

УДК 621.384.654

Ускоритель электронов ЭЛВ-1 для промышленного использования

БУДКЕР Г. И., ГАПОНОВ В. А., КОРАБЕЛЬНИКОВ Б. М., КРАЙНОВ Г. С., КУЗНЕЦОВ С. А.,
КУКСАНОВ Н. К., КОНДРАТЬЕВ В. И., САЛИМОВ Р. А.

Ускорители типа ЭЛВ разработаны Институтом ядерной физики СО АН СССР в 1971—1973 гг. и предназначены для широкого применения в народном хозяйстве в качестве мощных источников радиации. Головной образец ускорителя ЭЛВ-1 успешно прошел длительные испытания (несколько тысяч часов), рекомендован Межведомственной комиссией к промышленному применению и запущен в серийное производство.

Принцип действия и схема ускорителя. Ускоритель (рис. 1) состоит из генератора ускоряющего напряжения, ускорительной трубки, встроенной в генератор, системы выпуска ускоренного электронного пучка в атмосферу и электрических цепей питания, измерения и управления. Генератор с ускорительной трубкой помещены в котел, наполненный газом, сжатым до давления 4—6 кгс/см². Ускоренный в трубке пучок развевается в отклоняющей системе по двум взаимно перпендикулярным направлениям и выводится в атмосферу через титановое окно прямоугольной формы. Генератором ускоряющего напряжения служит повышающий трансформатор с секционированной вторичной обмоткой. Переменное напряжение, которое индуцируется на секциях вторичной обмотки, преобразуется в постоянное по двухтактной выпрямительной схеме с удвоением напряжения. Между собой секции соединены последовательно по постоянному напряжению и изолированы друг от друга по переменному напряжению. Цепочка из 24 выпрямительных секций нагружена на ускорительную трубку с делителем. Первичная обмотка трансформатора питается от преобразователя ВПЛ-50, выходное напряжение которого не более 208 В, а частота 388 Гц.

Емкости С₂ и С₃ предназначены для согласования преобразователя ВПЛ-50 с генератором ускоряющего напряжения. Верхняя катушка служит для питания накальной и анодной цепей инжектора, делитель используется для измерения ускоряющего напряжения.

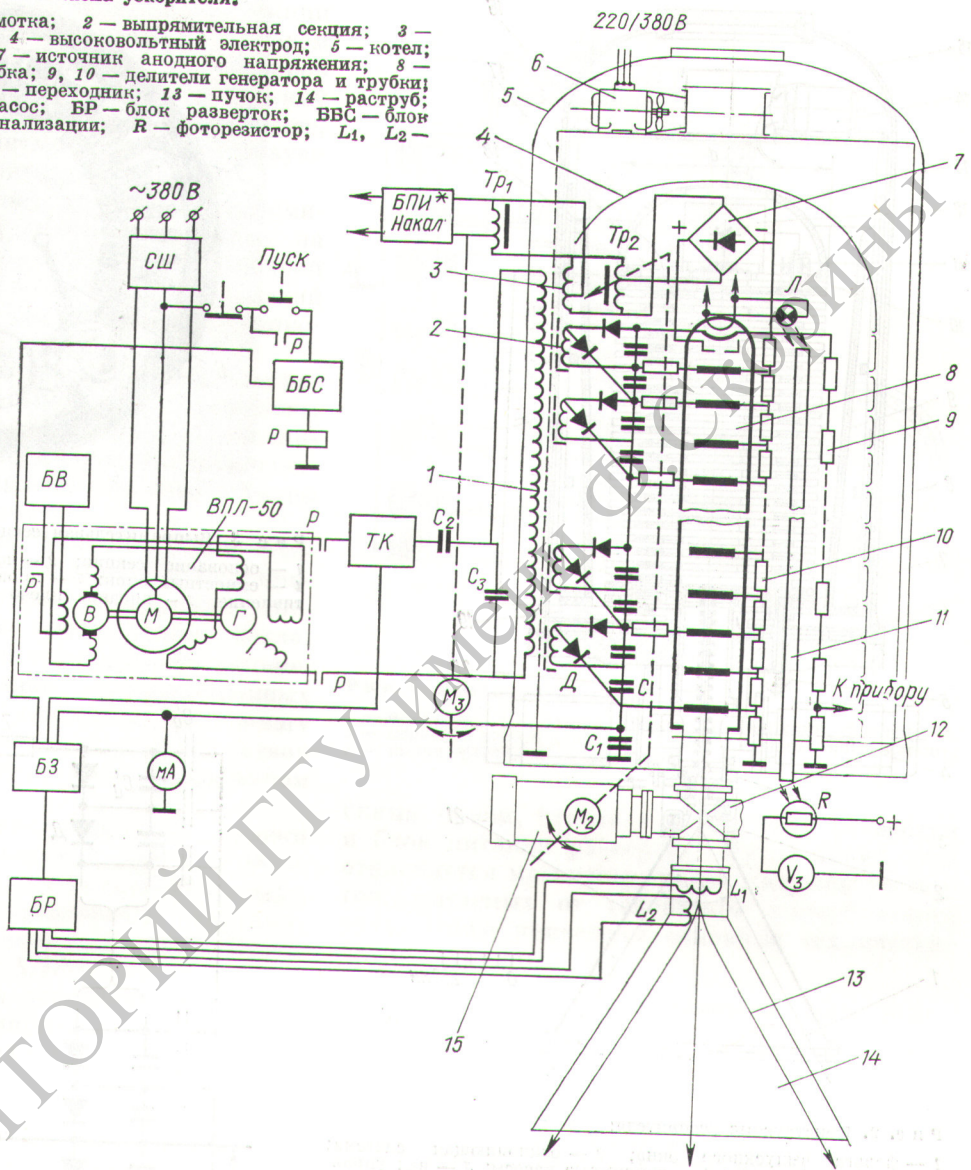
Ниже приведены параметры ускорителя ЭЛВ-1.

| | |
|--|----------|
| Диапазон энергий ускоренных электронов, кэВ . . . | 400—1000 |
| Мощность пучка электронов во всем диапазоне энергий, кВт . . . | 20 |
| Пульсации ускоряющего напряжения под нагрузкой, % . . . | 2,5 |
| Суммарные потери в ускорителе, кВт . . . | 3,5 |
| Размеры выпускного окна, мм: | |
| длина . . . | 980 |
| ширина . . . | 75 |
| Размеры ускорителя с вакуумной и отклоняющей системами, м: | |
| высота . . . | 3,8 |
| ширина . . . | 1,6 |
| Масса ускорителя, т . . . | ~8 |

Генератор ускоряющего напряжения. Внутри котла (рис. 2) на дисковом магнитопроводе концентрично установлены первичная обмотка и выпрямительные секции, катушки которых являются составными частями вторичной обмотки повышающего трансформатора. Первичная обмотка представляет собой каркас из текстолита, обмотанный изнутри спаренной медной трубкой диаметром 12 мм, по которой циркулирует вода для охлаждения. Для увеличения связи с катушками выпрямительных секций первичная обмотка ($W = 30$) выполнена конической. Со стороны высокого напряжения витки первичной обмотки закрыты разрезным экраном из нержавеющей стали. Выпрямительные секции, сложенные друг на друга в одну стопу, накрыты основанием высоковольтного электрода, на котором закреплены верхняя катушка, два автотрансформатора цепи управления током пучка и установлен блок питания инжектора. Выходное напряжение автотрансформаторов регулируется с помощью валов управления. Для электростатического экранирования высоковольтного конца выпрямительной колонны применен полусферический высоковольтный электрод с радиальными прорезями по наружной облицовке. Для уменьшения размеров установки по диаметру и вихревых потерь в стенках котла генератор имеет два кольцевых и дисковых магнитопровода, выполненных из трансформаторной стали Э-43 с радиальной шихтовкой. Кольцевой магнитопровод сверху накрыт металлическим экраном, на котором установлен вентилятор.

Р и с. 1. Электрическая схема ускорителя;

1 — первичная обмотка; 2 — выпрямительная секция; 3 — верхняя катушка; 4 — высоковольтный электрод; 5 — котел; 6 — вентилятор; 7 — источник анодного напряжения; 8 — ускорительная трубка; 9, 10 — делители генератора и трубки; 11 — световод; 12 — переходник; 13 — пучок; 14 — раструб; 15 — вакуумный насос; БР — блок разверток; ВВС — блок блокировок и сигнализации; R — фоторезистор; L₁, L₂ — катушки разверток



Кроме того, генератор снабжен еще омическим делителем для измерения полного ускоряющего напряжения, установленным рядом с ускорительной трубкой, и устройством для контроля тока накала инжектора (см. рис. 1, позиции 9 и 11).

Выпрямительная секция (рис. 3 и 4). Основанием секции, на котором устанавливаются все элементы, служит разрезной металлический обод с прикрепленными к нему тремя секторами из стеклотекстолита. В секторы вклеены опорные втулки для стыковки и центровки секций. На основание секции по скользящей

посадке насаживается катушка, закрытая снаружи разрезным наружным экраном. Катушка обмотана проводом ПЭВ-2 диаметром 0,35 мм и имеет 3130 витков. В качестве межслоевой изоляции применена кабельная бумага. Намотанная на разборном каркасе катушка пропитана эпоксидным компаундом. Конец катушки скреплен с наружным экраном, который полиэтиленовым проводом присоединен к средней точке емкостного блока. Емкостной блок состоит из четырех керамических конденсаторов типа К15-10 ($C = 10^4$ пФ; $U = 40$ кВ), соединенных последовательно-параллельно. Диод-

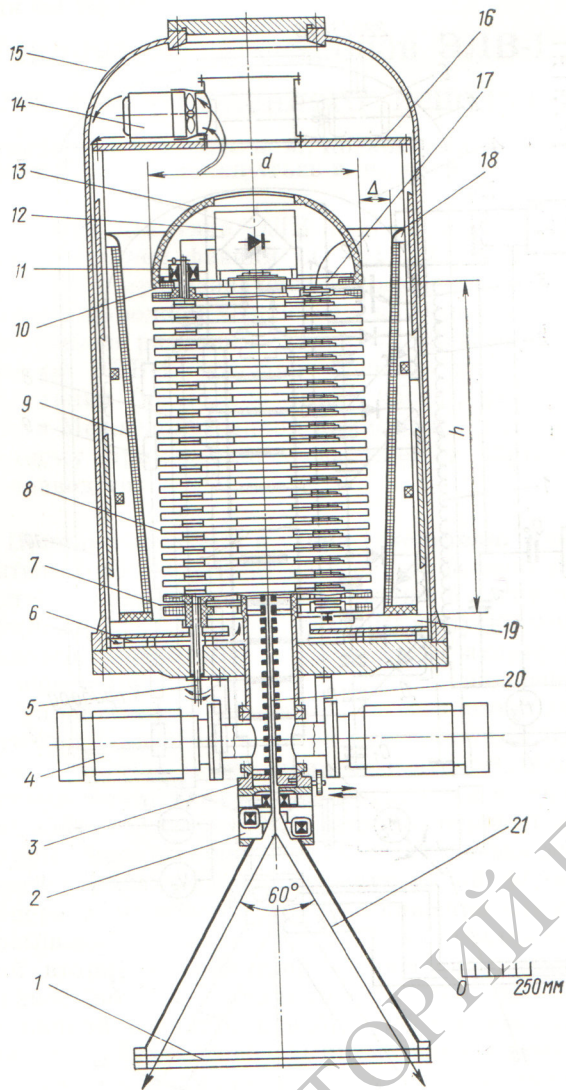


Рис. 2. Конструкция ускорителя:

1 — фольга выпускного окна; 2 — отклоняющая система; 3 — шибберный затвор; 4 — вакуумные насосы; 5 — вал управления; 6 — радиатор; 7 — ускорительная трубка; 8 — выпрямительная секция; 9 — первичная обмотка; 10 — верхняя катушка; 11 — автотрансформатор; 12 — блок управления инжектором; 13 — высоковольтный электрод; 14 — вентилятор; 15 — котел; 16 — экран; 17 — основание высоковольтного электрода; 18 — магнетрон; 19 — дисковый магнетрон; 20 — электропровод; 21 — граница электронного пучка

Рис. 4. Схема выпрямительной секции:

$C_1 = C_2 = C$ — фильтрующие емкости; Z — сопротивление дросселя; D — выпрямительный столб; R_1, R_2 — ограничительные сопротивления; C_d^* — шунтирующий конденсатор; C_q' — паразитная емкость элемента диодного плеча на внутреннем экране катушки; L — катушка секции

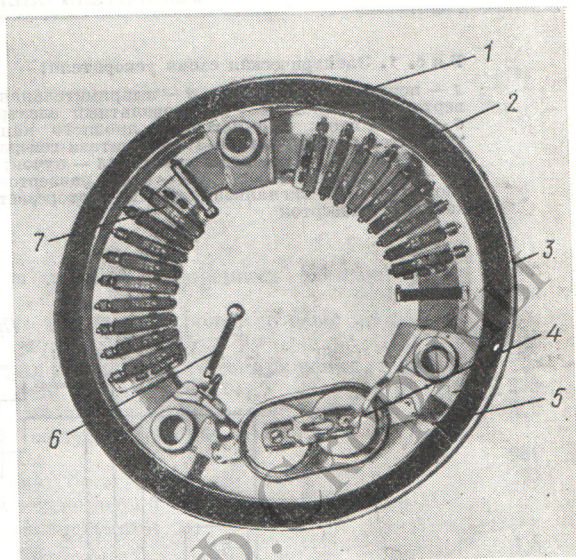
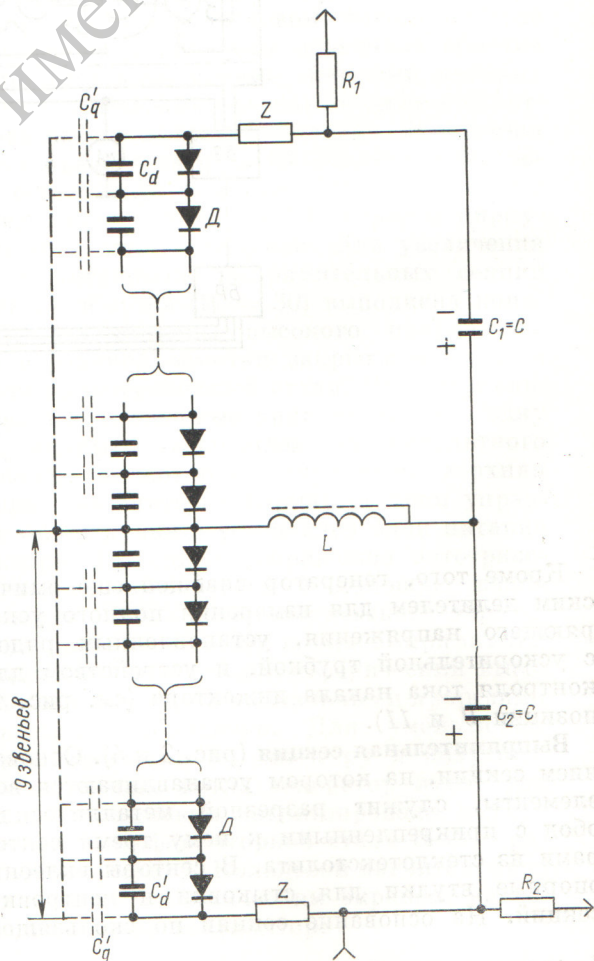


Рис. 3. Выпрямительная секция:

1 — основание секции; 2 — катушка; 3 — наружный экран; 4 — емкостный блок; 5 — провод; 6 — ограничительное сопротивление; 7 — диодное плечо



ные плечи связывают вход и выход секции с внутренним экраном катушки — ободом основания секции. К одному из секторов основания секции через пластинчатую пружину прикреплено ограничительное сопротивление, конец которого контактирует с соответствующим электродом ускорительной трубки.

Диодное плечо состоит из девяти выпрямительных столбов типа Д1008, наклеенных на изоляционное основание. В начале диодной цепочки размещен дроссель, ограничивающий прямой ток в цепи диодов при пробоях (сопротивление Z на рис. 4).

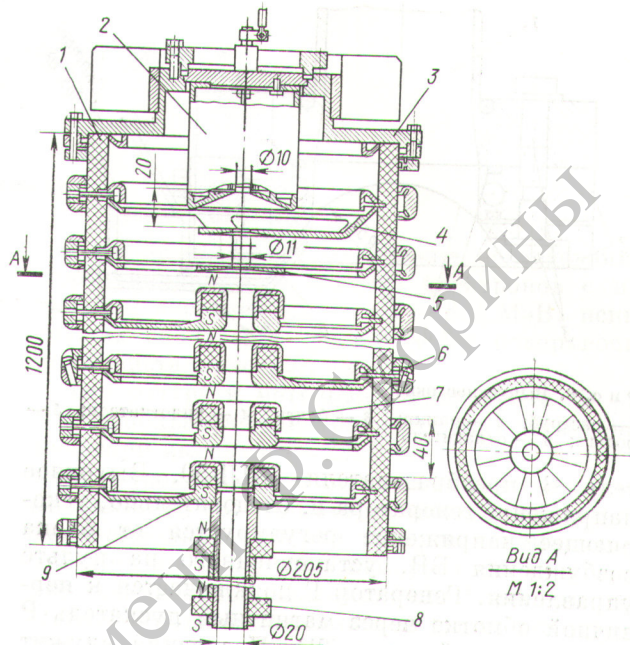
Для равномерного деления обратного напряжения по выпрямительным столбам применены шунтирующие конденсаторы КВИ-3, привинченные к выпрямительным столбам. Весь электромонтаж диодного плеча выполнен голой медной проволокой диаметром 1,5 мм.

Ускорительная трубка. Ускорительная трубка (см. рис. 2) встроена в колонну из выпрямительных секций, внизу она оканчивается горловиной, пропущенной через днище котла, который присоединяется к вакуумной системе. Вакуумная система (два магнитозарядных насоса НМДО-025-1) привинчена к днищу котла, к ней прикреплены шибберный затвор и отклоняющая система с выпускным окном из титановой фольги.

Длина изолятора ускорительной трубки равна высоте выпрямительной колонны ($h = 1200$ мм). Изолятор (рис. 5) состоит из двух частей, герметично скрепленных винтами. На верхнем фланце установлена пушка Пирса с первансом $\sim 0,4 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2}.

Ток пучка электронов регулируется изменением на первом аноде напряжения, подаваемом от блока питания инжектора. Все электроды трубки соединены между собой омическим делителем с суммарным сопротивлением $8 \cdot 10^3$ МОм из резисторов КЭВ-1. Кроме того, второй анод и некоторые промежуточные электроды трубки подключены к выпрямительной колонне через ограничительные сопротивления 6 Ом. Пучок после второго анода попадает в магнитную периодическую фокусирующую систему (МПФС), образованную постоянными магнитами с размерами $D \times d \times h = 52 \times 23 \times 12$, изготовленными из феррита бария марки 2БА. Амплитуда магнитного поля на оси каждого магнита ~ 600 Гс. Ускоренный пучок электронов по каналу с магнитным сопровождением попадает в отклоняющую систему.

Отклоняющая система и выпускное окно. В состав этой системы входят раструб с выпу-



Р и с. 5. Ускорительная трубка:

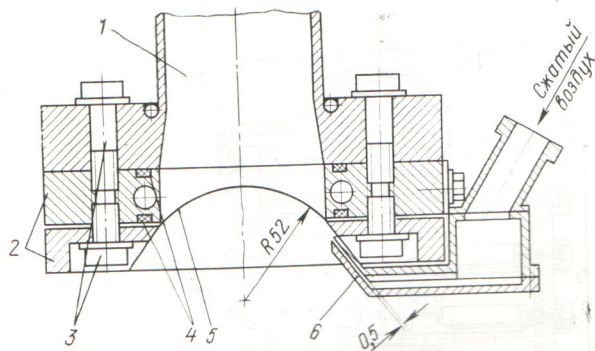
- 1 — изолятор; 2 — пушка Пирса; 3 — верхний фланец; 4, 5 — первый и второй аноды; 6 — винт; 7 — постоянный магнит; 8 — канал МПФС; 9 — электрод

скным окном, строчная и кадровая развертки и блок питания разверток. Пучок электронов отклоняется магнитным полем катушек разверток, питаемых от генератора пилообразного тока. Ниже приведены основные технические данные системы.

| | |
|---|-----------------|
| Угол отклонения строчной развертки, град | ± 30 |
| Частота развертки, Гц: | |
| строчной | 50 |
| кадровой | 1075 |
| Размеры выпускного окна, мм ² | 75×980 |
| Толщина титановой фольги, мкм | 50 |
| Потери энергии электронов на фольге, кэВ | 50 |
| Неравномерность плотности тока пучка по длине выпускного окна, % | ± 12 |
| Минимальное давление сжатого воздуха на входе в охладитель, кгс/см ² | 0,5 |

Раструб отклоняющей системы (см. рис. 2) сварен из нержавеющей стали и в месте расположения разверток имеет тонкие стенки, через которые проникает переменное магнитное поле разверток. Снизу раструб оканчивается прямоугольным фланцем, к которому прикреплено выпускное окно (рис. 6).

Электрические цепи. Через силовой шкаф СШ (см. рис. 1) асинхронный двигатель M_1 преобразователя ВПЛ-50 подключен к сети. Двигатель вращает генератор Г и возбуди-



Р и с. 6. Выпускное окно:

1 — раструб; 2 — рамки; 3 — болты; 4 — уплотнители; 5 — фольга; 6 — охладитель

тель В преобразователя ВПЛ-50. Выходное напряжение генератора и, следовательно, ускоряющее напряжение регулируется от блока возбуждения БВ, установленного на пульте управления. Генератор Г подключается к первичной обмотке через магнитный пускатель Р и тиристорный ключ ТК. Последний служит для быстрого отключения питания ускорителя при авариях и выполнен на двух тиристорах ТЛ-200, включенных встречно-параллельно.

Цепочка из выпрямительных секций подключена к электродам ускорительной трубки. Верхняя катушка через автотрансформаторы Tr_1 и Tr_2 питает цепь накала блока питания инжектора (БПИ) и источник БПИ, выходное напряжение которого подано на анод инжектора. (БПИ и источник расположены в высоковольтном электроде.) Изменением анодного

напряжения регулируется ток пучка. Напряжение накала и тока пучка регулируется с пульта с помощью электродвигателей M_3 , M_2 , расположенных под днищем котла. Нагрев катода контролируется с пульта. Для этого в цепь накала инжектора включена лампочка Л, яркость свечения которой зависит от напряжения накала. Световой поток от лампочки идет по световоду и падает на фоторезистор R, включенный в измерительную цепь.

Представляют интерес также измерительные и защитные цепи. Конец нижней выпрямительной секции выведен из котла и соединен через измерительный прибор с землей. Постоянная составляющая тока, который течет через миллиамперметр МА, соответствует току пучка. Переменная составляющая тока, который замыкается через конденсатор C_2 , сигнализирует об изменениях ускоряющего напряжения при пробоях в ускорителе. Поэтому напряжение с конденсатора C_1 подано на блок защиты БЗ, предназначенный для отключения ускорителя при пробоях в ускорителе, ухудшении вакуума в ускорительной трубке, превышении заданных уровней ускоряющего напряжения и накала инжектора и при исчезновении тока в катушках строчной и кадровой разверток, т. е. в аварийных ситуациях.

В заключение авторы выражают признательность А. Н. Скринскому за его постоянное внимание и помощь при создании ускорителя.

Поступила в Редакцию 26/V 1975 г.