

A.16

И Н С Т И Т У Т
Я Д Е Р Н О Й Ф И З И К И С О А Н С С С Р

И Я Ф 18 - 70

Е.А.Абрамян

СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ -
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Новосибирск

1970

Е.А.Абрамян

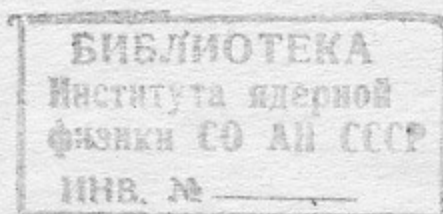
СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ-ТРАНСФОРМАТОРЫ

А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны принципы работы и конструкции ускорителей-трансформаторов, генерирующих интенсивные пучки заряженных частиц в диапазоне энергий 0,5-5 Мэв. Исследованы импульсные ускорители, создающие пучки электронов длительностью 10^{-8} - 10^{-5} сек, некоторые из них с частотой повторения сотни герц; установки квазинепрерывного действия (скважность около 5); трехфазные трансформаторы. Средняя мощность в большинстве моделей достигает десяти квт и более, в одной из последних разработок - св.150 квт; к.п.д. от 60 до 95%. Приведена конструкция установки для ускорения электронов с током 30 кА, энергией 5 Мэв в одиночных импульсах длительностью $4 \cdot 10^{-8}$ сек; установки для ускорения протонного пучка до энергии 1,2 Мэв при средней мощности 10 квт.

Обсуждаются особенности основных элементов высоковольтных трансформаторов и сильноточных ускорительных трубок.

Рассмотрены некоторые вопросы использования интенсивных пучков, а также перспективы развития ускорителей-трансформаторов.



E.A. Abramyan

HIGH-CURRENT TRANSFORMER ACCELERATORS

Summary

The design and operation of transformer-accelerators generating the intensive charged particle beams in the range 0,5-5 Mev are described.

Pulse electron accelerators with pulse length of 10^{-8} - 10^{-5} sec are investigated (some of them have repetition rate of several hundreds cps) as well as one - phase and three-phase 50-cps transformers.

The mean beam power for some models exceeds ten kw, and is as high as 150 kw for the newest model, efficiency of 60-95 % . Descriptions are given for the single - pulse electron accelerator (30 kA, 5 Mev, $4 \cdot 10^{-8}$ sec) and for the proton accelerator (1,2 Mev, mean power 10kw)

The peculiarities of basic elements of high-potential transformers and strong-current accelerating tubes are discussed. Some problems of the using of intensive beams of the development of transformer-accelerators are considered.

1. Введение

Среди известных методов прямого ускорения заряженных частиц, по-видимому, наиболее эффективны схемы, использующие в качестве генераторов напряжения высоковольтные трансформаторы. Как и в обычном электротехническом трансформаторе, к.п.д. здесь может быть близок к 100%, передаваемая мощность принципиально ничем не ограничена. При работе на промышленной частоте - 50 или 60 герц - такие установки включаются прямо в сеть. Переход к более высоким частотам позволяет сделать трансформаторы значительно компактнее, однако требует дополнительных преобразователей и снижает к.п.д.

Один из основных вопросов в ускорителях, проектируемых на основе трансформатора, - способ выпрямления ускоряющего напряжения. В трансформаторах с изолированным ярмом (JCT) вторичная обмотка разбита на много секций, каждая из которых имеет свое выпрямляющее устройство /1/; в ускорителях - трансформаторах /2/ единственный выпрямительный элемент - сама ускорительная трубка, модуляция тока в которой автоматически поддерживает напряжение на трубке постоянным. В резонансных трансформаторах /3/ заданная монохроматичность обеспечивается шириной импульсов тока ускоряемых частиц; такой же способ может использоваться в импульсных ускорителях - трансформаторах /2/.

Сильноточные ускорители на основе трансформатора часто применяются для решения прикладных задач. Как известно, электронные пучки мощностью десятки киловатт позволяют реализовать весьма эффективные технологии в радиационной химии, металлургии, пищевой индустрии, медицине и др. Промышленное применение ускорителей предъявляет особые требования к их мощности, надежности, простоте обслуживания и стоимости. Эти факторы являются в значительной мере производными простоты конструкции установок, их к.п.д.

Если и сегодня ускорители, использующие трансформаторы, наиболее экономичны до энергий 3-5 Мэв, то тем более они могут оказаться вне конкуренции в будущем, когда мощности установок достигнут тысяч киловатт и стоимость киловатт-часа в электронном пучке значительно снизится.

Помимо многих вопросов, решаемых при создании трансформатора, его высоковольтной изоляции, устройств для выпрямления напряжения, — ряд сложных проблем в сильноточных ускорителях связан с ускорительной трубкой, её электрической прочностью, электронной оптикой и т.д. Сложность анализа процессов, происходящих в ускорительной трубке, затрудняет разработку оптики для ускорения мощных пучков, и получение более высоких градиентов напряжения. Появление в последние годы трубок с наклонными электродами /4/, с сильнофокусирующими линзами /5/ позволяет надеяться, что ускоряемые токи электронов, протонов и, вероятно, более тяжелых частиц могут быть существенно повышены.

В настоящем реферате дан обзор работ, проводимых с целью создания мощных, а в некоторых случаях, и компактных ускорителей-трансформаторов. В основном, это ускорители электронов на энергии 0,5-3 Мэв со средними мощностями пучков до десятков киловатт. Развиваются два направления: ускорители низкой частоты — 50-60 гц и импульсные — с собственной частотой десятки кгц. В первом случае установки питаются непосредственно от промышленной сети стандартного напряжения, во втором — в первичной цепи имеется выпрямитель и специальный коммутатор. Основные модели импульсных ускорителей — трансформаторов рассчитаны на большую частоту повторения — до сотен гц, благодаря чему средние мощности пучков достаточно высоки. На базе импульсных трансформаторов созданы также установки, генерирующие интенсивные одиночные импульсы тока.

Исследованы различные сильнофокусирующие системы, устанавливаемые внутри ускорительных трубок. В таких трубках получены электронные пучки с токами до 10-20 ампер и протонные — до 80 ма. Разработаны также ускорительные трубки, способные пропускать импульсы тока св.100а длительностью 10^{-8} — 10^{-5} сек при частоте повторения до 100 гц и выше. Для создания сверхмощных одиночных импульсов тока применяются популярные сейчас конструкции с автоэмиссионным катодом.

В настоящей работе собраны результаты проведенных в последние годы исследований ускорителей на основе трансформаторов. Обсуждаются также некоторые вопросы использования интенсивных электронных пучков; рассмотрены перспективы развития сильноточных ускорителей-трансформаторов.

2. Принципы работы ускорителей

Импульсные трансформаторы

В импульсных ускорителях в качестве генераторов напряжения используются трансформаторы с ударным возбуждением (рис.1) /6/, соб -

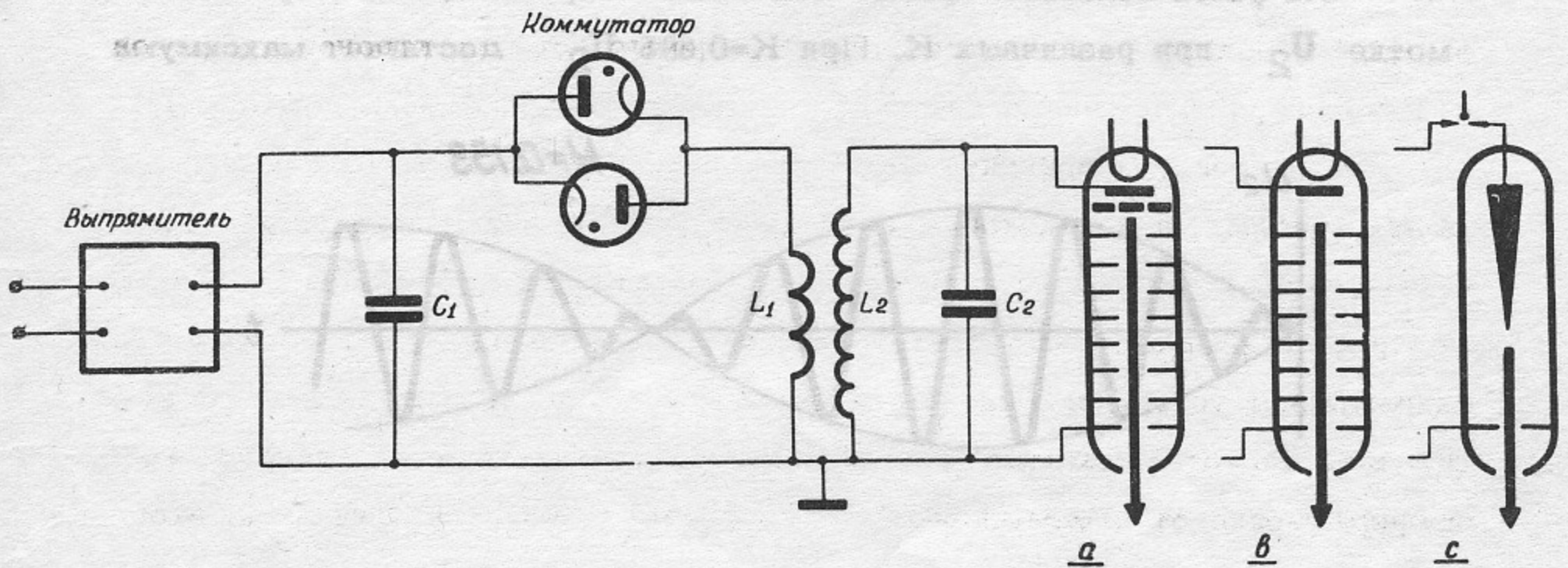


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема импульсного ускорителя

C_1 - конденсатор в первичном контуре

C_2 - собственная ёмкость вторичного контура

L_1, L_2 - индуктивности обмоток трансформатора.

ственные частоты первичного и вторичного контуров которых равны;

$C_1 L_1 = C_2 L_2$. C_1 - конденсатор в первичной цепи, заряжаемый выпрямителем перед рабочим импульсом, C_2 - распределенная ёмкость вторичного контура трансформатора, L_1 и L_2 - индуктивности первичной и вторичной обмоток. После подключения конденсатора C_1 к первичной обмотке энергия, накопленная в нем, перекачивается в C_2 . Для этого требуется тем меньше периодов колебаний, чем выше добротности контуров Q_1 и Q_2 и коэффициент связи K между обмотками.

Трансформатор с ударным возбуждением (трансформатор Тесла) использовался для ускорения заряженных частиц еще в 30-х годах /7/, однако отсутствие в то время высококачественной изоляции и ряд кон -

структивных трудностей не позволяли реализовать коэффициенты связи выше $K=0,1 - 0,2$. Установки имели слишком большие потери энергии, что затрудняло получение высоких напряжений на вторичной обмотке и явилось одной из причин прекращения разработки ускорителей такого типа. Описанные ниже установки имеют $K=0,4 - 0,6$ и это вместе с другими усовершенствованиями делает описываемую схему весьма перспективной.

На рис.2 показаны кривые изменения напряжения на вторичной обмотке U_2 при различных K . При $K=0,385$ U_2 достигает максимума

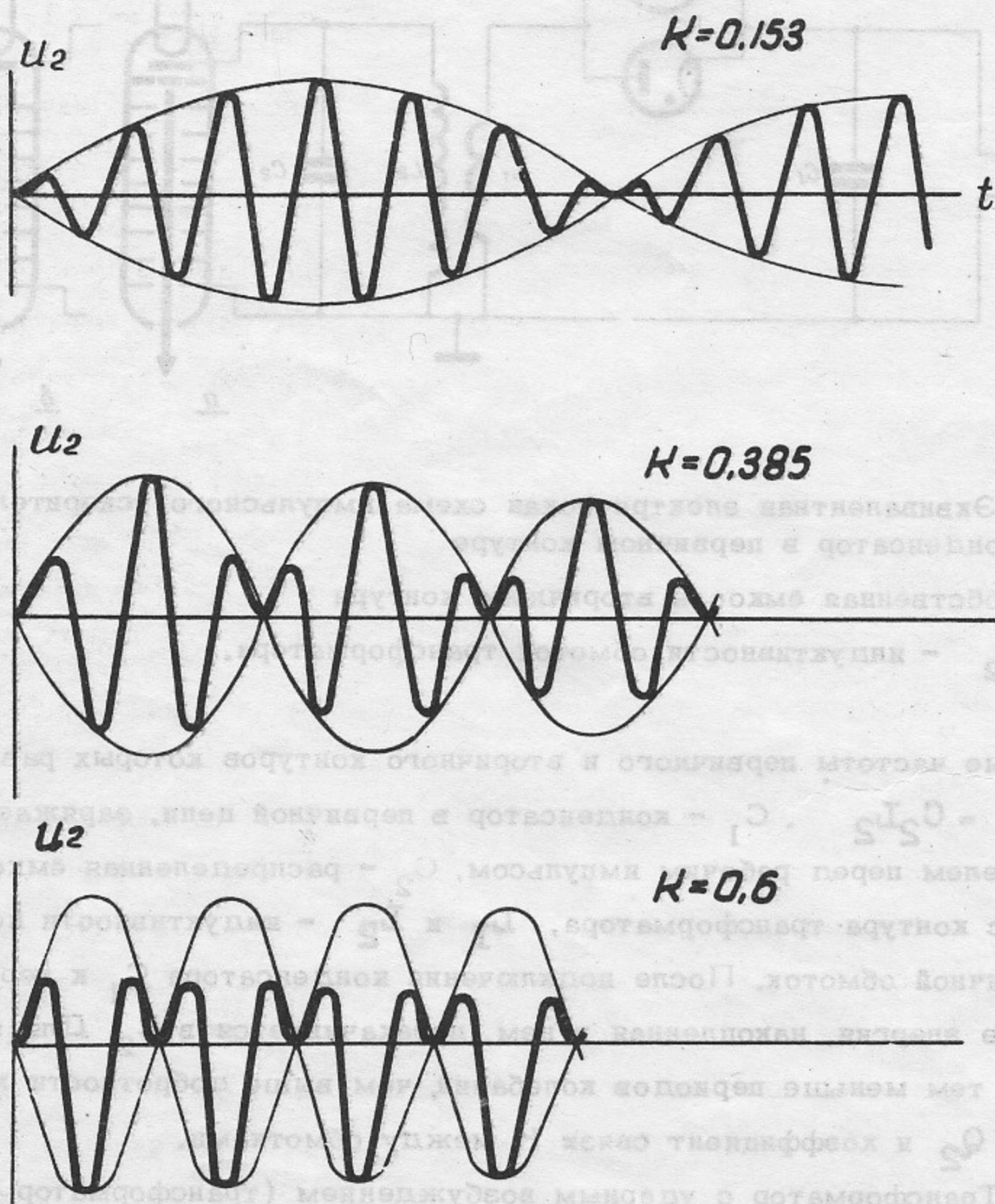


Рис.2. Изменение напряжения на вторичной обмотке при различных коэффициентах связи.

уже на третьей полуволне колебаний, а при $K=0,6$ - на второй. Изменение во времени U_2 зависит от нескольких параметров трансформатора:

$$U_2 = U_{01} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \sin \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1-K}} + \frac{1}{\sqrt{1+K}} \right) t + \sin \frac{\omega}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1-K}} - \frac{1}{\sqrt{1+K}} \right) t \right\},$$

где U_{01} - напряжение на конденсаторе C_1 в начальный момент

ω - собственная частота каждого из контуров

τ - постоянная времени затухания, $\tau = \frac{4}{\omega} \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2} (1 - K^2)$

Из приведенной формулы следует, что максимальные значения U_2 достигаются при определенных значениях K (0,153; 0,18; 0,222; 0,28; 0,385; 0,6).

Естественно, при заданной добротности системы омические потери в коммутаторе и обмотках трансформатора тем больше, чем больше периодов колебаний требуется для перекачки энергии из первичного контура во вторичный. Доля энергии, попадающей в результате из конденсатора C_1 в емкость вторичной обмотки C_2 : $\alpha = \frac{C_2 U_{2 \max}^2}{C_1 U_{01}^2}$,

иллюстрируется рис. 3 /8/. Здесь по оси ординат отложена условная величина $Q = 2 \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2} (1 - K^2)$. Например, при $K=0,6$ и $Q_1 =$

$Q_2 = 50$ во вторичный контур передается ок. 90% энергии, запасенной в C_1 перед рабочим импульсом.

Во всех разработанных нами импульсных ускорителях собственные частоты контуров трансформатора ω составляют десятки килогерц и время достижения $U_{2 \max}$ с момента включения коммутатора равно 10 - 20 мксек. Напряжение U_{01} обычно выбирается в диапазоне 10 - 50 кВ, коэффициент трансформации достигает 50-100. Ускорительная трубка чаще всего подсоединена непосредственно к вторичной обмотке (варианты а и в, рис. 1). В случае а инжектор имеет управляющую сетку, благодаря чему можно регулировать как момент включения тока, так и ширину импульса. Включение инжектора производится обычно вблизи $U_{2 \max}$

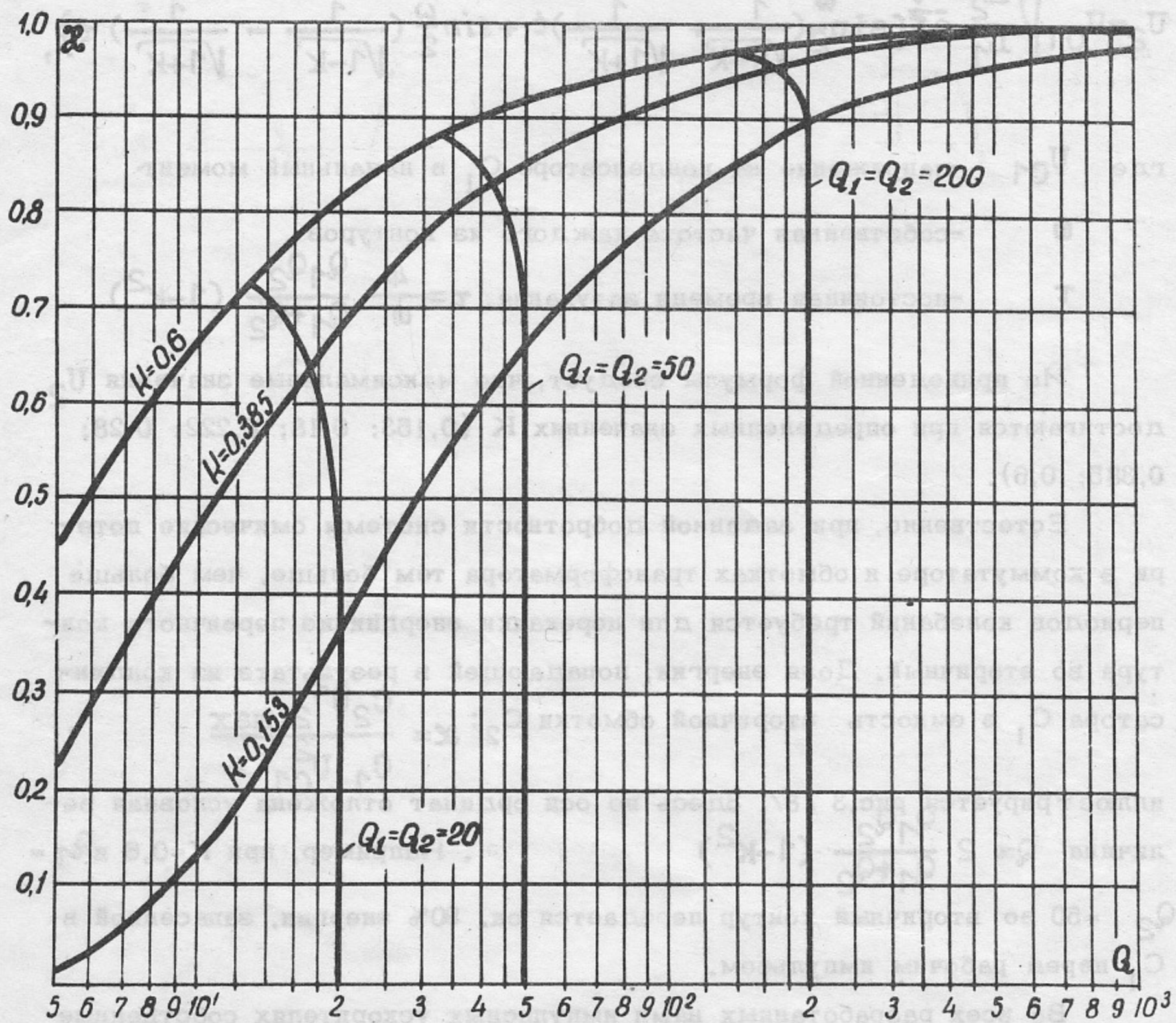


Рис.3. Зависимость энергии, переданной во вторичный контур, от добротности системы.

(рис.4), ширина импульса варьируется от $4 \cdot 10^{-8}$ до $2 - 5 \cdot 10^{-6}$ сек, амплитуда тока электронов i_e составляет многие десятки ампер.

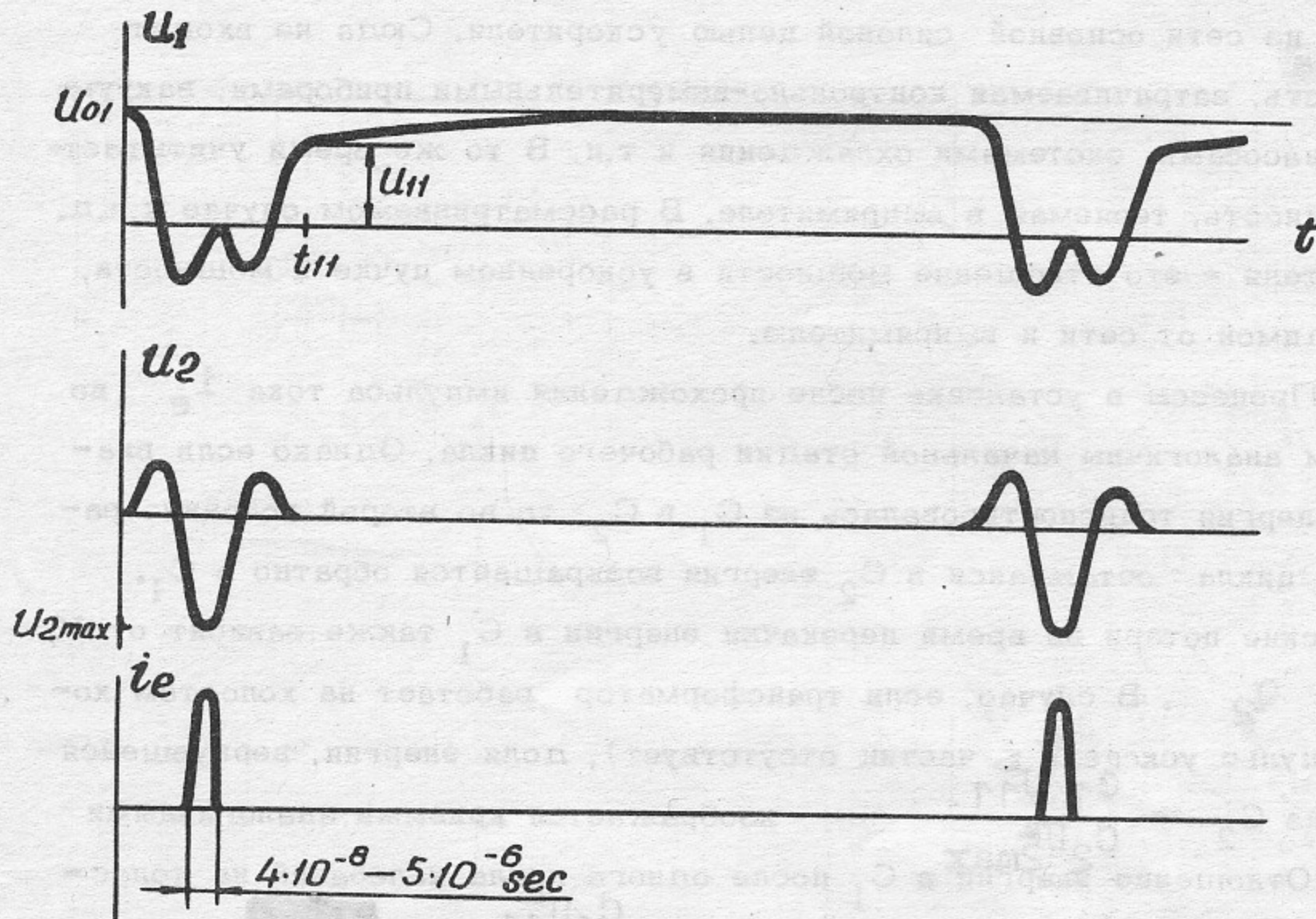


Рис.4. Режим работы ускорителя с рекуперацией энергии

Энергия, уносимая пучком, достигает 50-70% энергии, имеющейся в C_2 :

$$\int i_e U_2 dt = 0,5 + 0,7 \frac{C_2 U_{2max}^2}{2}$$

Энергия, оставшаяся в системе после прохождения тока, в момент t_{11} снова сосредотачивается в C_1 . Во многих моделях коммутатор первичной цепи в этот момент запирается, перестает проводить ток, и энергия, возвратившаяся в C_1 , сохраняется для следующего импульса.

После подзарядки C_1 до напряжения U_{01} (рис.4) система снова готова к работе. Частота повторения импульсов может достигать нескольких

Сотен герц. к.п.д. ускорителя 60-70%.

Здесь и дальше под к.п.д. ускорителя мы понимаем отношение мощности (энергии) в пучке ускоренных частиц к мощности (энергии), взятой из сети основной силовой цепью ускорителя. Сюда не входит мощность, затрачиваемая контрольно-измерительными приборами, вакуумными насосами, системами охлаждения и т.п. В то же время учитывается мощность, теряемая в выпрямителе. В рассматриваемом случае к.п.д. ускорителя - это отношение мощности в ускоренном пучке к мощности, подводимой от сети к выпрямителю.

Процессы в установке после прохождения импульса тока i_e во многом аналогичны начальной стадии рабочего цикла. Однако если вначале энергия транспортировалась из C_1 в C_2 , то во второй половине рабочего цикла оставшаяся в C_2 энергия возвращается обратно в C_1 .

Омические потери во время перекачки энергии в C_1 также зависят от K , Q_1 и Q_2 . В случае, если трансформатор работает на холостом ходу (импульс ускоренных частиц отсутствует), доля энергии, вернувшейся

в C_1 из C_2 - $\frac{C_1 U_{11}^2}{C_2 U_{2max}^2}$ - изображается кривыми, аналогичными рис.3. Отношение энергий в C_1 после одного цикла колебаний на холостом ходу к начальной энергии в C_1 : $v = \frac{C_1 U_{11}^2}{C_1 U_{01}^2}$

Величина v названа коэффициентом рекуперации, рабочий цикл, показанный на рис.4, - режим работы с рекуперацией энергии. Для системы без потерь (добротность бесконечна, импульс тока в трубке отсутствует) на рис.5 показана зависимость χ и v от коэффициента связи K /8/.

На рис. 6 приведены также кривые токов в первичной и вторичной обмотках в системе без потерь для случая $K=0,6$.

В ускорителях, имеющих инжектор с управляющей сеткой (рис.1а), монохроматичность ускоренных электронов зависит от ширины импульса. В случаях, когда допустима немонохроматичность 10-15% и более, время ускорения может составлять $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$ от ширины импульса ускоряющего напряжения.

В варианте а можно также получать широкие импульсы тока с монохроматичностью не хуже 1-2%, если изменять ток в трубке i_e по

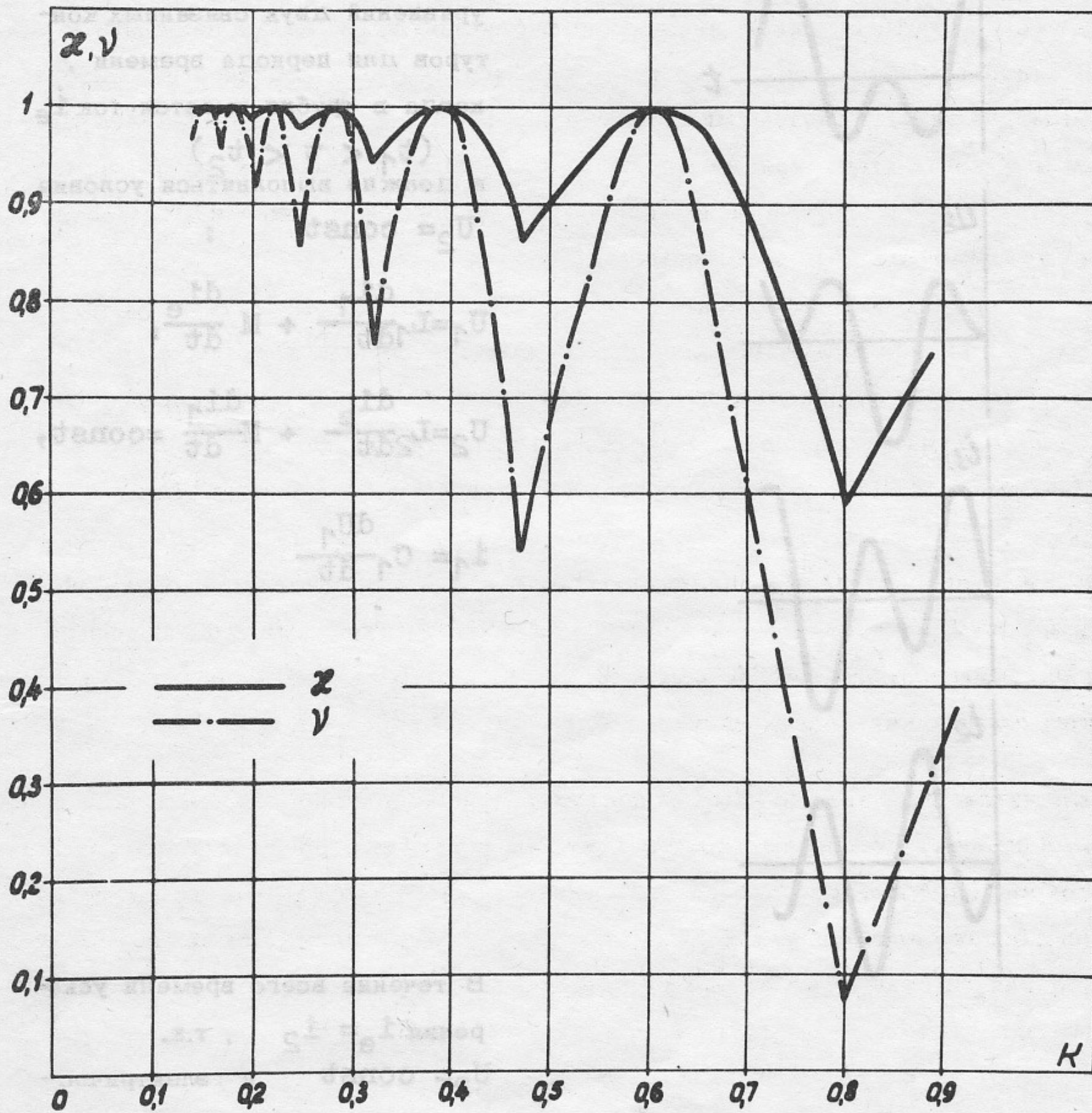


Рис.5. Переход энергии из первичного контура во вторичный и обратно как функция коэффициента связи.

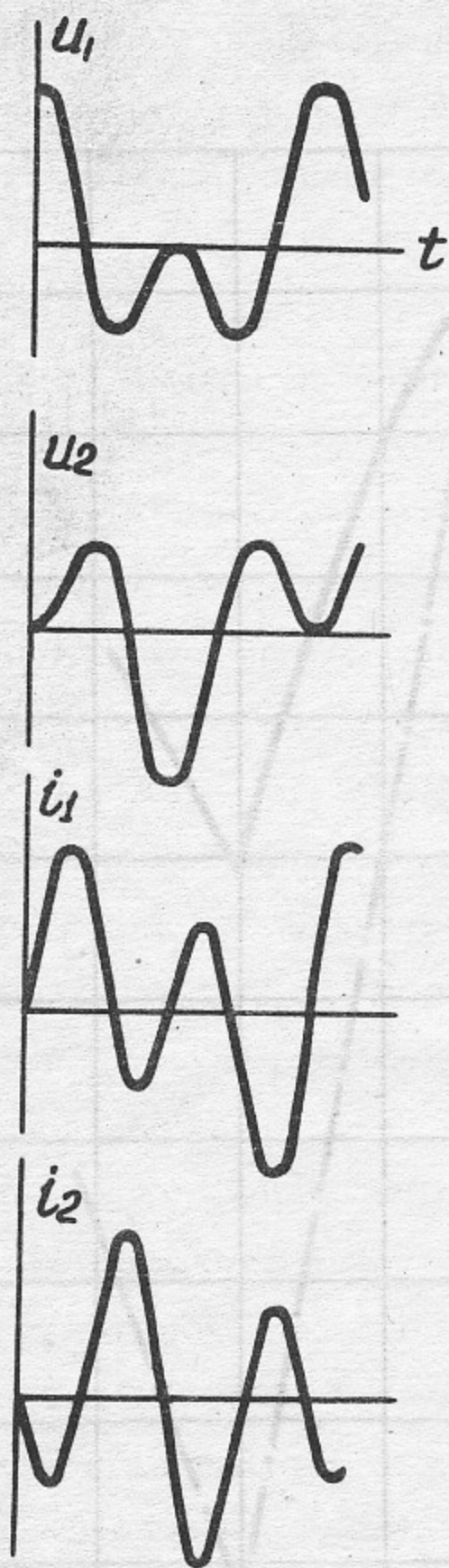


Рис. 6. Напряжение и ток первичной и вторичной обмоток трансформатора при коэффициенте связи $K=0,6$.

определенному закону (рис.7). Зависимость $i_e(t)$ находится решением системы уравнений двух связанных контуров для периода времени, когда в трубке имеется ток i_e ($t_1 < t < t_2$) и должно выполняться условие

$$U_2 = \text{const} \quad :$$

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_e}{dt},$$

$$U_2 = L_2 \frac{di_e}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = \text{const},$$

$$i_1 = C_1 \frac{dU_1}{dt}$$

В течение всего времени ускорения $i_e = i_2$, т.к.

$U_2 = \text{const}$ и электрическая энергия в емкости C_2 не

меняется. Решение системы уравнений показывает, что ток в течение всего импульса должен уменьшаться по закону,

близкому к линейному. При таком режиме доля энергии, уносимой пучком из ускорителя, может достигать 70% полной энергии системы.

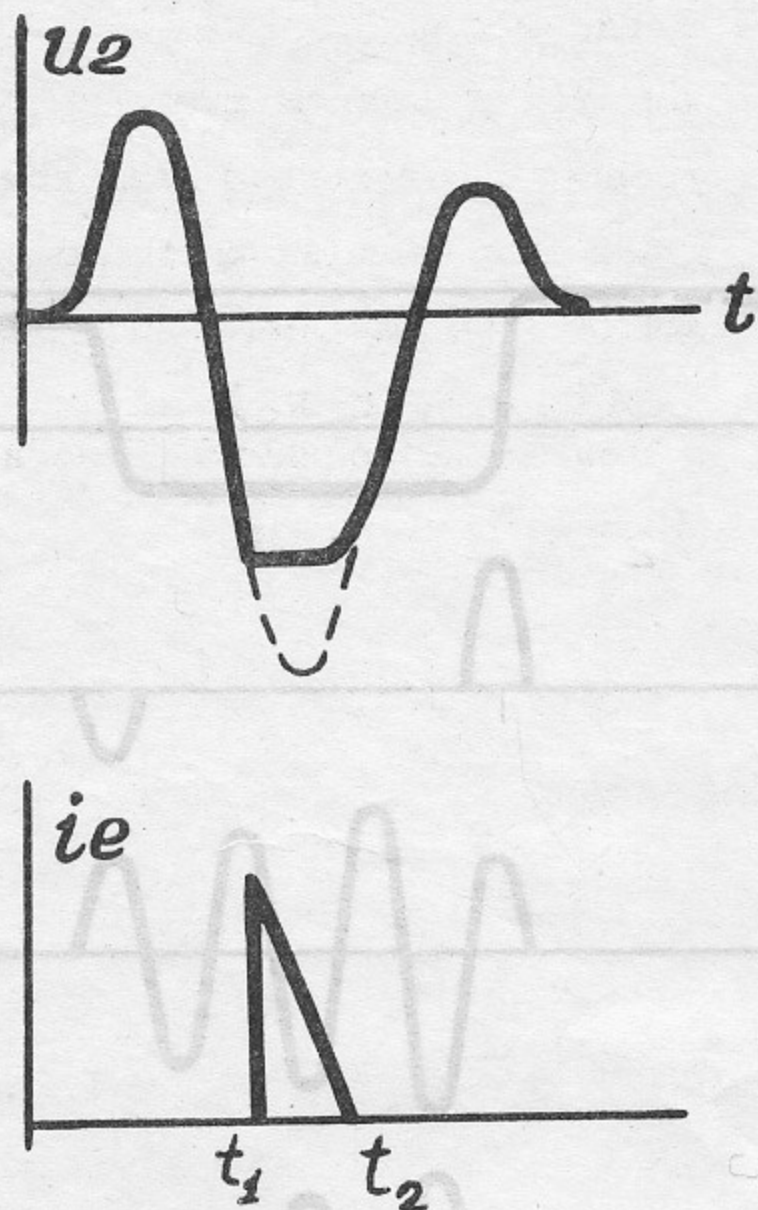


Рис.7. Напряжение и ток трубки в режиме ускорения монохроматического пучка.

конденсаторе C_1 , полярность напряжения на котором изменяется на обратную. Коммутатор в течение некоторого времени держится запертым, и энергия, попавшая во вторичный контур, колеблется в нем, как показано на рис.8. Добротность вторичного контура, как правило, высока: $Q_2 = 100-150$ и более, и омические потери за несколько периодов колебаний невелики. В то же время электроны ускоряются на каждом периоде колебаний при соответствующей полярности напряжения U_2 . После того как электронный пучок унесет значительную часть энергии вторичного контура, коммутатор первичной цепи снова включается и пропускает полуволну тока обратной полярности. При этом напряжение на C_1 снова переполюсовывается. В перерыве между рабочими циклами C_1 заряжается до исходного напряжения U_{01} .

Диодные трубки (рис.1в) применяются в установках, используемых для решения некоторых прикладных задач — гамма-дефектоскопии, радиационной обработки материалов и др. Хотя здесь имеется полный спектр энергии ускоренных электронов, но отсутствие сетки и схемы для её управления заметно упрощает установку. В случаях, когда имеются трудности с ускорением в трубке большого тока, способного за один импульс унести значительную часть энергии из C_2 , осуществляется режим работы, показанный на рис. 8 /9/. Коммутатор первичного контура пропускает сначала только полуволну тока i_1 одной полярности. При этом из C_1 во вторичный контур L_2C_2 переходит ок.75% энергии. Меньшая часть энергии остается в

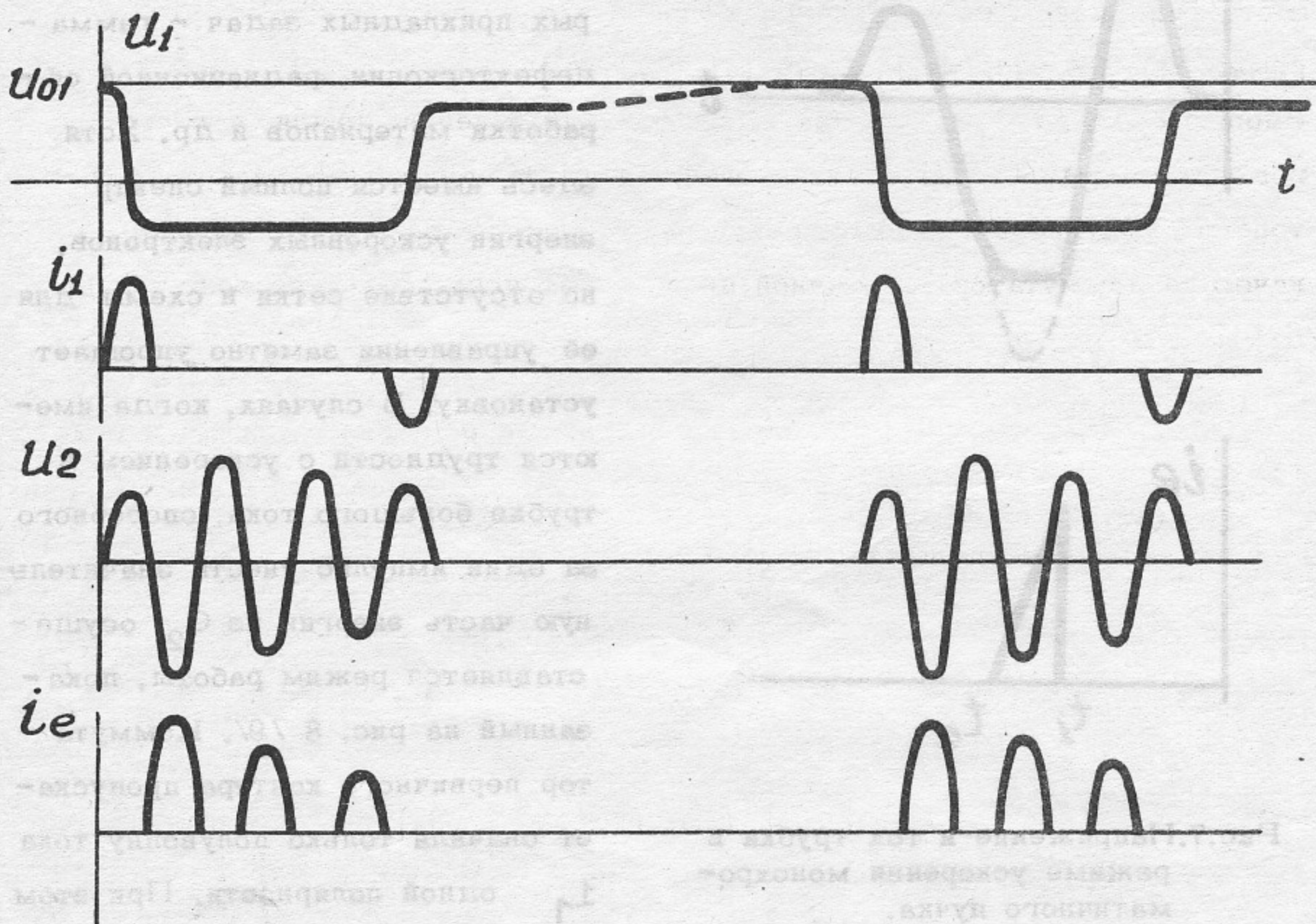


Рис.8. Ускорение электронов сериями импульсов в диодной трубке.

Во всех рассмотренных случаях в качестве коммутаторов используются схемы на основе стандартных водородных тиратронов с номинальным напряжением 20 - 35 кв. Некоторые варианты схем описаны в /10,11/.

Трансформатор с ударным возбуждением может использоваться также для зарядки высоковольтной емкости C_2 с последующим подключением её к трубке с автоэмиссионным катодом (рис.1с) /12/. Первичное напряжение в этом случае не превышает 50-100 кв, напряжение на C_2 достигает 5 - 7 и более мегавольт, время зарядки вторичной емкости ок. 20 мксек. После подключения C_2 к ускорительной трубке с помощью разрядника проходит импульс тока ускоренных электронов. Энергия

электронов, длительность импульса и амплитуда тока в значительной мере зависят от волнового сопротивления емкости вторичного контура, площади катода и сопротивления искры в разрядном промежутке. При достаточно малом сопротивлении искры в пучок может быть передано свыше 50-60% энергии, попавшей в C_2 . Доля энергии, переданной трансформатором из C_1 в C_2 при высоких коэффициентах связи, как уже говорилось выше, также значительна. В таких установках частота повторения импульсов невелика, рекуперация энергии не производится и в качестве коммутатора первичной цепи может использоваться воздушный разрядник.

Т р а н с ф о р м а т о р ы п р о м ы ш л е н н о й ч а с т о т ы

Электрическая схема трансформатора промышленной частоты показана на рис.9. В описываемых установках первичная обмотка подсоединяется к сети 50 гц, 220/380 в. Максимальное напряжение на вторичной обмотке - 1-3 Мв. L_s -индуктивность рассеяния, L -индуктивность

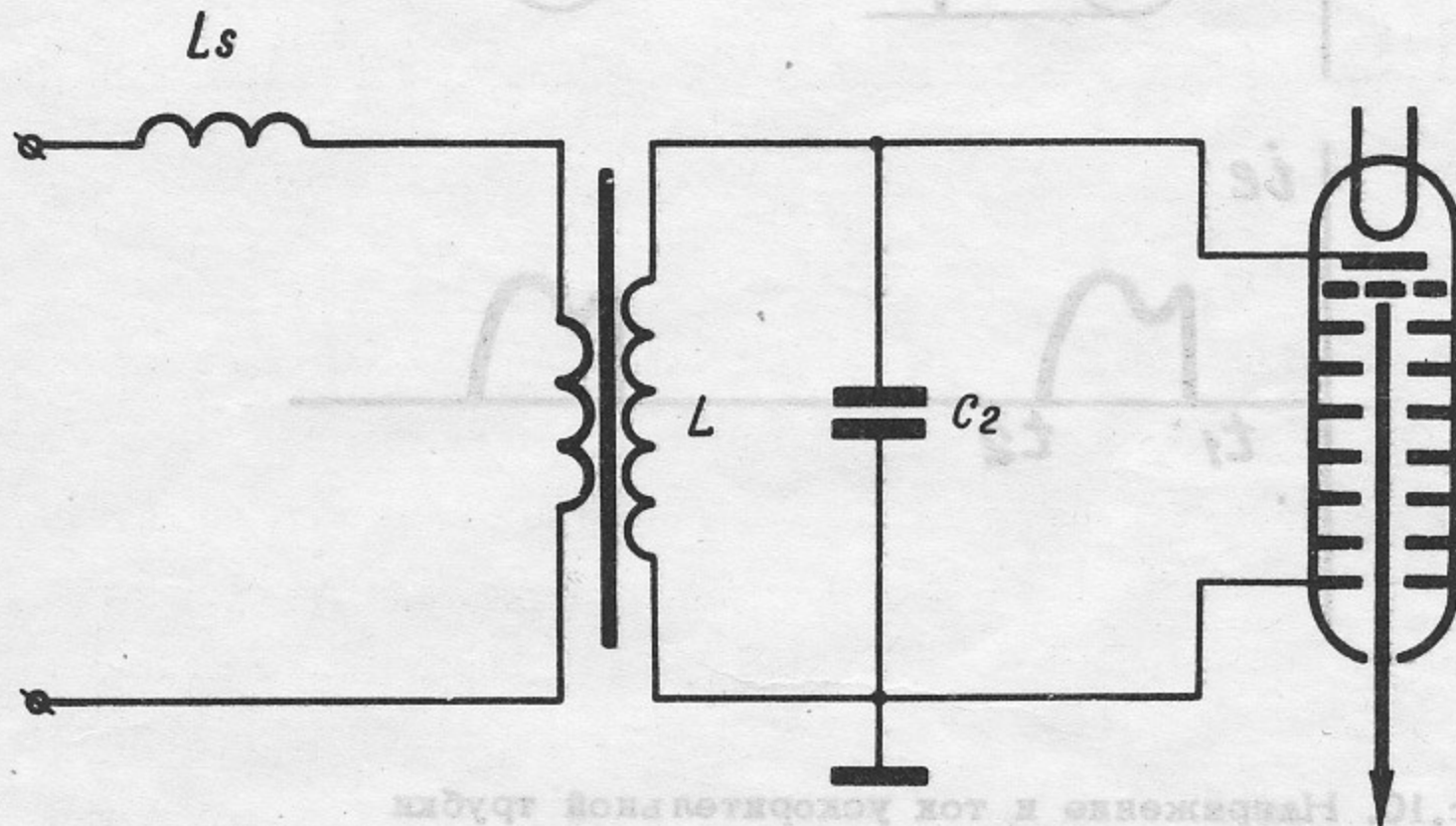


Рис.9. Эквивалентная электрическая схема трансформатора промышленной частоты. L -индуктивность трансформатора;

L_s -индуктивность рассеяния;

C_2 -собственная емкость вторичной обмотки на землю.

трансформатора, C_2 - собственная (распределенная) емкость вторичной обмотки на землю. Число витков вторичной обмотки W_2 и геометрические размеры установки подобраны так, что собственная частота трансформатора близка к 50 гц. Благодаря этому снижаются потери в трансформаторе и $\cos \varphi$ приближается к единице. Инжектор ускорительной трубки имеет управляющую сетку и систему управления напряжением на сетке. Монохроматизация энергии ускоряемых частиц достигается за счет изменения величины тока частиц в течение импульса, как показано на рис. 10 /13/. U_e - напряжение на ускорительной трубке, i_e - ток ускоренных частиц.

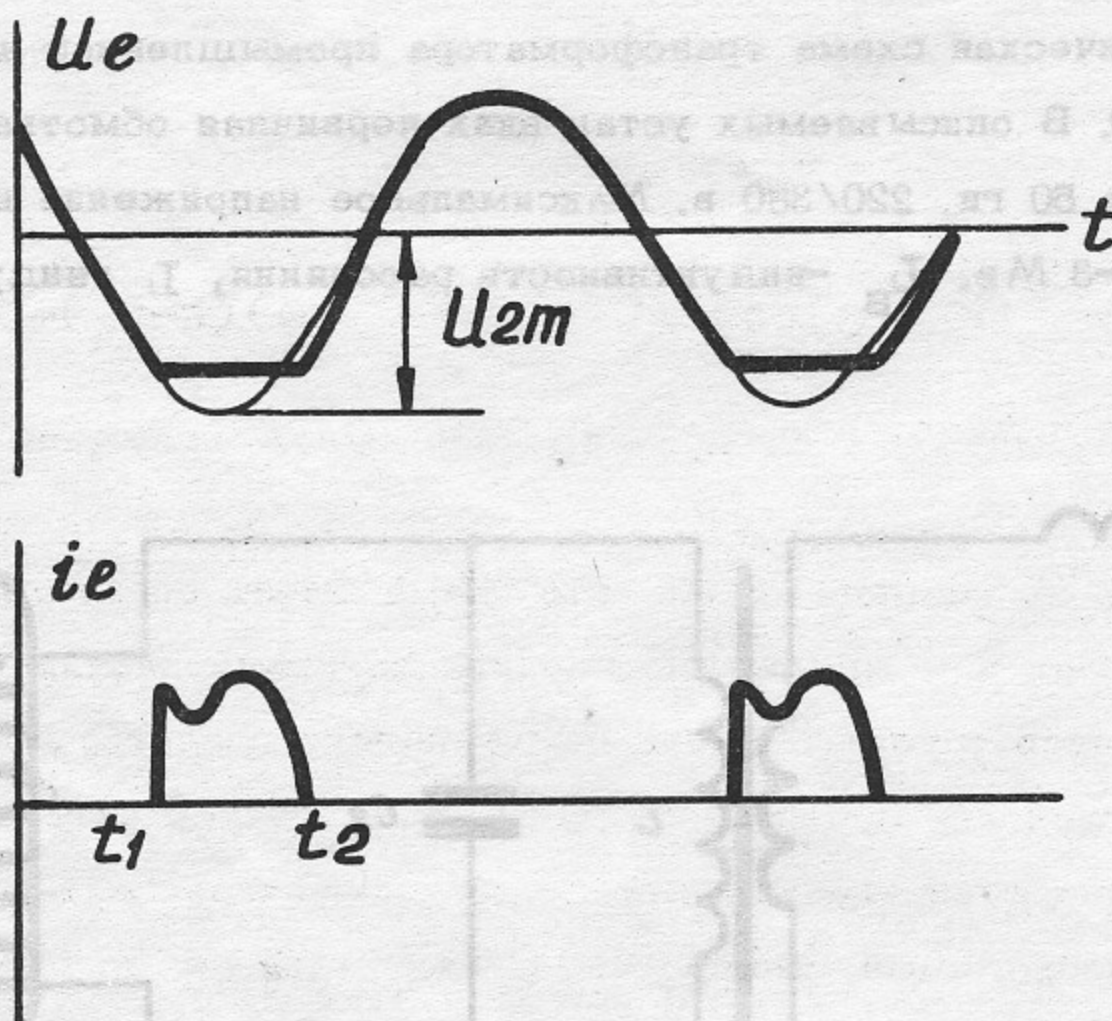


Рис.10. Напряжение и ток ускорительной трубки

Закон изменения $i_e(t)$ во время импульсов для упрощенного случая (потери в трансформаторе пренебрежимо малы, $\frac{1}{2\pi LC_2} = 50 \text{ Гц}$)

может быть найден с помощью несложных выкладок /14/. Обозначая коэффициент трансформации и U_{1m} - амплитуду первич-

$$\frac{1}{k} = \frac{W_2}{W_1}$$

ного напряжения, можем записать

$$U_{1m} \sin \omega t = L_s \frac{di_1}{dt} + kU_e$$

Это уравнение решается для промежутка времени $t_1 < t < t_2$

в предположении, что $U_e = L \frac{di_L}{dt} = \text{const}$. Тогда ток в индуктивности

$i_L = \frac{U_e}{L} (t - t_1) + i_L(t_1)$. Величина $i_L(t_1)$ находится из режима

холостого хода: $i_L(t_1) = -\frac{U_{2m}}{\omega L} \cos \omega t_1$, где U_{2m} - амплитуда вто-

ричного напряжения. Т.к. напряжение на ёмкости C_2 за рассматриваемый

промежуток времени также постоянно, то ток в трубке $i_e = ki_1 - i_L$.

Обозначая $\frac{U_e}{U_{2m}} = \sin \omega t_1 = \alpha$, $\frac{L_s}{L} = \theta$, запишем закон из-

менения тока в ускоряемом пучке:

$$i_e = \frac{U_{2m}}{\omega L_s} [(k^2 + \theta) \cos \omega t - \alpha \omega (k^2 + \theta) (t - t_1) - k^2 \cos \omega t]$$

Момент t_2 находится из приведенного выражения, если его левую часть приравнять нулю.

В расчёте предполагалось, что схема имеет сосредоточенные пара - метры, и сделан ряд других допущений. Хотя вычисление $i_e(t)$ для реальных случаев трудоёмко, это не осложняет проектирование ускорителей, т.к. для обеспечения постоянного напряжения на ускорительных трубках обычно используются электронные схемы с обратной связью, автоматически задающие необходимый закон изменения тока в трубке. На вход схем подается с делителя часть напряжения на ускорительной трубке, с выхода снимается напряжение на управляющую сетку (или управляющий электрод) инжектора. Ширина импульса $t_2 - t_1$ может регулироваться от нуля (холостой ход) до 6-7 мсек. С пульта задается лишь момент включения схемы управления - t_1 , дальше система работает автоматически. Максимальная ширина импульсов определяется допустимой величиной обратного напряжения на трубке U_{2m} , при $t_2 - t_1 = 6 - 7$ мсек оно превышает на 15-20% напряжение на

трубке во время импульса. Это, практически, не сказывается на электрической прочности ускорителя, т.к. в отсутствие пучка и сопутствующей ему радиации установка способна выдерживать большие напряжения. При длинных импульсах отношение максимального тока и мощности в трубке к средним равно примерно 6. Так, для ускорителя электронов на энергию 1,3 Мэв и среднюю мощность 15 квт максимальная мощность достигает 90 квт, ток - 70 ма. Ускорение таких и более интенсивных электронных пучков относительно несложно в трубках с сильно фокусирующими магнитными системами, описанными ниже.

Точность поддержания энергии ускоряемых частиц зависит от тщательности выполнения системы управления. В установках, используемых для радиационных технологий, она обычно составляет $\pm 0,5\%$. Возможно получение и других законов $U_e(t)$, если установить в системе управления заданную программу. Изменение ширины импульсов тока используется, в основном, для регулирования средней мощности ускоренного пучка.

В связи с тем, что описанные трансформаторы подключаются только к одной фазе сети, их трудно использовать при мощностях свыше 30-50 квт. Возникающая при этом несимметрия нагрузки сети может устраняться подключением сразу нескольких ускорителей к разным фазам. Такое решение возможно в промышленности при одновременной эксплуатации многих установок.

Для ускорения пучков мощностью сотни и тысячи квт более рационально использовать трехфазные высоковольтные трансформаторы. Один из вариантов таких трансформаторов, создаваемый в настоящее время, имеет электрическую схему, показанную на рис.11. Первичная обмотка трансформатора подключена к обычной сети 50 (или 60) гц, пульсация напряжения на трубке $\pm 3\%$. Возможно использование инжектора с управляемым током и для стабилизации напряжения на трубке - модуляции тока пучка, аналогично описанной выше. Амплитуда тока в вентиллях составляет 120% от тока трубки, обратное напряжение на вентиллях на 5% выше напряжения на трубке. Параметры первой модели трансформатора: напряжение 1,2 Мв, мощность 150 квт. Разработанные нами компактные элект-

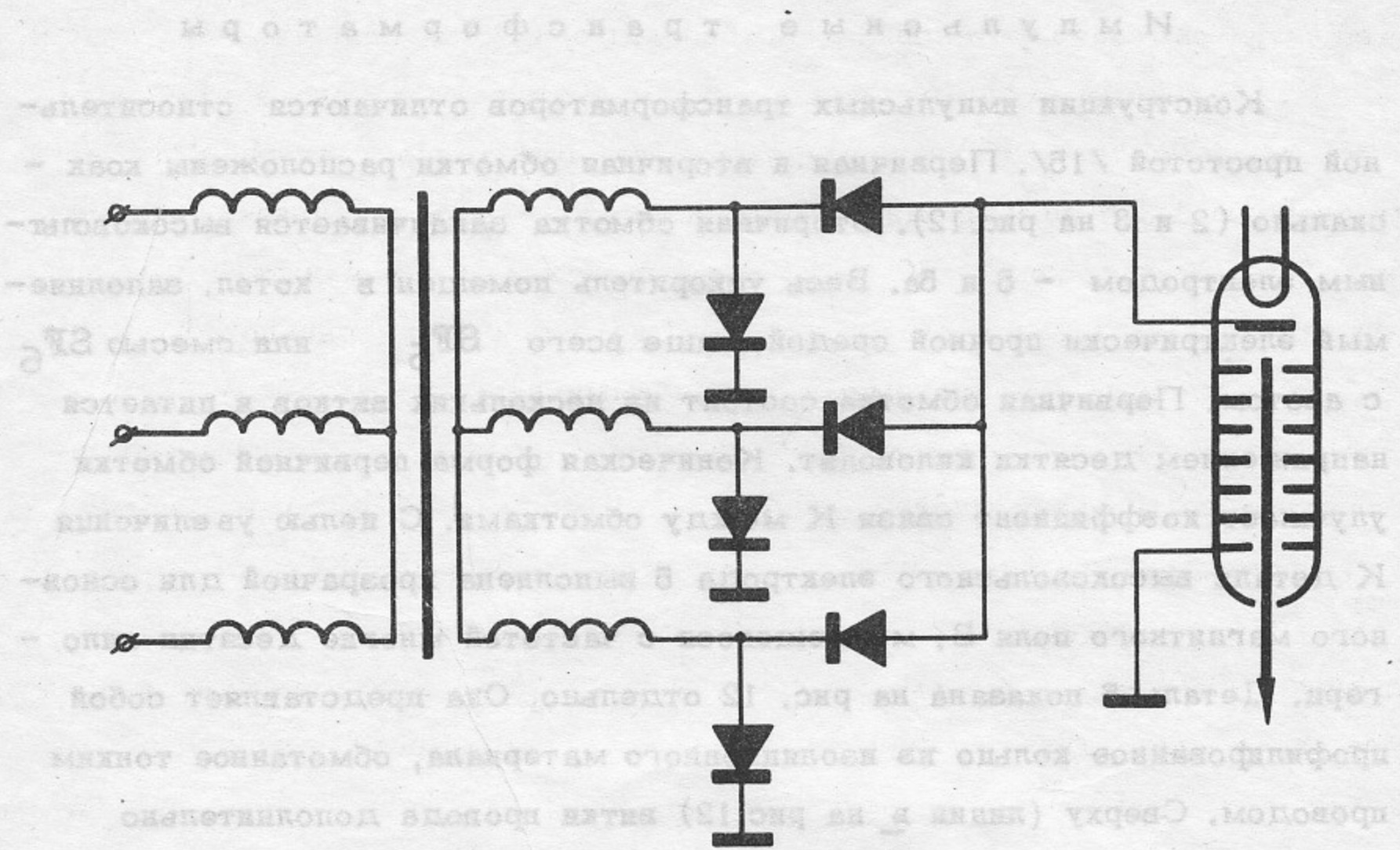


Рис.11. Ускоритель на основе трехфазного трансформатора

тровоакуумные вентили с необходимыми параметрами (обратное напряжение 1,26 Мв, макс.ток 150 ма) успешно проходят испытания.

3. Конструкции трансформаторов

И м п у л ь с н ы е т р а н с ф о р м а т о р ы

Конструкции импульсных трансформаторов отличаются относительной простотой /15/. Первичная и вторичная обмотки расположены коаксиально (2 и 3 на рис.12). Вторичная обмотка заканчивается высоковольтным электродом - 5 и 5а. Весь ускоритель помещен в котел, заполняемый электрически прочной средой, чаще всего SF_6 или смесью SF_6 с азотом. Первичная обмотка состоит из нескольких витков и питается напряжением десятки киловольт. Коническая форма первичной обмотки улучшает коэффициент связи K между обмотками. С целью увеличения K деталь высоковольтного электрода 5 выполнена прозрачной для основного магнитного поля B , меняющегося с частотой многие десятки килогерц. Деталь 5 показана на рис. 12 отдельно. Она представляет собой профилированное кольцо из изоляционного материала, обмотанное тонким проводом. Сверху (линия в на рис.12) витки провода дополнительно электрически соединяются. Такая эквипотенциальная поверхность высоковольтного электрода не создает заметного сопротивления магнитному потоку. Аналогично выполнено кольцо 11, экранирующее край первичной обмотки. При высококачественных газовых смесях высоковольтный зазор а может быть достаточно мал: 3-5 см на каждый 1 Мв. Подбором соответствующей геометрии в описываемой конструкции достигнуты коэффициенты связи $K=0,4; 0,6$. Ярмо или какие-либо детали из ферромагнетика отсутствуют.

Вторичная обмотка имеет несколько сотен витков, уложенных в один слой. Собственные частоты первичного и вторичного контуров - десятки килогерц. При необходимости подвести мощность к высоковольтному электроду - для накала инжектора, питания системы управления и т.п. создается второй слой (на рис. 12 показан черными кружками). Оба слоя имеют одинаковое число витков и соединены параллельно. Со стороны земли к ним подсоединяется источник напряжения (50 или 400 гц, 0,3 - 2 квт), питающий системы, находящиеся в высоковольтном электроде. Небольшое импульсное напряжение, возникающее между слоями

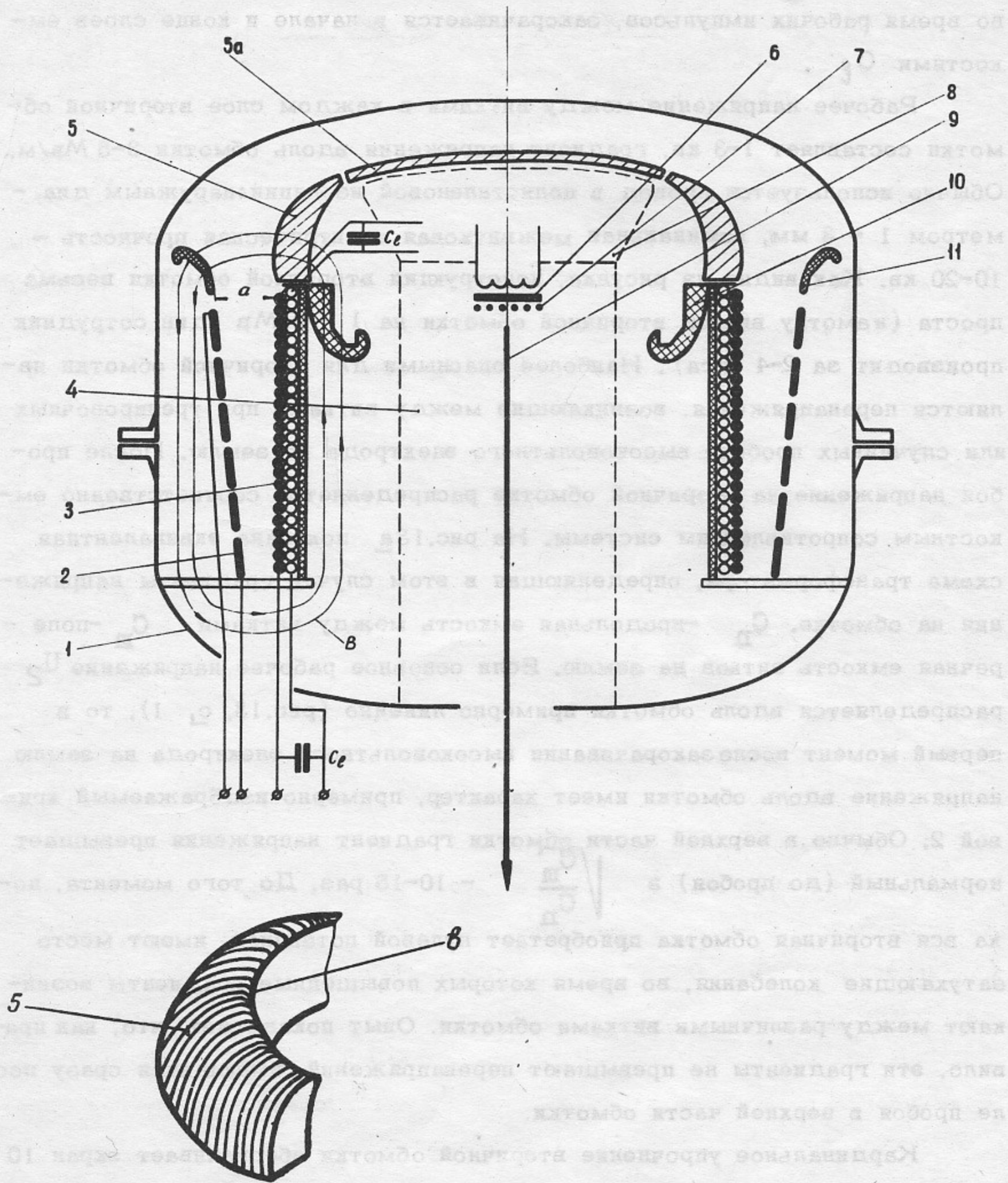


Рис.12. Конструкция импульсного трансформатора.

1 - котел, 2 - первичная обмотка, 3 - вторичная обмотка, 4 - ускорительная трубка, 5, 5а - высоковольтный электрод, 6 - катод, 7 - сетка катода, 8 - система управления инжектором, 9 - электронный пучок, 10 - защитный экран, 11 - кольцо, экранирующее край первичной обмотки.

во время рабочих импульсов, закорачивается в начале и конце слоев емкостями C_r .

Рабочее напряжение между витками в каждом слое вторичной обмотки составляет 1-3 кв, градиент напряжения вдоль обмотки 3-5 Мв/м. Обычно используется провод в полистиленовой изоляции с наружным диаметром 1 - 3 мм, номинальная межвитковая электрическая прочность - 10-20 кв. Как видно из рисунка, конструкция вторичной обмотки весьма проста (намотку витков вторичной обмотки на 1 - 2 Мв один сотрудник производит за 2-4 часа). Наиболее опасными для вторичной обмотки являются перенапряжения, возникающие между витками при тренировочных или случайных пробоях высоковольтного электрода на землю. После пробоя напряжение на вторичной обмотке распределяется соответственно емкостным сопротивлениям системы. На рис.13а показана эквивалентная схема трансформатора, определяющая в этом случае градиенты напряжения на обмотке. C_n - продольная емкость между витками, C_m - поперечная емкость витков на землю. Если основное рабочее напряжение U_2 распределяется вдоль обмотки примерно линейно (рис.13, с₁), то в первый момент после закорачивания высоковольтного электрода на землю напряжение вдоль обмотки имеет характер, примерно изображаемый кривой 2. Обычно в верхней части обмотки градиент напряжения превышает нормальный (до пробоя) в $\sqrt{\frac{C_m}{C_n}}$ - 10-15 раз. До того момента, пока вся вторичная обмотка приобретает нулевой потенциал, имеют место затухающие колебания, во время которых повышенные градиенты возникают между различными витками обмотки. Опыт показывает, что, как правило, эти градиенты не превышают перенапряжений, имеющих сразу после пробоя в верхней части обмотки.

Кардинальное упрочнение вторичной обмотки обеспечивает экран 10 (рис.12), создающий дополнительную емкость верхних витков на высоковольтный электрод. Эквивалентная схема для этого случая показана на рис.13в. Распределение потенциала после пробоя значительно улучшается (кривая 3, рис.13с), и перенапряжения не превышают 2 - 3. Кратковременность пробойных напряжений, а также запас в изоляции витков обеспечивают в этом случае отсутствие повреждений вторичной обмотки при многих

тысячах пробоев. Экран 10 изготовлен аналогично деталям 5 и 11 и также прозрачен для основного магнитного потока.

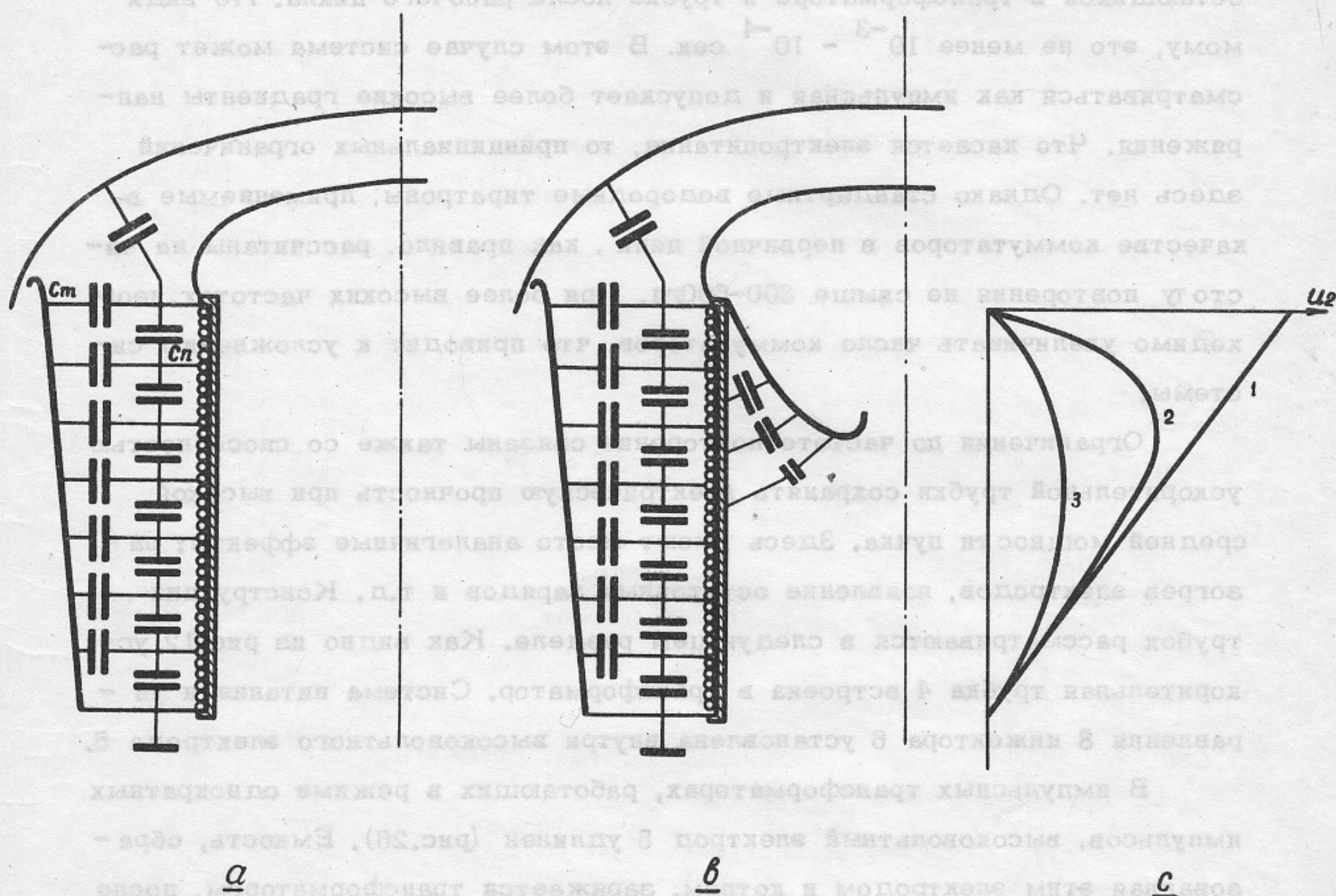


Рис.13. Эквивалентная схема и распределение напряжений в момент пробоя.

Частота повторения рабочих импульсов трансформатора может достигать многих сотен герц и ограничивается, во-первых, тепловыделением и возможностями охлаждения трансформатора, во-вторых, минимально возможным временем между соседними импульсами, и в-третьих, схемой электропитания. В ряде моделей сейчас достигнута частота повторения 300гц, в экспериментальных ускорителях-1000 гц. Такие установки имеют водяное охлаждение котла и в некоторых случаях - первичной обмотки; для вто -

ричной обмотки применяется провод с радиационно-модифицированной полиэтиленовой изоляцией. Время между импульсами должно быть выше времени деионизации и времени стекания случайных остаточных зарядов, остающихся в трансформаторе и трубке после рабочего цикла. По-видимому, это не менее 10^{-3} - 10^{-4} сек. В этом случае система может рассматриваться как импульсная и допускает более высокие градиенты напряжения. Что касается электропитания, то принципиальных ограничений здесь нет. Однако стандартные водородные тиратроны, применяемые в качестве коммутаторов в первичной цепи, как правило, рассчитаны на частоту повторения не свыше 300-500гц. При более высоких частотах необходимо увеличивать число коммутаторов, что приводит к усложнению системы.

Ограничения по частоте повторения связаны также со способностью ускорительной трубки сохранять электрическую прочность при высокой средней мощности пучка. Здесь имеют место аналогичные эффекты: разогрев электродов, появление остаточных зарядов и т.д. Конструкция трубок рассматриваются в следующем разделе. Как видно из рис.12, ускорительная трубка 4 встроена в трансформатор. Система питания и управления 8 инжектора 6 установлена внутри высоковольтного электрода 5.

В импульсных трансформаторах, работающих в режиме однократных импульсов, высоковольтный электрод 5 удлинен (рис.26). Емкость, образованная этим электродом и котлом, заряжается трансформатором, после чего подключается к трубке с холодным эммитором.

Наилучшие результаты по электрической прочности трансформаторов получены на установках, заполненных SF_6 при давлении 15-20 атмосфер. В наиболее напряженных местах в газе градиенты достигают 400-500 кв/см. Такие установки, как правило, имеют устройства для многократного использования газа. Для этой цели используется охлаждаемый жидким азотом объем, подсоединяемый к установке. Для вымораживания газа требуется 1-2 часа. После этого объем отсоединяется, герметизируется и SF_6 хранится в нем в жидком состоянии до следующего заполнения установки. Крупные установки имеют газгольдер и компрессор для перекачки газа. При работе на пониженных напряжениях установки заполняются смесью 5-20% SF_6 и остальное N_2 . В промышленных

ускорителях разборка котла производится достаточно редко - 1-2 раза в год и в этом случае системы для сохранения газа отсутствуют.

В установках с одиночными импульсами тока (рис.1 с) кардинально новые возможности дает заполнение котла водой, прошедшей специальную очистку. Электрическая прочность воды при длительности импульсов $10^{-7} - 10^{-6}$ сек может достигать 500 кв/см (16,17). Удельная плотность энергии составляет при этом $1 \frac{\text{Мдж}}{\text{м}^3}$. Волновое сопротивление таких систем и время съема энергии могут быть весьма малыми. Основные проблемы при разработке сверхмощных установок, заполненных водой: создание малоиндуктивных батарей первичного контура или упрочнение воды при больших длительностях приложенного напряжения; повышение сопротивления воды с целью уменьшения потерь и улучшения к.п.д. системы. Проводимые в настоящее время исследования позволяют надеяться, что названные проблемы будут решены.

Т р а н с ф о р м а т о р ы п р о м ы ш л е н н о й ч а с т о т ы

Основное отличие конструкции низкочастотных трансформаторов - наличие ферромагнитного ярма (рис.14) /14,18/. Ярмо состоит из нескольких отдельных частей - наружного магнитопровода 12, 12а и 12в, высоковольтного электрода 5 и 5а и сердечников центральной колонны 13. Секции вторичной обмотки 3 соединены электрически с сердечниками 13. Потенциал деталей центральной колонны меняется от потенциала земли до полного вторичного напряжения U_2 . Газовые зазоры между сердечниками δ (рис.14а) в типовой конструкции равны 5 мм и рассчитаны на рабочее напряжение 70-80 кв, к зазору a приложено полное напряжение U_2 . Первичная обмотка 2 вмонтирована в наружный магнитопровод. Ускорительная трубка 4 и система управления инжектором 8 расположены в центральной колонне. Вся установка помещена в котел 1.

Секции вторичной обмотки 3 являются наиболее ответственными деталями трансформатора. Параметры и качество изготовления секций в значительной мере определяют габариты трансформатора и его надежность. Общее количество витков во вторичной обмотке составляет многие десятки тысяч, в секциях 3 по 8000 витков. Каждый слой секции представляет со-

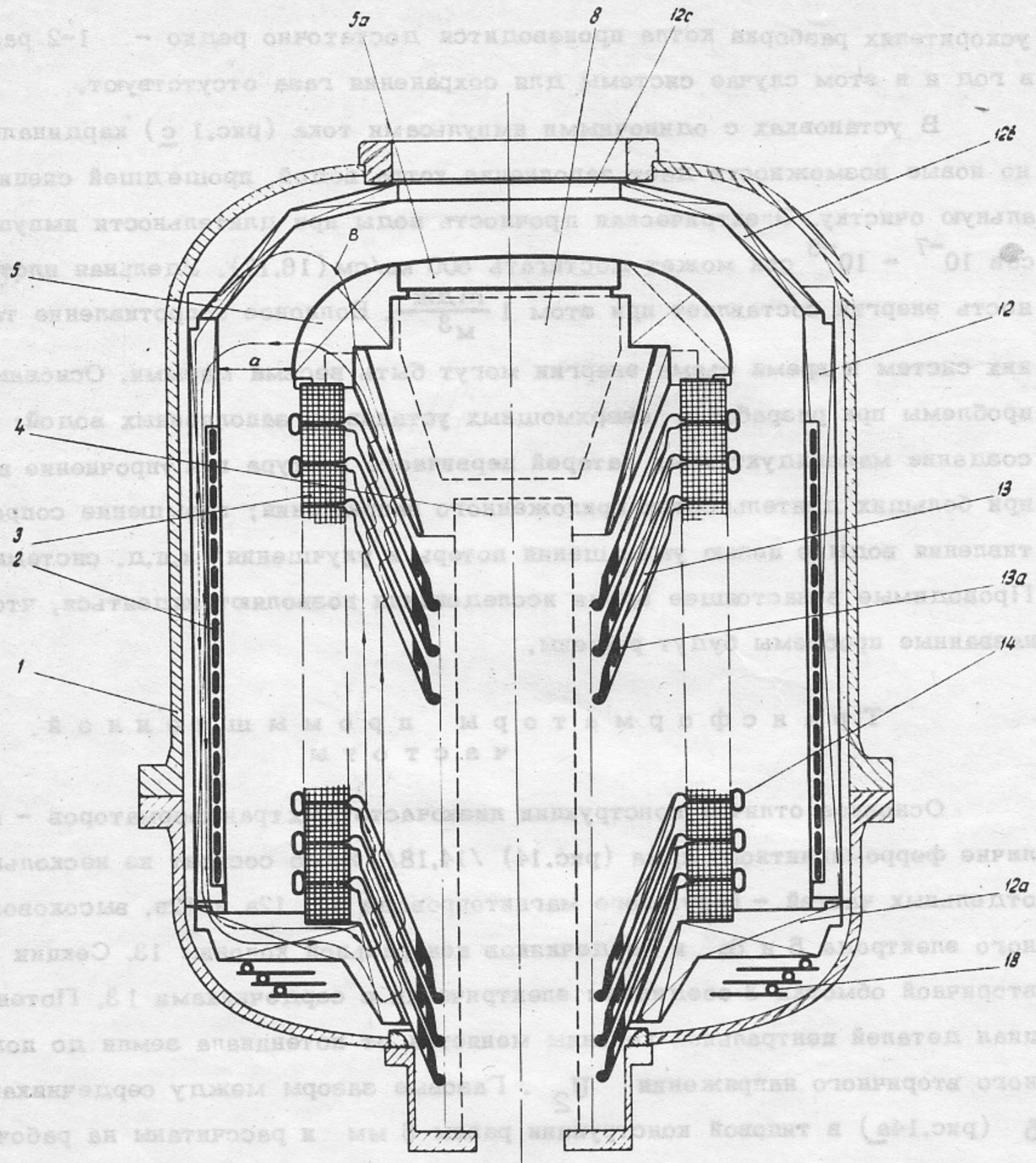


Рис.14. Конструкция трансформатора промышленной частоты.

- 1 - котел, 2 - первичная обмотка, 3 - вторичная обмотка, 4 - ускорительная трубка, 5, 5а - высоковольтный электрод, 8 - система управления инжектором, 12, 12а, 12в, 12с - детали наружного магнитопровода, 13 - конусный сердечник, 13а - медное кольцо, 14 - экран катушки вторичной обмотки, 18 - охлаждение.

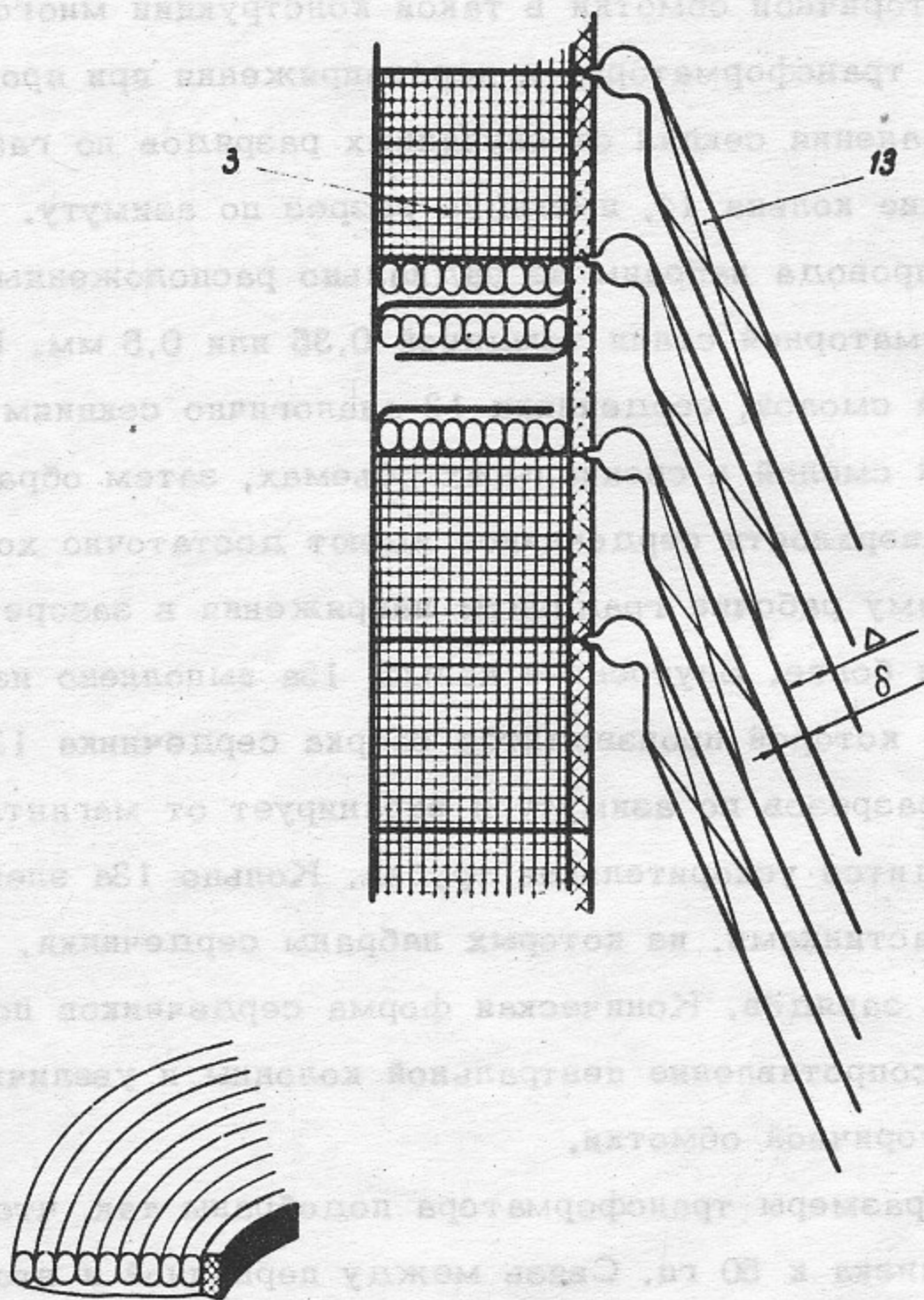


Рис.14а. Секции вторичной обмотки трансформатора

бой навитую из провода $\phi 0,35$ мм плоскую спираль (см. рис.14а). Слои накладываются друг на друга и соединяются последовательно. К каждой спирали при изготовлении приклеиваются с обеих сторон щеки из электрически прочной бумаги. После сборки нескольких десятков слоев, образующих одну секцию 3, они закладываются в специальный технологический

объем, в котором вакуумируются, сушатся и затем пропитываются эпоксидной смолой при давлении до 40 атмосфер. В результате получается монолитная секция, обладающая высокой электрической и механической прочностью. Градиент напряжения вдоль вторичной обмотки 2-3 Мв/м. Продольная емкость вторичной обмотки в такой конструкции много больше, чем в импульсных трансформаторах и перенапряжения при пробоях невелики. Для предохранения секций от случайных разрядов по газу установлены металлические кольца 14, имеющие разрез по азимуту.

Детали магнитопровода набраны из радиально расположенных пластин обычной трансформаторной стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины склеены эпоксидной смолой, сердечники 13 аналогично секциям 3 пропитываются эпоксидной смолой в специальных объемах, затем обрабатываются на станках. Поверхности сердечников имеют достаточно хорошее качество, благодаря чему рабочие градиенты напряжения в зазоре δ достигают 160 кв/см и более. Внутреннее кольцо 13а выполнено из меди и является основой, на которой производится сборка сердечника 13. Кольцо 13а не имеет разрезов по азимуту и экранирует от магнитных полей область, где находится ускорительная трубка. Кольцо 13а электрически соединено с пластинками, из которых набраны сердечники, для съема с них случайных зарядов. Коническая форма сердечников позволяет снизить магнитное сопротивление центральной колонны и увеличить продольную емкость вторичной обмотки.

Геометрические размеры трансформатора подобраны так, что его собственная частота близка к 50 гц. Связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора достаточно высока ($K=0,85 - 0,9$), и резонансность не играет столь решающей роли, как в резонансных трансформаторах фирмы **General Electric** /3/ и в импульсных трансформаторах (рис.1). Однако и здесь резонансность дает ряд преимуществ: повышается $\cos \phi$, снижаются потери в трансформаторе, т.к. реактивная мощность, обусловленная наличием емкости центральной колонны на землю, циркулирует только во вторичной цепи и, наконец, снижаются габариты устройства, регулирующего напряжение на входе первичной обмотки.

Относительно высокая добротность трансформатора на холостом ходу ($Q = 60 - 70$) достигается подбором отношения толщины сердечни-

ков 13 к зазору между ними $-\frac{\xi}{\Delta}$ (рис.14а). Действительно, при заданных рабочей частоте, материале магнитопровода и обмоток, размерах магнитопровода (полная длина, зазор \underline{a} и сечение в каждом месте), в первом приближении, реактивная мощность

$$P_1 = A_1 \frac{i_L^2}{R}, \quad \text{потери в меди и стали } P_2 = A_2 i_L^2 \text{ и } P_3 = A_3 \frac{i_L^2}{R^2}.$$

Здесь A_1, A_2 и A_3 - коэффициенты, постоянные при заданных условиях, i_L ток в обмотке и

$$R = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} - \text{полное магнитное сопротивление магнитопровода.}$$

$$Q = \frac{P_1}{P_2 + P_3} = \frac{A_1 R}{A_2 R + A_3} \text{ и является функцией магнитного сопротивления } R.$$

Из условия $\frac{dQ}{dR} = 0$ находим величину сопротивления R^* , соответ-

$$\text{ствующую максимальной добротности трансформатора: } R^* = \sqrt{\frac{A_3}{A_2}}$$

δ и Δ , обеспечивающие $\sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} = R^* = \sqrt{\frac{A_3}{A_2}}$, легко находятся.

Конструкция трансформатора предусматривает возможность замены системы управления 8, инжектора и ускорительной трубки без разборки котла. Для заполнения котла используются те же смеси газов и газовые системы, что и для импульсных трансформаторов. Градиент напряжения в зазоре \underline{a} до 200-300 кв/см.

Для регулирования ускоряющего напряжения между сетью и ускорителем установлен специальный переключатель, на которой выведено несколько отводов первичной обмотки. В первичной цепи имеется также быстроедействующий размыкатель, отключающий ускоритель от сети при аварийных ситуациях /21/.

Конструкция трехфазного трансформатора рассмотрена ниже в разделе "Типовые установки".

4. Ускорительные трубки

Описанные выше трансформаторы способны обеспечить ускорение высокоинтенсивных пучков заряженных частиц. К настоящему времени ускорены до энергий 1 Мэв и выше в импульсных установках с горячим катодом (рис.1а) электронные пучки с амплитудой токов до 100а, в трансформаторах промышленной частоты (рис.8) - с амплитудой до 130 ма. На трансформаторах с частотой 50 гц (рис.8) получены также протонные пучки с током до 80 ма и энергией свыше 1 Мэв. Средние мощности в ряде моделей составляют десятки киловатт. Исследования таких установок показывают, что возможно создание высоковольтных трансформаторов на значительно большие мощности. Технически осуществимы трансформаторы на многие сотни и тысячи киловатт средней мощности.

Для ускорения таких пучков требуются ускорительные трубки, способные работать при токах, на несколько порядков превышающих величины, достигнутые в ранее известных установках. Как правило, ускорительная трубка является одним из наиболее слабых мест в ускорителях прямого действия, и трудности анализа механизмов, вызывающих пробой по вакууму, усложняют проектирование новых трубок в случаях, когда их параметры, в частности, величина ускоряемого тока, существенно отличаются от экспериментально опробованных систем. Одни из основных проблем при этом - удержание больших токов в пучке малого радиуса с целью уменьшения апертуры и ограничения эффектов, вызывающих пробой по полному напряжению, и подавление потока вторичных частиц в основном канале трубки.

Минимальное сечение канала в электродах трубки, предназначенного для ускорения частиц, может быть достигнуто несколькими способами. Во-первых, увеличением градиента ускоряющего напряжения и, следовательно, повышением предельной плотности тока в пучке. В тех случаях, когда в вакууме могут быть получены более высокие градиенты напряжения, чем по вакуумной поверхности изолятора трубки, электроды имеют геометрию, показанную на рис.15а: электроды стянуты у оси, диаметр трубки несколько увеличивается. Такая конструкция применяется обычно в

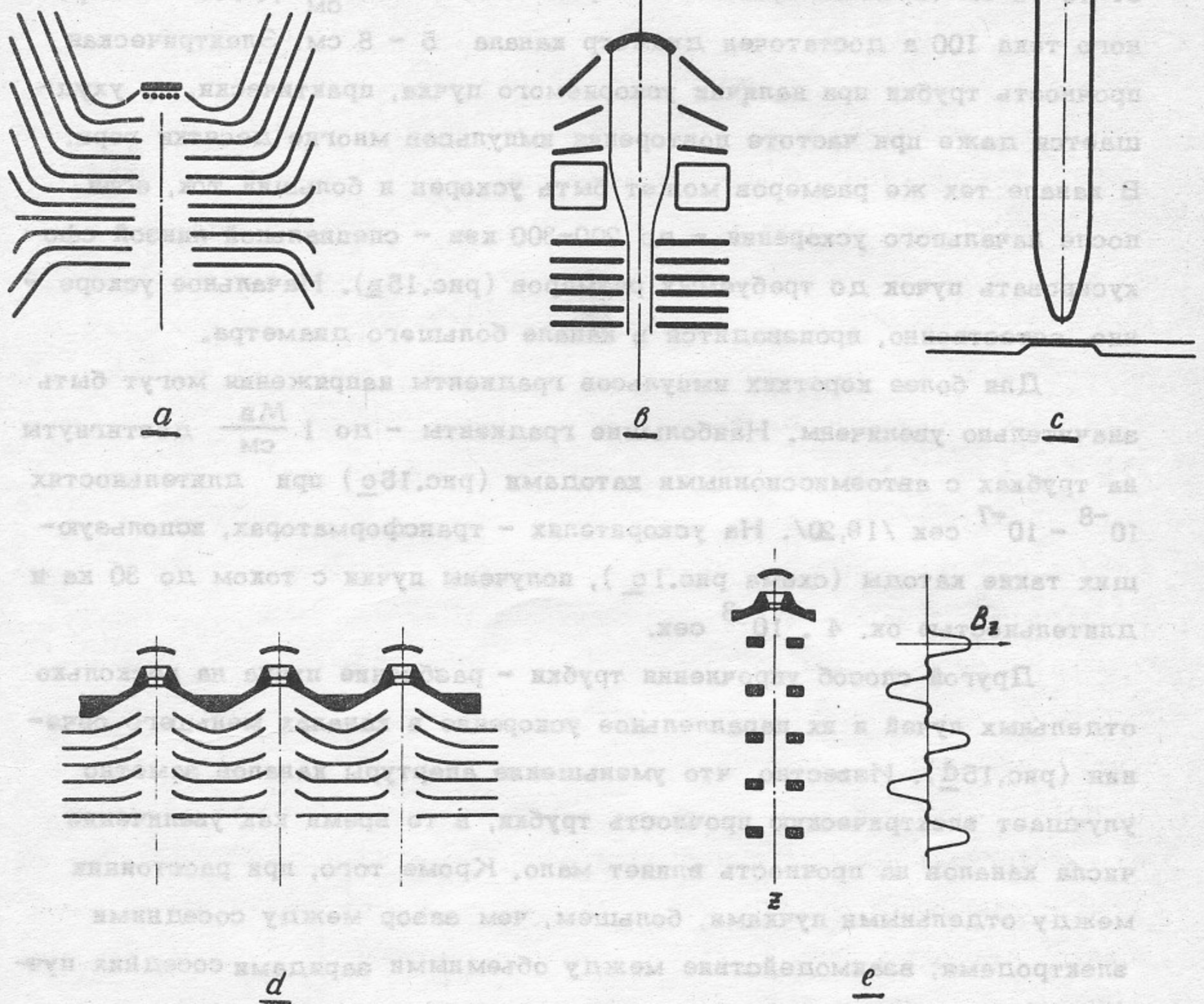


Рис.15. Электронно-оптические системы ускорительных трубок.

а - система со стянутыми электродами;

в - фокусировка пучка после начального ускорения;

с - трубка с автоэмиссионным катодом;

д - ускорение частиц в параллельных каналах;

е - фокусировка пучка постоянными магнитными линзами.

импульсных ускорителях. При напряжении 1 МВ и длительности импульса $10^{-6} - 10^{-5}$ сек длина канала, в котором ускоряются частицы, составляет 10-15 см (средний градиент напряжения $60-100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$). Для электронного тока 100 а достаточен диаметр канала 5 - 8 см. Электрическая прочность трубки при наличии ускоряемого пучка, практически, не ухудшается даже при частоте повторения импульсов многие десятки герц. В канале тех же размеров может быть ускорен и больший ток, если после начального ускорения - до 200-300 кэВ - специальной линзой сфокусировать пучок до требуемых размеров (рис.15в). Начальное ускорение, естественно, производится в канале большего диаметра.

Для более коротких импульсов градиенты напряжения могут быть значительно увеличены. Наибольшие градиенты - до $1 \frac{\text{МВ}}{\text{см}}$ достигнуты на трубках с автоэмиссионными катодами (рис.15с) при длительностях $10^{-8} - 10^{-7}$ сек /19,20/. На ускорителях - трансформаторах, использующих такие катоды (схема рис.1с), получены пучки с током до 30 ка и длительностью ок. $4 \cdot 10^{-8}$ сек.

Другой способ упрочнения трубки - разбиение пучка на несколько отдельных лучей и их параллельное ускорение в каналах меньшего сечения (рис.15д). Известно, что уменьшение апертуры каналов заметно улучшает электрическую прочность трубки, в то время как увеличение числа каналов на прочность влияет мало. Кроме того, при расстоянии между отдельными пучками, большем, чем зазор между соседними электродами, взаимодействие между объемными зарядами соседних пучков отсутствует и предельная плотность в каждом луче возрастает.

В трубках с небольшим средним градиентом напряжения (15-20 кВ/см) кардинальное увеличение плотности частиц в пучке может быть получено с помощью системы линз, установленных внутри трубки (рис.15е). В трубках обычных размеров (диаметр 15-25 см) возможно размещение фокусирующих систем, состоящих из многих магнитных или электростатических линз, способных удерживать в шнуре малого диаметра потоки заряженных частиц высоких интенсивностей. Нами рассмотрены фокусирующие тракты, состоящие из аксиально-симметричных постоянных магнитов, квадрупольных постоянных магнитных линз и электростатических квадрупольных линз, - предназначенные для транспортировки как электронных,

так и протонных пучков. Разработаны методы согласования фокусирующих трактов с параметрами пучка на выходе из источника. Ряд систем успешно применен в описываемых ускорителях - трансформаторах.

При установке линз внутри трубки вблизи пучка объём поля линз оказывается небольшим и сами линзы достаточно портативными. В работе /22/ рассмотрены системы для транспортировки электронного пучка с током до 50 а. Приведем результаты расчёта фокусирующих трактов до энергии электронов 1 Мэв. Система, состоящая из квадрупольных магнит-

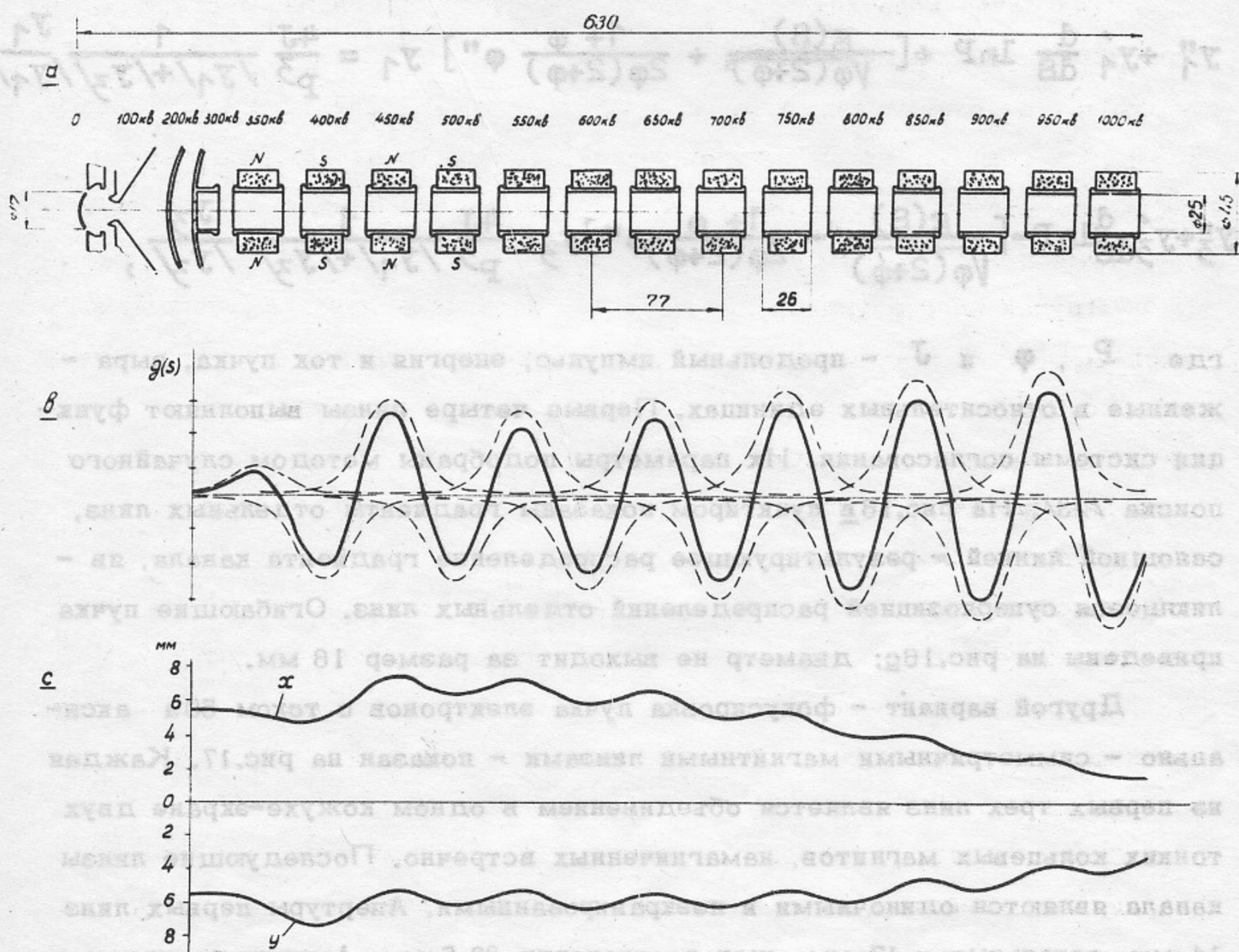


Рис.16. Ускорение электронов в тракте с квадрупольными магнитными линзами.

- а - фокусирующий тракт
- б - градиент магнитного поля линз
- с - огибающие пучка.

ных линз, показана на рис.16а. Предварительно - до 300 кэв - электроны ускоряются в пушке со сферическим катодом и оптикой Пирса. Структура сильнофокусирующего тракта - ФОДО, внутренний диаметр каждой квадрупольной линзы 25 мм, длина 26 мм, период 77 мм. Распределение градиента поля на оси линзы $g(S)$ принято колоколообразным. Используется система относительных единиц, в которой масса электрона, его заряд и скорость света равны единице. В этом случае траектория "крайнего" электрона ламинарного потока (фазовый объем равен нулю) с равномерным распределением плотности тока по сечению в линейном приближении по поперечным отклонениям Y_1 и Y_2 описывается уравнениями

$$y_1'' + y_1' \frac{d}{dS} \ln P + \left[\frac{g(S)}{\sqrt{\phi(2+\phi)}} + \frac{1+\phi}{2\phi(2+\phi)} \phi'' \right] y_1 = \frac{4J}{P^3} \frac{1}{\sqrt{y_1} + \sqrt{y_3} / \sqrt{y_1}}$$

$$y_3'' + y_3' \frac{d}{dS} \ln P - \left[\frac{g(S)}{\sqrt{\phi(2+\phi)}} - \frac{1+\phi}{2\phi(2+\phi)} \phi'' \right] y_3 = \frac{4J}{P^3} \frac{1}{\sqrt{y_1} + \sqrt{y_3} / \sqrt{y_3}},$$

где P , ϕ и J - продольный импульс, энергия и ток пучка, выраженные в относительных единицах. Первые четыре линзы выполняют функции системы согласования. Их параметры подобраны методом случайного поиска [23]. На рис.16в пунктиром показаны градиенты отдельных линз, сплошной линией - результирующее распределение градиента канала, являющееся суперпозицией распределений отдельных линз. Огибающие пучка приведены на рис.16с; диаметр не выходит за размер 16 мм.

Другой вариант - фокусировка пучка электронов с током 50а аксиально - симметричными магнитными линзами - показан на рис.17. Каждая из первых трех линз является объединением в одном кожухе-экране двух тонких кольцевых магнитов, намагниченных встречно. Последующие линзы канала являются одиночными и незранированными. Апертуры первых линз 14 мм, остальных - 17 мм; шаг расстановки 38,5 мм. Амплитуда индукции в первых линзах 1000 гс, в остальных - 1200 гс. Уравнение движения "крайней" частицы в этом случае имеет вид

$$y'' + y' \frac{d}{dS} \ln P + \left[\frac{b^2(S)}{4\phi(2+\phi)} + \frac{1+\phi}{2\phi(2+\phi)} \phi'' \right] y = \frac{2J}{P^3} \frac{1}{\sqrt{y}},$$

где $b(S)$ - индукция продольного магнитного поля на оси канала (рис.17в).

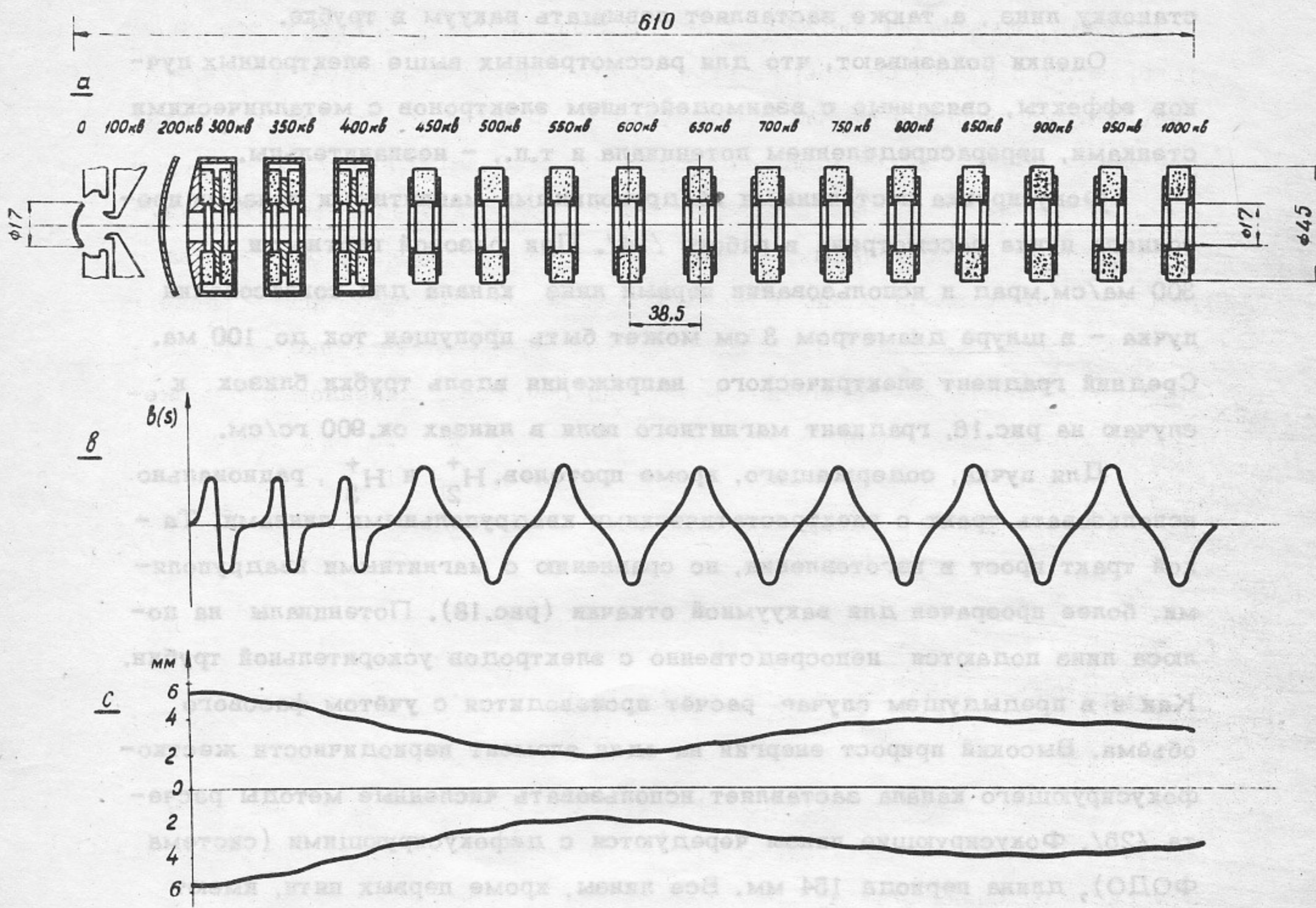


Рис.17. Ускорение электронов в тракте с аксиально-симметричными магнитными линзами

- а - фокусирующий тракт
- б - магнитное поле на оси тракта
- с - огибающие пучка

Максимальный диаметр пучка здесь около 12 мм (рис.17с).

Описанные системы фокусировки в принципе могут быть использованы как для импульсных, так и для стационарных пучков. Однако при больших длительностях импульсов или в стационарных режимах необходима высокая чистота прохождения частиц, обеспечивающая попадание на электроды очень малой доли мощности пучка $< 10^{-2} - 10^{-4}\%$. Это обстоятельство приводит к значительному ужесточению допусков на выполнение и рас-

становку линз, а также заставляет повышать вакуум в трубке.

Оценки показывают, что для рассмотренных выше электронных пучков эффекты, связанные с взаимодействием электронов с металлическими стенками, перераспределением потенциала и т.п., — незначительны.

Фокусировка постоянными квадрупольными магнитными линзами протонного пучка рассмотрена в работе /24/. При фазовой плотности 300 ма/см.мрад и использовании первых линз канала для согласования пучка — в шнуре диаметром 3 см может быть пропущен ток до 100 ма. Средний градиент электрического напряжения вдоль трубки близок к случаю на рис.16, градиент магнитного поля в линзах ок.900 гс/см.

Для пучка, содержащего, кроме протонов, H_2^+ и H_3^+ , рационально использовать тракт с электростатическими квадрупольными линзами. Такой тракт прост в изготовлении, по сравнению с магнитными квадрупольными, более прозрачен для вакуумной откачки (рис.18). Потенциалы на полюса линз подаются непосредственно с электродов ускорительной трубки. Как и в предыдущем случае расчёт производится с учётом фазового объёма. Высокий прирост энергии на один элемент периодичности жесткофокусирующего канала заставляет использовать численные методы расчёта /25/. Фокусирующие линзы чередуются с дефокусирующими (система ФОДО), длина периода 154 мм. Все линзы, кроме первых пяти, имеют длину 25 мм и апертуру 46 мм. Т.к. линзы короткие, то при расчетах учитывалось фактическое распределение градиента потенциала, снятое на электролитической ванне. На первые пять линз накладываются функции системы согласования. Их параметры подбираются методом случайного поиска так, чтобы оптимизировать прохождение пучка через трубку и получить на выходе сечение пучка, близкое к круглому. В результате апертуры и длины линз имеют следующие значения:

№ линзы	1	2	3	4	5	6 и остальные
апертура (мм)	55	46	46	55	55	46
длина линзы (мм)	25	45	45	30	30	25

На рис.19 показан тракт длиной ок. 1100 мм, состоящий из 14 линз. При полном напряжении на тракте ~1,2 Мв по нему может быть пропущен пучок с эквивалентным током 65 ма и фазовым объёмом пучка $2,2 \cdot 10^{-4}$ см.рад. Понятие эквивалентный ток введено в связи с наличием в пучке различ —

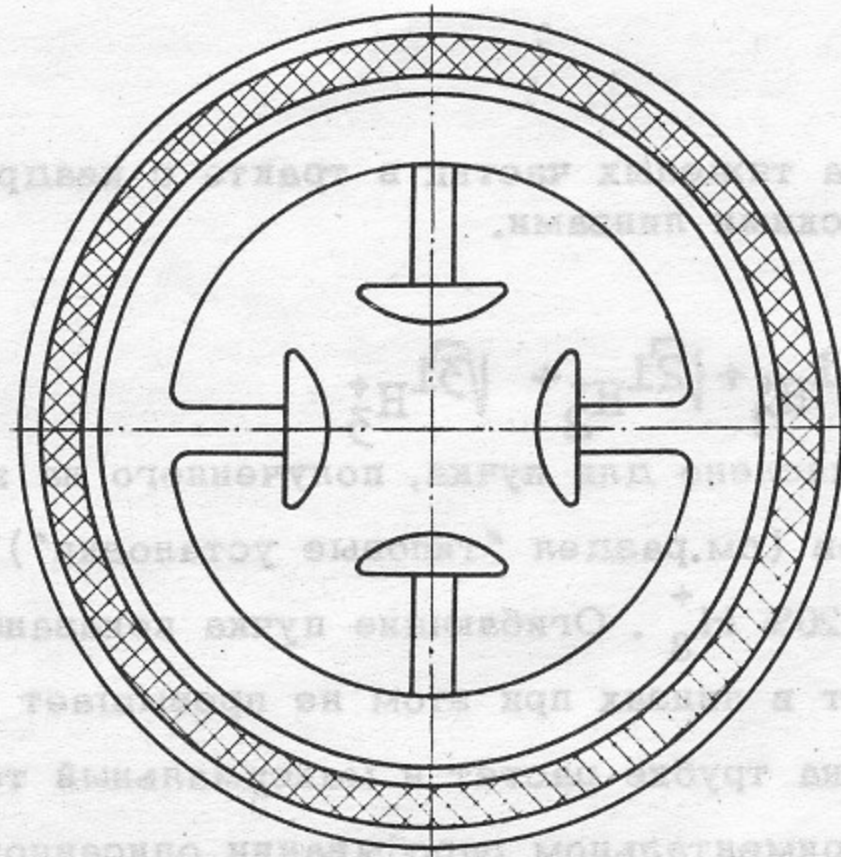
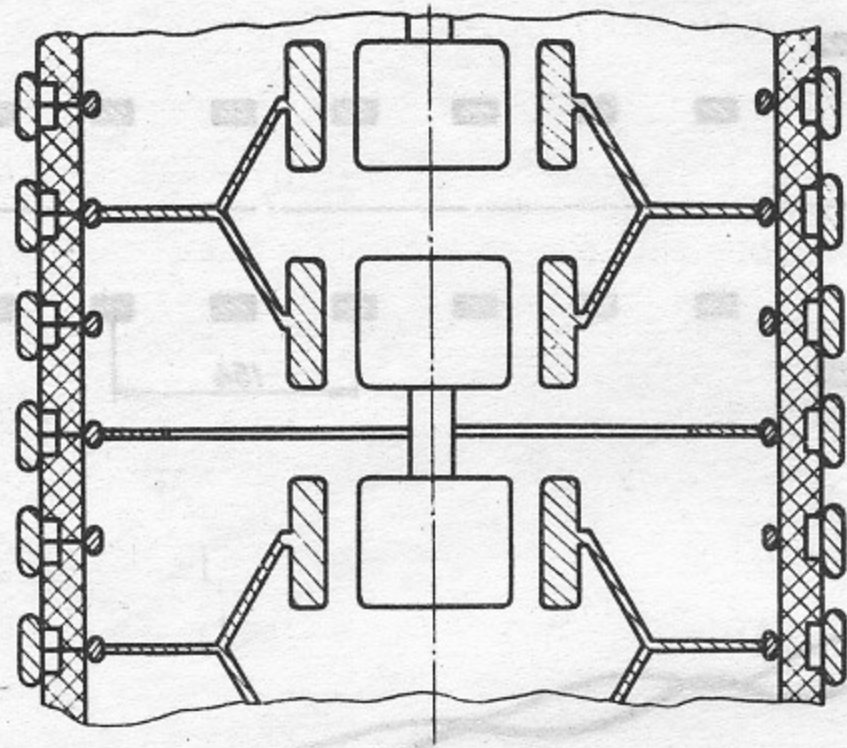


Рис.18. Фокусирующий тракт с квадрупольными электростатическими линзами.

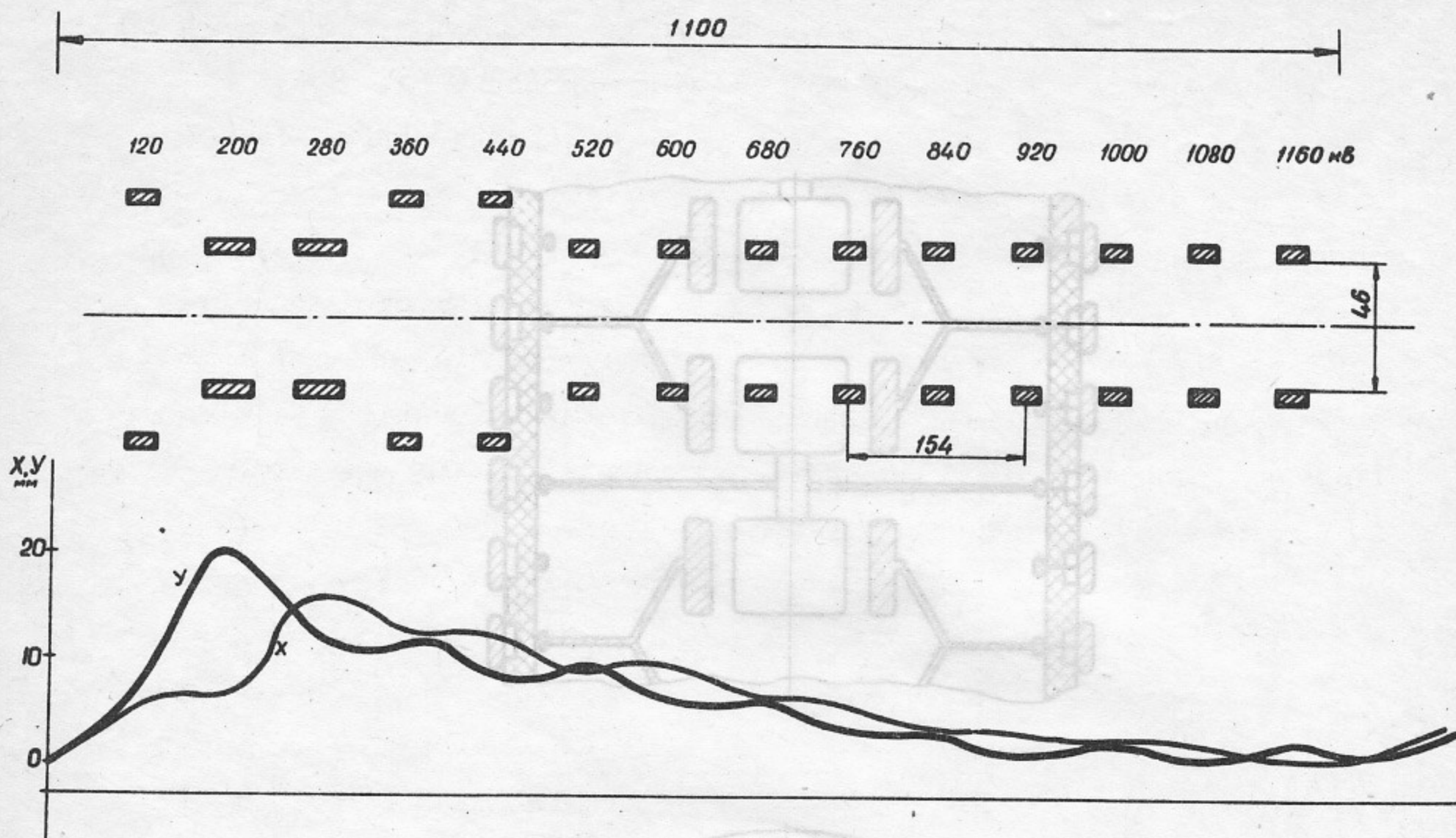


Рис.19. Ускорение пучка тяжелых частиц в тракте с квадрупольными электростатическими линзами.

ных компонент: $i_{\text{экв}} = i_{H_1^+} + \sqrt{2}i_{H_2^+} + \sqrt{3}i_{H_3^+}$ /26/. Значение $i_{\text{экв}} = 65$ ма вычислено для пучка, полученного на экспериментальном ускорителе протонов (см.раздел " типовые установки"), содержащего 50% H_1^+ , 30% H_2^+ и 20% H_3^+ . Огибающие пучка показаны на рисунке. Максимальный градиент в линзах при этом не превышает 7 кв/см^2 . С повышением напряжения на трубке растет и максимальный ток, пропускаемый каналом. Об экспериментальном опробывании описанного тракта будет сказано ниже.

Возможности сильнофокусирующих систем, устанавливаемых внутри ускорительной трубки, естественно, не исчерпываются приведенными примерами. Прежде всего, значительно могут быть повышены градиенты магнитных линз, особенно при использовании электромагнитов. Увеличит пропускную способность трубки также применение фокусирующих систем с винтовой симметрией (см., напр./27/).

Как говорилось в начале этого раздела, сокращение апертуры уско-

ряющего канала трубки имеет основной целью ограничить процессы, вызывающие пробой трубки. Известно, что эти процессы связаны с ускорением и размножением вторичных частиц, возникновением электронно-фотонных лавин и т.д. Экспериментально проверено, что уменьшение сечения сквозного канала в трубке существенно увеличивает её электрическую прочность. Не менее действенными являются меры по затруднению ускорения в трубке вторичных частиц, в частности, наклон электродов /4/, создание небольших поперечных магнитных полей и др. Прямая связь между длиной пробега вторичных частиц и прочностью трубки установлена во многих работах (напр. /28/).

В связи с исследованием сильнофокусирующих систем для ускорительных трубок в работе /29/ проанализирована способность этих систем удалять из канала случайно возникающие в нем частицы. При помощи датчиков случайных чисел имитировалось возникновение на электродах трубки и в зоне прохождения основного пучка электронов с энергией 100-900 эв и случайным направлением вектора скорости. Траектория каждого электрона рассчитывалась вплоть до его попадания на электроды или выхода из трубки. Изучены вторичноэлектронные характеристики трех фокусирующих систем, эквивалентных по фокусировке основного пучка: магнитные и электростатические квадрупольные и с аксиально симметричными магнитными линзами. Наименьшие пробеги вторичных частиц и, следовательно, наибольшую электрическую прочность обеспечивает система с магнитными квадрупольными линзами. Возможно создание трактов с квадрупольными линзами, в которых основная масса вторичных частиц проходит не более одного элемента периодичности.

Наиболее сложным в изготовлении элементом ускорительной трубки является секционированный изолятор. При малой апертуре ускоряющего канала могут быть достигнуты высокие градиенты напряжения в основном канале (у оси трубки) и длина трубки определяется электрической прочностью изолятора, точнее, прочностью вакуумной поверхности изолятора. Последняя находится в наиболее тяжелых условиях, т.к. электрическая прочность по поверхности изолятора в вакууме значительно меньше, чем в сжатом газе. Секционированная поверхность в газе сохраняет электрическую прочность при градиентах 100-150 кв/см и выше. Кроме того, вакуумная сторона подвергается большему воздействию ускоренных частиц. В

ускорителях-трансформаторах, использующих SF_6 высокого давления и хорошо отработанные конструкции вторичных обмоток, осевой размер ускорителя определяется, в первую очередь, изолятором ускорительной трубки.

В промышленных ускорителях, где простота обслуживания является одним из наиболее существенных факторов, желательно применять отпаянные трубки без органических материалов - с металлокерамическими или металлостеклянными изоляторами. Усложнение технологии при производстве трубок в этом случае оправдывается экономией при эксплуатации. С другой стороны, в экспериментальных установках трубка должна легко разбираться и допустима непрерывная откачка.

Для ускорителей-трансформаторов различного назначения разработано несколько конструкций секционированных изоляторов. Типовые изоляторы показаны на рис.20. Вариант а - металлокерамическая трубка, керамические кольца 1 соединены с медными электродами 2 термодиффузионной сваркой /9/. После приварки электродов 2 к керамике отдельные секции соединяются друг с другом электросваркой в среде гелия электродов 2. Такая трубка может быть прогрета и отпаяна.

Вариант в представляет собой цельную изоляционную трубу 1, разнос напряжения на которой осуществляется с помощью колец 2 и 3, плотно посаженных на трубу снаружи и изнутри /5/. Каждая пара колец 2 и 3 соединяется несколькими вакуумно уплотненными проводниками 4. Величина среднего градиента вдоль трубки в этом случае определяется, в основном, качеством сопряжения металлических колец с изолятором. Известно, что в малых зазорах между металлом и изолятором напряженность электрического поля может оказаться в ϵ раз больше. Для изготовления изоляторов по варианту в используются недорогие трубы из фарфора и других материалов. Градиенты напряжения на трубках вариантов а и в достигают сейчас 2 - 2,5 Мв/м как для импульсов длительностью 10^{-5} сек, так и для 50 гц.

Большие градиенты получены на изоляторах вариантов с и д. Эти конструкции выполняются обычно из орг.стекла или эпоксидных композитов и используются для непрерывно откачиваемых систем. Герметизация колец 1 и электродов 2 производится резиновыми уплотнениями 5. Сжатие трубки в случае с производится при сборке атмосферным давлением, за -

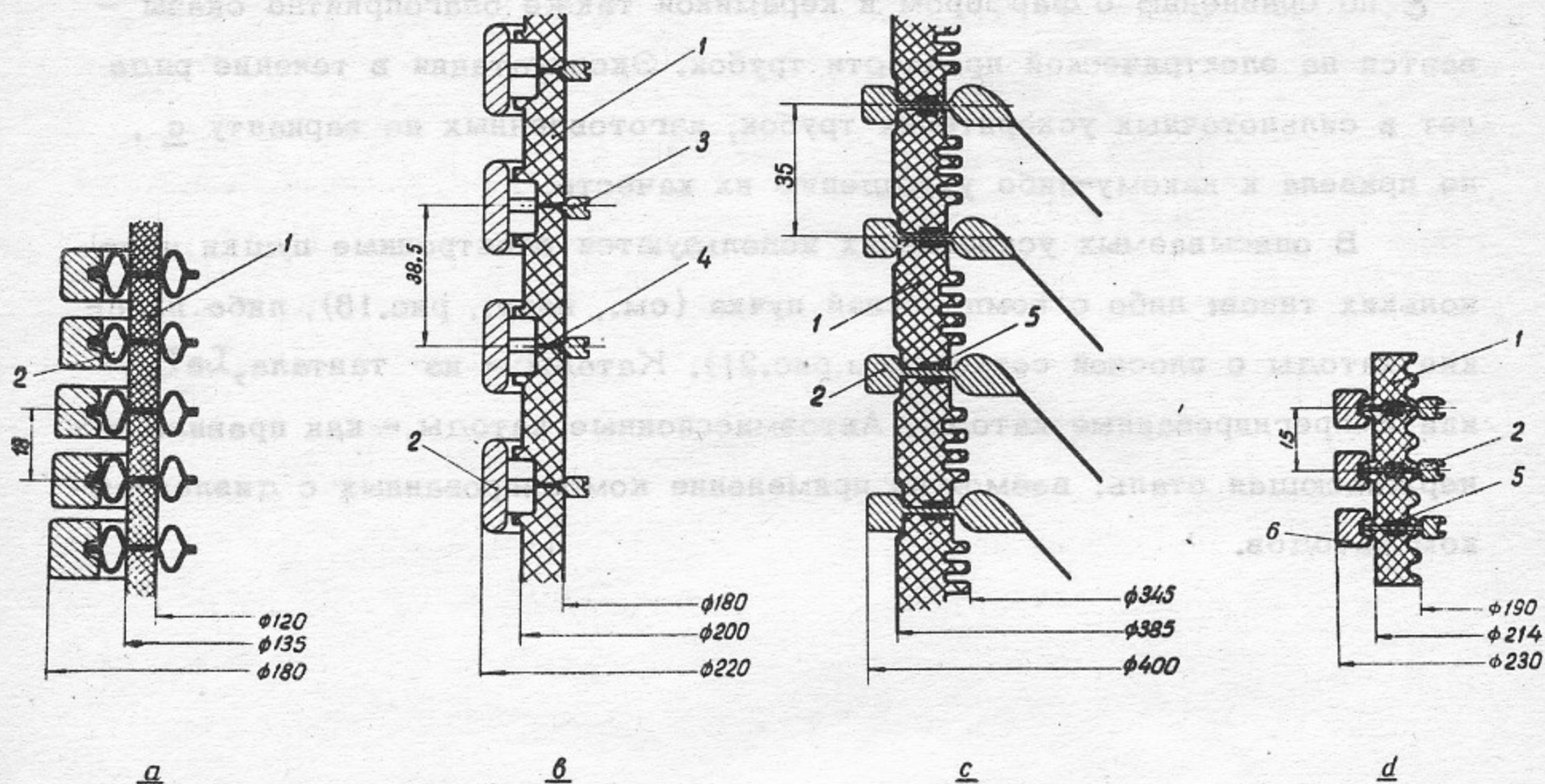


Рис.20. Конструкции секционированных изоляторов ускорительных трубок.

- а - металлокерамическая трубка
- в - разнос напряжения на цельной керамической трубе
- с и д - изоляционные кольца, уплотненные на резине
- 1 - изоляционные кольца
- 2 - металлические кольца, разносящие потенциал
- 3 - металлические кольца, задающие потенциал на вакуумной поверхности изолятора
- 4 - электрическое соединение наружных и внутренних колец
- 5 - уплотнение
- 6 - фиксирующие кольца.

тем к нему добавляется давление газа; в случае д изолятор сжимается в приспособлении и затем надеваются кольца 6, играющие роль замков. Рабочий градиент вдоль трубки растет при более мелком секционировании изолятора. В варианте с он составляет 2,5 - 3 Мв/м, в варианте д - 3,5 - 4 Мв/м (для указанных выше длительностей напряжения). При коротких импульсах высокого напряжения ок. 10^{-7} сек - в варианте с допустимы градиенты 8 Мв/м и выше. Изготовление таких трубок не связано с разработкой специальных технологий, что позволяет быстро создавать

конструкции любых необходимых размеров и форм. Значительно меньшее ϵ по сравнению с фарфором и керамикой также благоприятно сказывается на электрической прочности трубок. Эксплуатация в течение ряда лет в сильноточных ускорителях трубок, изготовленных по варианту с, не привела к какому-либо ухудшению их качеств.

В описываемых ускорителях используются электронные пушки нескольких типов: либо с компрессией пучка (см., напр., рис.16), либо плоские катоды с плоской сеткой (см.рис.21). Катоды - из тантала, LaB_6 или импрегнированные катоды. Автоэмиссионные катоды, - как правило, - нержавеющая сталь; возможно применение комбинированных с диэлектриком катодов.

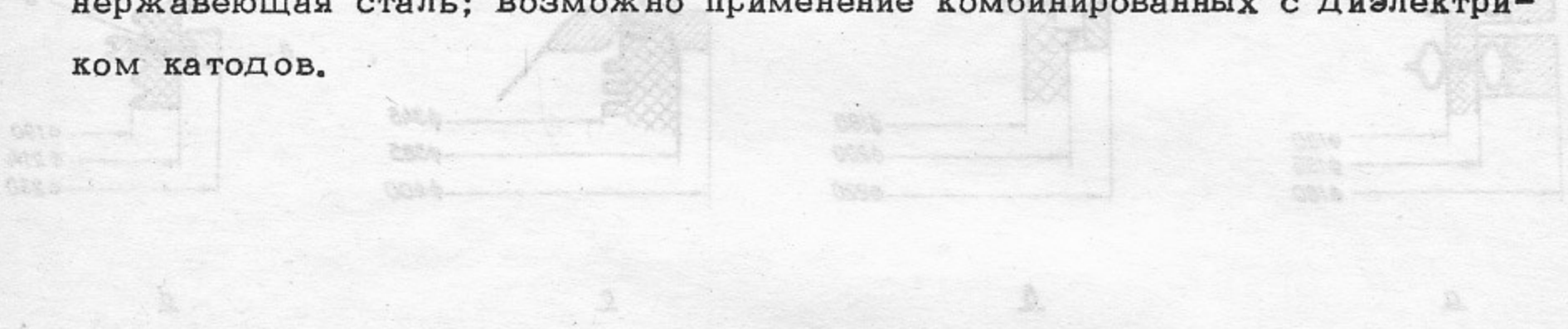


Рис. 20. Конструкция секционированных вакуумных ускорительных трубок:
 а - металлокерамическая трубка
 б - трубка с керамическим покрытием на внутренней керамической трубке
 в - трубка с керамическим покрытием на внешней керамической трубке
 г - трубка с керамическим покрытием на внутренней керамической трубке
 1 - анодные катоды
 2 - металлокерамическая трубка, анодные катоды
 3 - металлокерамическая трубка, анодные катоды, анодные катоды
 4 - электрическое соединение анодных катодов
 5 - анодные катоды
 6 - фиксирующие катоды.

тем * нему добивается выравнивание пучка в случае β вакуумной системы
 в процессорных и системных катодах β катодных трубчатых систем
 Работы выполняются в трубах, диаметр которых более метра секционированы
 катодов. В варианте с он составляет 2,5 - 3 МВ/м, в варианте б
 3,5 - 4 МВ/м (для ускорения в поле напряженности 10^{10} В/м). При ко-
 ллектимпульсовых системах напряженность ок. 10^{10} В/м, в варианте с доходит
 до 10^{11} В/м. Напряженность таких трубок не связана с
 разработкой современных технологий, что позволяет быстро создавать

5. Типовые установки

Ускорители-трансформаторы промышленной частоты были предложены в 1963 г., импульсные установки с горячим катодом - в 1965 г. За несколько лет были изготовлены и опробованы десятки различных модификаций таких установок. Импульсные ускорители с холодным катодом и трехфазные трансформаторы на 50 гц начали разрабатываться относительно недавно, и сейчас исследуются первые опытные экземпляры.

Ниже приведены краткие описания типовых ускорителей последних моделей.

И м п у л ь с н ы е у с к о р и т е л и

ЭЛИТА-1,5 - ускоритель электронов на максимальную энергию 1,5 Мэв и ток до 100 а. Длительность импульсов регулируется от 50нсек до 3 мксек, частота повторения - от одиночных до 100 гц.

Конструкция ускорителя показана на рис.21. Котел, в котором размещен ускоритель, имеет габаритный диаметр 1 м, высоту 0,8 м и заполняется SF_6 при давлении 12-14 атмосфер. Первичная обмотка 2 имеет 4 витка и питается напряжением 20-30 кв. Высоковольтная обмотка 3 содержит 350 витков. Коэффициент связи $K=0,6$, собственные частоты первичного и вторичного контура ок.80 кгц. Емкость электрода 5 и высоковольтных витков обмотки 3 на землю $C_2 = 150$ пф запасает при напряжении 1,5 Мв ок.170 дж. При длительности импульса 50 нсек и амплитуде тока 100а подсадка напряжения на C_2 и, следовательно, немонахроматичность электронов составляет 2%. При широких импульсах немонахроматичность увеличивается, однако положение облегчается тем, что в течение импульса тока в C_2 продолжает поступать энергия через вторичную обмотку 3 трансформатора. Момент включения, ширина импульса и амплитуда тока могут быть подобраны так, что энергия частиц во время импульса будет мало меняться /8/. Так, при импульсе 2 мксек и токе 80а немонахроматичность $\pm 7\%$ (рис.22). При установке более мощного инжектора возможен режим с $U_2 = const = 1,5$ Мв (см.рис.7). При ширине импульса 2,7 мксек ток должен спадать от 175а до нуля и в одном

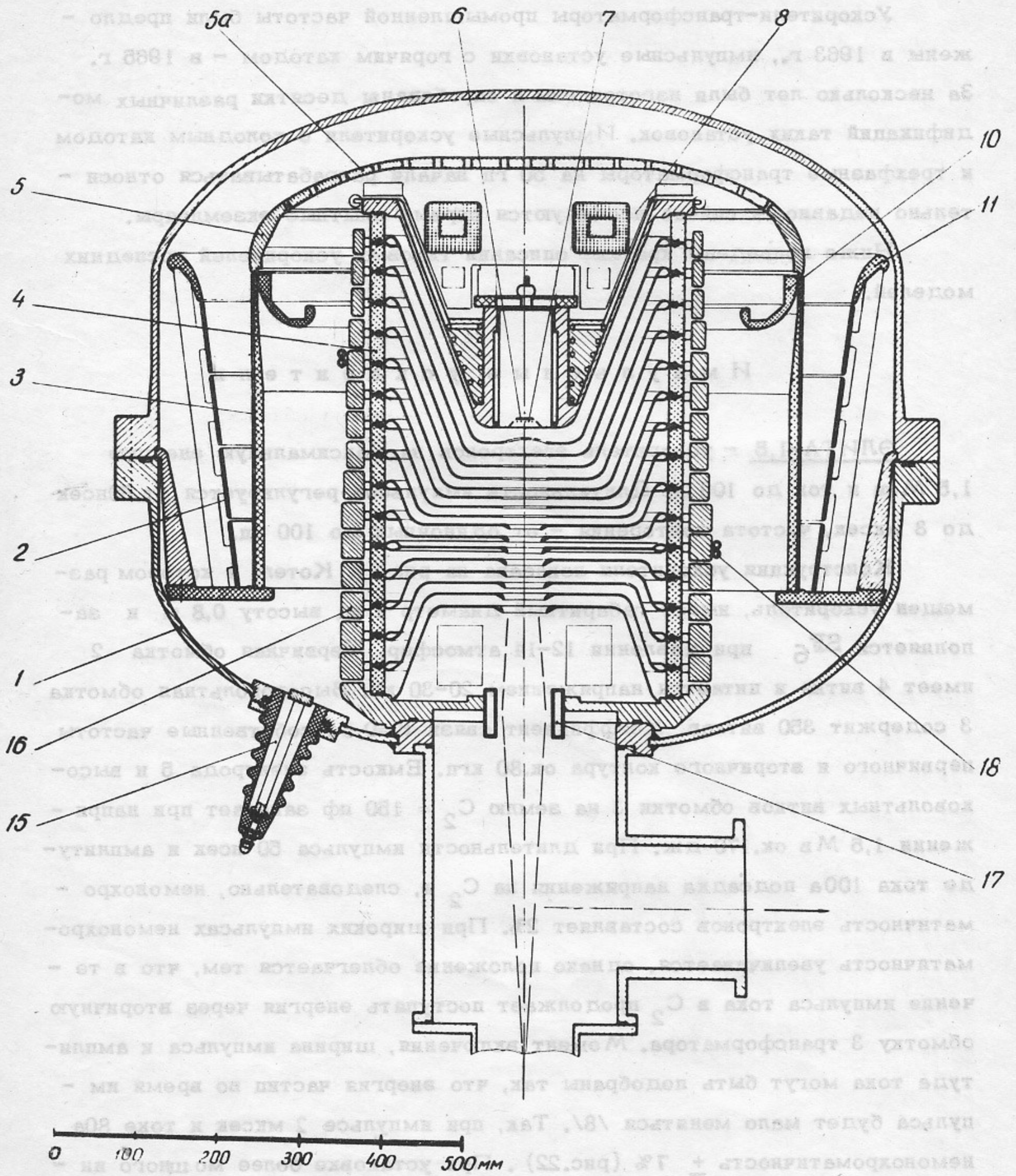


Рис.21. Ускоритель ЭЛИТА-1,5. Обозначение см. стр.45.

Перечень обозначений к рисункам 12, 14, 14а, 21, 23, 24, 26, 29 и 30

- 1 - котёл
- 2 - первичная обмотка
- 3 - вторичная обмотка
- 4 - ускорительная трубка
- 5, 5а - высоковольтный электрод
- 6 - катод
- 7 - сетка катода
- 8 - система управления инжектором
- 9 - электронный пучок
- 10 - защитный экран
- 11 - кольцо, экранирующее край первичной обмотки
- 12, 12а, 12в, 12с - детали наружного магнитопровода
- 13 - конусный сердечник
- 13а - медное кольцо
- 14 - экран катушки вторичной обмотки
- 15 - ввод первичной обмотки
- 16 - кольца, выравнивающие ёмкость между электродами трубки
- 17 - фокусирующая линза
- 18 - охлаждение
- 19 - раструб
- 20 - поджигающий разрядник
- 21 - вентилятор
- 22 - вакуумный насос
- В - магнитное поле

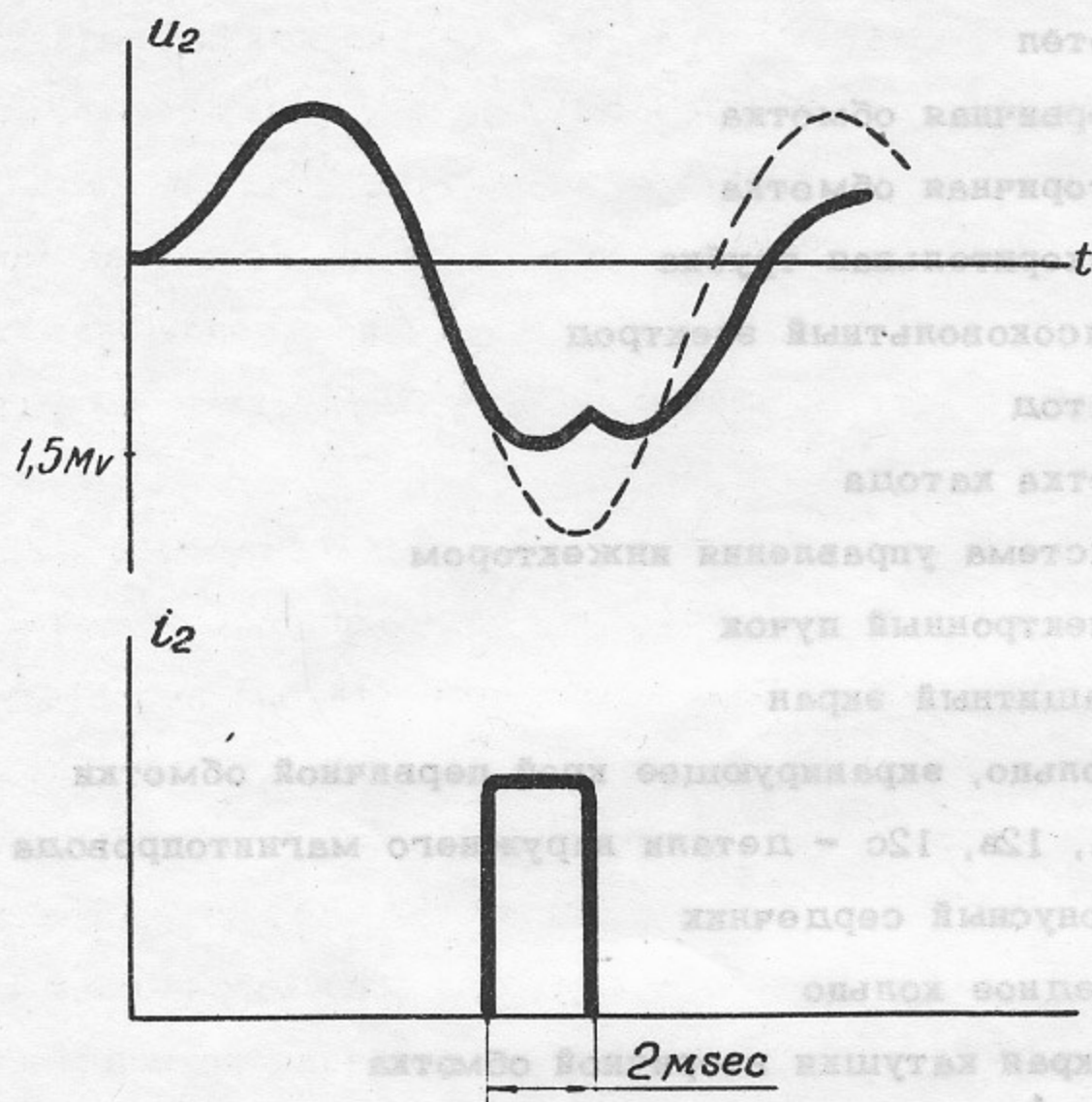


Рис.22. Напряжение и ток трубки.

импульсе пучок уносит 360 дж. В этих режимах (рис.7 и рис.22) на первичную обмотку подается повышенное напряжение с учетом подсадки U_2 . Пунктиром показано U_2 при отсутствии тока в трубке.

Ускорительная трубка 4 собрана из эпоксидных колец, уплотненных с электродами резиновыми прокладками, электроды стянуты у оси трубки. Инжектором является катод 6 из LaB_6 \varnothing 30 мм с сеткой. Длина канала ускорения \sim 23 см, $\varnothing \sim$ 7 см. Мощность для нагрева катода и питания системы управления 8 (ок.1,5 квт) подается по вторичной обмотке 3, намотанной двойным слоем (см.рис.12). Для выравнивания ёмкостей между электродами трубки установлены кольца 16, зазоры между которыми создают дополнительные ёмкости, благодаря чему импульсное напряжение вдоль трубки распределяется равномерно. Для стекания случайных зарядов к кольцам 16 подсоединен омический делитель (на рисунке не показан). Постоянная времени омического делителя ок. $1,5 \cdot 10^{-3}$ сек, так что

заряды снимаются в паузах между рабочими циклами.

После выхода из трубки пучок 9 фокусируется магнитной линзой 17 и направляется на облучаемый объект. Откачка трубки производится 500-литровым диффузионным насосом с азотной ловушкой. Для охлаждения элементов, находящихся вблизи инжектора под высоким потенциалом, по изоляционным трубкам 18 циркулирует масло. Установка может работать как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Вес ускорителя без защиты и системы электропитания и управления не превышает 500 кг.

Наиболее ответственным элементом электропитания ускорителя является коммутатор первичной цепи, обеспечивающий режим работы с рекуперацией энергии (рис.4). В качестве коммутатора используются шесть импульсных водородных тиратронов ТГИ1-2000/35, включенных встречно-параллельно. Каждый тиратрон нагружается током, превышающим номинальный (ок. 3,5 кА против номинального 2 кА), но работает при значительно меньшем по сравнению с номинальным, напряжении (ок. 18 кВ при номинальном 35 кВ). Такой режим в сочетании со специально подобранными параметрами сеточных цепей и водородных генераторов тиратронов позволяет обеспечить разрыв первичной цепи в момент t_{11} (см.рис.4).

Энергия электронов, частота следования импульсов, ток инжектора и другие параметры пучка регулируются с пульта. Управление инжектором (поз.8 на рис.21) определяет длительность и форму импульса ускоренного тока. Для перехода к новым режимам сменяются или переключаются блоки в системе управления. Питание первичного контура определяет среднюю мощность электронного пучка, которая может достигать в этой установке 10 квт. Коммутирующему устройству и другим элементам электропитания импульсных ускорителей посвящен ряд работ, в частности (10, 11).

ЭЛИТА-3 предназначена для ускорения электронных пучков с токами 20/40/а до энергий 2,5 - 3 Мэв. Основной рабочий режим - широкие импульсы до 10 мксек. Частота повторения до 100/300/гц. Максимально возможная энергия в пучке в одном импульсе - ок.1000 дж, максимальный ток - 40 а. Средняя мощность в пучке 10-20 квт и более.

Сечение ускорителя представлено на рис.23. Наружные размеры котла: диаметр 1 м, высота 1,3 м. Другие размеры видны из рисунка.

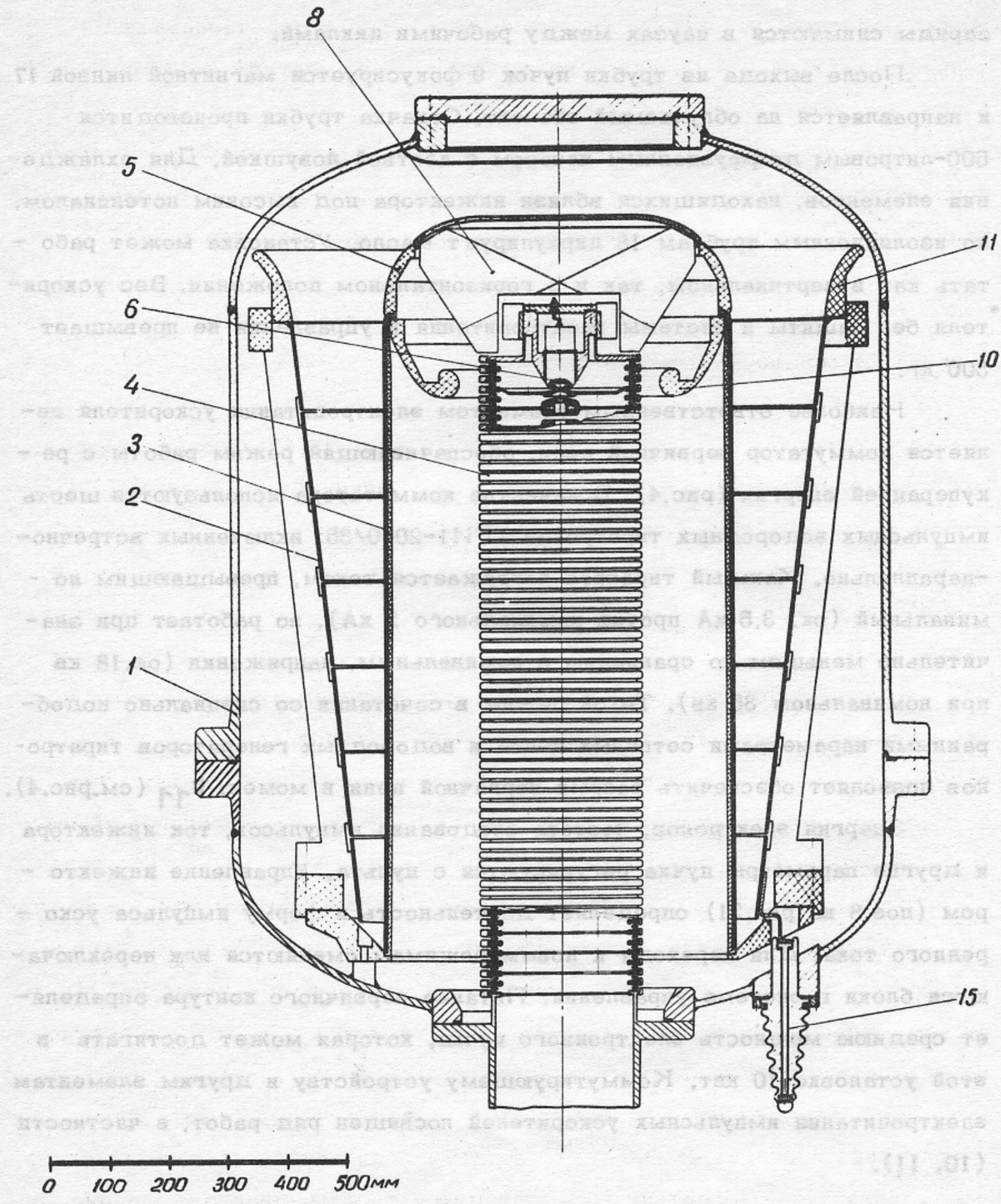


Рис.23. Ускоритель ЭЛИТА-3. Обозначения см.стр. 45

Котел заполняется SF_6 при давлении 15 - 20 атм. Изоляционные кольца ускорительной трубки - из эпоксидного компаунда, конструкция колбы показана на рис.20d.

Предусматривается работа ускорителя как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Установка легко транспортабельна. Электропитание и ряд других систем выполнены аналогично элементам ЭЛИТА-1,5.

ЭЛИТА-1 - компактный ускоритель электронов на энергию 1 Мэв и среднюю мощность пучка 8 квт (рис.24). В отличие от двух предыдущих установок ускорительная трубка работает в диодном режиме. На высоковольтный электрод 5 подается только мощность для накала катода. Отсутствие системы управления инжектором упрощает установку. Основное назначение ускорителя - промышленное применение. Он может работать как с внутренней мишенью в качестве генератора гамма-излучения, так и с разверткой и раструбом, имеющем окно для выпуска пучка из вакуума.

Немонохроматичность пучка приводит к дополнительным потерям при развертке. При частоте повторения 300 гц (мощность в пучке 8 квт) потери в ускорителе и выпускном устройстве составляют 3,5 квт. Эта мощность снимается водой, которая охлаждает котел, первичную обмотку и раструб (поз.18 на рис.24).

Применена отпаянная металлокерамическая трубка; для поддержания вакуума при наличии некоторого натекания, в частности, при работе с выпускным окном, в трубку встроен магниторазрядный насос 22. Наружный диаметр котла 38 см, высота без раструба 55 см. Вес собственно ускорителя ок.120 кг.

При торможении электронов на внутренней мишени поток гамма-излучения составит ок.400 $\frac{\text{рентген}}{\text{мин.м}}$. Установка легко транспортабельна, соединение с электропитанием производится гибким шлангом. На рис.25 показаны последовательные стадии разборки ускорителя.

ЭЛИТА-500 имеет конструкцию, аналогичную описанным импульсным установкам. Энергия электронов 500 кэв, средняя мощность 1 квт. Трубка отпаяна, внутри установлена вольфрамовая мишень. Габариты ускорителя: диаметр 28 см, высота 50 см, вес - 40 кг. Электропитание вы-

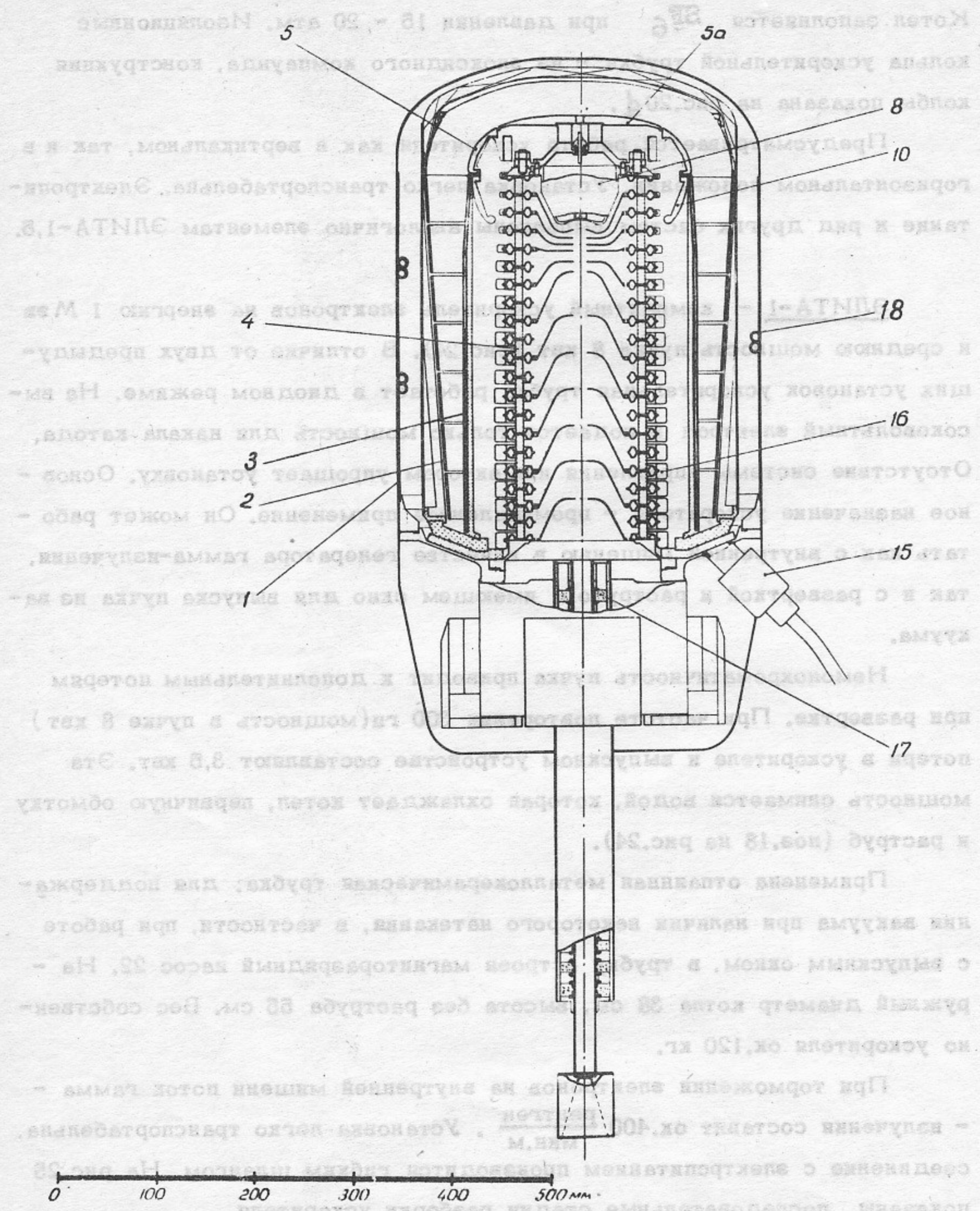


Рис.24. Конструкция ускорителя ЭЛИТА-1. Обозначения см.стр. 45

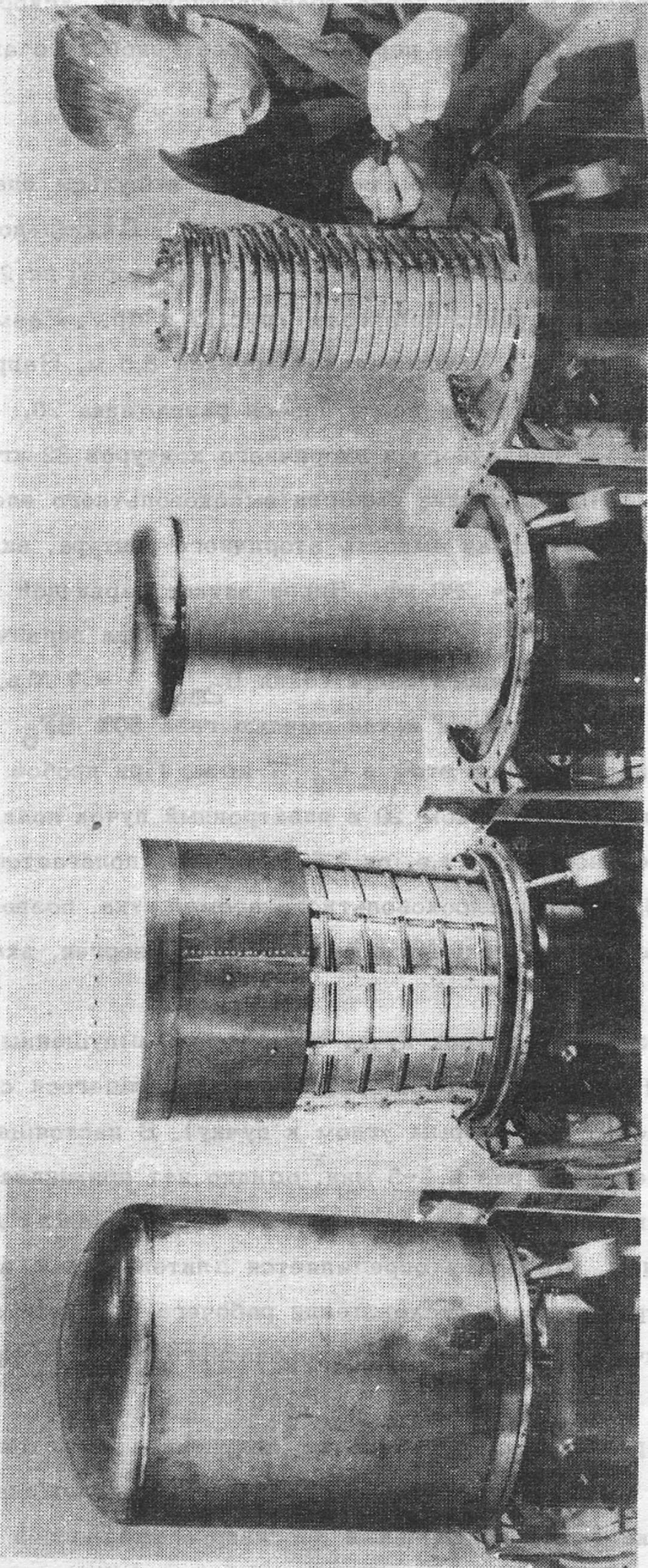


Рис.25. Ускоритель ЭЛИТА-1.

полнено в отдельном блоке и также легко транспортируется. Ускоритель предназначен для работы в качестве переносного рентгеновского аппарата.

РИУС-5 - установка, генерирующая одиночные импульсы электронного тока амплитудой до 30 кА и энергией 5 МэВ /12/. Длительность импульсов ок. 40 нсек. Конструкция высоковольтного генератора /рис. 26/ аналогична другим импульсным трансформаторам /рис. 12 и др./. Размеры котла: диаметр ок. 2 м, длина с ускорительной трубкой 5,5 м. Напряжение на ускорительную трубку 4 подаётся после пробоя разрядника 20.

Собственная частота первичного и вторичного контуров 32 кГц, коэффициент связи $K = 0,45$, величина ёмкости высоковольтного электрода 5 на землю 220 пф. Суммарная ёмкость вторичного контура, включая ёмкость вторичной обмотки, $C_2 = 280$ пф. Числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно 4 и 580. При напряжении на первичной обмотке 50 кВ амплитуда вторичного напряжения $U_{2max} = 7$ МВ. Такое напряжение получено при заполнении котла смесью газа 50% SF_6 и 50% N_2 . Энергия, запасенная при этом в C_2 , 7 кДж. При пробое высоковольтного промежутка разрядником 20 в электронный пучок попадает до 40% энергии, запасенной в C_2 , т.е. ок. 2,5 кДж. Предполагается применить другие способы пробоя высоковольтного промежутка, позволяющие уменьшить сопротивление искры и повысить долю энергии, вкладываемой в пучок.

На рис. 27 показан фотоснимок пучка электронов, выпущенных в атмосферу. Ток пучка 15 кА. Диаметр ок. 3 см, длина светящегося столба ок. 1,3 м. (Снимок сделан под острым углом к пучку). В настоящее время ускоритель работает один раз в 2-5 мин, однако нет принципиальных ограничений, запрещающих существенно уменьшить время между двумя импульсами. В основном, это время определяется длительностью восстановления вакуума в трубке после прохождения рабочего импульса и восстановлением электрической прочности высоковольтного газового промежутка.

Максимальное рентгеновское излучение, полученное к настоящему времени на РИУС-5, $10 \frac{\text{рентген}}{\text{м.импульс}}$. Ось ускорителя расположена горизонтально. Установка имеет специальный ресивер и компрессор для

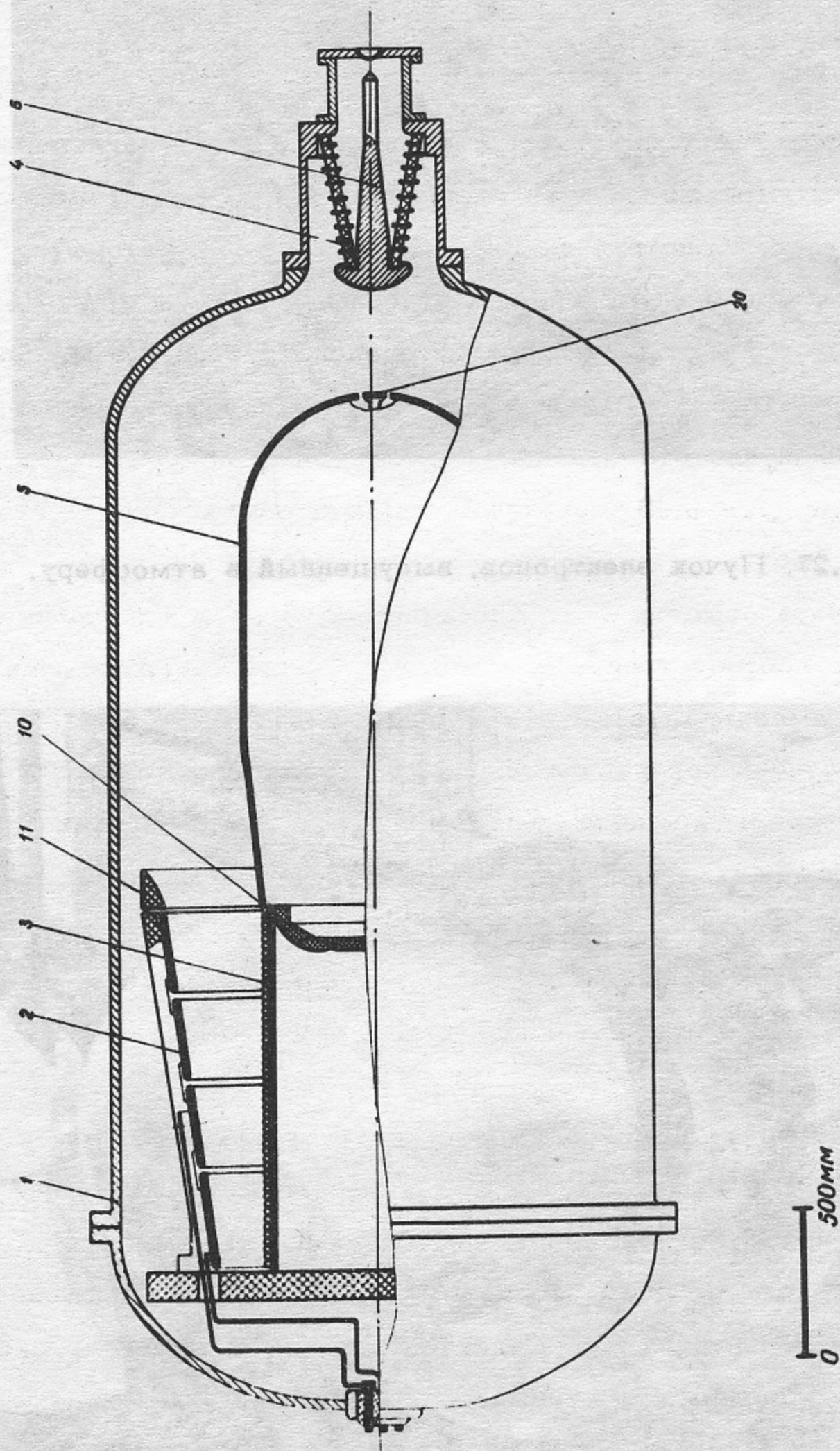


Рис.26. Конструкция установки РИУС-5. Обозначения см.стр. 45

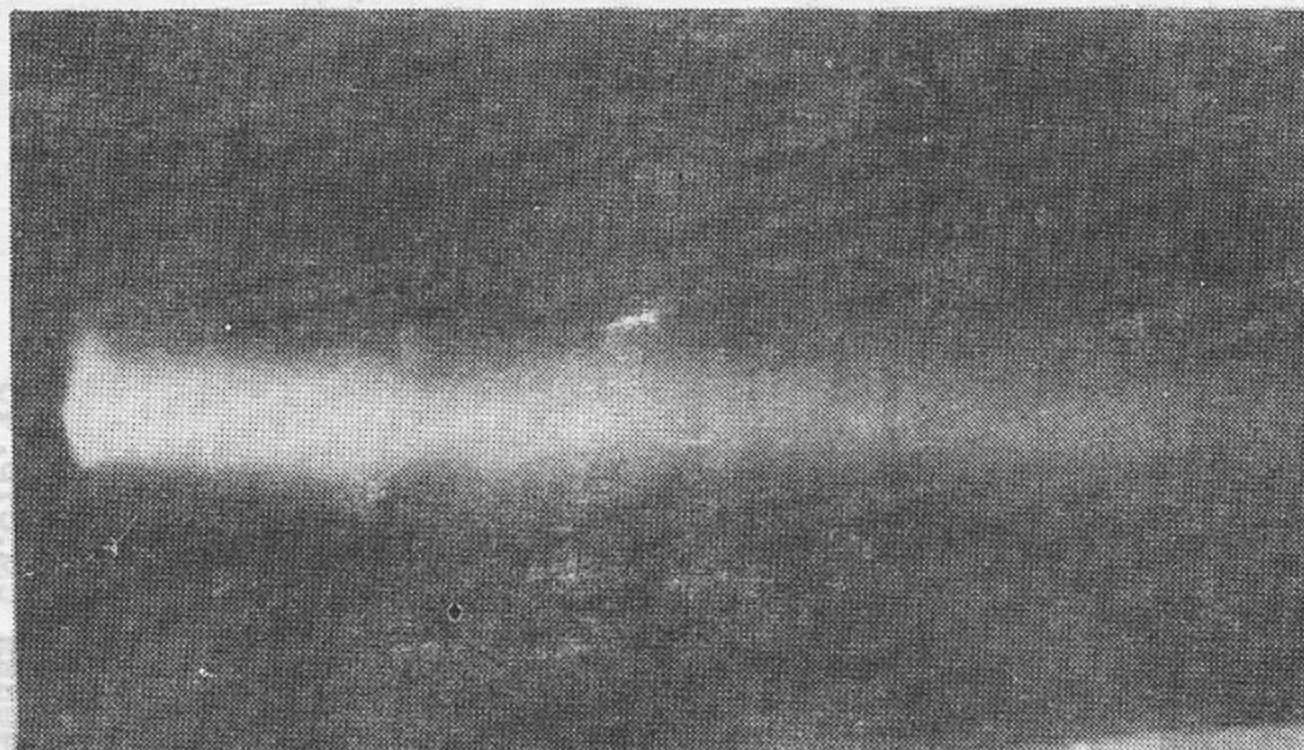


Рис.27. Пучок электронов, выпущенный в атмосферу.

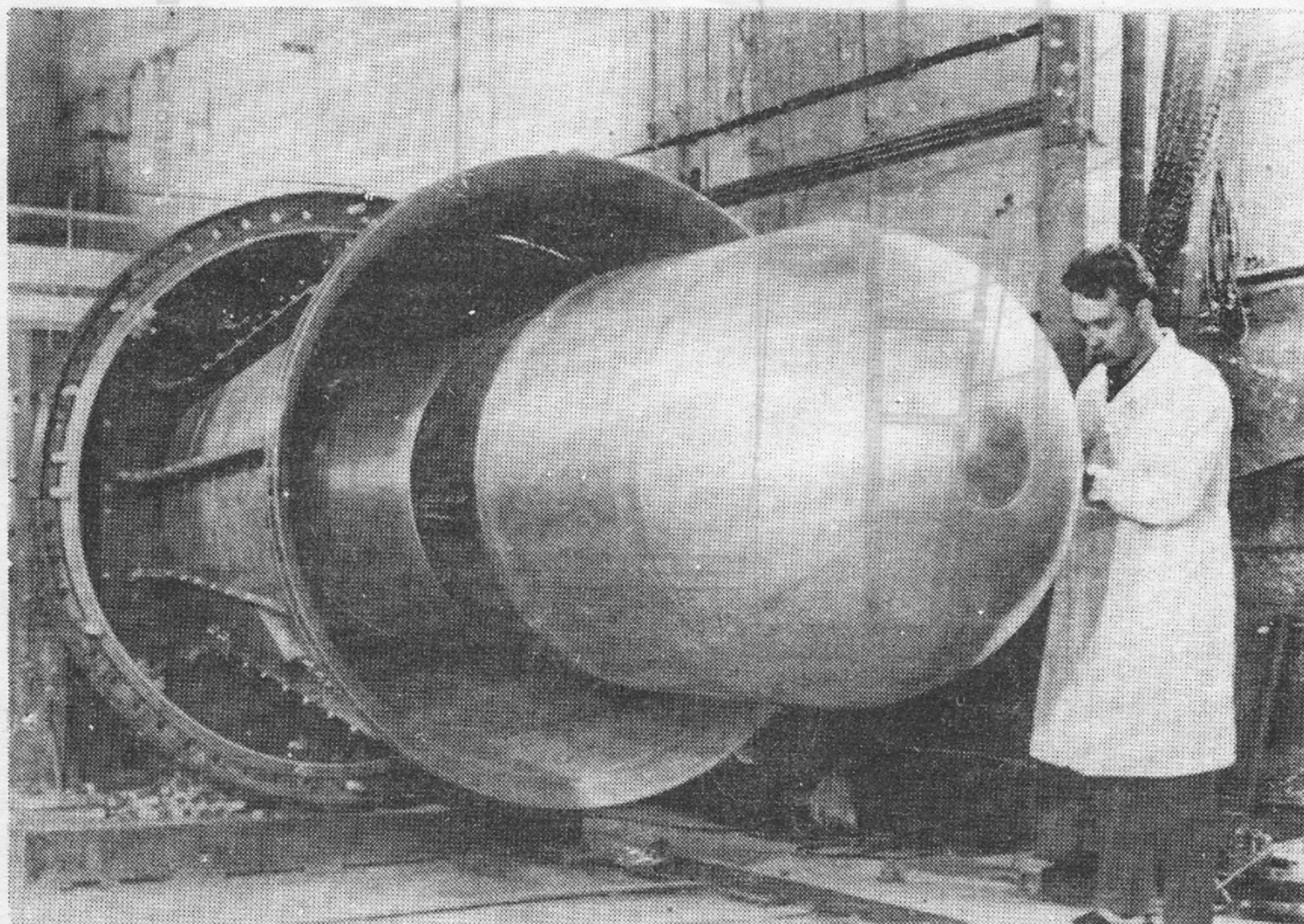


Рисунок 28. Ускоритель РИУС-5. Котел снят.

перекачки газа при вскрытии котла. На рис.28 РИУС-5 при разборке.

Т р а н с ф о р м а т о р ы п р о м ы ш л е н н о й ч а с т о т ы

ЭЛТ-1 - ускоритель электронов на 1,3 Мэв и среднюю мощность 15 квт /18/. Установка питается прямо от сети 220в, 50 гц. Средний ток пучка ок.12 ма, амплитуда - 70 (100)ма, немонахроматичность $\pm 0,5\%$.

Ускоритель размещен в котле диаметром 1 м и высотой 1,3 м (рис.29), заполненном SF_6 при давлении до 14 атм. Вторичная обмотка состоит из 20 катушек 3, общее число витков вторичной обмотки 190 тысяч, собственная частота трансформатора ок.50 гц. В центральной колонне магнитопровода двадцать конусных сердечников 13, набранных из радиально расположенных пластин трансформаторного железа. Ускорительная трубка 4 имеет электрические контакты с сердечниками 13. Внутри трубки установлены постоянные фокусирующие магниты. Инжектором служит танталовый катод 6 с электронным подогревом и управляющим электродом. Амплитуда напряжения на управляющем электроде до 5 кв.

К.п.д. ускорителя 90-95%. Для отвода тепла, выделяющегося внутри котла, имеется охлаждаемый водой радиатор 18 и вентилятор 21. Откачка трубки производится 500-литровым диффузионным насосом. Система выпуска пучка и диф.насос на рисунке не показаны.

Энергия ускоренных частиц может регулироваться от 0,4 до 1,3 Мэв, мощность - от 0,5 до 15 квт. Все регулировки производятся с пульта.

ЭЛТ-2 - ускоряет электроны до 1,8 Мэв при средней мощности пучка 25 квт (рис.30). Центральная колонна трансформатора, ускорительная трубка и ряд других узлов собраны из таких же элементов, что и ЭЛТ-1. Ускоритель помещен в котел диаметром 1,3 и высотой 2,4 м. Центральная колонна содержит 36 катушек и конусных сердечников. Число витков во вторичной обмотке 265.000, собственная частота трансформатора 50 гц.

ПРТ - экспериментальный ускоритель протонов. На нем получен пучок тяжелых ионов ($50\% H_1^+$, $30\% H_2^+$ и $20\% H_3^+$) с энергией 1,2 Мэв

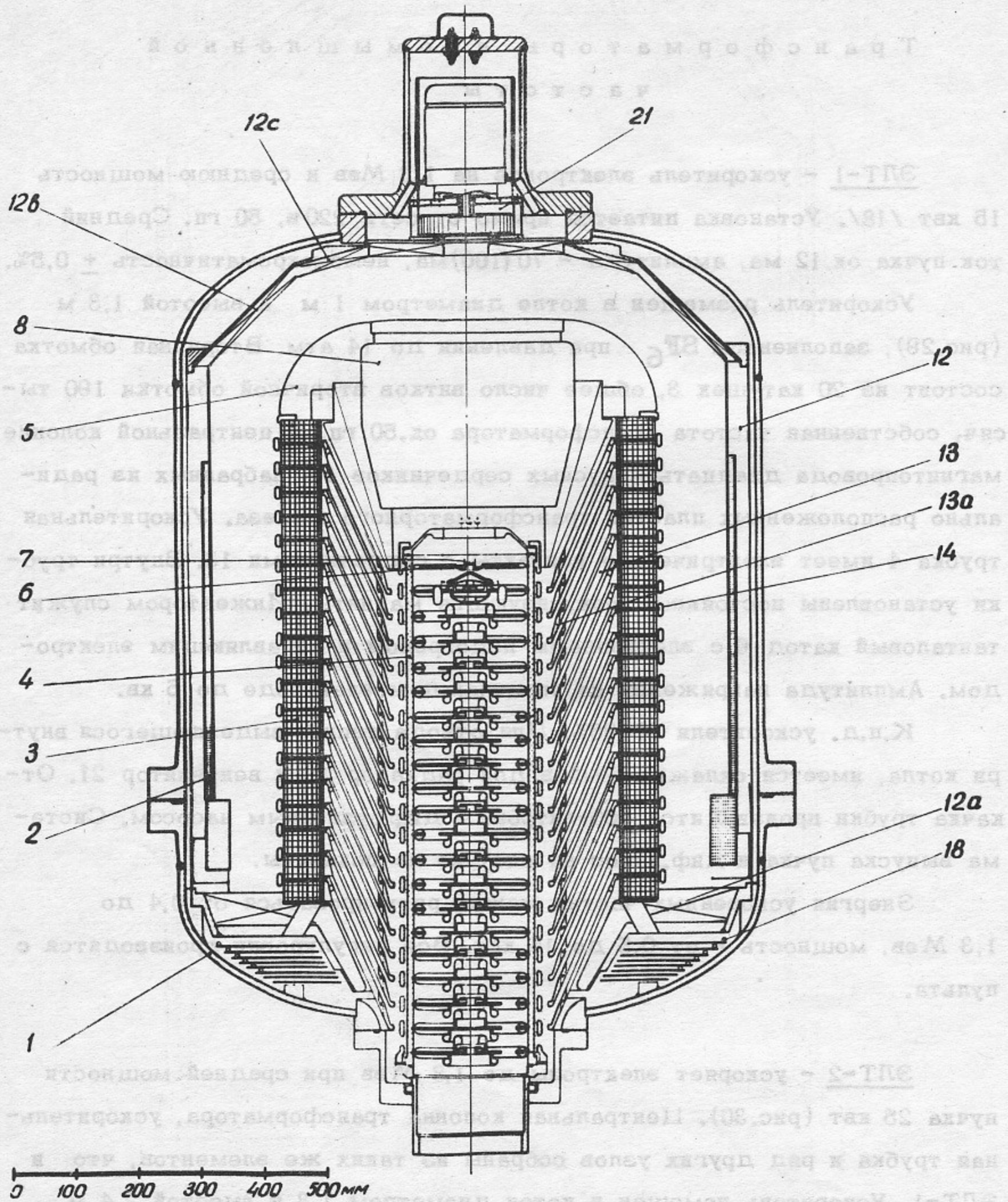


Рис.29. Конструкция ускорителя ЭлТ-1. Обозначения см.стр.45.

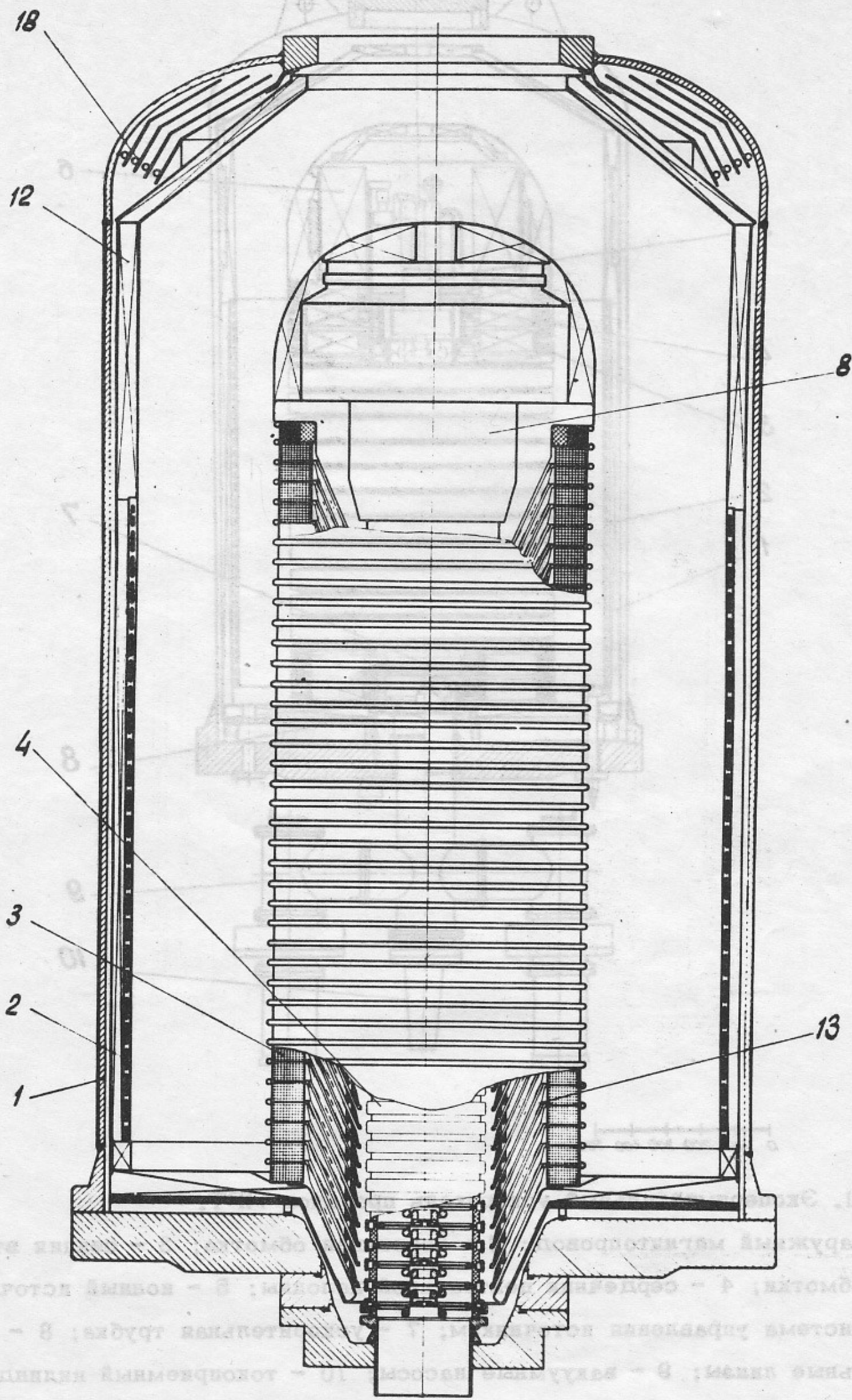


Рис.30. Установка ЭЛТ-2. Обозначения см.стр.45

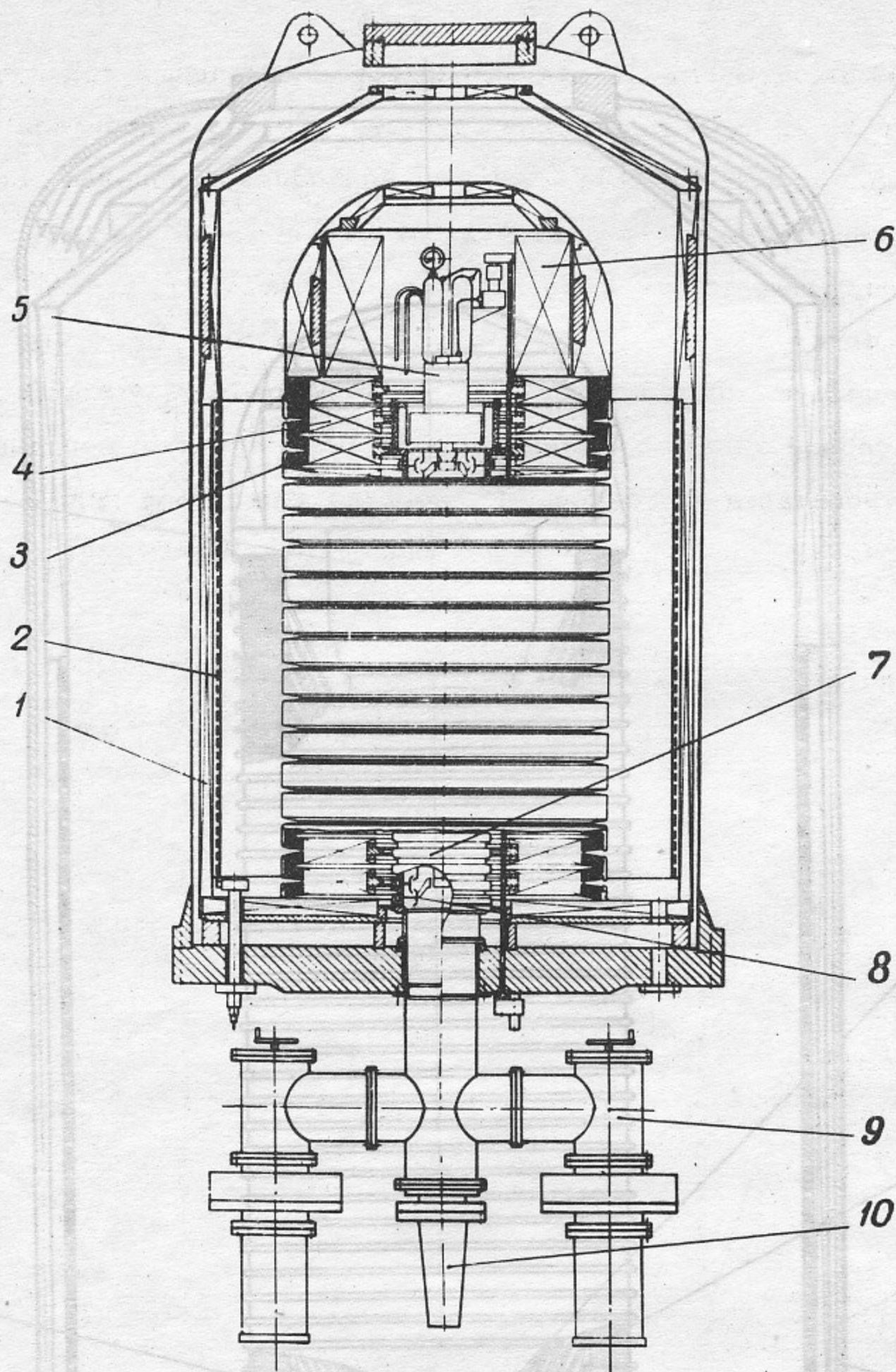


Рис.31. Экспериментальный ускоритель протонов ПРТ.

1 - наружный магнитопровод; 2 - первичная обмотка; 3 - секции вторичной обмотки; 4 - сердечник центральной колонны; 5 - ионный источник; 6 - система управления источником; 7 - ускорительная трубка; 8 - квадрупольные линзы; 9 - вакуумные насосы; 10 - токоприемный цилиндр.

и средней мощностью до 10 квт /26,25/. Максимальный ток пучка 80ма. Конструкция высоковольтного трансформатора этого ускорителя (рис.31) близка к трансформатору ЭЛТ-2, кроме центральной колонны, собранной из плоских сердечников 4 и секций вторичной обмотки 3 старой конструкции. Трансформатор также имеет собственную частоту 50 гц и питается от обычной сети.

Наибольшую трудность представляла разработка ускорительной трубки, способной ускорить интенсивный ионный пучок, и портативной системы электропитания инжектора. В качестве инжектора используется ионный источник с осцилляцией электронов в магнитном поле (рис.32).

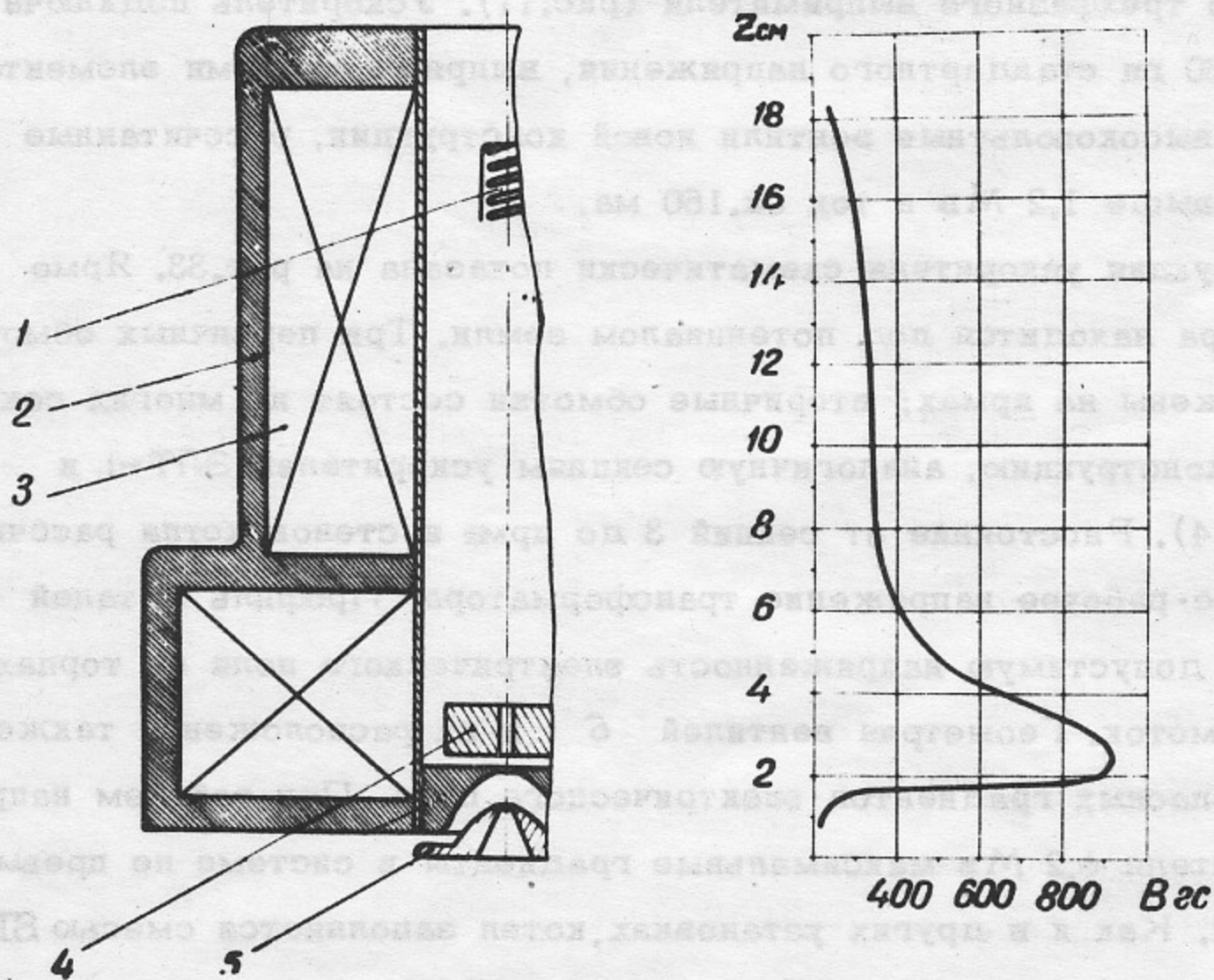


Рис.32. Ионный источник.

- 1 - катод, 2 - магнитопровод, 3 - катушки магнита,
4 - антикатод, 5 - вытягивающий электрод.

При напряжении экстракции 80 кв пучок содержит 50% H_1^+ и имеет фазовую плотность ок. $300 \frac{ма}{см.мрад}$. При постоянном напряжении экстракции ионный ток регулируется изменением потенциала антикатада 4. Специальная система управления, расположенная под высоким потенциалом, регулирует напряжение на антикатоде, стабилизируя ускоряющее напряжение на трубке во время импульсов тока подобно тому, как это делается в электронных ускорителях - трансформаторах. Фокусировка пучка в ускорительной трубке осуществляется квадрупольными электростатическими линзами, потенциалы на полюса которых подаются непосредственно от электродов трубки. Конструкция трубки показан на рис.19. Параметры фокусирующей системы также приведены в предыдущем разделе.

Ускоритель работает в диапазоне энергий 0,5 - 1,2 Мэв. С уменьшением энергии соответственно падает величина ускоряемого тока.

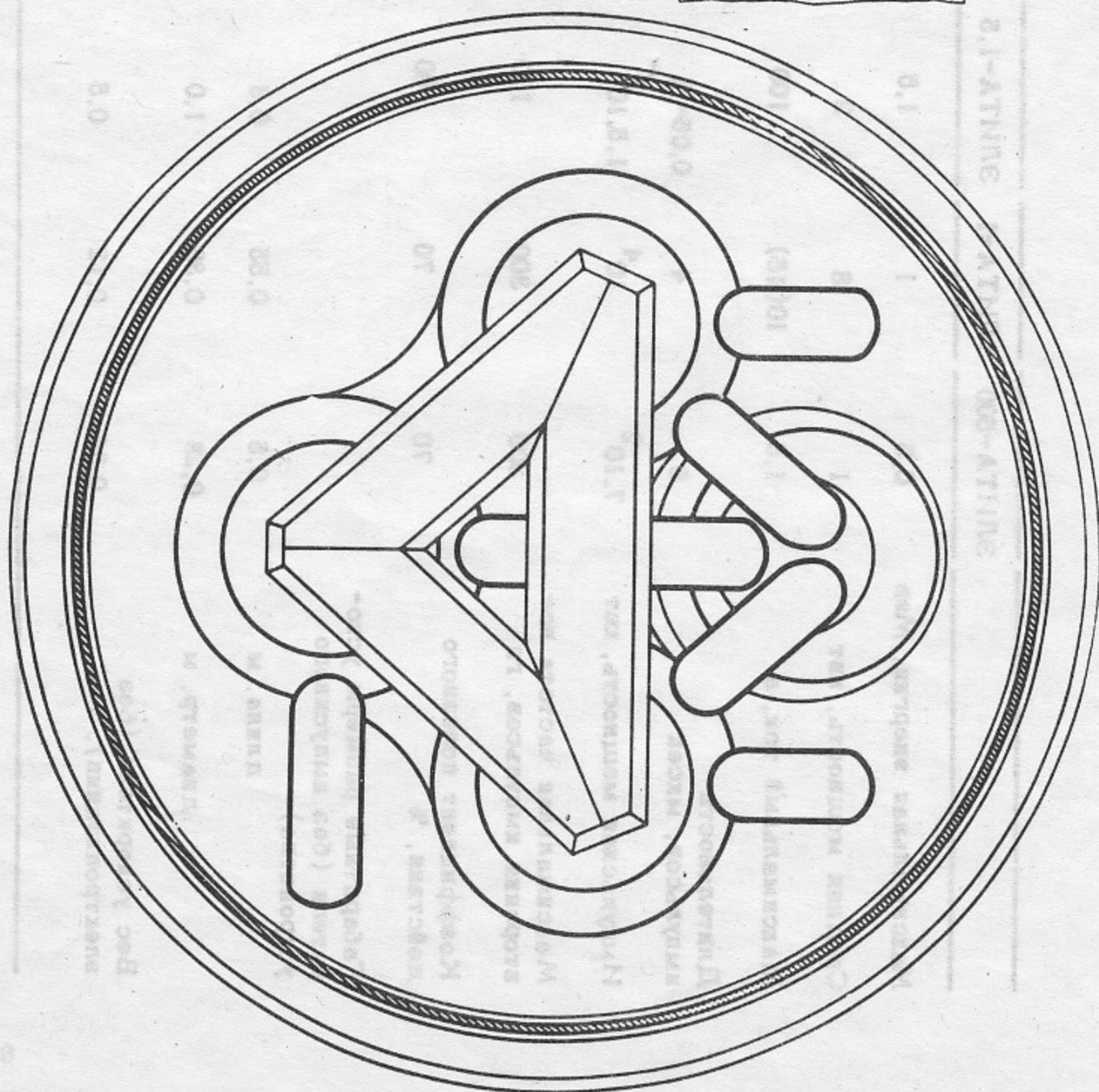
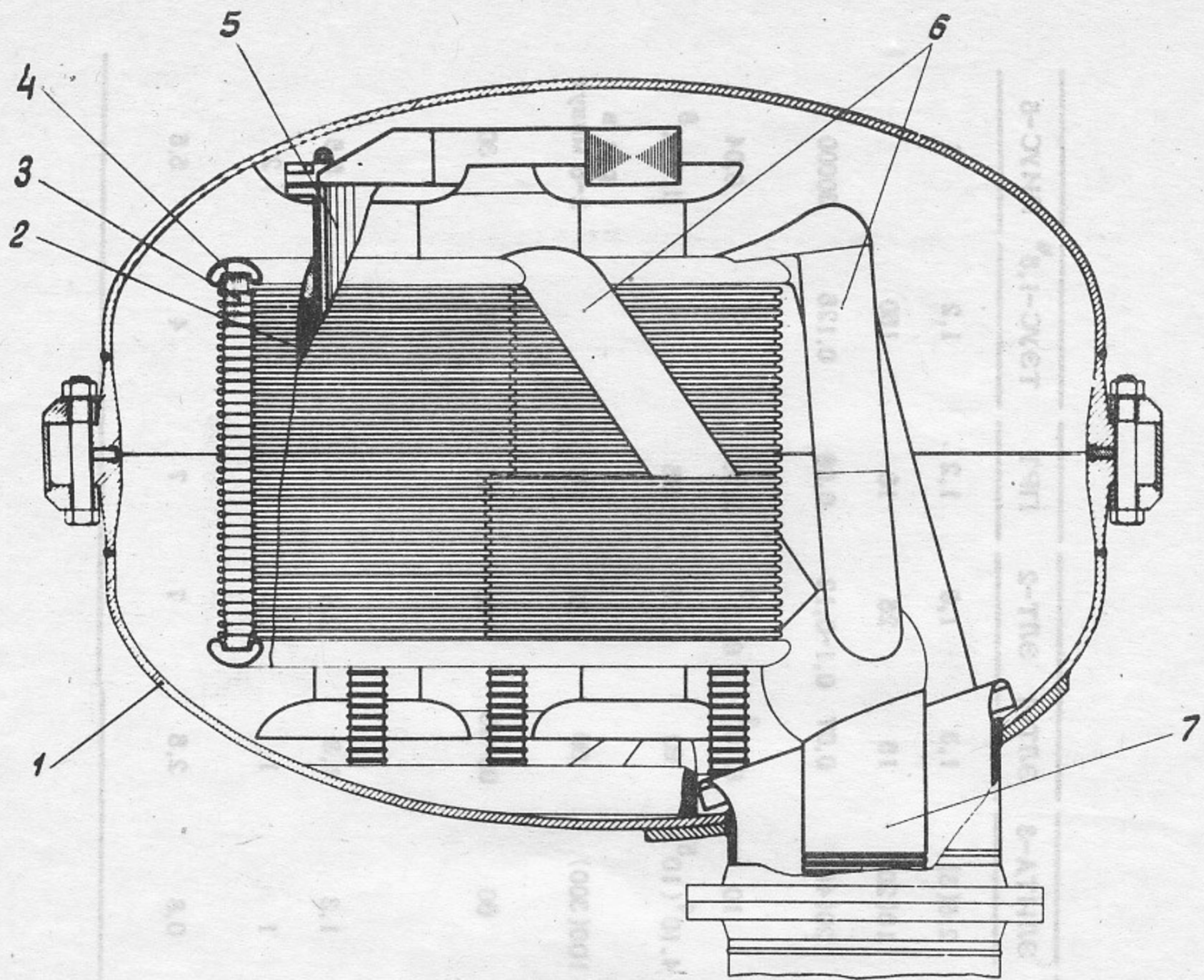
ТЭУС-1,5 - ускоритель электронов на 1,2 Мэв и 150 квт, созданный на основе трехфазного выпрямителя (рис.11). Ускоритель подключается к сети 50 гц стандартного напряжения, выпрямительными элементами являются высоковольтные вентили новой конструкции, рассчитанные на напряжение свыше 1,2 Мв и ток ок.150 ма.

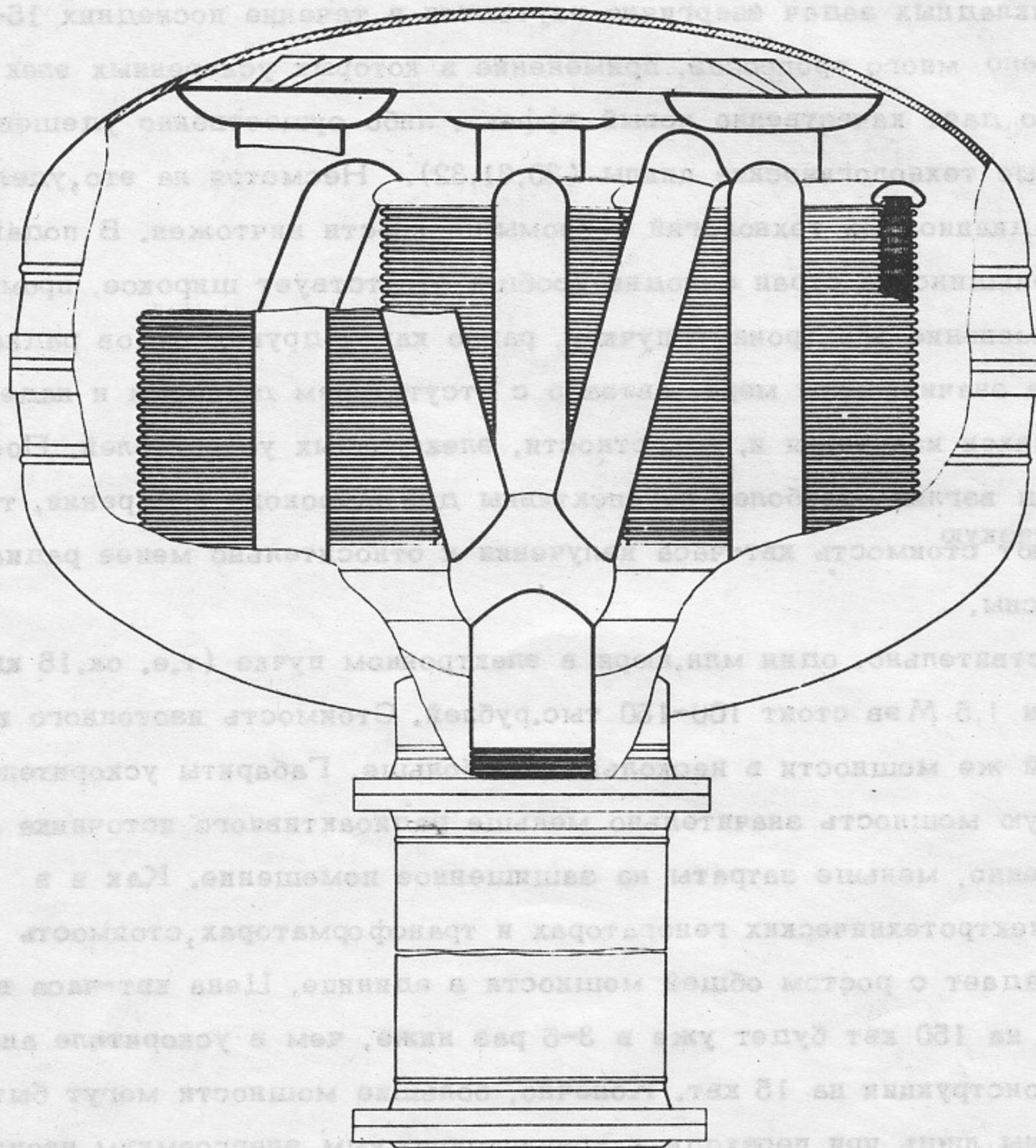
Конструкция ускорителя схематически показана на рис.33. Ядро трансформатора находится под потенциалом земли. Три первичных обмотки 2 расположены на ядрах; вторичные обмотки состоят из многих секций 3, имеющих конструкцию, аналогичную секциям ускорителей ЭЛТ-1 и ЭЛТ-2 (рис.14). Расстояние от секций 3 до ядра и стенок котла рассчитано на полное рабочее напряжение трансформатора. Профиль деталей 4 обеспечивает допустимую напряженность электрического поля на торцах вторичных обмоток. Геометрия вентилях 6 и их расположение также не создают опасных градиентов электрического поля. При рабочем напряжении ускорителя 1,2 Мв максимальные градиенты в системе не превышают 210 кв/см. Как и в других установках, котел заполняется смесью SF_6 с N_2 . Ускорительная трубка 7 может находиться отдельно от трансформатора или, как показано на рис.33, пристроена к котлу 1.

Основные параметры типовых установок собраны в таблице.

Основные параметры типовых установок

	ЭЛИТА-500	ЭЛИТА-1	ЭЛИТА-1.5	ЭЛИТА-3	ЭЛТ-1	ЭЛТ-2	ПРТ	ТЭУС-1.5	РИУС-5
Максимальная энергия, Мэв	0,5	1	1,5	2,5(3)	1,3	1,8	1,2	1,2	5
Средняя мощность, кВт	1	8	2	10(20)	15	25	10	150	
Максимальный ток, а	1,5	10(15)	100	20(40)	0,07	0,1-0,12	0,08	0,125	30000
Длительность импульсов, мксек	5	4	0,05-3	10	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$		0,04
Импульсная мощность, кВт	$7 \cdot 10^2$	10^4	$1,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4 (10^5)$	80	215	95		$1,5 \cdot 10^8$
Максимальная частота повторения импульсов, гц	300	300	100	100(300)	50	50	50		1 раз в 2-5 минут
Коэффициент полезного действия, %	70	70	60	60	80-85	80	70	95	30
Габаритные размеры ускорителя (без выпускного устройства)									
длина, м	0,5	0,55	0,8	1,3	1,3	2,4	2,4	2,5	5,5
диаметр, м	0,28	0,38	1,0	1	1	1,3	1,5	2	2
Вес ускорителя (без электропитания), т	0,04	0,12	0,5	0,8	2,5	7	7	4	5,5





0 100 200 300 400 500 мм

Рис.33. Схема конструкции ускорителя ТЭУС-1,5.

- 1 - котел, 2 - первичная обмотка, 3 - вторичная обмотка,
 4 - экран вторичной обмотки, 5 - магнитопровод, 6 - венти-
 лиль, 7 - ускорительная трубка.

6. Использование пучков

Возможности использования быстрых электронов для решения различных прикладных задач энергично изучаются в течение последних 15-20 лет. Найдено много процессов, применение в которых ускоренных электронов либо даёт качественно новый эффект, либо существенно удешевляет известные технологические циклы (30,31,32). Несмотря на это, удельный вес радиационных технологий в промышленности ничтожен. В подавляющем большинстве стран сегодня вообще отсутствует широкое, промышленное применение электронных пучков, равно как и других видов радиации. Это, в значительной мере, связано с отсутствием дешёвых и надёжных источников излучения и, в частности, электронных ускорителей. Последние, на наш взгляд, наиболее перспективны для широкого внедрения, т.к. обеспечивают ^{низкую} стоимость квт-часа излучения и относительно менее радиационно опасны.

Действительно, один млн.кюри в электронном пучке (т.е. ок.15 квт) при энергии 1,5 Мэв стоит 100-150 тыс.рублей. Стоимость изотопного источника той же мощности в несколько раз больше. Габариты ускорителя на названную мощность значительно меньше радиоактивного источника и, соответственно, меньше затраты на защищенное помещение. Как и в обычных электротехнических генераторах и трансформаторах, стоимость квт-часа падает с ростом общей мощности в единице. Цена квт-часа в ускорителе на 150 квт будет уже в 3-5 раз ниже, чем в ускорителе аналогичной конструкции на 15 квт. Конечно, большие мощности могут быть использованы лишь при переходе к крупнотоннажным энергоёмким производствам.

Иногда считается, что электронное излучение имеет слишком ограниченное применение из-за малой глубины проникновения λ [см] = $\frac{0,35 E \text{ [Мэв]}}{\rho \text{ [г/см}^3\text{]}}$. Так, при энергии электронов $E=3$ Мэв, плотности вещества $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ при двустороннем облучении может быть обработан на всю глубину материал толщиной ок.2 см. Как показывает практика, большая часть конструкционных материалов, требующих радиационной обработки, имеет меньшую толщину. Можно также предположить, что дальнейшее развитие техники ускорителей, в частности, ускорителей - трансфор-

маторов, позволит создавать экономичные машины с энергией 3-4 Мэв и мощностью несколько сотен квт, имеющих внутреннюю мишень и генерирующих достаточно дешевое гамма-излучение.

На существующих установках стоимость квт-часа излучения в электронном пучке с учётом как капитальных, так и текущих затрат в 5-10 раз ниже, чем в потоке гамма-излучения изотопных источников. Кроме того, коэффициент использования излучения электронного пучка, как правило, составляет 0,6 - 0,9, а гамма - излучения - 0,15-0,3, т.е. в результате, электронное излучение в 15-30 раз дешевле.

Производительность ускорительной установки $\eta \left[\frac{\text{т}}{\text{час}} \right] = \frac{1}{3} \frac{P [\text{квт}]}{r [\text{Мрад}]} \xi$ где P - мощность пучка, r - доза облучения и ξ коэффициент использования пучка. На современных ускорителях объём облученной продукции достигает многих тысяч тонн в год, такие аппараты могут встраиваться в заводской конвейер. Изотопные источники оказываются более выгодными при облучении небольших количеств материала, например, для опытных целей, когда нужны слабые потоки излучения - десятки и сотни ватт. В ряде случаев радиационная обработка является побочным процессом в ядерных реакторах. В настоящей работе не проводится подробного сравнения этого и других методов облучения. Что касается радиационной опасности, то преимущество ускорителя - возможность проведения профилактических и ремонтных работ при полном отсутствии радиации. Кроме того, нет опасности радиоактивного заражения облучаемых изделий.

Многочисленные приложения электронных ускорителей невысоких энергий можно разделить на четыре группы: 1 - бомбардировка материалов ускоренными электронами с целью радиационного воздействия, 2 - использование концентрированного потока электронов как носителя энергии для теплового воздействия на вещество, 3 - конвертирование пучка в гамма-излучение для целей дефектоскопии или облучения массивных объектов и 4 - применение ускорителей для научных целей: в качестве инжекторов ускорителей на высокие энергии, в физике плазмы, для возбуждения лазеров и др.

Остановимся на второй области использования ускорителей. Как известно, плотность энергии, полученная в электронных пучках, опережает другие известные носители тепловой энергии. Это относится как к импульсным, так и к стационарным пучкам. Исследования на импульсных сверхмощных электронных потоках сейчас бурно развиваются и находятся

в центре внимания специалистов многих областей. Электроны с энергией 100-200 кэв также широко применяются в промышленных установках для плавки и сварки металлов в вакууме. С появлением сильноточных ускорителей электронов - на 0,5 - 1 Мэв и выше - становится реальным создание установок со стационарным электронным пучком, выпущенным в атмосферу без развертки - с плотностью 10-20 квт/мм². Концентрированный электронный пучок в воздухе может использоваться для сварки и другой обработки крупногабаритных изделий из тугоплавких металлов, для резки и разрушения горных пород и т.п. Разработка портативных легко-транспортабельных ускорителей-трансформаторов позволит широко применять электронно-лучевую технологию для указанных целей. Эффективный выпуск из вакуума стационарных интенсивных электронных пучков с указанной плотностью - технически разрешимая проблема, особенно при энергиях 0,5 Мэв и выше. Для этого конструируются устройства с непрерывной откачкой /33/ или с вращающейся фольгой /34/. Основная задача состоит в том, чтобы сделать эти устройства достаточно портативными и надежными.

Отметим, что вслед за внедрением электронных ускорителей, вероятно, усилится интерес и к сильноточным ускорителям тяжелых частиц. Можно утверждать, что экономичные установки для ускорения интенсивных пучков протонов и других тяжелых частиц вполне осуществимы. К вероятным областям использования потоков тяжелых частиц можно отнести легирование металлов, обработку полупроводниковых материалов, генерацию интенсивных нейтронных потоков, получение новых материалов. Возможно применение мощных протонных пучков в высокочастотной технике.

7. Перспективы развития

Параметры типовых установок, приведенные выше, отнюдь не являются предельными для ускорителей рассматриваемого типа. Наиболее интересные направления усовершенствования ускорителей-трансформаторов: повышение энергии, мощности (импульсной и средней), миниатюризация и упрощение установок, облегчение обслуживания, увеличение надежности, ускорение более тяжелых частиц.

Предельная энергия определяется в основном электрической прочностью ускорительной трубки, вторичной обмотки и высоковольтного зазора. В трубках последних конструкций градиент напряжения приближается к 3 Мв/м. Мелкое секционирование изолятора трубки и минимальное ϵ , сильная фокусировка пучка и уменьшение диаметра основного канала, более тщательный подбор материала электродов трубки, - по-видимому, позволяют повысить градиенты до 3,5-4 Мв/м, а может быть, и выше. Устранение эффекта полного напряжения позволит проектировать трубки с приведенными градиентами до 10 Мв и выше. При длительности ускоряющего напряжения 10^{-7} - 10^{-8} сек градиент на изоляторе трубки уже сейчас составляет 8 Мв/м и более.

Градиент напряжения вдоль вторичной обмотки достигает в импульсных ускорителях 3-5 Мв/м, в ускорителях промышленной частоты - 2 Мв/м и более, в высоковольтном зазоре в случае качественной газовой изоляции (SF_6 при максимальном давлении - ок. 20 атмосфер) предельные градиенты 300-500 кв/см. В импульсных ускорителях, заполненных водой (время приложения напряжения 10^{-7} - 10^{-6} сек), наибольшие напряженности также ок. 500 кв/см. Средние градиенты в высоковольтном зазоре обычно в 1,5-2 раза ниже максимальных, прежде всего из-за существенной разницы радиусов кривизны высоковольтного электрода и котла. Резкое увеличение напряженности электрического поля в зазоре может быть получено только при переходе к качественно новой изоляции, например, к твердым диэлектрикам. Однако изготовление твердой изоляции на несколько Мв, имеющую сложную форму и разнос напряжения, пока представляет значительные технологические трудности.

В то же время создание ускорителей-трансформаторов до 10 Мв и

выше с приведенными выше градиентами технически осуществимо. На основе рассматриваемых ускорителей могут быть также разработаны различные варианты тандемов для ускорения тяжелых частиц.

Средняя мощность в импульсных ускорителях наращивается, в основном, увеличением частоты повторения рабочих циклов. Как указывалось выше, принципиальный предел уменьшения интервалов между циклами определяется временами деионизации и т.п. и составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ сек. Таким образом, вероятно, имеется возможность повторять импульсы тока с частотой до нескольких килогерц. Количество джоулей, уносимых пучком в одном импульсе, растет при увеличении ёмкости вторичного контура C_2 и величины подсадки вторичного напряжения. Ширина импульса и ток инжектора должны при этом обеспечивать унос джоулей. С увеличением мощности электропитание и охлаждение установки также форсируются. Резервы для увеличения средней мощности в импульсных ускорителях огромны. Так, трансформатор установки ЭЛИТА-3 уже при частоте 300 импульсов в секунду без изменения геометрии мог бы обеспечить среднюю мощность в пучке 300 квт. (Выше указывалось, что максимальная энергия в одном импульсе в ЭЛИТА-3 достигает 1 кдж). Естественно, что столь резкий подъём мощности потребовал бы заметного усложнения электропитания, охлаждения, улучшения вакуума и тщательной отработки электронно-оптической системы трубки с целью обеспечения предельно малого выпадания электронов на электроды трубки.

В установках с одиночными импульсами кардинальное увеличение импульсной мощности может быть получено при использовании в качестве диэлектрика воды. ϵ воды ок. 80, удельное сопротивление после специальной очистки $1-2,5 \cdot 10^7$ ом.см. При напряженности электрического поля 500 кв/см в 1 м^3 запасается 1 Мдж. Волновое сопротивление ёмкости вторичного контура достаточно мало, и время съёма энергии не превышает 10^{-7} сек. При высоковольтном зазоре 10 и более см время зарядки ёмкости может составлять 10^{-6} сек. Это время значительно увеличивается при уменьшении напряженности в воде до 300 кв/см и менее /16/. Основная проблема - разработать накопительную ёмкость первичного контура, способную отдать энергию трансформатору за $10^{-6} - 10^{-5}$ сек, или добиться увеличения прочности воды при больших временах.

Предполагается также улучшить параметры существующих установок с газовой изоляцией: повысить к.п.д. и уменьшить интервал между соседними импульсами. Первое может быть достигнуто улучшением условий пробоя высоковольтного зазора при подаче напряжения на трубку. Для этого необходимо создать широкий канал с целью уменьшить сопротивление искры в газе и потери энергии. Наиболее вероятный путь расширения канала пробоя - поджиг с помощью вспомогательного широкого пучка электронов с энергией 0,5 - 1 МэВ, ионизирующего ("прошивающего") высоковольтный зазор. Пучок создается портативным импульсным ускорителем, встроенным в высоковольтный электрод.

Создание серии из двух или более импульсов с короткими интервалами возможно при наличии нескольких отдельных конденсаторных батарей первичного контура. Время между соседними импульсами определяется скоростью восстановления вакуума в трубке после прохождения тока и восстановления электрической прочности высоковольтного газового зазора.

Мощность трансформаторов промышленной частоты наращивается теми же способами, что и в обычных электротехнических трансформаторах. Уменьшение размеров установок заданной мощности достигается увеличением частоты до 400 гц и более. Как отмечалось выше, при больших мощностях наиболее перспективны трехфазные трансформаторы. Их мощность, практически, не ограничена, и определяющими элементами являются высоковольтные вентили и ускорительная трубка. Исследования высоковольтных вентилях подтверждают возможность создания вентилях на напряжение несколько Мв и токи многие десятки ампер, что обеспечивает выпрямление при мощности трансформатора десятки тысяч киловатт.

Ускорительные трубки с электронными пучками, имеющими средние мощности тысячи и десятки тысяч киловатт, по-видимому, также могут быть созданы. Электронно-оптические системы, описанные в разделе "Ускорительные трубки" позволяют ускорять десятки ампер электронного тока. Эксперименты подтверждают работоспособность приведенных схем. Минимальное выпадание частиц на электроды трубки достигается усилением фокусировки пучка, ограничением ускорения вторичных частиц, улучшением вакуума и т.д. К.п.д. ускорителей - трансформаторов большой мощности превысит 95%.

Один из путей миниатюризации импульсных ускорителей с газовой изоляцией — укорочение времени действия высокого напряжения. В установках небольших размеров собственные частоты могут превышать 1 Мгц. Увеличение импульсной прочности позволяет повысить градиенты напряжения как в трансформаторе, так и в ускорительной трубке и уменьшить размеры ускорителя. При малых временах может оказаться целесообразным применение масляной изоляции.

Упрощение конструкции и эксплуатации ускорителей достигается, прежде всего, применением отпаянных ускорительных трубок. Конструкция импульсных трансформаторов предельно проста, однако такие установки имеют выпрямитель, коммутатор и другие элементы электропитания. Ускорители промышленной частоты включаются непосредственно в сеть, но более сложны по конструкции. Импульсные ускорители имеют преимущество, когда нужны портативные ускорители с максимальной энергией, установки на 50 гц, — когда требуется высокая мощность и к.п.д.

Простота конструкций способствует повышению надежности ускорителей-трансформаторов. Опыт эксплуатации ряда установок в течение нескольких лет подтвердил высокую надежность ускорителей. Наименьшее время жизни сейчас имеют катоды — 500 часов и ускорительные трубки — 3-4 тыс. часов, однако, как отмечалось при описании конструкций установок, замена этих узлов достаточно проста. При крупносерийном выпуске установок узлы ускорителей могут быть более тщательно отработаны и проверены на надежность.

Для ускорения интенсивных пучков тяжелых частиц описанные трансформаторы могут быть использованы, практически, без изменений. Наибольшие трудности связаны с фокусировкой тяжелых частиц в ускорительной трубке и разработкой портативных ионных источников и систем их электропитания. Принципы фокусировки ионного пучка в трубке, описанные в настоящей работе, положены в основу экспериментального протонного ускорителя. Его успешное оперирование показывает реальность экономичного ускорения интенсивных ионных пучков.

В заключение отметим, что в настоящем препринте опущены многие детали, не имеющие принципиального значения. Описание схем элект-

тропитания, расчетных и экспериментальных методик и ряд других вопросов могут быть найдены в публикациях участников работы. Список основных публикаций приведен ниже.

Автор пользуется случаем выразить благодарность Г.И.Будкеру за инициативу в постановке работы и за постоянный интерес и внимание, а также всем сотрудникам ИЯФ, принимавшим участие в разработке описанных ускорителей.

Л и т е р а т у р а

1. M.Cleland et al, Nucleonics, N 8, 52 (1960).
2. E.Abramyan. On possibilities of transformer type accelerators, Nucl.Instr. and Meth., 59(1968),22-28.
3. Radiation sources, edited by A.Charlesby, p.171-196, Pergamon Press, 1964.
4. E.Koltay. Phys.Letters, 4, N 2,66-68 (1963).
5. Е.Абрамян, В.Гапонов. Ускорительные трубки для сильноточных установок, Атомная энергия, т.22, в.1, янв.1967.
6. Е.Абрамян, С.Вассерман. Сильноточный импульсный ускоритель электронов, Атомная энергия, т.23, в.1, июль 1967.
7. G.Breit, M.Tuve, O.Dahl. Phys. Rev., 35, 51, 1930.
8. С.Вассерман. Сильноточный импульсный ускоритель электронов на 1 Мэв, канд.диссертация, ИЯФ, Новосибирск, 1967.
9. Е.Абрамян, С.Вассерман, А.Егоров, И.Казарезов, А.Крючков, Е.Любавин, В.Радченко, И.Черток. Мини-ускоритель электронов, доклад на конференции МАГАТЭ, Мюнхен, авг.1969.
10. Е.Абрамян, С.Вассерман, А.Егоров, В.Панасюк, Н.Шустров. Система электропитания и управление ускорителя ЭЛИТ-1, доклад на VI конференции по ускорителям, Томск, февр.1966.
11. А.Егоров, В.Панасюк, С.Ширкин. О коммутации тока в трансформаторах Тесла, Приборы и техника эксперимента, № 4, 1968, 26-30.
12. Е.Абрамян, С.Вассерман, В.Долгушин, Л.Моркин, О.Печерский, В.Цукерман. Генератор коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения высокой интенсивности, Доклады Ак.наук, т.192, № 1, май 1970.
13. Е.Абрамян, В.Гапонов. Источник ускоренных частиц одинаковой энергии, авт. свидетельство № 208144, окт.1967, (приоритет 15 июня 1964), тоже патенты в Англии, США, Франции, Швеции и Японии.
14. Е.Абрамян, В.Гапонов. Сильноточный ускоритель на основе трансформатора. Атомная энергия, т.20, в.5, май 1966.
15. Е.Абрамян, С.Вассерман, В.Гапонов, Г.Крайнов. Ускоритель заря-

- женных частиц, авт.свидетельство № 1025550, февр.1967 (приоритет 24 июля 1965), тоже патенты в Англии, Италии, Канаде, США, Франции, ФРГ, Швейцарии, Швеции.
16. В.Лагунов. Применение импульсных высоковольтных накопителей для сверхбыстрого нагрева плазмы, канд.диссертация, ИЯФ, Новосибирск, 1969.
 17. О.Печерский, А.Сидорук, В.Тарасов, В.Цукерман. Генератор с водяным диэлектриком для получения интенсивных импульсов быстрых электронов и жесткого тормозного рентгеновского излучения, Доклады Акад.наук, в печати.
 18. Е.Абрамян, С.Вассерман, В.Вечеславов, В.Гапонов, В.Горбунов, А.Егоров, А.Елфимов. Сильноточные ускорители на энергии 1-3 Мэв, доклад на конференции МАГАТЭ, Мюнхен, авг.1969.
 19. В.Цукерман, М.Манакова. Источник коротких рентгеновских вспышек для исследования быстропротекающих процессов, Журнал техн. физики, т.ХХV11, в.2, 1957.
 20. T.Martin. Design and Performance of the Sandia Laboratories Hermes II Flash X-ray Generator, JEEE transactions on nuclear science, vol.NS-16,N3, June 1969
 21. Е.Абрамян, И.Авербух, Ю.Аксенов, Б.Баклаков, М.Бровин, В.Гапонов, М.Карлинер, А.Литвинов, В.Нехаев. Системы автоматики и управления промышленного ускорителя электронов ЭлТ-1,5, доклад на VI конференции по ускорителям, Томск, февр.1966.
 22. Е.Абрамян, В.Вечеславов, В.Гапонов, А.Резаков. Электронные пучки высокой интенсивности в ускорительных трубках с жесткой фокусировкой, Атомная энергия, т.25, в.2, авг.1968.
 23. В.Вечеславов, В.Кононов. Ионно-оптическое согласование методом случайного поиска. Журнал техн.физики, т.ХХХ1Х, № 7, 1969.
 24. Е.Абрамян, В.Вечеславов, В.Кононов. Предельные токи протонов в ускорительной трубке с жесткой фокусировкой, Журнал техн.физики, т.ХХХVIII, в.10, 1968.
 25. Е.Абрамян, М.Бровин, В.Вечеславов, В.Горбунов, В.Кононов, И.Черток. Сильноточный ускоритель протонов, Атомная энергия, в печати.
 26. Е.Абрамян, В.Вечеславов. Ускорение интенсивного пучка протонов

- на установке трансформаторного тока, Атомная энергия, т.22, в.5, май 1967.
27. В.Захаров, М.Рабинович. Сильная фокусировка частиц в винтовых и гофрированных магнитных полях, Журнал техн.физики, т.XXXIV, в.11, 1964.
 28. L.Purser et al. Rev.Scient.Instr., 36, 453 (1965).
 29. В.Вечеславов, В.Кононов. Вторичноэлектронные характеристики ускорительных трубок с жесткой фокусировкой. Атомная энергия, т.25, в.2, авг.1968.
 30. Мощная радиационная техника, под ред.С.Джефферсона, Атомиздат, 1967.
 31. A.Gale. High voltage beams and their place in industry, Nuclear Fair "Nuclex-66", Basle, Switzerland, 1966.
 32. Э.Финкель, С.Лещенко, Р.Брагинский. Радиационная химия и кабельная техника, Атомиздат, Москва, 1968.
 33. B.Schumacher. Electron beam cutting of rocks and concrete, The South African Mining and Engineering Journal, January 3, 1969.
 34. Е.Абрамян, И.Черток. Выпуск из вакуума концентрированного пучка ускоренных электронов, Приборы и техника эксперимента, № 6, 1969.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
1. В в е д е н и е	3
2. Принципы работы ускорителей	5
Импульсные трансформаторы	5
Трансформаторы промышленной частоты	15
3. Конструкции трансформаторов	20
Импульсные трансформаторы	20
Трансформаторы промышленной частоты	25
4. Ускорительные трубки	30
5. Типовые установки	43
Импульсные ускорители	43
Трансформаторы промышленной частоты	55
6. Использование пучков	64
7. Перспективы развития	67
Литература	72

Отпечатано на территории в НИИ СО АН СССР, № 18
Завод № 18, бесплатно, ПРИБИРИТИ
Ул. 3-я, пер. 1-й, этаж 300 - зал.
Подписано к печати 24.4.70
Ответственный за выпуск Е.А. Абрамкин

Отпечатано на территории в НИИ СО АН СССР, № 18

3	1. Введение
8	2. Принципы работы усилителей
8	Минимальные трансформаторы
18	Трансформаторы промышленной частоты
20	3. Конструкция трансформаторов
20	Минимальные трансформаторы
25	Трансформаторы промышленной частоты
30	4. Усилительные трубки
43	5. Газовые усилители
48	Минимальные усилители
55	Трансформаторы промышленной частоты
64	6. Нормализация трубок
67	7. Перспективы развития
72	Литература

Ответственный за выпуск Е.А.Абрамян

Подписано к печати 24.4.70

Усл. 3,7 печ.л., тираж 300 экз.

Заказ № 18 , бесплатно. ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР, нв.