

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С345е3
В-19

22/ix.75

P9 - 8921

3549 / 2-75

А.Т.Василенко, А.А.Глазов, Л.Г.Денисова,
Ю.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга,
Н.И.Полумордвинова, В.И.Сидорова, З.Трейбал

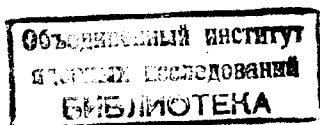
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1975

Р9 - 8921

А.Т.Василенко, А.А.Глазов, Л.Г.Денисова,
Ю.Н.Денисов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга,
Н.И.Полумордвинова, В.И.Сидорова, З.Трейбал

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Василенко А.Т., Глазов А.А., Денисова Л.Г.,
Дмитриевский В.П., Денисов Ю.Н., Кольга В.В.,
Полумордвинова Н.И., Сидорова В.И., Трейбал Э.

P9 - 8921

Электростатическая система вывода пучка из фазотрона
с вариацией магнитного поля

В работе изложены результаты расчета и проектирования электростатической системы вывода пучка из сильноточного фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. Рассмотрен вариант конструкции, обеспечивающий дистанционное управление системой, а также предусматривающий проведение профилактических работ в условиях высокой радиоактивности.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Vasilenko A.T., Glazov A.A., Denisova L.G., P9 - 8921
Dmitrievsky V.P., Denisov Yu.N., Kolga V.V.,
Polumordvinova N.I., Sidorova V.I., Treibal E.

An Electrostatic System for Beam Extraction from
the Phasotron with the Magnetic Field Variation

The results of calculation and design of an electrostatic system for beam extraction from the high-current phasotron with the spatial variation of the magnetic field are presented. The variant of the construction has been considered that provides a remote control of the system and also stipulates the preventive inspection in the conditions of high radioactivity.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975

Одной из основных проблем, возникающих при разработке сильноточных фазотронов с пространственной вариацией магнитного поля, является проблема создания системы высокоэффективного вывода пучка из камеры ускорителя. В ускорителях этого типа используется регенеративный метод вывода пучка^{/1,2/}, в котором с помощью одной или двух локальных неоднородностей градиента магнитного поля возбуждаются синхронные радиальные колебания частиц вблизи частоты $Q_r = 1$. При этом на радиальные колебания действуют одновременно простой и параметрический резонансы, сила действия которых определяются параметрами неоднородностей и азимутальным расстоянием между ними. Кроме этого, параметры регенеративной системы выбираются так, чтобы не только сохранить устойчивость аксиального движения, но и обеспечить минимальное возрастание огибающей аксиальных колебаний. Увеличение шага радиальных колебаний за оборот /заброс/ приводит в общем случае при обычных значениях частоты аксиальных колебаний $Q_z = 0,2 \div 0,3$ к увеличению огибающей аксиальных колебаний. Поэтому при допустимом увеличении огибающей аксиальных колебаний и заданной величине максимальной амплитуды свободных радиальных колебаний появляется ограничение на величину заброса, составляющее обычно несколько сантиметров. Далее частицы направляются в магнитный или токовый каналы, и основные потери пучка будут происходить на септуме первой секции отклоняющего канала. Величину коэффициента вывода (ϵ) можно приближенно определить из выражения:

$$\epsilon = 1 - \frac{\delta}{\Delta r}, \quad /1/$$

где δ - эффективная толщина септума, Δr - радиальный заброс. Выражение /1/ справедливо в случае, если шаг за счет набора энергии за оборот существенно меньше заброса Δr , что характерно для больших фазотронов. Полученный коэффициент вывода следует еще умножить на коэффициент, характеризующий потери частиц из-за увеличения огибающей аксиальных колебаний.

Из этого анализа следует, что наиболее радикальным средством увеличения полного коэффициента в регенеративном методе является значительное уменьшение эффективной толщины септума первой секции канала. При этом появляется также возможность некоторого уменьшения заброса Δr , что приводит к устранению потерь частиц по аксиальному движению. Наименьшую величину септума имеет электростатический канал / $\delta = 0,5 - 1,0$ мм/, который применяется повсеместно в изохронных циклотронах на низкие энергии в том числе и при регенеративном способе вывода /3/.

В настоящей статье с целью увеличения эффективности вывода частиц рассмотрена возможность использования электростатического дефлектора в качестве первой секции отклоняющего канала в регенеративной системе вывода пучка из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля ОИЯИ с энергией ускоренных протонов 680 МэВ и током внутреннего пучка ~50 мкА /установка "Ф"/ /4/. В качестве последующих секций отклоняющего канала используется магнитный канал, предусмотренный проектом установки "Ф". В связи с этим электростатический дефлектор должен располагаться внутри ускоряющего электрода /дуанта/. Так как возбуждатель при регенеративном способе вывода находится непосредственно перед каналом, то в рассматриваемой системе вывода возбуждатель является электростатическим и также расположен внутри дуанта. Регенератор в этой системе вывода магнитный, обычного типа, расположен на месте возбуждателя первоначальной системы вывода установки "Ф". Общее расположение основных элементов электростатической системы вывода показано на рис. 1.

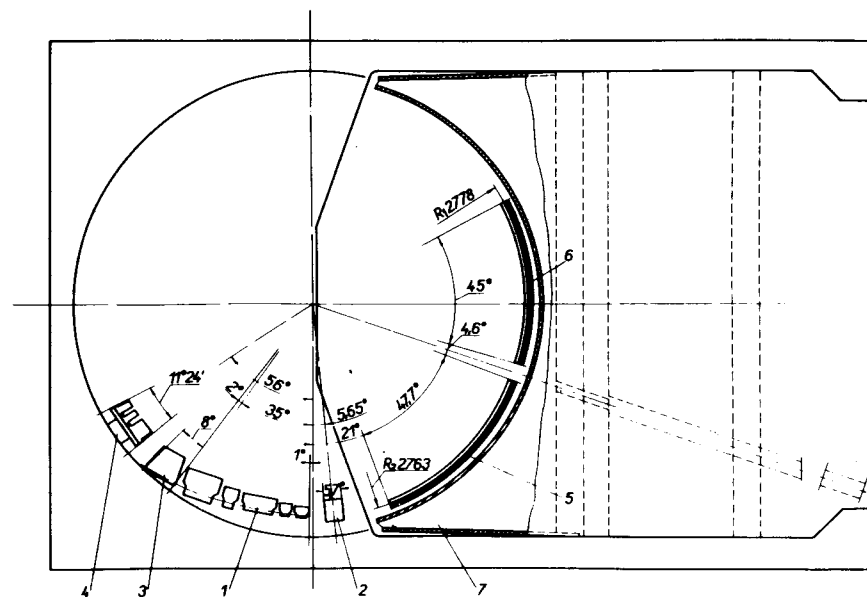


Рис. 1. Конструктивная схема вывода пучка. 1,3 - секции ферромагнитного канала, 2 - регенератор, 5 - дефлектор, 6 - возбуждатель, 7 - дуант.

Для определения значений основных параметров элементов системы вывода и их положений был проведен аналитический и численный расчет этой системы. При этом в качестве исходных значений были приняты следующие величины физических параметров, определяемые сформированным магнитным полем ускорителя и необходимые для получения высокой эффективности системы вывода: частота радиальных колебаний в невозмущенном поле непосредственно перед раскачкой радиальных колебаний $Q_{r_0} = 1,06 \div 1,07$; частота аксиальных колебаний в этой же области - $Q_{z_0} = 0,3$; диапазон свободных радиальных колебаний $a_0 = 0 \div 2,5$ см; диапазон амплитуд аксиальных колебаний $b_0 = 0 \div 0,5$ см; допустимое возрастание огибающей аксиальных колебаний в два раза, в этом случае еще отсутствуют потери частиц

в аксиальном направлении; радиальный заброс для заданных амплитуд радиальных колебаний должен быть в диапазоне от 1,2 см для малых амплитуд до 0,8 см для максимальных значений амплитуд. При этом, если эффективная толщина септума равна 0,1 см, то полный коэффициент вывода, при условии отсутствия потерь внутри отклоняющего канала, составит около 90%. Отход крайней траектории отклоненного пучка после прохождения электростатического дефлектора перед входом в магнитный канал должен быть не менее 3 см при радиальной ширине пучка на входе в канал около 1,8 см.

На основе аналитических выражений с использованием матричного формализма при произвольных длинах возбуждителя и регенератора найдены значения эффективных частот свободных колебаний и их огибающих. Для получения разумной величины градиента электрического поля в возбуждителя длина его принята равной 45° . Середина возбуждителя находится на азимуте, где вынужденные колебания проходят через нуль, а скорость $dr_0/d\phi$ имеет максимальное отрицательное значение, что соответствует минимуму огибающей для аксиальных колебаний^{/5/}. Через 90° от середины возбуждителя в такой же точке относительно орбиты находится узкий магнитный регенератор протяженностью $5,8^\circ$.

Электростатический дефлектор имеет протяженность по азимуту 52° , отстоит на 15 см по окружности от края возбуждителя и не доходит до края дуанта, во избежание влияния высокочастотного поля, на 35 см по длине окружности $r = 274$ см.

Для окончательного определения градиентов и радиальных положений элементов системы вывода при заданном забросе около 1 см и не более чем двойном увеличении огибающей аксиальных колебаний, была проведена серия численных расчетов с использованием полных уравнений движения и реального магнитного поля установки "Ф" по специально составленной программе^{/6/} на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6200. После просчета более 200 траекторий с набором энергии за оборот от 40 до 100 кэВ, причем начало счета соответствовало движению в невозмущенном магнитном поле, были найдены оптимальные значения параметров секций: радиаль-

ный градиент электрического поля возбуждителя $\partial E_r / \partial r = 6,7$ кВ/см²; начало поля возбуждителя с $r = 270$ см; показатель магнитного поля регенератора $n_0 = 4$; начало поля регенератора с $r = 268,5$ см. Для получения заброса около 1 см при заданном диапазоне амплитуд свободных радиальных колебаний и выбранном градиенте электрического поля возбуждителя необходима раскачка синхронных колебаний до амплитуды около 5 см, поэтому радиальные протяженности полей возбуждителя и регенератора должны составлять около 5,5 см.

При выбранных параметрах возбуждителя и регенератора 32 траектории частиц с начальными амплитудами радиальных колебаний от 0,5 до 2,5 см после раскачки были проведены через электростатический дефлектор с однородным электрическим полем напряженностью $E_g = 80$ кВ/см и длиной по азимуту 52° . На рис. 2

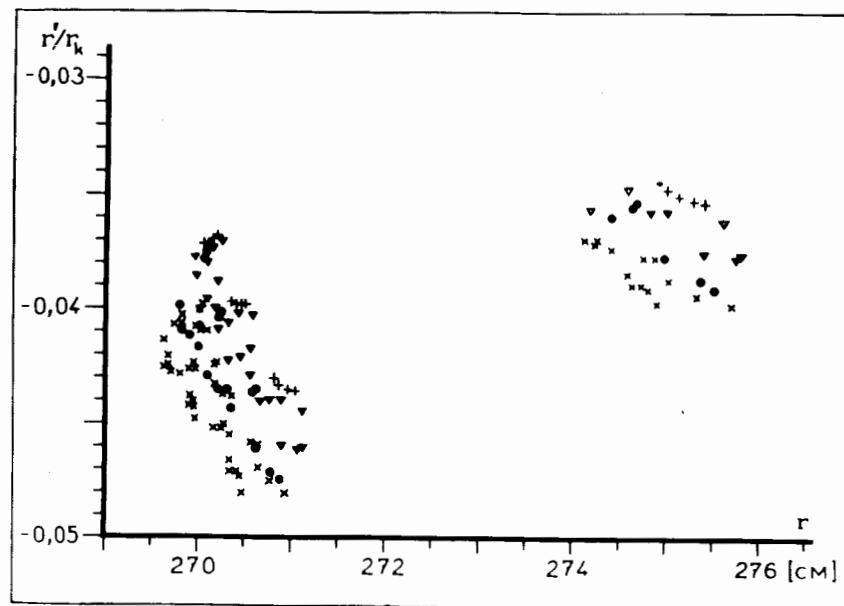


Рис. 2. Фазовая плоскость радиальных колебаний на азимуте входа в магнитный канал при различных начальных амплитудах радиальных колебаний (a_0). xx - $a_0 = 2,5$ см; $\bullet \bullet$ - $a_0 = 1,85$ см; $\nabla \nabla$ - $a_0 = 1,3$ см; $++$ - $a_0 = 0,5$ см.

представлена фазовая плоскость радиальных колебаний на азимуте входа в магнитный канал, на которой изображены отклоненные траектории после прохождения электростатического дефлектора, а также по три предшествующих оборота каждой траектории частицы, совершающей радиальные колебания в полях возбуждителя и регенератора. Как видно из рис. 2, отклоненный в дефлекторе пучок удовлетворяет условиям, при которых он может почти без потерь пройти магнитный канал и выйти из камеры ускорителя в заданном направлении. Радиальный размер пучка внутри электростатического дефлектора на всем протяжении не превышает 1,2 см. Энергии ускоренных частиц в прошедшем через дефлектор пучке находятся в диапазоне от $682,1 \text{ МэВ} / a_0 = 2,5 \text{ см/}$ до $684,4 \text{ МэВ} / a_0 = 0,5 \text{ см/}$. Таким образом, первоначальный энергетический диапазон пучка после процесса раскочки уменьшается примерно в 4 раза, что характерно для регенеративного способа вывода /эффект компрессии по энергиям/.

Численный расчет аксиального эмиттанса пучка при различных амплитудах радиальных колебаний показал, что в процессе раскочки происходит увеличение амплитуд аксиальных колебаний менее, чем в два раза, что не должно приводить к потерям частиц в дефлекторе и магнитном канале.

С помощью метода, изложенного в работе /7/, была рассчитана на ЭВМ "Наиря-2" форма электродов возбуждителя, необходимая для создания линейно растущего электрического поля в радиальной зоне около 6 см. На рис. 3 приведена картина эквипотенциалей и форма электродов возбуждителя. На потенциальные электроды как возбуждителя, так и дефлектора необходимо подать отрицательный потенциал около 100 кВ.

При разработке конструкции электростатических секций системы вывода главная трудность состояла в том, что необходимо было выполнить ряд противоречивых требований, сохранив при этом конструкцию дуанта без изменений: 1/ разместить секции в глубокой /2,2 м/ щели дуанта при малой ее высоте /100 мм/ и большой протяженности /6 м/ с возможностью их демонтажа механизмами без разборки дуанта; 2/ обеспечить необ-

ходимую электрическую прочность секций в условиях сильно ограниченного пространства; 3/ обеспечить дистанционную юстировку положения секций, механизм юстировки не должен осложнять монтаж и демонтаж секций.

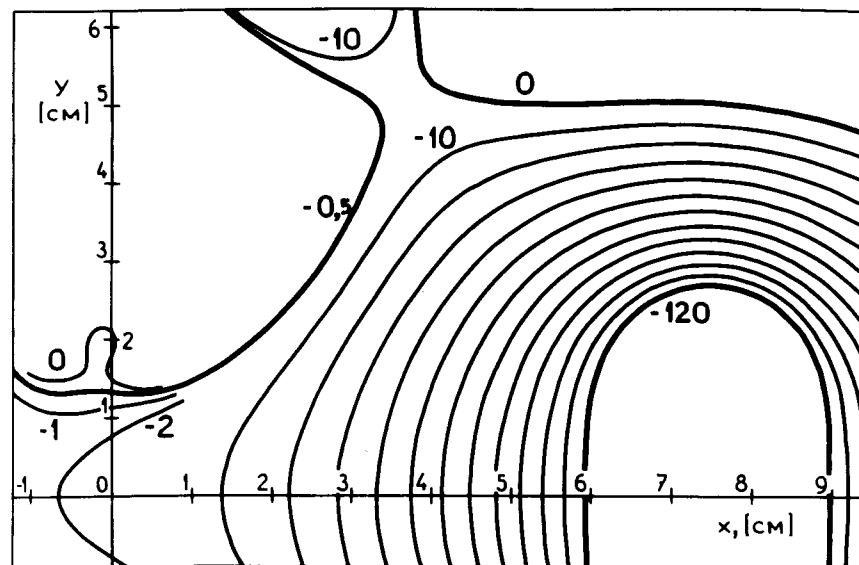


Рис. 3. Картина эквипотенциалей и форма электродов электростатического возбуждителя.

Устройство электростатической системы вывода /рис. 1/, состоящее, как указывалось выше, из возбуждителя, дефлектора и высоковольтного фидера, в основном отвечает перечисленным требованиям. Конструкции возбуждителя и дефлектора практически одинаковы, различие состоит только в геометрии электродов. На рис. 4 показана принципиальная схема системы вывода в плане. При этом полностью изображен дефлектор, возбуждитель показан схематически. Верхняя крышка дуанта снята. Секции крепятся к обечайке дуанта, изогнутой по дуге. На рис. 5 приводятся поперечные сечения секции возбуждителя по приводу, по изолятору и по подвеске. Кроме того, приведены разрезы места стыковки водяных коммуникаций дефлектора.

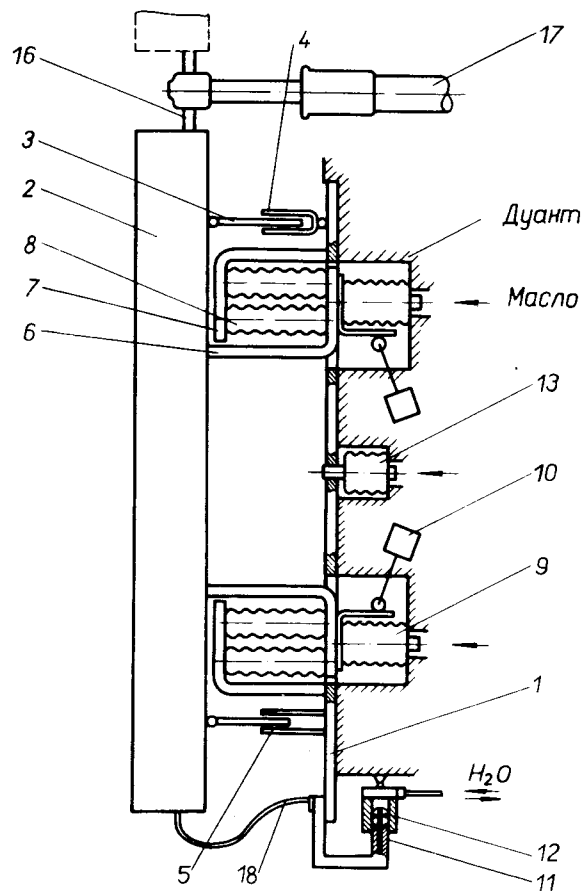


Рис. 4. Конструктивная схема электростатической секции. 1 - полоса, 2 - каркаса, 3 - вилка, 4 - втулка шарнирно укрепленная, 5 - втулка жестко укрепленная, 6 и 7 - скобы, 8 - сифон с газом, 9 - сифон с рабочей жидкостью, 10 - датчик положения, 11 - ниппель, 12 - гнездо, 13 - стопор, 16 - палец подпружиненный, 17 - фидер высоковольтный.

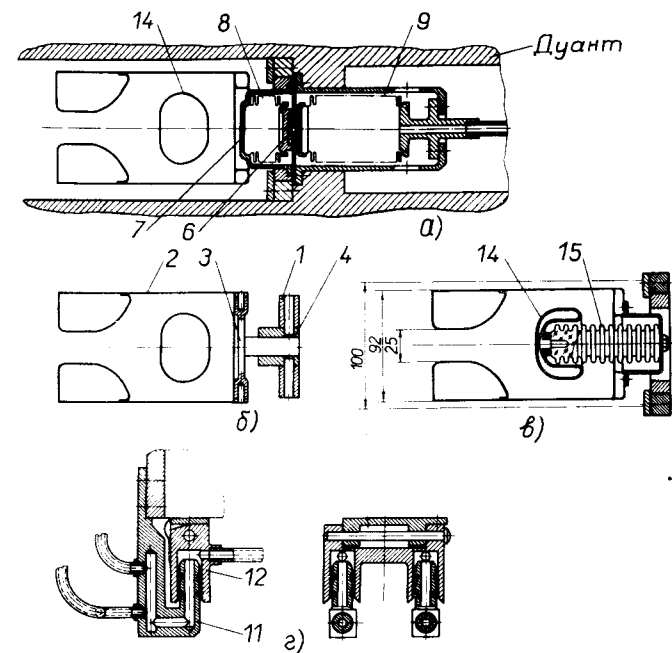


Рис. 5. Поперечные разрезы возбуждителя и разрез ввода воды. 1 - полоса, 2 - каркас, 3 - вилка, 4 - цапфа, 6 и 7 - скобы, 8 - сифон с газом, 9 - сифон с рабочей жидкостью, 11 - ниппель, 12 - гнездо, 14 - электрод высоковольтный, 15 - изолятор.

Несущим элементом секции является полоса 1 /рис. 4 и 5/. Каркас секции 2 через две шарнирно укрепленные вилки 3 и втулки 4,5 связан с несущей полосой 1. Скобы 6 жестко соединены с каркасом, а скобы 7 - с полосой. Между скобами находятся по два сифона 8 с герметично замкнутым в них воздухом при давлении, близком к атмосферному. Эти сифоны выполняют роль мощных эластичных пружин. В дуанте стационарно закреплены сифоны 9, во внутреннюю полость которых может быть подана жидкость под избыточным давлением. Сифоны 9 находятся против сифонов 8, которые в условиях атмосферы занимают положение, изображенное на рис. 4. В этом положении секцию по направляю-

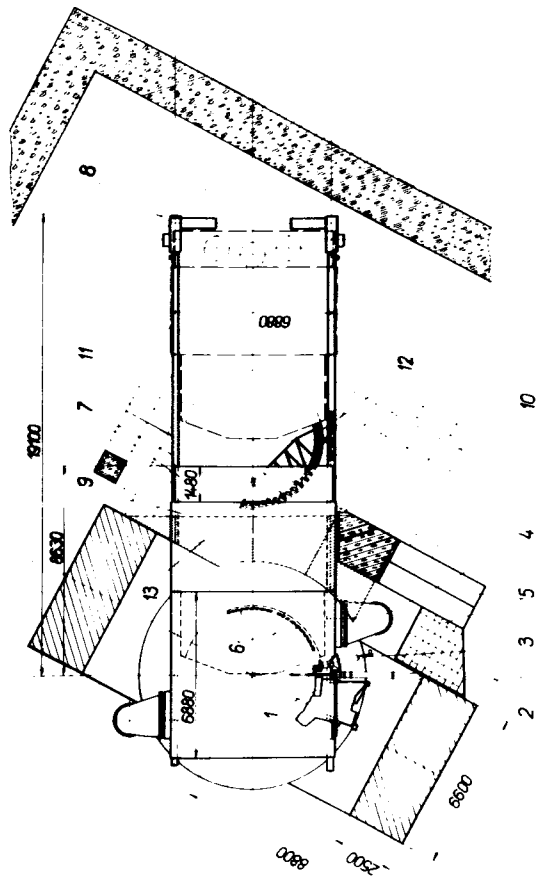


Рис. 6. План фазотрона. 1 - ферромагнитный канал, 2 - ионный источник, 3 - компенсатор, 4 - патрубков, 5 - защита, 6 - секция электростатического канала, 7 - вариатор, 8 - привод, 9 - промежуточная камера, 10, 11 - балки железобетонные, 12 - ферма вспомогательная.

щим на обечайке дуанта возможно либо вдвинуть в дуант до упора, либо извлечь из него. Легко заметить, что для проведения этой операции нет необходимости в дополнительных работах по соединению или разъединению элементов привода, а также звеньев подвода охлаждающей воды и высокого напряжения. Ниппель автоматически стыкуется с качающимся гнездом 12, а высоковольтные элементы секций входят в контакт с подпружиненными пальцами 16 высоковольтного фидера 17.

При подаче рабочей жидкости в сильфон 9 секцию можно сдвинуть к центру ускорителя, либо развернуть. При сбросе давления в этих сильфонах секция под действием давления в сильфонах 8 переместится от центра ускорителя либо развернется.

Стопор 13 с гидروприводом совместно с упором фиксирует секцию в рабочем положении.

Так как операции юстировки положения секций весьма редки, то, по-видимому, срок службы сильфонного привода будет равен сроку службы основных узлов ускорителя. Наиболее слабым местом является уплотнитель по воде, но его легко заменять во время ревизий ускорителя. Изоляторы хорошо экранированы от токов высокой частоты, а также от попадания паров диффузионного масла, поэтому можно предположить хорошую их работоспособность.

Таким образом, проведенный цикл расчетов и выполненная конструктивная разработка электростатических секций для установки "Ф" позволяют сделать вывод о том, что применение электростатических элементов в регенеративной системе вывода фазотронов открывает принципиальную возможность существенного увеличения коэффициента вывода ускоренного пучка.

Литература

1. A.V.Grewe, K.J.Le Couteur. *Rev.Sci.Instr.*, 26, 725(1955)
2. В.П.Дмитриевский, В.И.Данилов и др. ПТЭ, 1, 11 /1957/.
3. H.Kim. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, NS-13 (4), 58 (1966).
4. А.А.Глазов, В.П.Джелепов и др. *Препринт ОИЯИ*, 9-3591, Дубна, 1968.

5. В.П.Дмитриевский, Т.М.Прилипко, В.С.Рыбалко. Препринт ОИЯИ, Р9-3434-1, Дубна, 1967.
6. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Н.И.Полумордвинова, З.Трейбал. Материалы III -го совещания по изохронному циклотрону У-12ОМ. Препринт ОИЯИ Р9-7339, Дубна, 1973, стр. 102.
7. В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, З.Трейбал. Препринт ОИЯИ, Д9-8076, Дубна, 1974.

*Рукопись поступила в издательский отдел
27 мая 1975 года.*