

A.16

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

Lds

препринт

Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов, С.Г.Крайнов,
В.С.Николаев, И.М.Шалашов

Сильноточный электронный ускоритель на 2,5 Мэв

г.Новосибирск 1967

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана конструкция ускорителя электронов на энергию 2,5 Мэв и среднюю мощность пучка 40 кВт, представляющего собой резонансный трансформатор с секционированным сердечником. Изложены особенности конструкции деталей магнитопровода, обмоток высоковольтного трансформатора, ускорительной трубки и других элементов ускорителя.

A. Abramyan, V. Gaponov, G. Kraynov
V. Nikolayev, I. Shalashov

HIGH-CURRENT ELECTRON ACCELERATOR
FOR ENERGY 2.5 MeV

Summary

A construction of accelerator designed for acceleration of electrons up to 2.5 MeV with average beam power 40 kW is described. The accelerator is a resonance transformer with core divided into many insulated sections. Features of the core, transformer windings, accelerating tube and other elements of the accelerator are expounded.

Существуют различные типы высокопоточных ускорителей электронов прямого действия на энергию несколько Мэв — резонансные трансформаторы /1/, трансформаторы с изолированным сердечником /2/ и ускорители-трансформаторы, стабилизация энергии электронов в которых производится модуляцией величины тока самих ускоряемых частиц /3,4/. Конструкции последних сочетают в себе некоторые особенности первых двух типов с рядом новых элементов. Первая модель таких ускорителей — ЭлТ-1,5 (электронный трансформатор на энергию 1,5 Мэв) успешно испытана. Средняя мощность в электронном пучке в таких установках составляет 25 квт. В настоящее время выпускается несколько экземпляров ускорителя ЭлТ-1,5 для использования на различных предприятиях страны. Разработана и изготовлена также экспериментальная установка ЭлТ-2,5, рассчитанная на ускорение электронов до 2,5 Мэв при средней мощности пучка ~ 40 квт. Принцип работы и схемы конструкций ЭлТ-1,5 и ЭлТ-2,5 весьма близки. Учитывая, что особенности работы таких ускорителей подробно изложены в /4/, мы опишем действие ускорителя ЭлТ-2,5 вкратце. Настоящая статья посвящена главным образом описанию конструктивных элементов ускорителя, а также технологическим вопросам, решение которых определило конструкцию основных деталей установки.

Принцип работы и параметры

Ускоритель ЭлТ-2,5 представляет собой повышающий трансформатор, нагруженный на ускорительную трубку (рис.1а). Число витков во вторичной обмотке и геометрические размеры подбираются так, чтобы собственная частота трансформатора равнялась 50 гц. Питание установки осуществляется от сети 220/380 в, 50 гц, стабилизация ускоряющего напряжения на трубке — варьированием величины нагрузки. Действительно, если потери в стали и меди малы по сравнению с мощностью, передаваемой в нагрузку, эквивалентная схема может быть упрощена (рис.1б), и напряжение на трубке $u_{тр}$ во время протекания по ней тока $i_{тр}$ определено из $u_{тр} = U_{11m} \sin \omega t - L_s \frac{di_{тр}}{dt}$, где U_{11m} — амплитуда напряжения на вторичной обмотке в режиме холостого хода, L_s — индуктивность рассеяния, приведенная ко вторичной обмотке. Легко видеть, что существует закон изменения $i_{тр}$, при котором $u_{тр} = \text{Const}$. На рис.1в показаны кривые изменения напряжения и тока трубки в режиме $u_{тр} = \text{Const}$. Изменение тока электро-

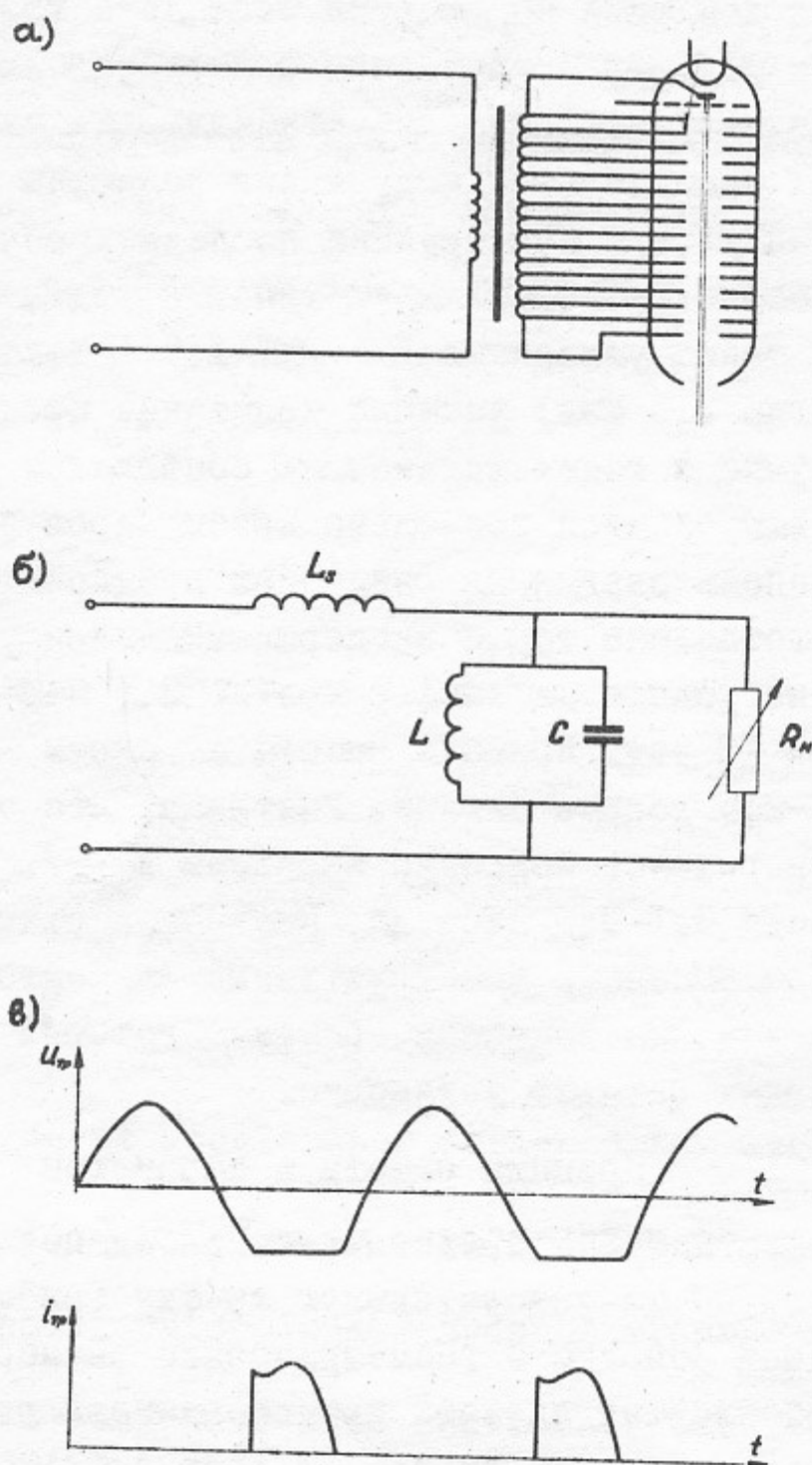


Рис. I. Электрическая схема ускорителя и напряжение и ток трубки.

L_s - индуктивность рассеяния

L - индуктивность трансформатора

C - общая ёмкость трансформатора

$R_n = \frac{u_{тр}}{i_{тр}}$ - сопротивление нагрузки

$u_{тр}$ - напряжение на ускорительной трубке

$i_{тр}$ - ток ускоренных электронов.

нов производится регулированием напряжения на управляющем электроде инжектора с помощью специальной системы управления. Ширина импульсов тока может регулироваться от 0 до 5 мсек, частота следования от единичных до 50 гц. Величина мощности, которая может быть передана в пучок, в значительной мере определяется величиной индуктивности рассеяния.

Приведем сводку основных параметров ЭлТ-2,5.

Напряжение питания первичной обмотки	- 220/380в, 50 гц
Максимальное напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода	- 2,8 Мв
Номинальное ускоряющее напряжение на трубке	- 2,5 Мв
Диапазон изменения ускоряющего напряжения	- 0,8-2,5 Мв
Стабильность ускоряющего напряжения	- до 2%
Средняя мощность электронного пучка в основном рабочем режиме ($u_{тр} = 2,5$ Мв)	- 40 кВт
Диапазон изменения средней мощности	- 0-40 кВт
Длительность импульсов тока для основного режима	- 4 + 5 мсек
Средний ток в основном режиме	- ок. 16 ма
Максимальный ток в импульсе в основном режиме	- 100 ма
Диаметр электронного пучка на выходе ускорительной трубки	~ 5 мм
Суммарные потери в обмотках и магнитопроводе трансформатора, а также в инжекторе и системе его питания в основном режиме	- 4 кВт
Коэффициент полезного действия в основном режиме	- 0,9
Индуктивность трансформатора L	- $5,9 \cdot 10^4$ гн
Общая ёмкость трансформатора C	- $170 \cdot 10^{-12}$ ф
Собственная частота $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	- 50 гц
Индуктивность рассеяния первичной обмотки в основном режиме	- $5,0 \cdot 10^{-4}$ гн
Габариты ускорителя без вакуумной системы и выпускного устройства	- высота 4,1 м диаметр 1,6 м
Вес ускорителя	- 15 тн
Давление газа в котле	- 16 ат.

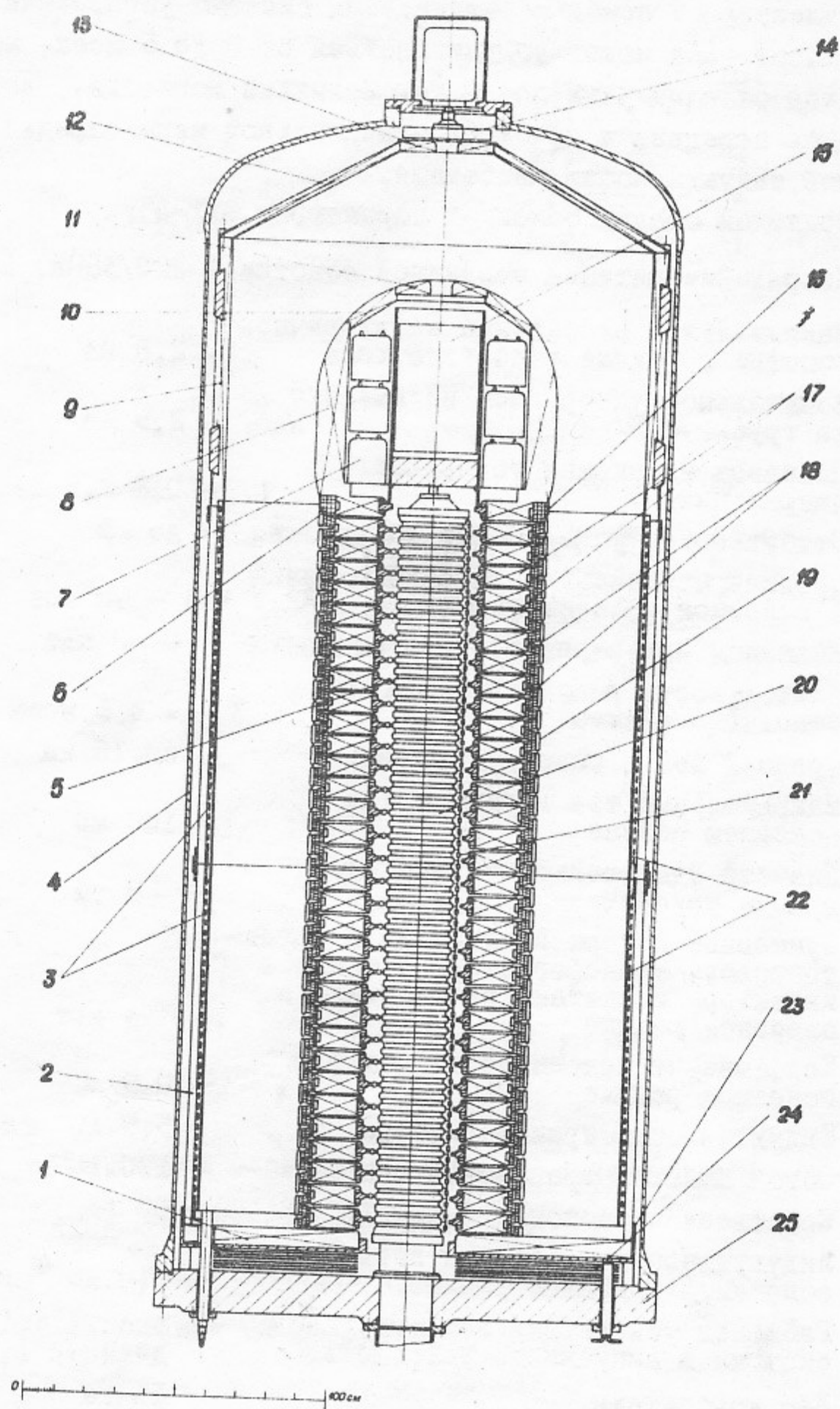


Рис.2. Схема конструкции ускорителя.

Подписи к рис.2

1. Основание магнитопровода
2. Магнитопровод гранёный
3. Обмотка первичная
4. Котел
5. Упругий прижим
6. Катушка головки
7. Батарея конденсаторов
8. Головка
9. Магнитопровод цилиндрический
10. Съёмная часть головки
11. Крышка головки
12. Магнитопровод конусный
13. Крышка конусного магнитопровода
14. Вентилятор
15. Система управления инжектором
16. Экран катушки головки
17. Диск центральной колонны магнитопровода
18. Секция вторичной обмотки
19. Экран
20. Ускорительная трубка
21. Омический делитель
22. Медный цилиндр
23. Бандажное кольцо
24. Радиатор
25. Нижняя крышка котла

Общее описание конструкции

Сечение установки приведено на рис.2. Первичная 3 и вторичная 18 обмотки трансформатора расположены коаксиально. Центральная часть магнитопровода (см.также рис.3) разбита на 32 изолированных друг от друга диска 17, потенциал которых меняется вместе с потенциалом вторичной обмотки. На высоковольтной стороне центральной колонны установлена головка 8. Диски и головка набраны из радиально расположенных листов трансформаторного железа. Наружная часть магнитопровода, состоящая из основания магнитопровода 1, грабеного 2, цилиндрического 9 и конусного 12 магнитопроводов, полностью охватывает центральную колонну, образуя замкнутую поверхность. Вторичная обмотка состоит из последовательно соединенных секций 18. С высоковольтной стороны последовательно к секциям 18 подсоединена катушка 6, посаженная на головку 8. Параллельно к катушке 6 подключена конденсаторная батарея 7, установленная внутри головки.

Ускорительная трубка 20 размещается внутри центральной колонны. Она секционирована и потенциалы на электродах задаются с помощью упругих прижимов 5, контактирующих с дисками 17, и омическим делителем 21. Инжектор (см.рис.4) установлен на фланце высоковольтного торца трубки. Над ним находится система управления инжектором 15 (рис.2), обеспечивающая накал катода 39 и напряжение на управляющем электроде 38 (рис.4). Ускорительная трубка жестко крепится только к нижней крышке 25 котла 4 и не воспринимает деформаций колонны.

Весь ускоритель помещен в котел 4 (диаметр 1,6 м, высота 4,1 м), заполненный газом под давлением 16 ат. Вакуумный насос для ускорительной трубки находится вне котла. Для отвода тепла, выделяющегося в обмотках, магнитопроводе, инжекторе и других элементах ускорителя установлен радиатор 24. Циркуляция газа (см.рис.5) обеспечивается вентилятором 14. Через отверстие в верхней части котла, в котором установлен вентилятор, может быть извлечена система управления 15 и при необходимости замены — инжектор. Также без снятия котла может производиться замена ускорительной трубки. Для проведения этих операций головка 8 и конусный магнитопровод 12 имеют съемные крышки 11 и 13, набранные из трансформаторного железа.

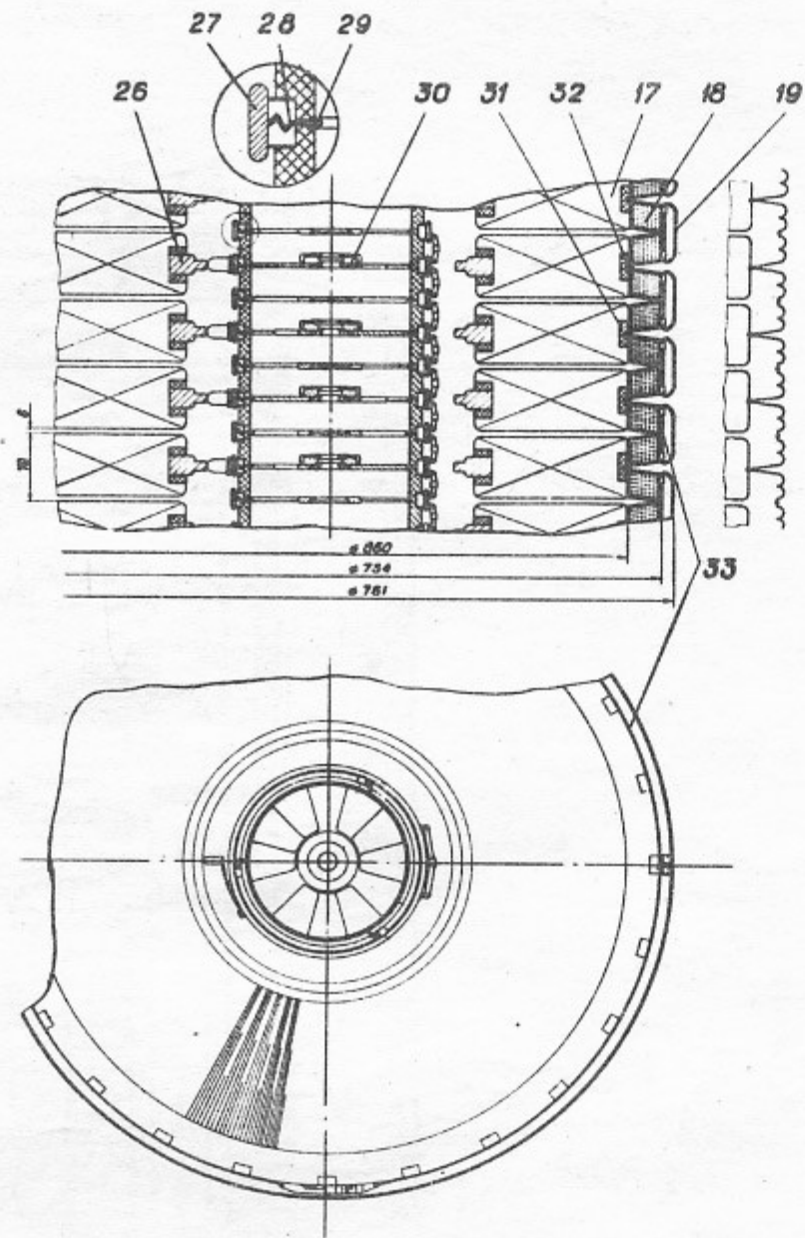


Рис.3. Конструкция центральной колонны и трубки

- 26. Медное кольцо
- 27. Наружнее эквипотенциальное кольцо
- 28. Проводник
- 29. Внутреннее кольцо
- 30. Магнитная линза
- 31. Стеклолента
- 32. Упорный бурт
- 33. Бандаж

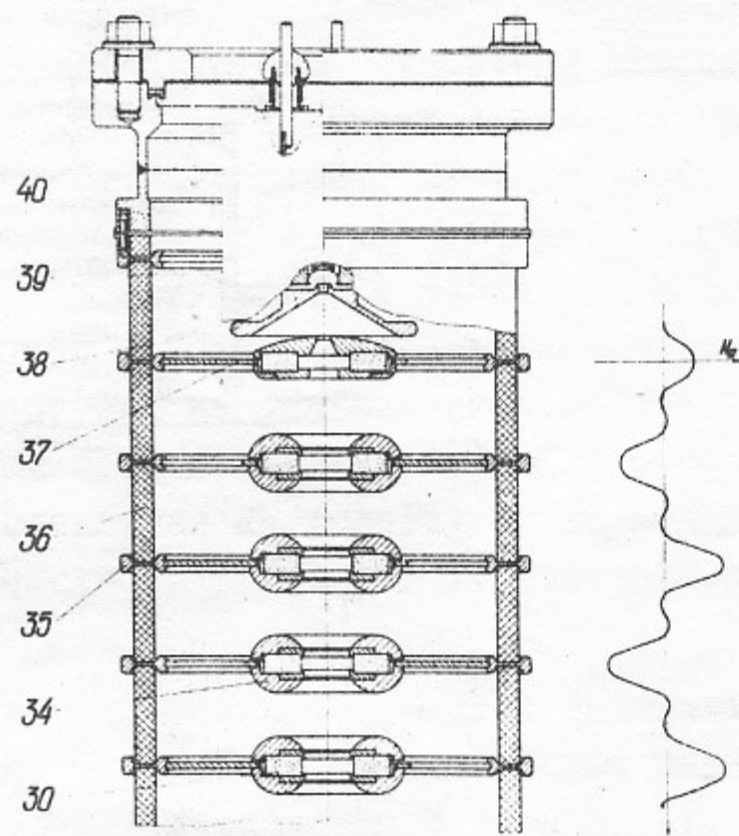


Рис.4. Вариант конструкции трубки

34. Экран из сплава свинца

35. Электрод

36. Керамическое кольцо

37. Внутренняя часть электрода

38. Управляющий электрод

39. Катод

40. Металлический стержень в центре катода

H_z - осевая составляющая магнитного поля линз

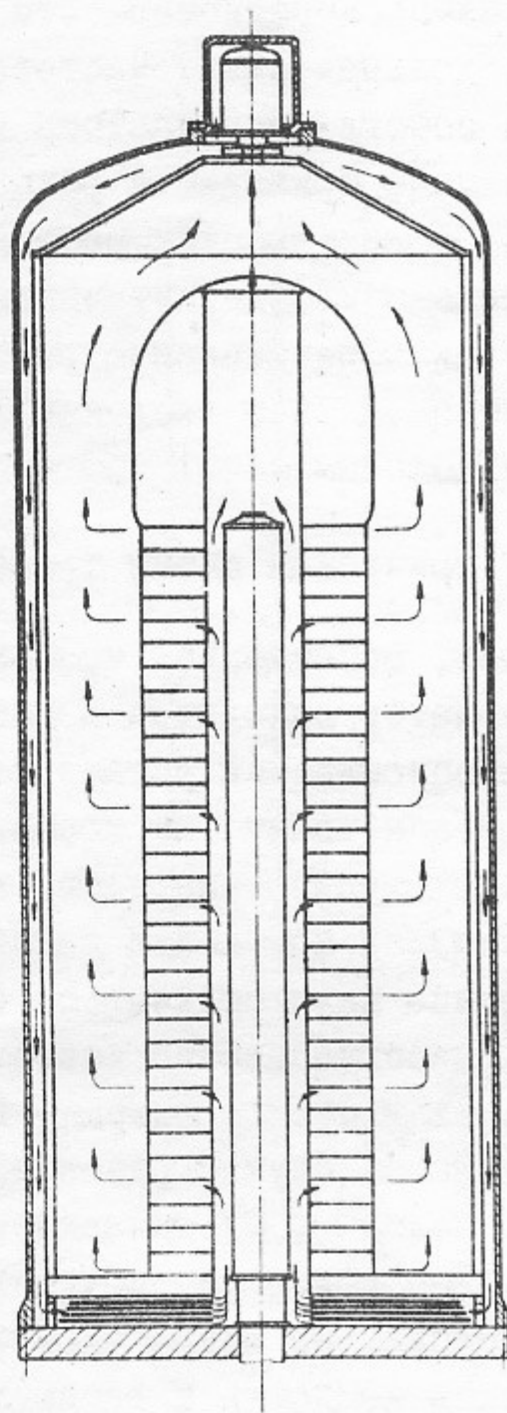


Рис.5. Схема циркуляции газа.

Одним из основных вопросов при конструировании установки было обеспечение заданных зазоров между дисками 17 и устойчивости центральной колонны. Конструкция крепления деталей центральной колонны описана ниже. Отметим, что на колонну помимо собственного веса (~ 4 тн) действуют силы магнитного поля — поперечная сила, возникающая из-за неравномерности (неточности) высоковольтного зазора, и продольная сила. Частота изменения магнитных сил — 100 гц. Основная собственная частота колонны существенно ниже, и поэтому эти силы не приводят к резонансной раскачке при частоте 100 гц. Влияние более высоких собственных частот может быть оценено приблизительно и будет уточняться экспериментально. При необходимости устранить резонансную раскачку колонны её жесткость может быть изменена за счет введения дополнительных прокладок между элементами колонны.

Электрическая схема трансформатора

Как уже отмечалось, собственная частота трансформатора равна 50 гц, т.е. трансформатор находится в резонансе с питающей сетью. Резонансность в описываемой установке, имеющей сильную индуктивную связь между обмотками, не играет столь решающей роли, как у обычных резонансных трансформаторов, где резонансность является обязательным условием повышения напряжения и где собственная частота системы должна мало отличаться от частоты питающего напряжения. Например, рассогласование частоты в резонансных трансформаторах фирмы General Electric Company не должно превышать $\pm 0,3\%$ /1/. Однако и в нашем случае резонансность дает ряд преимуществ: а) повышается $\cos \phi$, б) снижаются потери в трансформаторе, так как реактивная мощность, обусловленная наличием емкости высоковольтной колонны на землю циркулирует только во вторичной цепи, в) снижаются мощность и габариты устройств, регулирующих напряжение на входе первичной обмотки.

Электрическая схема трансформатора показана на рис.6.

При проектировании ускорителя сначала, исходя из электрической прочности ускорительной трубки и допустимых напряженностей электрического поля в газовых зазорах, выбираются основные размеры ускорителя: длина трубки, высота и диаметр центральной колонны, величина высоковольтного зазора a и высота наружного

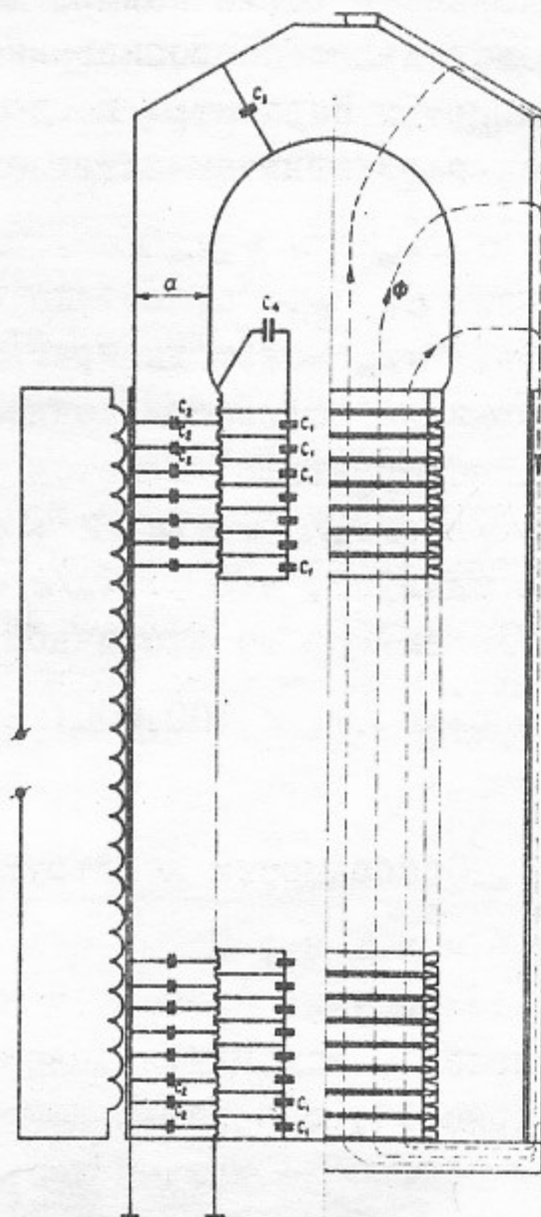


Рис.6. Электрическая схема трансформатора

- C_1 - ёмкости между дисками центральной колонны магнитопровода
- C_2 - ёмкость вторичной обмотки на землю, приходящаяся на 1 см высоты обмотки
- C_3 - ёмкость головки на землю
- C_4 - ёмкость батареи конденсаторов, установленной в головке центральной колонны
- a - высоковольтный зазор
- Φ - основной магнитный поток трансформатора.

магнитопровода. Затем по полученным геометрическим размерам подсчитываются C_1, C_2, C_3 и по ним суммарная ёмкость трансформатора на землю C . Вычисляются также полное магнитное сопротивление R зазоров колонны и магнитное сопротивление R_a высоковольтного зазора a ($R = \sum l / \mu S$). Параметры конденсаторной батареи C_4 выбираются из условия равенства амплитуд электрической и магнитной энергий см. /4/: $C_4 U_{4m}^2 / 2 = \Phi_m^2 R_a / 2$. Здесь U_{4m} — амплитуда напряжения на ёмкости C_4 , Φ_m — амплитуда основного магнитного потока трансформатора. U_{4m} может выбираться в широких пределах в зависимости от имеющихся номиналов конденсаторов. Общим условием резонанса всего трансформатора является равенство:

$$C U_{11m}^2 / 2 + C_4 U_{4m}^2 / 2 = \Phi_m^2 R / 2 + \Phi_m^2 R_a / 2$$

Из вышеизложенного следует, что $C U_{11m}^2 / 2 = \Phi_m^2 R / 2$. Отсюда находится Φ_m и затем число витков во вторичной обмотке $w_2 = U_{11m} / \omega \Phi_m$.

В описываемой установке $w_2 \cong 100.000$. Число витков в катушке 6 равно $w_2 \frac{U_{4m}}{U_{11m}}$.

Особенности конструкции узлов

В центральной колонне трансформатора (рис.3) несущим элементом являются секции I8, на каждую из которых опирается вся находящаяся выше часть колонны. Диски I7 имеют бурт 32 (рис.3), с помощью которого фиксируются в заданном положении. При сборке на каждый диск плотно насаживаются две секции I8 и затем такие элементы собираются в колонну. Снаружи на секции надеваются стальные бандажы 33, скрепляющие секции. Каждый бандаж натягивается специальным приспособлением, обеспечивающим тангенциальное усилие ~ 3 тн, и скрепляется замком, имеющим изоляционную прокладку для устранения короткозамкнутого витка. Экраны I9 улучшают электрическую прочность колонны и предохраняют секции при тренировочных пробоях. Каждый экран для устранения замкнутого витка также разрезан и затем скреплен через изоляцию.

Максимальное рабочее напряжение на зазоре между двумя соседними дисками ~ 90 кв и, соответственно, на каждой секции — 45 кв. Секции имеют коническую форму (рис.7) и каждая содержит 3100 витков. Обкладки из нержавеющей стали 41 и 42 защищают витки крайних слоев от пробоя на диск или бандаж в момент тренировочных пробоев между дисками или с колонны на землю. Межслоевой изоля —

лии - бумаге - придается корытообразная форма для удержания крайних витков при намотке. Для создания высокой электрической и механической прочности секция после намотки пропитывается эпоксидным компаундом горячего твердения. В пропиточный бак секция закладывается вместе с каркасом, в котором производится намотка; в баке осуществляется вакуумная сушка, пропитка эпоксидным компаундом и полимеризация, для чего создается давление 40 ат и поддерживается следующий тепловой режим: пропитка при 65°C - 4 часа, полимеризация при 100°C - 10 часов. Затем секция вынимается из бака и полимеризация продолжается еще 10 часов в печи при температуре 100°C . После окончания полимеризации каркас разбирается и используется снова. Поверхности секций после пропитки имеют достаточно хорошее качество и механической обработке подвергаются только места посадки. В результате получаются безкаркасные монолитные катушки, имеющие необходимые электрические и механические качества. Проверка секций показала, что они не прогибаются при напряжении, в два раза превышающем рабочее.

41

42

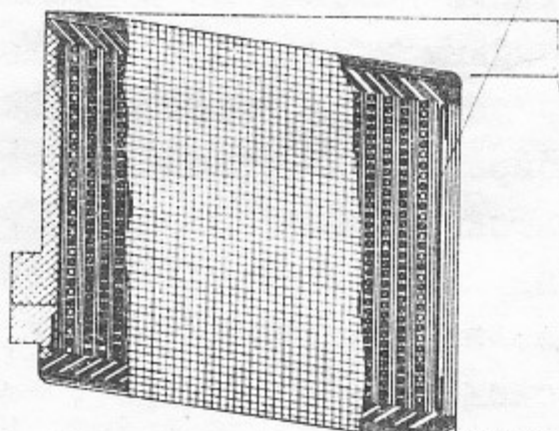


Рис.7. Сечение секции вторичной обмотки
 41. Обкладка наружная
 42. Обкладка внутренняя.

Диски 17, как уже отмечалось, шихтованы радиально (рис.3). Для дисков, как и для всех других деталей магнитопровода, использована сталь Э43 толщ. 0,35 мм. Предварительно отштампованные,

обезжиренные и отожженные пластины набираются на медном кольце 26, после чего стягиваются в приспособлении гидравлическим бандажом для увеличения плотности набивки. Снаружи диски обматываются стеклолентой 31, затем помещаются в бак для вакуумной сушки и пропитки эпоксидным компаундом. При пропитке и полимеризации в баке давление поднимается до 40 ат при одновременном прогреве соответственно до 65⁰С и до 100⁰С. Затем диски обрабатываются на токарном и шлифовальном станках для получения нужных размеров и качества поверхностей. Отсутствие закорачивания пластин при механической обработке достигается прокладыванием при сборке между пластинами бумаги, обеспечивающей изоляционный зазор до 0,15 мм., на торцевые поверхности дисков гальванически наносится антикоррозионное никелевое покрытие. Для уменьшения неоднородности электрического поля у поверхностей дисков и искрения между пластинами при тренировочных пробах в газе в пропиточный компаунд добавляется сажа, обеспечивающая проводимость $10^{-4} - 10^{-5}$ I/ом.см. Изготовленные по описанному способу диски монолитны и имеют высококачественные поверхности. При стендовых испытаниях зазоры между дисками выдерживают двухкратное перенапряжение, по сравнению с рабочим.

Головка 8 также набрана из радиально расположенных пластин и пропитана эпоксидным компаундом. Технология её изготовления во многом аналогична описанной выше. Наружный диаметр головки и радиус кривизны выбираются из условия обеспечения величины напряженности электрического поля не более 170 кв/см. При этом амплитуда магнитной индукции у поверхности головки в основном рабочем режиме (ускоряющее напряжение на трубке 2,5 Мэв) не превышает 3400 гаусс, в дисках 17 - 2800 гаусс, что позволяет делать коэффициент заполнения этих деталей по железу 0,5-0,7 и менее. Головка - полая и для облегчения монтажа внутри нее батареи конденсаторов 7 и др. оборудования имеет съемную часть 10 и крышку 11. Катушка 6 плотно посажена на головку и закрыта экраном 16.

Д е т а л и м а г н и т о п р о в о д а 1,9 и 12 (рис.2) также шихтованы радиально. В отличие от дисков и головки они пропитаны эпоксидным компаундом холодного твердения непосредственно в атмосфере без применения пропиточных баков. Поверхности этих деталей, обращенные в сторону центральной колонны, также обрабатываются на станках. Граненый магнитопровод 2 состоит из двух час -

тей, каждая из которых собрана из 24 пакетов склеенного железа, образующих многоугольник с 24 гранями. Пластины железа в граненых магнитопроводах, в отличие от всех других деталей магнитопровода, ориентированы по азимуту. Пакеты склеены боковыми гранями и стянуты вместе напрессованными бандажными кольцами 23.

Первичная обмотка 3 состоит из двух частей, каждая из которых намотана на медный цилиндр 22, имеющий разрез по образующей, и пропитана эпоксидным компаундом холодного твердения. Всего в обмотке 30 витков, намотанных шиной 10x5 мм. Медные цилиндры 22 уменьшают рассеяние витков первичной обмотки. Величина напряжения на вторичной обмотке определяется напряжением, подаваемым на первичную обмотку от отдельного регулирующего устройства. Первичная обмотка расклинивается в граненом магнитопроводе и при разборках трансформатора вынимается вместе с ним единым узлом.

Ускорительная трубка сконструирована на основе трубки ускорителя ЭЛТ-1,5, см./4/ и /5/. Длина трубки ок. 2,5 м, электроды установлены с шагом 3,8 см. Удержание электронного тока в пучке малых размеров достигается с помощью системы постоянных магнитных линз 30 (рис.рис.3 и 4), установленных внутри трубки. Осевое поле линз H_z меняет попеременно знак (рис.4) и по абсолютной величине равно 600 гаусс, в ближайшей к инжектору линзе величина осевого поля в полтора раза меньше - 400 гаусс. Во время ускорения электронов в основном рабочем режиме на первый промежуток катод 39 - первый анод (управляющий электрод) 38 от системы управления 15 (рис.2) подается напряжение до 2,3 кв, соответствующее току с катода 100 ма. Наладка ускорителя будет производиться с боридлантановым катодом. Диаметр катода 8 мм, мощность подогревателя - 80 вт. Средняя часть катода 39, подвергающаяся ионной бомбардировке, имеет отверстие, в которое вставлен металлический стержень 40. Применяемая электронно-оптическая система обеспечивает диаметр электронного пучка на выходе из трубки ~ 5 мм в диапазоне ускоряющего напряжения на трубке от 800 кв до 2,5 Мв. Величина максимального тока при этом меняется от 50 ма при 800 кв (средняя мощность ~ 7 квт) до 100 ма при 2,5 Мв в основном рабочем режиме (средняя мощность ~ 40 квт). Экспериментальная проверка описанной оптики, в основном, проведена на ускорителе ЭЛТ-1,5.

Изолятор ускорительной трубки выполнен из керамики в двух вариантах. В первом — изоляционная трубка-цельная и разнос напряжения на ней осуществляется металлическими кольцами, посаженными снаружи и внутри (рис.3). Наружные 27 и внутренние 29 кольца электрически соединяются уплотненными на вакуум проводниками 28. Внутри трубки имеются канавки, покрытые серебром, в которые вставляются внутренние распорные контактные кольца 29. Снаружи изолятора сделаны широкие канавки, поверхность которых также покрыта слоем серебра и в которые вставлены наружные эквипотенциальные кольца 27. Металлизованные наружные канавки снижают напряженность электрического поля в области внутренних канавок, повышая электрическую прочность трубки по вакуумной стороне.

Во втором варианте (рис.4) трубка состоит из керамических колец 36, соединенных с электродами 35 термокомпрессионной сваркой. В обоих случаях внутренняя часть электродов съемная. Отверстия для вакуумной откачки в соседних электродах смещены. Для защиты изоляции трубки и газовых зазоров ускорителя от радиации, возникающей в области прохождения пучка, предусмотрена установка массивных экранов 34, изготовленных из сплава свинца. Напряжение на электродах задается упругими прижимами 5 и омическим делителем 2I (рис.2).

Вакуумная откачка производится с земляного конца трубки. Будет проверена работа трубки как с масляным диффузионным насосом, так и с магниторазрядным насосом. Подготовлен также портативный магниторазрядный насос, который при необходимости может быть установлен на высоковольтной стороне трубки.

Система подачи газа расположена отдельно от ускорителя и содержит сушилку, заполненную алюмогелем и силикогелем, и фильтр. Свойства сушилки периодически восстанавливаются прогревом в вакууме.

Устройства для использования ускоренного пучка различны для различных задач. Для облучения объектов вне вакуума пучок разворачивается магнитным полем и выпускается через фольгу в атмосферу. Для сварки металлов и других целей электроны могут быть выведены из вакуума, например, через вращающуюся фольгу /6/. При необходимости

создать интенсивный поток гамма-излучения устанавливаются вращающиеся или другие мишени.

З а к л ю ч е н и е

Описанная выше установка является первой моделью электронного трансформатора на энергию 2,5 Мэв. Ряд её узлов повторяет уже отработанные конструкции аналогичных ускорителей на 1,5 Мэв, которые выпускаются малой серией. Ускоритель ЭЛТ-2,5 в настоящее время находится в сборке. Как видно из изложенного, конструкция установки относительно проста и после изготовления деталей по отлаженной технологии её сборка не представляет затруднений. Соответственно в процессе эксплуатации возможна замена любой из деталей, что делает срок службы установки, практически, неограниченным. Предполагается, что возможна форсировка ускорителя до максимальных энергий, превышающих 2,5 Мэв, однако точные данные о возможностях установки будут получены после проведения экспериментов.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам Института ядерной физики Сибирского отделения АН СССР, принявшим участие в проектировании и изготовлении установки.

Л и т е р а т у р а

1. Radiation sources, edited by A. Charlesby p. 171-196
Pergamon Press, 1964.
2. M.R.Cleland et al, Nucleonics, No 8,52 (1960).
3. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. Авторская заявка № 906570/26-25.
4. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. Атомная энергия, т.20, вып.5, май
1966 г.
5. Е.А.Абрамян, В.А.Гапонов. Атомная энергия, т.22, вып.1,
стр.39, 1967 г.
6. Е.А.Абрамян, Г.И.Будкер. Авторская заявка № 1020893/26-25.

Ответственный за выпуск Качалова А.М.
Подписано к печати 13.IV-1967 г.
Усл.0,8 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.
Заказ № II6

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР