

39

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

А.И.Грищенко, Б.М.Корабельников, Г.С.Крайнов,
С.А.Кузнецов, Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов,
А.Н.Самойлович

СДВОЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ТИПА ЭЛВ

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 54

Новосибирск

Черепицкий

СДВОЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ТИПА ЭЛВ

А.И.Грищенко, Б.М.Корабельников, Г.С.Крайнов,
С.А.Кузнецов, Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов,
А.Н.Самойлович

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан оригинальный вариант компоновки ускорителя на основе безжелезного или с изолированным сердечником трансформатора. Сделана оценка предельной мощности снимаемой с трансформатора и приведены результаты испытаний ускорителя на энергии 0,4-0,7 МэВ мощностью до 50 кВт.

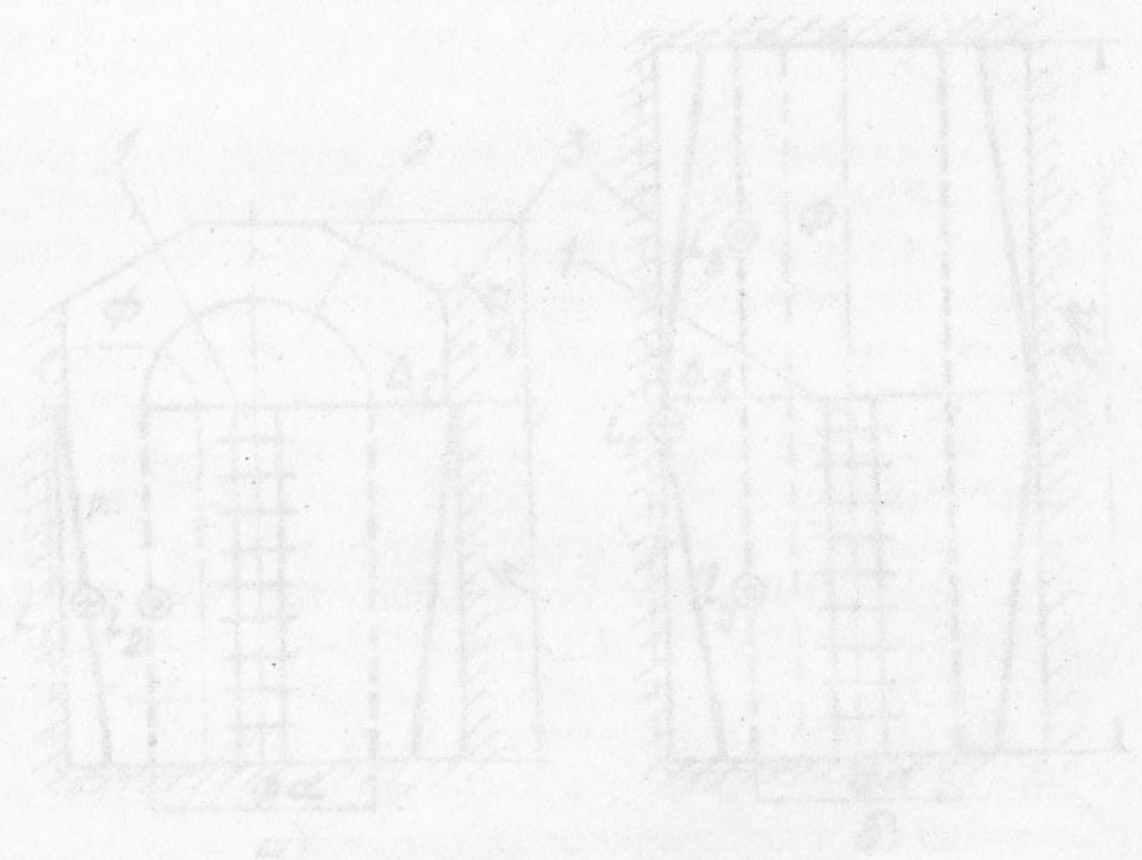


Рис. 1. Компоновка ускорителя.
1 - ускорительная трубка; 2 - изолированный сердечник трансформатора; 3 - изолирующая конструкция; 4 - электроды; 5, 6, 7 - элементы трансформатора.

А.А. Гурьев, В.М. Коваленко, Л.С. Коваленко,
 А.А. Коваленко, В.А. Коваленко,
 А.Н. Сидоров

УСТРОЙСТВО

Основной задачей является создание ускорителя, способного ускорять электроны до энергий в несколько десятков МэВ. Для этого необходимо использовать высоковольтный трансформатор без магнитного сердечника. Напряжение секций вторичной обмотки трансформатора выпрямляется по схеме с удвоением напряжения [1]. Обмотки этого трансформатора расположены коаксиально. Внутри обмоток установлена ускорительная трубка. Выпуск пучка электронов в атмосферу осуществляется либо через титановую фольгу, либо через систему отверстий с четырехступенчатой откачкой вакуумными насосами. Такая компоновка ускорителей оправдала себя длительной и надежной работой на заводах страны.

Генератор ускоряющего напряжения ускорителя типа ЭЛВ состоит из высоковольтного секционированного трансформатора без магнитного сердечника. Напряжение секций вторичной обмотки трансформатора выпрямляется по схеме с удвоением напряжения [1]. Обмотки этого трансформатора расположены коаксиально. Внутри обмоток установлена ускорительная трубка. Выпуск пучка электронов в атмосферу осуществляется либо через титановую фольгу, либо через систему отверстий с четырехступенчатой откачкой вакуумными насосами. Такая компоновка ускорителей оправдала себя длительной и надежной работой на заводах страны.

Свое дальнейшее развитие ускорители этого типа получили в удвоенном исполнении [2]. На рис. I изображены применявшаяся ранее "а" и рассматриваемая "б" конструктивные схемы ускорителя. В прежнем варианте колонна выпрямительных секций заканчи-

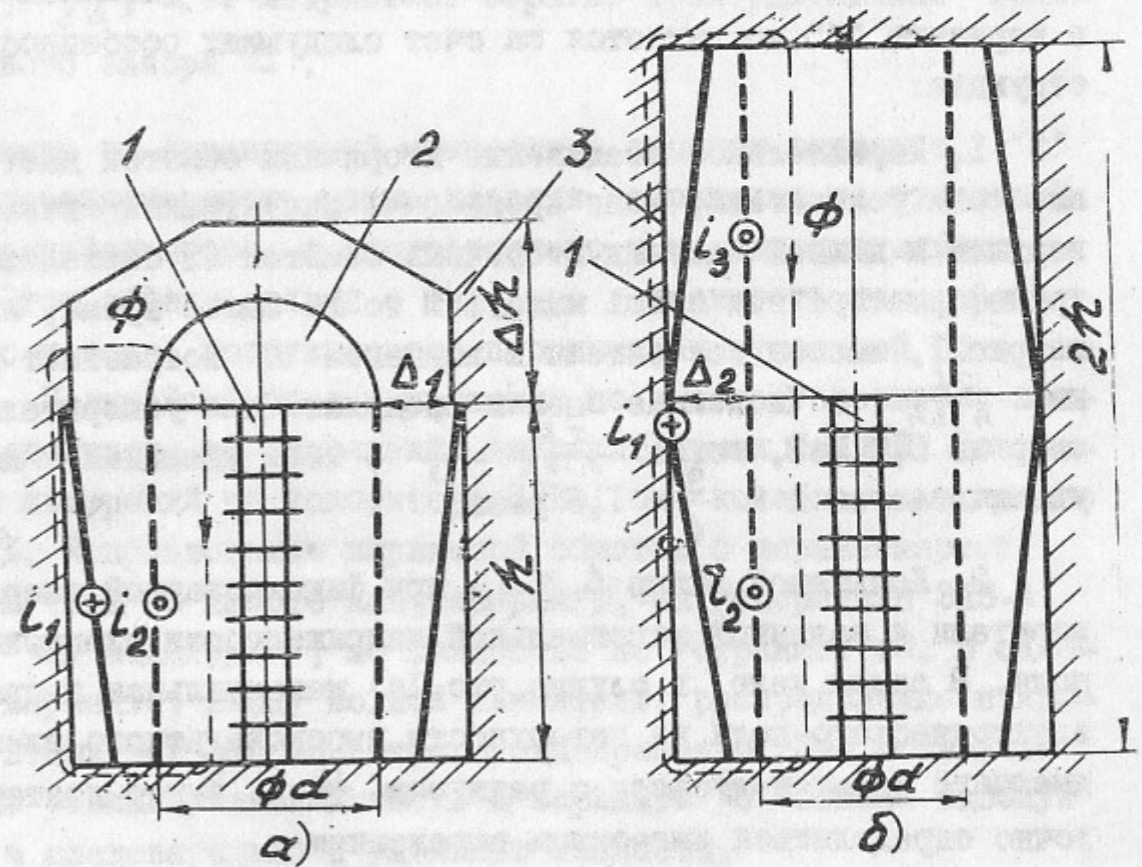


Рис. I. Конструктивная схема ускорителя.
 1 - ускорительная трубка; 2 - высоковольтный электрод; 3 - внешний магнитопровод; ϕ - магнитный поток; i_1, i_2, i_3 - токи обмоток трансформатора.

вается полусферой. Магнитный поток Φ , создаваемый токами обмоток I_1 и I_2 проходит через кольцевой зазор Δ , разделяющий внешний магнитопровод и высоковольтный электрод. Величина этого газового зазора рассчитана на полное напряжение, прикладываемое к ускорительной трубке. Оказывается, что с такой схемой ускорителя успешно конкурирует схема с двумя вторичными обмотками, соединенными параллельно (рис. 1б). Здесь первичная обмотка с током I_1 имеет удвоенную высоту $2h$, обе вторичные обмотки с токами I_2 и I_3 нагружены на одну ускорительную трубку, установленную внутри обмотки с током I_2 . Магнитный поток Φ в этом случае не пересекает кольцевой зазор Δ_2 .

Критерием, по которому следует сравнивать эти два варианта, слежит, по нашему мнению, мощность, приходящаяся на единицу объема ускорителя. При одинаковой энергии ускоренных электронов и одинаковых максимальных напряженностях электрического поля в высоковольтных зазорах Δ_1 и Δ_2 рост удельной мощности в варианте "б" достигается за счет следующих особенностей конструкции:

1. Параллельное соединение вторичных обмоток дает удвоение тока ускорителя, если пренебречь индуктивной связью между верхней и нижней частями вторичных обмоток (в безжелезном трансформаторе эта связь мала). В то же самое время, как видно из рис. 1, высота ускорителя в варианте "б" возрастает в отношении $\frac{2h}{h+\Delta h}$. Численные оценки сделаем для ускорителя на энергию 0,7 МэВ, тогда $\frac{2h}{h+\Delta h} = \frac{4}{3}$, т.е. удельная мощность увеличивается в $2 \cdot \frac{3}{4} = 1,5$ раза.

2. Кольцевой зазор $\Delta_1 > \Delta_2$ при фиксированной энергии ускорителя и заданной максимальной напряженности электрического поля. В самом деле, в случае рис. 1а) максимальная напряженность электрического поля на поверхности высоковольтного электрода 2, имеющего форму полусферы с радиусом $\frac{d}{2}$, будет достаточно точно определяться известным выражением

$$E_d = \frac{U_0}{\frac{d^2}{4} \left(\frac{2}{d} - \frac{2}{d+2\Delta_1} \right)}$$

где U_0 — ускоряющее напряжение,

$$\frac{d+2\Delta_1}{2} \text{ — усредненный радиус наружной полусферы.}$$

В двойном же варианте максимальная напряженность в коаксиальном зазоре равна:

$$E_s = \frac{U_0}{\frac{d}{2} \ln \frac{d+2\Delta_2}{d}}$$

Полагая $E_0 = E_s$, для реальных размеров, применяемых в ускорителях типа ЭЛВ, можно найти отношение зазоров $\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = 1,1 \div 1,2$. За счет этого в варианте "б" уменьшается индуктивность рассеяния трансформатора и, следовательно, растет удельная мощность. Как будет показано далее, при прочих равных условиях, мощность ускорителя на единицу длины $\sim \frac{\tau_1^2 \cdot \tau_2^2}{\tau_1^2 - \tau_2^2}$, где τ_1, τ_2 — средние

радиусы первичной и вторичной обмоток. Тогда удельная мощность $\sim \frac{\tau_2^2}{\tau_1^2 - \tau_2^2} = \frac{\tau_2}{2\Delta}$, т.е. возрастает обратно пропорционально величине газового зазора Δ .

3. Одним из ограничений мощности в обычном варианте "а" является неравномерность распределения напряжения по вторичной обмотке трансформатора, а следовательно и по выпрямительным секциям. Этот эффект связан с тем, что зависимость по высоте магнитного потока, возбуждаемого первичной и вторичной обмотками разная. Нелинейный рост напряжения по высоте ускорителя приводит к недогрузке по напряжению выпрямительных секций. По результатам измерений на ускорителе ЭЛВ-1 она колеблется в пределах 10-12%. Использование первичной обмотки с неравномерной плотностью тока по высоте как, например, на ускорителе ЭЛВ-4 уменьшает эту недогрузку, но полностью не устраняет её. В двойном же варианте, ввиду полной симметрии, распределение напряжения по вторичной обмотке строго одновременно. Это позволяет при прочих равных условиях иметь в варианте "б" более высокую энергию, а следовательно и удельную мощность.

Учет всех перечисленных факторов для ускорителя с высотой выпрямительной колонны $h = 1,2$ м дает двукратный выигрыш в удельной мощности.

Оценим мощность ускорителя в сдвоенном варианте. Для этого удобно искать мощность, снимаемую с единицы его длины. Будем пользоваться простой эквивалентной схемой рис.2.

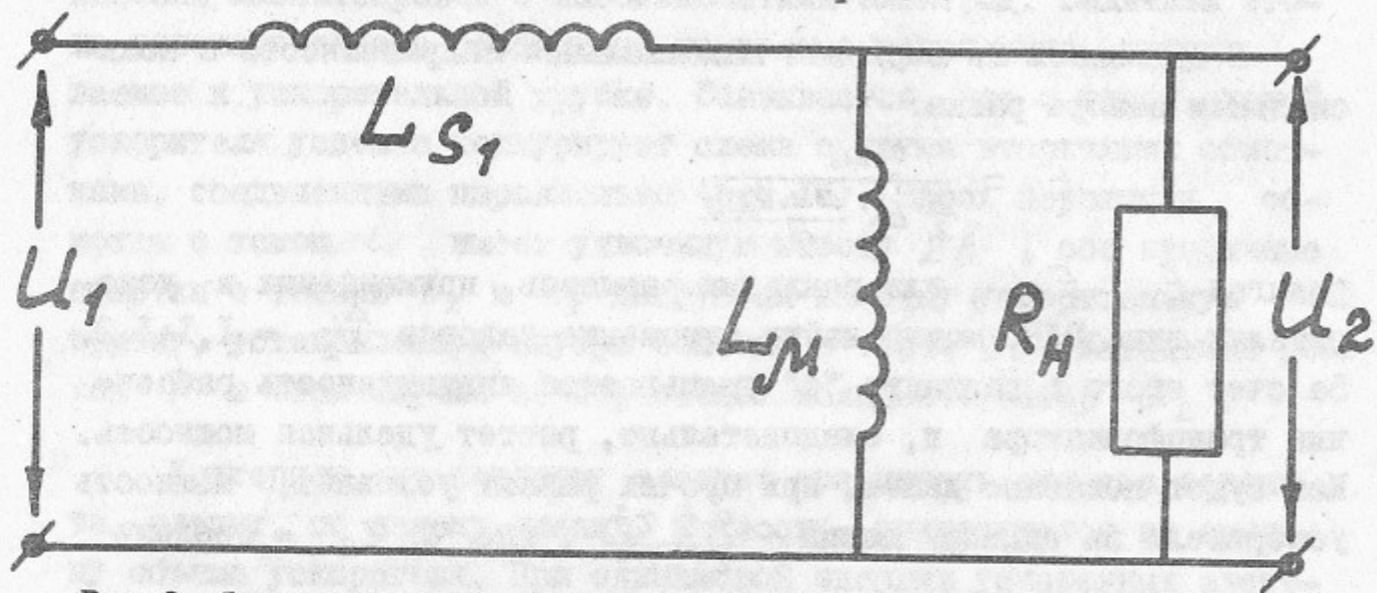


Рис.2. Эквивалентная схема ускорителя.

L_S — индуктивность рассеяния первичной обмотки; L_M — взаимная индуктивность; R — эквивалентное сопротивление нагрузки.

В этой схеме не учтены следующие факторы:

1. Омическое сопротивление обмоток;
2. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки L_{S2} ;
3. Нелинейный характер сопротивления нагрузки.

Первое оправдано тем, что мощность выделяющаяся в обмотках составляет не более 10% мощности ускорителя. Что касается второго, то из-за конечной величины μ внешнего магнитопровода часть потока вторичной обмотки замыкается не по железу, а по газу — не охватывая витков первичной обмотки. Этот поток и является потоком рассеяния вторичной обмотки. L_{S2} следует сравнивать с $\frac{R_H}{\omega}$. В нашем случае взаимная индуктивность $L_M \sim \frac{R_H}{\omega}$, поэтому $\frac{\omega L_{S2}}{R_H} \sim \frac{L_{S2}}{L_M}$, $\frac{L_{S2}}{L_M} = \frac{S_{\Delta}}{\mu \cdot S_{\text{сеч}}}$, где S_{Δ} — площадь зазора между обмотками, $S_{\text{сеч}}$ — сечение магнитопровода, μ — его магнитная проницаемость. Для реальных конструкций $\frac{L_{S2}}{L_M} \leq 5 \cdot 10^{-2}$, т.е. мы вполне можем пренебречь L_{S2} . Третье предположение справедливо лишь при большой мощности, снимаемой с трансформатора [3], а именно эти режимы нас и интересуют.

Для эквивалентной схемы рис.2 нетрудно написать:

$$\mathcal{L} = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L_M^2 L_S^2}{R_H^2 (L_M + L_S)^2}}, \text{ где}$$

параметр \mathcal{L} равен отношению напряжения первичной обмотки под нагрузкой к её напряжению в режиме холостого хода при постоянном напряжении на нагрузке. Перепишем это выражение, чтобы яснее стала связь между \mathcal{L} , мощностью P и геометрическими параметрами трансформатора

$$\mathcal{L}(P) = \sqrt{1 + \left(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{P \cdot \Delta S}{S_1 S_2 \omega B^2}\right)^2}, \text{ где}$$

$S_{1,2}$ — площадь первичной и вторичной обмоток соответственно, ΔS — площадь зазора между обмотками, P — мощность на единицу длины, ω — рабочая частота, B — рабочая индукция. Переходя к мощности:

$$P = \sqrt{\mathcal{L}^2(P) - 1} \cdot \frac{S_1 S_2 \omega B^2}{4\pi \Delta S} \cdot 10^7$$

Как показал нам опыт величину $\mathcal{L}(P)$ можно выбирать в пределах не более 2+2,5. Причем большее значение соответствует минимальной энергии. С учетом этого для минимальной энергии ($B = 25$ гс и $U_0 \sim 500$ кВ) имеем $P \approx 40$ кВт/м. Для максимальной энергии ($B = 50$ гс) и $\mathcal{L} = 1,5$ эта величина возрастает до 70 кВт/м; т.е. даже на минимальной энергии имеется более чем двукратный запас по мощности.

Мощность трансформатора можно существенно увеличить поместив внутрь вторичной обмотки изолированный секционированный сердечник. Причем мощность возрастает примерно пропорционально $\mu_{\text{эфф}}$. В традиционном варианте величина $\mu_{\text{эфф}}$ ограничивается, при прочих равных условиях, наличием высоковольтного зазора Δ . Отсутствие этого зазора для магнитного потока в сдвоенном варианте позволяет иметь примерно вдвое большую удельную мощность при наличии сердечника.

В идеальном варианте, т.е. полной симметрии верхнего и ниж-

него контуров распределение напряжения по выпрямительным секциям было бы однородным и не зависело от нагрузки. Однако, если ускорительная трубка экранирована от переменного магнитного поля и расположена в нижней части колонны, то она делает контура несимметричными. В частности, напряжение холостого хода в нижней колонне уменьшается в $1 + \frac{Z_1 r_p}{Z_2}$ раз. Эта разность напряжений холостого хода приводит и к неодинаковой токовой нагрузке верхнего и нижнего контуров ускорителя. Нетрудно показать, что с ростом нагрузки абсолютная разность токов уменьшается. Кроме того, изменив число секций в каком-либо из контуров можно исключить указанную асимметрию.

При создании ускорителей в двояном варианте следует обратить внимание на следующее. При пробое ускорительной трубки емкость верхней выпрямительной колонны, которая заметно больше емкости высоковольтного электрода в обычном варианте "а" рис.1, увеличивает перенапряжения на конденсаторах нижних выпрямительных секций и блока управления инжектором.

Конструкцию ускорителя рассмотрим на примере ЭЛВ-3 (рис.3).

На дне котла I, заполненного сжатым элегазом, укреплен нижний магнитопровод I2, с установленной на нем первичной обмоткой 2 повышающего трансформатора. Обмотка состоит из двух частей, каждая из них выполнена конической. Намотана она спаренной медной трубкой $\phi 12 \times 1$, по которой циркулирует вода для охлаждения. Витки первичной обмотки со стороны высокого напряжения закрыты разрезным экраном из нержавеющей стали. Выпрямительные секции 3, сложенные друг на друга в одну стопу, накрыты высоковольтным электродом 8, на котором смонтирован блок управления инжектором. На высоковольтный электрод установлен верхний выпрямительные секции, которые электрически подключены параллельно нижним секциям. Для замыкания рабочего магнитного потока снаружи первичной обмотки установлены магнитопроводы I0 и I1. Ускорительная трубка 5 встроена в нижнюю колонну выпрямительных секций и заканчивается горловиной, пропущенной через днище котла. К горловине присоединяется вакуумная система с двумя магниторазрядными насосами 6. Выпускное устройство 7 с двумя электромагнитами для отклонения пучка прикреплено к переходнику вакуумной системы.

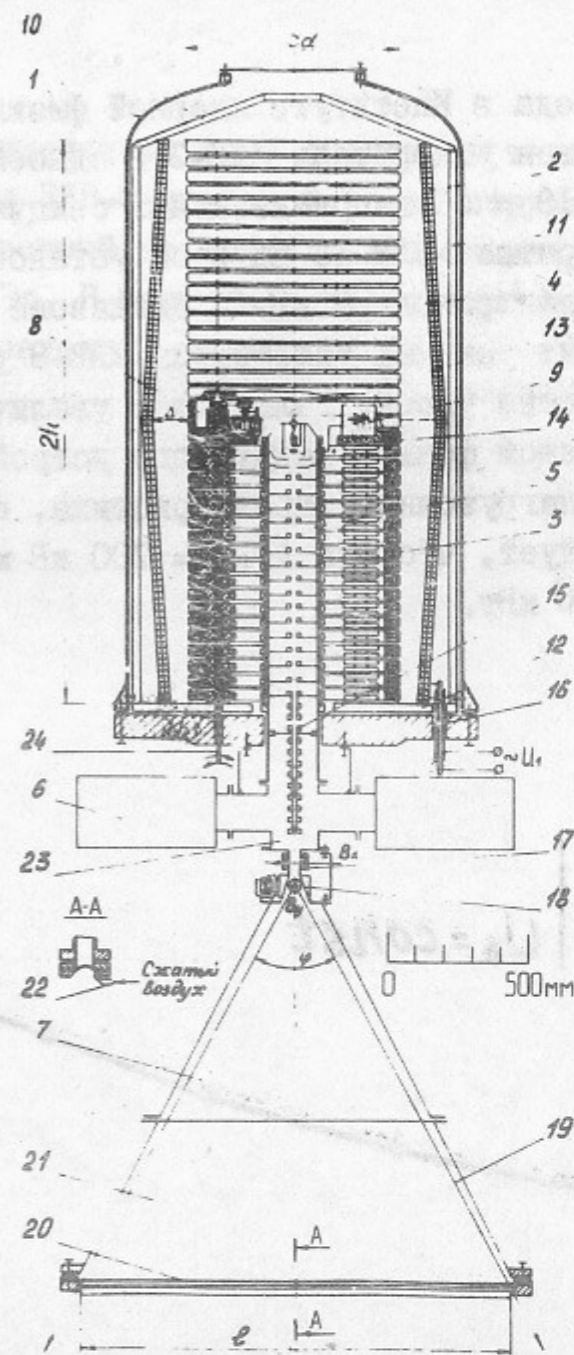


Рис.3. Конструкция ускорителя:

I - котел, 2 - первичная обмотка, 3,4 - выпрямительные секции, 5 - ускорительная трубка, 6 - вакуумные насосы, 7 - раструб, 8 - высоковольтный электрод, 9 - блок управления инжектором, I0, I1, I2 - магнитопроводы, I3 - автотрансформатор, I4 - катушка питания, I5 - электропровод, I6 - ввод, I7, I8 - отклоняющие электромагниты, I9 - пучок, 20 - выпускное окно, 21 - удлинитель, 22 - сопло, 23 - переходник, 24 - вал управления.

В течение 1977 года в Институте ядерной физики СО АН СССР был изготовлен и испытан ускоритель ЭЛВ-3 в сдвоенном варианте. Он был собран на 2 x 18 = 36 выпрямительных секциях и имел габаритные размеры ускорителя ЭЛВ-1. На этой установке была получена мощность пучка электронов 50 кВт в диапазоне энергий от 400 до 700 кэВ. На этих режимах ускоритель ЭЛВ-3 успешно прошел испытания в течение сотни часов. Дальнейшее увеличение мощности ограничивалось перегревом фольги вакуумного устройства. В ходе испытаний была снята нагрузочная характеристика, приведенная на рис. 4, из которой следует, что при $U_0 = 700$ кВ может быть достигнута мощность ~ 100 кВт.

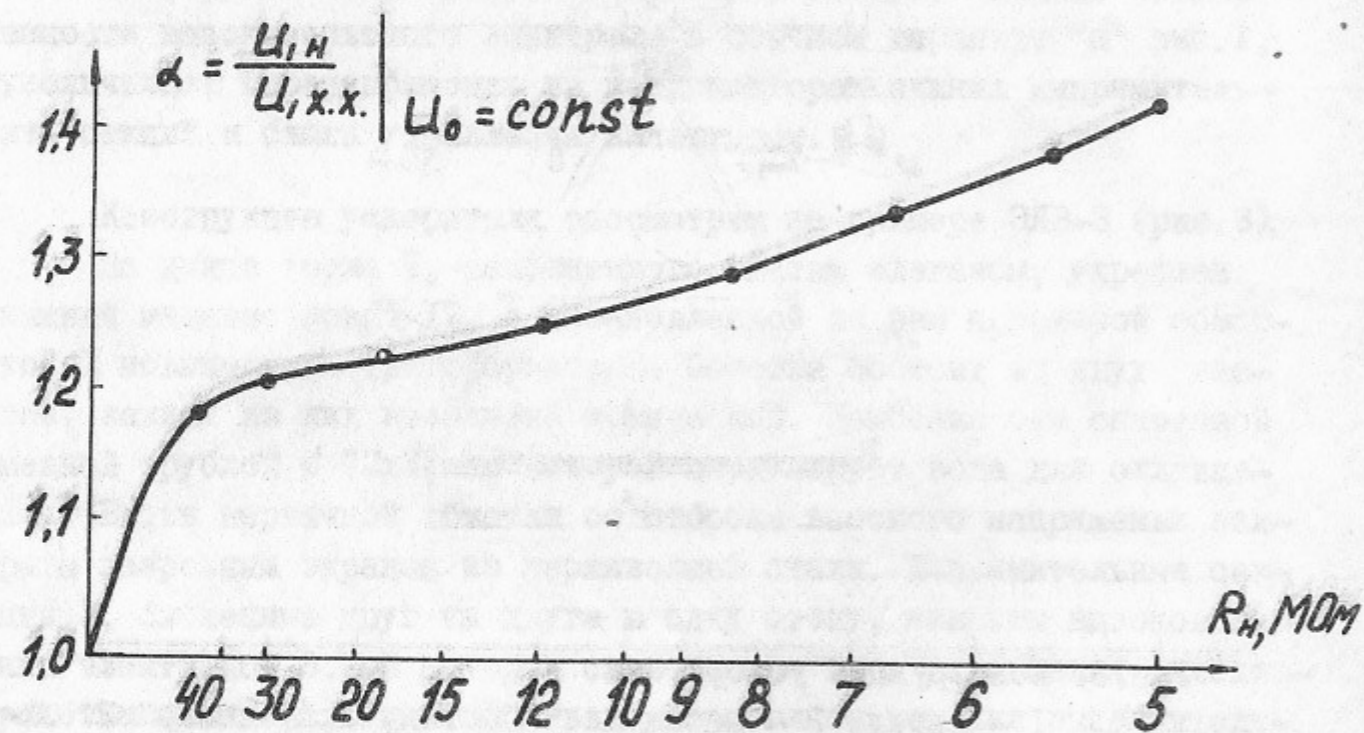


Рис. 4. Нагрузочная характеристика ускорителя ЭЛВ-3.

$R_{ннгр} = \frac{U_0}{J_0}$, где U_0 — ускоряющее напряжение,
 J_0 — ток пучка.

Было также проверено, что как блок управления инжектором, так и остальные элементы ускорителя устойчивы к большому числу пробоев ускорительной трубки.

Исходя из приведенных выше оценок, а также результатов испытаний ускорителя ЭЛВ-3 по такой же конструктивной схеме был спроектирован сдвоенный ускоритель ЭЛВ-6 на энергию 1500 кэВ и мощность до 100 кВт. В настоящее время этот ускоритель находится в стадии изготовления.

Работа выполнена в 1979 г.

Составитель: А. И. Сидоров

Напечатано в печати 25.03.1979 г. М. 1200

Уч. 0,7 см.д. 0,5 уч.ч.-м.д.

Тираж 100 экз. Бесплатно

Литер. 5

Отпечатано на станциях ИЯФ СО АН СССР

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, 1976, том 40, вып.3.
2. Ауслендер В.Л., Салимов Р.А. Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства. Атомная энергия. 1978, том 44, вып.5, с.403.
3. Крайнов Г.С. Ускоритель электронов для прикладных целей (конструкция и расчет). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1975.

Работа поступила - 31 мая 1979 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 25.06.1979 г. МН 02893
Усл. 0,7 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 54

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР