдрик, Н.С.Костиков. Физико-химические основы и эксплуатации электрокерамики. "Энергия" Москва 1971 год.
5. Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Материалы Всесоюзной конференции (3-5 сентября 1975г. Томск) стр. 188.

Работа поступила - 7 июля 1976 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати - 18.XI-1976г. МН 03037
Усл. 1,1 печ.л., учетно-изд.л. 0,9.
Тираж 270 экз. Бесплатно
Заказ № 108.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР