

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 99

Е. А.Абрамян, В. В.Вечеславов

**Ускорение
интенсивного пучка протонов на установке
трансформаторного типа**

г.Новосибирск 1967

Препринт

Е.А.Абрамян, В.В.Вечеславов

**УСКОРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ НА УСТАНОВКЕ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА**

Как правило, ускорение протонов до таких энергий производится в циклотронах или ускорителях типа Фокера (СФ), а в последние годы в ускорителях протонного типа типа Фокера - Фокера (СФ) и трансформаторах с регулируемым квантом /1,2/. Наиболее сложными объектами ускорения являются - атомно-энергетические реакторы протонного типа - реакторы протонного типа, а также реакторы протонного типа, в которых протоны образуются в осколках деления ядер урана, который может использоваться в качестве источника протонов. В этом случае ускорение протонов производится в трансформаторах с регулируемым квантом. В этом случае ускорение протонов производится в трансформаторах с регулируемым квантом. В этом случае ускорение протонов производится в трансформаторах с регулируемым квантом.

г.Новосибирск

1967

Основная часть работы посвящена исследованию ускорения протонов в трансформаторах с регулируемым квантом. В работе описаны основные принципы работы трансформатора с регулируемым квантом. В работе описаны основные принципы работы трансформатора с регулируемым квантом. В работе описаны основные принципы работы трансформатора с регулируемым квантом.

Возможности получения протонов в трансформаторах с регулируемым квантом до энергии 1 МэВ и выше, рассмотрены в работе Абрамян Е.А., Вечеславов В.В. Доклад на Всесоюзном симпозиуме по физике ускорителей, Новосибирск, 1967.

А н н о т а ц и я

Рассмотрена возможность ускорения протонов на ускорителе прямого действия на основе трансформатора. Приведены схемы источника и сильнофокусирующей системы для удержания интенсивного пучка в ускорительной трубке. Рассмотрены вопросы стабилизации энергии частиц, обеспечения рабочего вакуума в трубке, влияние тяжелых компонент пучка и др.

Приведена конструктивная схема установки для ускорения протонов до энергии около 1,5 Мэв и среднем токе пучка до 17 миллиампер.

Протоны, ускоренные до энергии несколько Мэв, используются в ядерных экспериментах, для получения нейтронных потоков, а также могут быть применены для различных прикладных целей.

Как правило, ускорение протонов до таких энергий производится в электростатических ускорителях (ЭСУ), а в последние годы в ускорителях прямого действия новых типов — динамитронах и трансформаторах с изолированным ярмом [1,2]. Наиболее существенным отличием новых установок является значительно больший предельный ток протонов — несколько миллиампер против сотен микроампер в ЭСУ. В ЭСУ токи ограничиваются, в основном, максимальным зарядом, который может переноситься механическим транспортом. В новых ускорителях максимальные токи протонов прежде всего ограничиваются появлением электронной загрузки и снижением электрической прочности трубки, а также сложностью обеспечения вакуумной откачки мощного ионного источника. В выпускаемых в настоящее время динамитронах и трансформаторах с изолированным ярмом предельные токи при ускорении электронов в несколько раз превышают предельные токи протонов.

Основные пути повышения электрической прочности ускорительной трубки при прохождении по ней интенсивных потоков тяжелых частиц — это уменьшение сечения пучка за счёт усиления фокусировки и максимальное удаление его от стенок, а также затруднение образования лавин, вызванных электронами, движущимися навстречу основному пучку.

Возможности получения большого тока протонов, ускоренных до энергии 1 Мэв и выше, рассмотрены нами применительно к ус-

корителю трансформаторного типа ЭлТ-1,5, описанному в /3/. Первые экземпляры такого ускорителя (рис. 1) были созданы для ускорения электронов до энергии 1,5 Мэв и обеспечили получение пучков со средней мощностью 25 квт.

Максимальные мощность и ток пучка в шесть раз превышают средние (рис. 2а). Стабилизация ускоряющего напряжения на трубке в течение рабочего импульса осуществляется регулированием тока ускоряемого пучка с помощью управляющей сетки инжектора и системы авторегулирования, задающей потенциал на сетке. На рис. 2б приведена электрическая схема такого ускорителя. Установка питается непосредственно от сети 50 гц и число импульсов ускоренного тока составляет соответственно 50 раз в секунду. Возможна работа с меньшей частотой повторения вплоть до одиночных импульсов. Энергия электронов может изменяться от 400 кэв до 1,5 Мэв, а мощность пучка регулироваться от нуля до максимума. Стабильность установленной энергии электронов в ускорителях, предназначенных для прикладных целей, составляет около 2% и при необходимости может быть повышена до $\sim 0,02\%$. К.п.д. ускорителя достигает 90%.

Для ускорения на такой установке протонов при параметрах пучка, близких к названным выше, необходим источник с регулируемым за время импульса током до 100 миллиампер, а также система транспортировки протонов через ускорительную трубку, обеспечивающая диаметр пучка менее 2 см. Кроме того, постановка на высоковольтной части ускорителя мощного ионного источника существенно усложняет вакуумную откачку, а наличие в пучке компонент H_2^+ и H_3^+ заставляет рассмотреть вопрос о необходимости сепарации пучка сразу после выхода его из источника. Требуется также разработать достаточно компактные системы питания и управления источником и другими устройствами, размещаемыми под высоким потенциалом.

Источник ионов и регулировка тока

Основным предъявляемым требованиям удовлетворяет ионный источник с осцилляцией электронов в магнитном поле (см., например /4/), с регулируемым током до 100 миллиампер.

На рис. 3 приведена схема экспериментального стенда с источником меньшего размера: диаметр отверстия эмиссии $d = 3$ мм и максимальный ток ~ 20 ма.

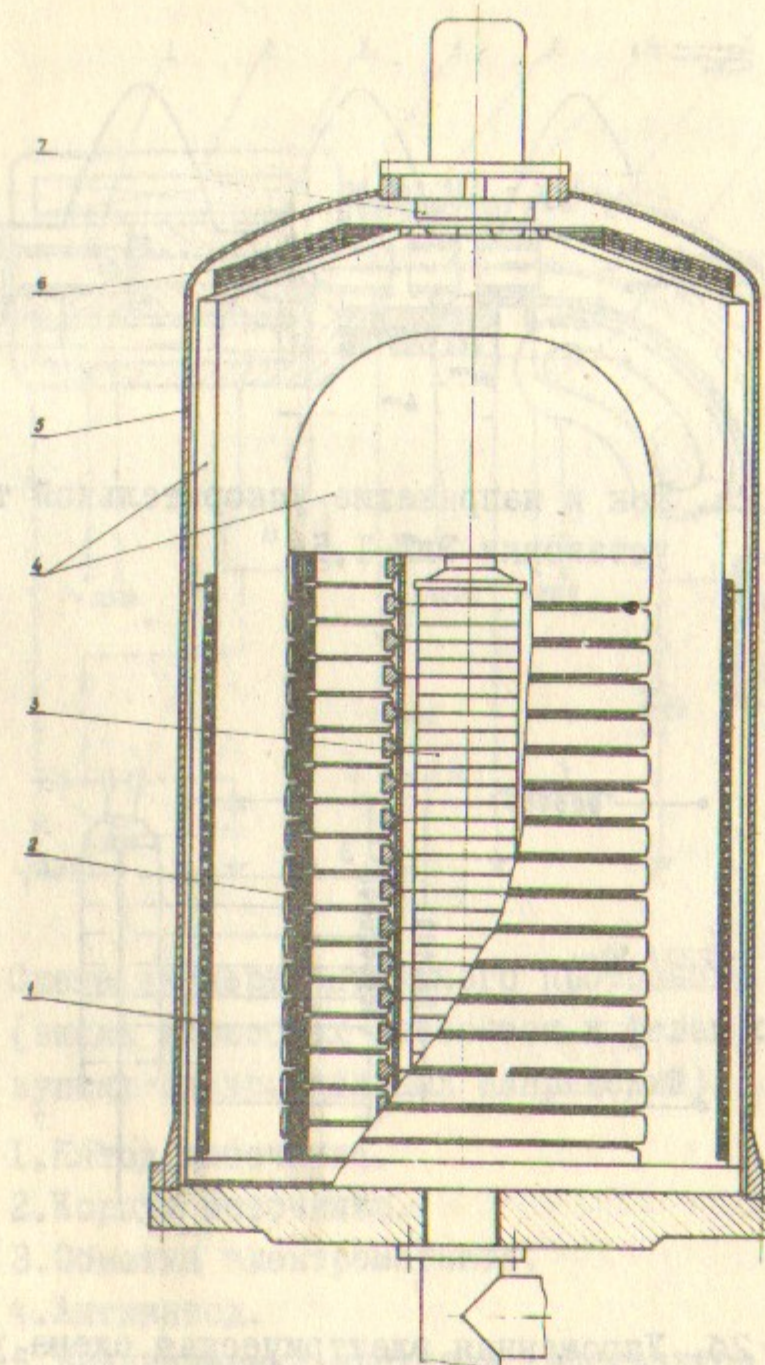


Рис. 1. Схема конструкции ЭлТ-1,5.

1. Первичная обмотка трансформатора.
2. Вторичная обмотка трансформатора.
3. Ускорительная трубка.
4. Детали магнитопровода.
5. Котёл.
6. Теплообменник.
7. Вентилятор.

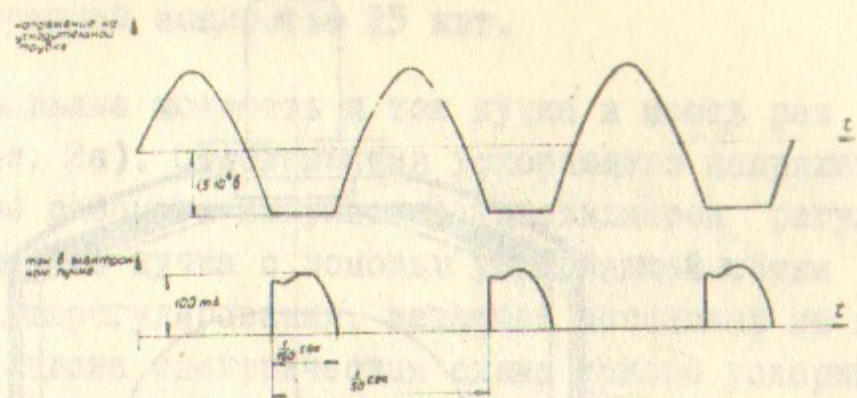


Рис. 2а. Ток и напряжение ускорительной трубки установки ЭЛТ-1,5.

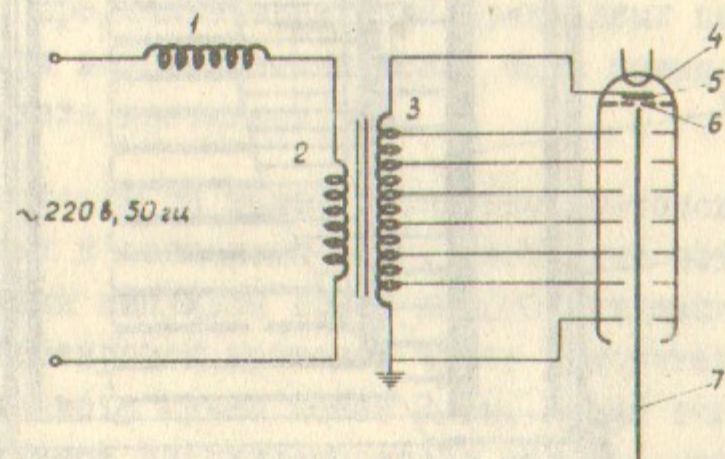


Рис. 2б. Упрощенная электрическая схема установки ЭЛТ-1,5.

1. Индуктивность рассеяния первичной обмотки.
2. Первичная обмотка.
3. Вторичная обмотка.
4. Ускорительная трубка.
5. Катод инжектора.
6. Управляющая сетка инжектора.
7. Пучок ускоренных частиц.

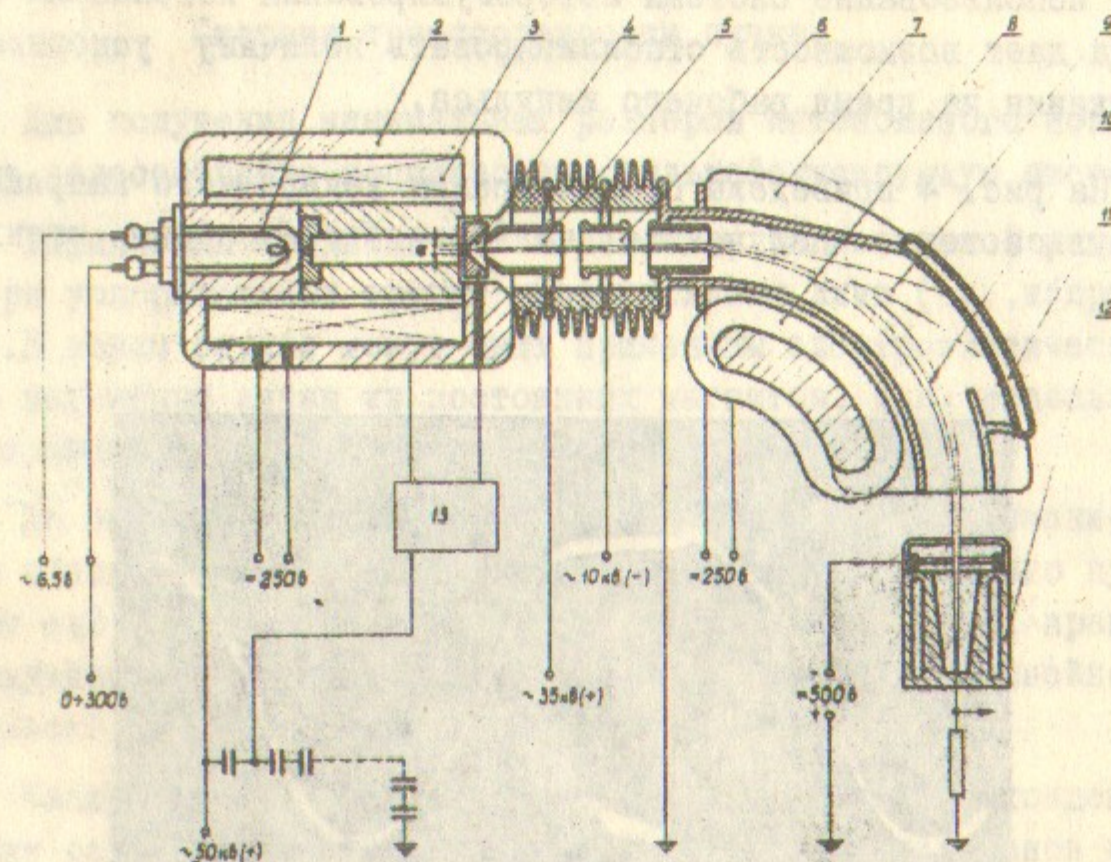


Рис. 3. Схема экспериментального протонного инжектора (знаки в скобках относятся к фазам соответствующих синусоидальных напряжений).

1. Катод источника.
2. Корпус источника.
3. Обмотка электромагнита.
4. Антикатод.
5. Вытягивающий электрод (экстрактор).
6. Электрод для запираания вторичных электронов.
7. Сепаратор.
8. Электромагнит сепаратора.
9. Тяжелые компоненты H_2^+ и H_3^+ пучка.
10. Пучок протонов.
11. Мишень для компонент H_2^+ и H_3^+ .
12. Мишень для протонов.
13. Система авторегулирования тока источника.

Управление током осуществляется за счет изменения потенциала антикатода (поз. 4 рис. 3) по отношению к корпусу источника. Использование системы авторегулирования потенциала антикатода дает возможность стабилизировать величину ускоряющего напряжения на время рабочего импульса.

На рис. 4 приведены осциллограммы ускоряющего напряжения и импульса тока, полученные на экспериментальном стенде (рис. 3).

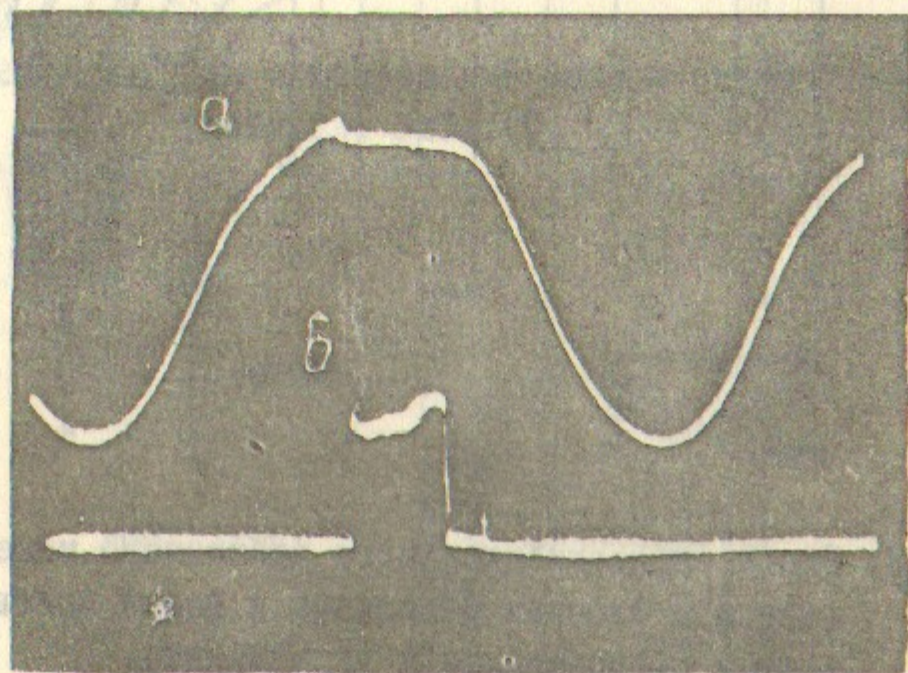


Рис. 4. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) экспериментального источника.

В условиях эксперимента сепаратор (поз. 7, рис. 3) позволяет установить процентное содержание протонов в пучке.

Расход газа в источнике на 100 ма составляет около 3 норм. см³/мин и откачка с земляного конца ускорительной трубки не обеспечивает необходимый вакуум в зоне источника. В связи с этим предусматривается установка на высоковольтном конце трубки сорбционно-ионного насоса типа "орбитрон" /5/. Изучается возможность подачи газа импульсами длительностью несколько большей длительности рабочих импульсов тока.

Охлаждение нагруженных в тепловом отношении узлов источника и схем питания осуществляется прокачкой масла по изоля-

ционным маслопроводам и теплообменнику, расположенному на низковольтной стороне.

Система транспортировки пучка

Для получения минимальных размеров интенсивного ионного пучка целесообразно использовать сильнофокусирующую систему.

Технически представляется наиболее рациональной установка внутри ускорительной трубки квадрупольных линз (см., например, /6/). В нашем случае могут быть применены электростатические линзы и магнитные линзы из постоянных магнитов, т.к. использование электромагнитов существенно усложняет конструкцию.

До энергий порядка нескольких Мэв электростатические квадрупольные линзы обеспечивают более сильную фокусировку протонного пучка и имеют еще ряд преимуществ по сравнению с магнитными: практически не ухудшают вакуумную откачку, позволяют получить линейное поле в большей части апертуры, проще в исполнении.

Квадрупольный канал существенно затрудняет прохождение по трубке случайных частиц, например, вторичных электронов и снижает вероятность образования электронных лавин /7/. Этот факт вместе с ничтожным выпадением на электроды частиц основного пучка благоприятно сказывается на электрической прочности трубки.

В рассматриваемом ускорителе электроды линз подсоединяются к отводам вторичной обмотки (рис. 5), напряжение на которой во время прохождения тока по трубке постоянно. Фокусирующие линзы чередуются с дефокусирующими (система ФОДО), длины всех линз и промежутков равны между собой $l_{\phi} = l_d = l_{\alpha} = l_{\sigma} = 3,85$ см.

Всего на длине трубки размещено 8 периодов линз длиной $S = 15,4$ см каждый. Амплитуда некогерентных колебаний частиц пучка $r_n \cong 0,8$ см. Система обеспечивает прохождение максимального тока I_{max} в случае, когда параметры пучка на входе в трубку согласованы с ионно-оптическими характеристиками квадрупольного канала. Величины I_{max} в режимах ускорения до 1,5 Мэв и без ускорения практически совпадают и определяются выражением /7/:

$$I_{max} = \frac{M_0 V_{\phi}}{2} \cdot \left(\frac{r_n}{S}\right)^2 \cdot \beta^3 \cdot \gamma^3 \cdot \frac{2kI_0}{\sqrt{1+k^2 + k}}; \quad (1)$$

где

$$h = j \frac{S}{\mu_0 \beta^2 \gamma^2 I_0}; \quad (2)$$

$j \cong 300$ ма/см.мрад - ожидаемая фазовая плотность тока на выходе из согласующего устройства.

$I_0 = 3,14 \cdot 10^7$ а - базовый расчётный ток для протонов,

μ_0, ν_ϕ - средняя и минимальная частоты поперечных колебаний (без учёта объёмного заряда),

β, γ - вычисляются по энергии входа в канал W_0 .

Градиент линз $G \cong 10^{KB/cm^2}$ для номинального режима (ускоряющее напряжение на трубке $U_{тр} = 1,5$ Мв), максимальная напряженность электрического поля в линзе не превышает $50^{KB/cm}$, а максимальный ток по (1) $I_{max} \cong 100$ ма.

Величины максимальных токов для различных ускоряющих напряжений на трубке описываемого ускорителя и соответствующих им градиентов линз сведены в таблицу:

| W_{max} (кэв) | G (KB/cm^2) | μ_0 | ν_ϕ | W_0 (кэв) | I_{max} (ма) |
|-----------------|-------------------|---------|------------|-------------|----------------|
| 1500 | 10,40 | 1,42 | 0,64 | 140 | 104 |
| 1100 | 7,63 | 1,21 | 0,63 | 120 | 88 |
| 800 | 5,55 | 1,07 | 0,60 | 100 | 60 |
| 500 | 3,47 | 0,75 | 0,51 | 80 | 38 |
| 300 | 2,08 | 0,66 | 0,50 | 70 | 24 |

Для обеспечения оптимальных характеристик пучка на входе в квадрупольный канал устанавливается согласующее устройство (поз.8, рис.5), являющееся квартетом квадрупольных линз.

Влияние тяжелых компонент на транспортировку пучка.

Пучок инжектора содержит не менее 70% протонов, остальная часть состоит из тяжелых компонент H_2^+ и H_3^+ , наличие которых ухудшает прохождение тока через трубку. Это ухудшение, однако, не является столь существенным для описанной системы электростатической фокусировки.

Можно показать, что основным эффектом здесь является усиление расталкивания, вызванного пространственным зарядом пучка, связанного с током $I_{эв}$:

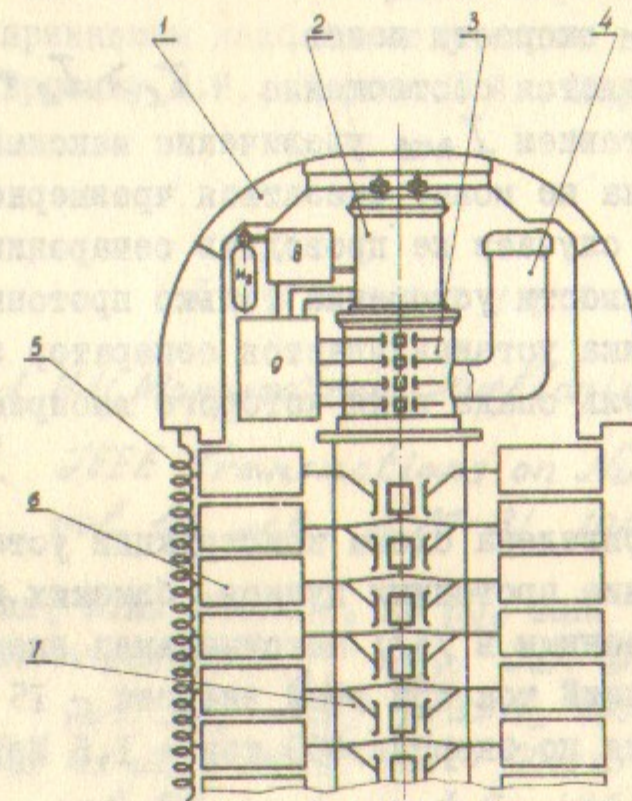


Рис. 5. Схема высоковольтной части установки для ускорения ионов.

1. Высоковольтная часть магнитопровода.
2. Ионный источник.
3. Система ионно-оптического согласования.
4. Ионно-сорбционный насос ("орбитрон").
5. Высоковольтная (вторичная) обмотка.
6. Детали магнитопровода.
7. Ускорительная трубка с электростатическими квадрупольными линзами.
8. Система импульсного напуска газа.
9. Система электропитания и стабилизации напряжения.

$$I_{\text{экв}} = I_1 \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \frac{v_1}{v_2} + \frac{I_3}{I_1} \frac{v_1}{v_3} \right) = I_1 + \sqrt{2} \cdot I_2 + \sqrt{3} \cdot I_3; \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_3 - токи ионов
 v_1, v_2, v_3 - скорости ионов.

Т.к. типичным является соотношение $I_1 > I_2 + I_3$, то обусловленное возрастанием $I_{\text{экв}}$ увеличение максимальных поперечных размеров пучка не может оказаться чрезмерно большим. Это позволяет в ряде случаев не проводить сепарацию пучка.

При необходимости ускорения только протонной фракции на выходе из источника устанавливается сепаратор электромагнитного типа, показатель спада поля которого выбирается отличным от нуля.

На рис. 5 приведена схема конструкции установки, рассчитанной на получение протонных пучков, близких по параметрам к электронным, описанным в /3/: максимальная энергия 1,5 Мэв, максимальный средний ток при этой энергии - 15 + 17 ма, пределы регулирования по энергии 400 кэв + 1,5 Мэв.

З а к л ю ч е н и е

Изучение возможности ускорения больших протонных токов на ускорителях - трансформаторах показывает, что на установках такого типа вполне реально получение средних токов в десятки миллиампер и импульсных до сотен миллиампер. Максимальные энергии могут быть доведены до 3 + 4 и более Мэв и к.п.д. до 90 + 95%.

На базе этих установок могут быть созданы сильноточные тандемы, а также ускорители тяжелых ионов с многократной перезарядкой /8/. Для реализации таких машин должен быть решен ряд технических вопросов: создание более мощных источников с управляемым током, насосов для вакуумной откачки с высоковольтной стороны, разработаны эффективные системы согласования и транспортировки пучка и т.д.

В настоящее время в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР закончены предварительные эксперименты по отработке элементов протонного сильноточного ускорителя на энергию 1,5 Мэв и среднюю мощность 25 квт. Основные результаты этих работ описаны выше. Ускорение протонов по приведенной

схеме предполагается провести на одном из серийных ускорителей типа ЭЛТ-1,5.

В заключение пользуемся случаем выразить благодарность сотрудникам, принявшим наибольшее участие в работе, тт. Горбунову В.А., Бровину М.И., Черток И.Л., Харченкову П.Г. и Шушаро А.И.

Л и т е р а т у р а

1. M.R. Cleland, H.H. Morganstern, *Nucleonics*, aug. 1960, p. 52.
2. E. Burill. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 10, n3, p. 70-81, 1963.
3. Е.А. Абрамян, В.А. Гапонов, АЭ 20, вып. 5, май 1966 г.
4. M. Abele, W. Meckbach, *Rev. Sci. Instr.* vol. 30, n5, p. 335, 1959.
5. R.A. Douglas et al. *Rev. Sci. Instr.* vol. 36, n1, p. 1-6, 1965.
6. Е.А. Абрамян, В.А. Гапонов, АЭ 22, вып. I, январь 1967 г.
7. И.М. Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Атомиздат, Москва, 1966.
8. G. Hortig. *Zeitschrift für Physik*, 176, n2, 115, 1963.

Содержание

1. Введение

2. Описание работы

3. Заключение

4. Литература

5. Приложение

6. Заключение

Ответственный за выпуск В.И.Кононов

Подписано к печати 23.01.1967 года, заказ №92.

Тираж 250 экз., 0,5 печ.л., бесплатно.

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР.