Принципы проектирования и основные данные бетатронных установок Московского трансформаторного завода

Б. Б. Гельперин

В статье приведены принципы проектирования ускорительных бетатронных установок для дефектоскопии, медицинских, физических и других целей. Рассматриваются условия возникновения азимутальной несимметрии магнитного поля бетатрона и методы ее компенсации. Описывается многояремная конструкция электромагнита бетатрона, разработанная Московским трансформаторным заводом (МТЗ), дающая более однородное (по азимуту) магнитное поле. Приведены данные о специализированных конструкциях бетатронов МТЗ следующих типов: стационарного 4-яремного с энергией ускоренных электронов 20 и 50 *Мэв*, подвесного поворотного для медицинских целей на 25 *Мэв*, поворотного и подвижного для дефектоскопии на 25 *Мэв* и качающегося (маятникового типа) для медицинских целей на 15 *Мэв*.

Введение

Бетатроны широко применяются для исследований в области атомного ядра, а также в медицине (для лечения злокачественных опухолей), в промышленности (для дефектоскопии) и т. д.

В ходе использования бетатронов в народном хозяйстве выявилась необходимость в разработке не только стационарных, но и подвижных установок: поворотных, качающихся (маятникового типа) и др.

От стационарных бетатронов требуется в основном получение надежных выходных параметров (энергии и интенсивности β- или γ-излучения). При проектировании подвижных бетатронов необходимо, кроме того, учитывать требования максимального снижения веса, габаритов уровня шума. Очевидно, в подвижных бетатронах необходимо применять отпаянные камеры.

Основные требования, предъявляемые к электромагнитам бетатронов

Для получения максимальной интенсивности излучения необходимо в воздушном зазоре электромагнита создать высокую степень азимутальной однородности магнитного поля. Практически магнитное поле бетатрона всегда обладает некоторой азимутальной неоднородностью, поэтому орбита, по которой будет двигаться электрон, из-за искажений однородности магнитного поля будет не окружностью, а некоторой замкнутой кривой.

Из теории бетатрона известно[1], что отклонение искаженной орбиты от идеальной x_0 определяется выражением

$$\frac{x_0}{r_0} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{h_l}{l^2+n-1} \cos(l\theta + \alpha_l),$$

где r_0—радиус идеальной орбиты; h_l—относительная величина l-ой гармоники разложения магнитного поля в ряд Фурье; α_l—фаза l-ой гармоники.

Рассмотрим более подробно причины возникновения азимутальной неоднородности и меры борьбы с ней. Напряженность поля H_1 в точке (θ_1, r_0) может отличаться от напряженности H_2 в точке (θ_2, r_0) как по амплитуде, так и по фазе. Пусть $H_1 = H_{01} \sin \omega t$, а $H_2 = H_{02} \sin(\omega t + \delta)$, где H_{01} и H_{02} — амплитуды напряженностей полей в точках θ_1 и θ_2, а δ — сдвиг фаз. Поскольку обычно δ — малый

[1] D. Bohm, L. Foldy. Phys. Rev., 70, 249 (1946).

угол, то

$$\frac{H_2-H_1}{H_1}=\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}+\frac{H_{02}-H_{01}}{H_{01}}\left(1+\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}\right).$$

Величиной $\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}$ по сравнению с единицей можно пренебречь, так как обычно уже при времени инжекции $\omega t_i \gg \delta$. Тогда

$$\frac{H_2-H_1}{H_1}=\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}+\frac{H_{02}-H_{01}}{H_{01}}.$$

Таким образом, неоднородность магнитного поля в двух точках можно разбить на две неоднородности: фазовую

$$\gamma_\Phi=\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}$$

и амплитудную

$$\gamma_a=\frac{H_{02}-H_{01}}{H_{01}}.$$

Природа возникновения этих неоднородностей различна. Фазовая неоднородность возникает из-за неодинаковости активных токов, потребляемых трубками магнитного поля, на разных азимутах, т. е. из-за неодинаковости потерь энергии в магнитных материалах электромагнита. Амплитудная же неоднородность вызывается различием магнитных сопротивлений этих трубок. Так как магнитное сопротивление трубок в основном определяется сопротивлением зазоров и прокладок между элементами конструкции, то γ_a вызывается различием их размеров для отдельных трубок поля.

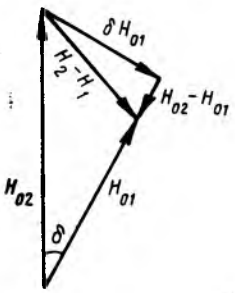

Рис. 1. Диаграмма фазовой и амплитудной неоднородностей магнитного поля.

Из рис. 1 видно, что γ_Φ вызывается вектором, перпендикулярным к напряженности поля H_{01}, а γ_a — вектором, совпадающим с ним.

В начале цикла ускорения, когда ωt мало, большее значение имеет γ_Φ, так как практически $\frac{\delta}{\operatorname{tg}\omega t}$ для момента инжекции составляет 8—12%, в то время как γ_a — около 2—3%. В конце ускорения γ_Φ уже не имеет значения, так как его величина стремится к нулю. Поэтому с неоднородностью поля борются в основном в начальный период ускорения, когда γ_Φ велика по сравнению с полем инжекции. При осуществлении этого, с одной стороны, стремятся создать симметричную по азимуту конструкцию электромагнита, чтобы обеспечить минимальную

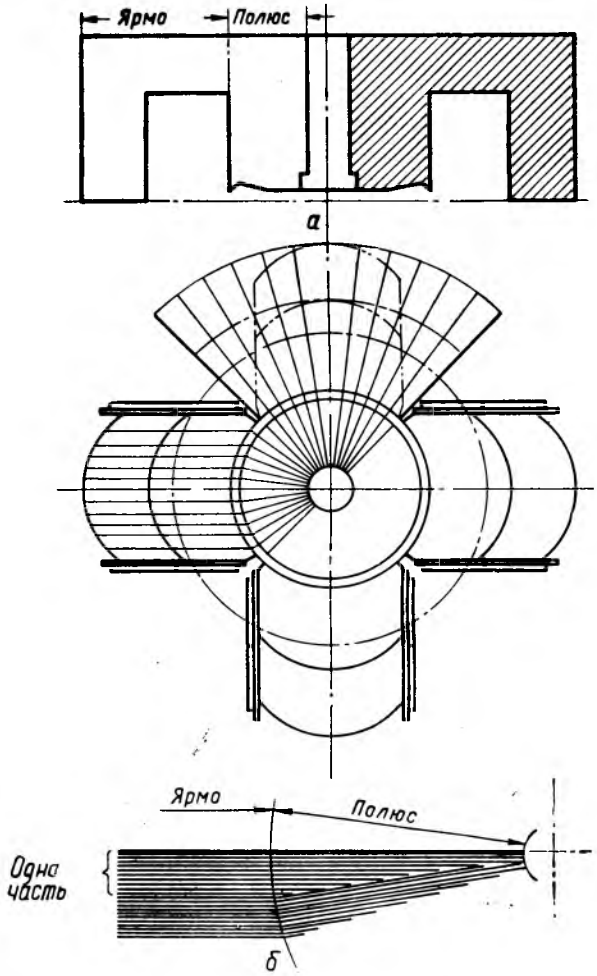

Рис. 2. Схема 4-яремной конструкции магнитопровода бетатрона.

«естественную» неоднородность, а с другой — создают специальную систему витков, при помощи которой компенсируется «естественная» неоднородность поля.

Примером симметричной конструкции магнитопровода может служить многояремная конструкция, разработанная МТЗ (на рис. 2 представлена 4-яремная конструкция). Вся окружность полюса разбивается на боль-

шое количество (200—250) участков, каждый из которых набирается из одинакового числа листов стали, образующих одновременно часть полюса и ярма (рис. 2, *а*). Толщины участков по азимуту выбираются с таким расчетом, чтобы при сборке всех частей полюс получился плотно наполненным, а яремные части участков, расположенные также радиально, заполнялись слабо. Затем яремные части всех участков разбиваются на m равных частей (четыре части на рис. 2, *б*), которые сжимаются, образуя m симметричных ярем, одинаковых по конструкции. В магнитном отношении они также одинаковы, за исключением краевых участков (у боков ярем), по которым дополнительно проходят краевые магнитные потоки рассеяния. Форма кривой распределения азимутальной фазовой неоднородности получается равномерной с характерными подъемами, соответствующими краям ярем. На рис. 3 представлена примерная кривая распределения магнитного поля в зазоре 4-яремного электромагнита. Четвертая гармоника в этой кривой является основной. Однако ее вклад в искажение орбиты невелик, так как ее амплитуда делится почти на квадрат номера гармоники (при $n=0{,}7$—на 15,7). В табл. 1 приведены величины гармоник этой кривой и их вклад в искажения орбиты. Таким образом, в многояремных магнитах вследствие симметричности их конструкции «естественная» азимутальная неоднородность магнитного поля является минимальной.

Таблица 1

Гармонический анализ кривой рис. 3

Амплитуда	Номер гармоник			
	1	2	3	4
h_l	0,29	0,517	0,14	0,995
$\frac{h_l}{l^2-n+1}$	0,435	0,141	0,0161	0,0635

Совершенно иную картину представляет обычная 2-яремная конструкция магнитопровода. Как видно из рис. 4, в этом случае полюс набран из радиально расположенных листов стали, а ярма и колонны—из параллельно расположенных листов стали. Нетрудно убедиться, что участки, расположенные ближе к середине, будут насыщаться сильнее (площадь *abcd*), чем удаленные от центра

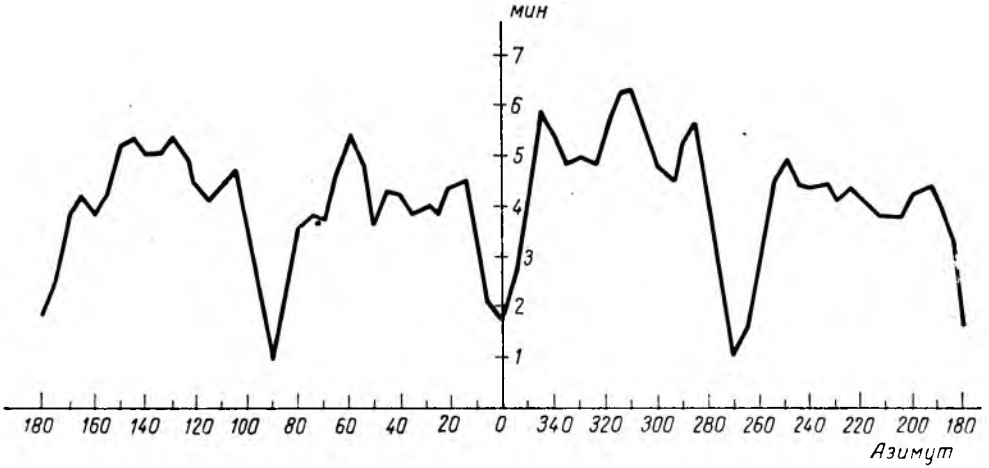

Рис. 3. Азимутальная фазовая неоднородность магнитного поля в зазоре 4-яремного электромагнита.

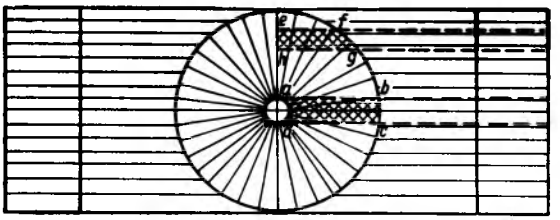

Рис. 4. Схема расположения листов стали в 2-яремном электромагните.

(площадь $effh$). В соответствии с этим удельные потери энергии в различных участках ярем будут неодинаковы. Очевидно, в этом случае кривая азимутального распределения

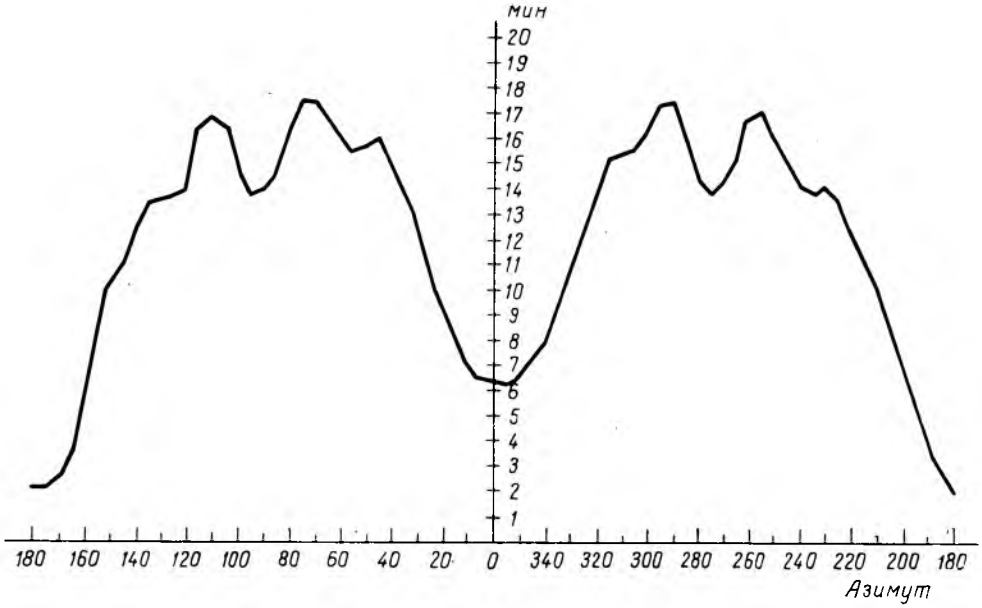

Рис. 5. Азимутальная фазовая неоднородность магнитного поля в зазоре 2-яремного электромагнита.

напряженности магнитного поля будет иметь ярко выраженную вторую гармонику (рис. 5). Из табл. 2 видно, что «естественная» γ_Φ в этом случае значительно больше.

Таблица 2

Гармонический анализ кривой рис. 5

Амплитуда	Номер гармоник			
	1	2	3	4
h_l	0,23	3,0	0,064	2,25
$\frac{h_l}{{}^2+n-1}$	0,345	0,82	0,0074	0,144

Компенсация γ_a достигается обычно выравниванием зазоров в магните (подкладыванием дополнительных прокладок или уменьшением толщины действующих).

Фазовая неоднородность компенсируется при помощи катушек, ток в которых сдвинут по фазе приблизительно на 90° по отношению к основному намагничивающему току магнита. При соответствующем размещении и соединении этих катушек можно скомпенсировать первую и вторую гармоники азимутальной неоднородности любой величины. Более высокие гармоники обычно не приходится компенсировать, так как их

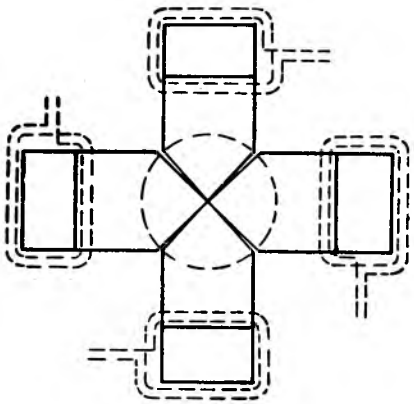

Рис. 6. Расположение компенсационных витков в 4-яремном электромагните.

вклад в искажение орбиты весьма мал. Схема компенсации первой гармоники в 4-яремной конструкции электромагнита представ-

лена на рис. 6. В 2-яремной конструкции бетатрона компенсационные витки наматываются соответственно на участки яремколонн (средние и крайние). Для размещения компенсационных витков используются вентиляционные каналы, устанавливаемые в ярмах-колоннах. Схема компенсации остается такой же.

Преимущество такой системы компенсации состоит в том, что управление током компенсации может производиться оператором с пульта управления при работающем бетатроне и дает возможность отрегулировать магнитное поле установки для получения максимальной интенсивности γ-излучения.

Конструкции электромагнитов стационарных и подвижных бетатронов

Приведенные выше соображения позволяют сделать вывод, что многояремная конструкция бетатрона имеет ряд преимуществ по сравнению с 2-яремной. Поэтому в стационарных бетатронах МТЗ, рассчитанных на энергию от 20 *Мэв* и выше, используются исключительно многояремные конструкции. При одинаковых напряженностях магнитного поля в воздушном зазоре вес многояремных магнитов мало отличается от веса 2-яремных магнитов.

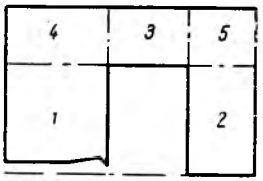

Рис. 7. Расположение участков в заготовке 4-яремного электромагнита.

При разработке подвижных бетатронов оказалось необходимым резко снизить вес подвижной части установки, т. е. электромагнита. Как известно, вес электромагнита бетатрона приблизительно пропорционален кубу радиуса орбиты. При заданной энергии ускоренных электронов радиус орбиты можно уменьшить только за счет увеличения напряженности магнитного поля на орбите. Кроме снижения веса, при уменьшении радиуса орбиты можно уменьшить радиальные размеры воздушного зазора электромагнита, так как искажения орбиты из-за азимутальной неоднородности поля пропорциональны радиусу орбиты. При этом ускорительная камера становится меньше и прочнее.

Для повышения напряженности магнитного поля в подвижных бетатронах было решено применить холоднокатаную сталь. Лучшие магнитные свойства этой стали позволили довести напряженность поля в воздушном зазоре электромагнита до 5 *кэ*, в то время как для горячекатаной стали эта величина не превышала 3,3 *кэ*. Таким образом радиус орбиты удалось уменьшить на 33%. Однако холоднокатаная сталь имеет большую анизотропию магнитных свойств. Если магнитный поток идет по направлению прокатки, то магнитные свойства стали очень высоки, если же магнитный поток идет под углом, в особенности под углом 60 и 90°, то магнитные свойства стали резко ухудшаются. В связи с тем, что в многояремной конструкции форма вырубки штампуется из целого листа и образует сразу полюс и ярмо (рис. 7), магнитный поток будет проходить частично вдоль направления прокатки (участки *1* и *2*), частично поперек прокатки (участок *3*), а частично под разными углами (участки *4* и *5*). В этом случае улучшенные магнитные свойства холоднокатаной стали не будут использованы.

В 2-яремной конструкции ярмо и сердечник могут быть собраны из заготовок, нарезанных только вдоль прокатки. Поэтому электромагниты подвижных бетатронов изготовляются из холоднокатаной стали 2-яремной конструкции.

Системы охлаждения стационарных и подвижных бетатронов

Длительность работы бетатрона зависит от того, в какой области он используется. В физике и для учебных целей обычно применяются стационарные бетатроны, причем отношение длительности их работы к длительности паузы может быть незначительным. В этих бетатронах применяется естественное воздушное охлаждение. В химии и биологии также применяются стационарные бетатроны, однако здесь требуется получать определенную дозу облучения, поэтому отношение длительности работы этих бетатронов к длительности паузы может быть значительным. Для этих бетатронов приходится применять искусственное охлаждение. Как правило, применяется воздушное охлаждение с дутьем.

Подвижные бетатроны для медицинских целей и дефектоскопии имеют большое отношение длительности работы к длительности

паузы. Для медицинских целей оно принято равным 60%, для дефектоскопии — около 100%. Для подвижных бетатронов требуется искусственное охлаждение с принудительной вентиляцией.

Большему обдуву подвергаются наиболее нагревающиеся детали: внутренний вкладыш, имеющий большое магнитное насыщение, и обмотки, имеющие сравнительно большую плотность тока. В стационарных бетатронах охлаждающий воздух засасывается из помещения, где установлен бетатрон, прогоняется через электромагнит и выбрасывается наружу. Такое направление потока воздуха

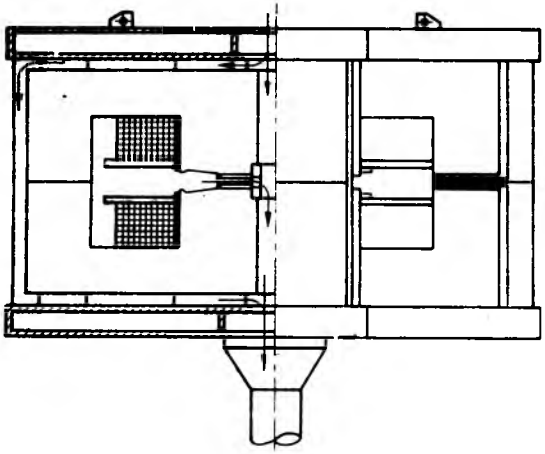

Рис. 8. Направление охлаждающего воздуха в электромагните.

предохраняет помещения, где работают люди, от попадания в них радиоактивного воздуха. Схема движения воздуха в электромагните стационарных бетатронов показана на рис. 8. Вентилятор стационарного бетатрона обычно устанавливается в подвальном помещении с тем, чтобы уменьшить шум от вентилятора в помещении бетатрона.

В подвижных бетатронах вентиляторы устанавливаются внутри корпуса бетатрона. В этом случае воздух из бетатрона попадает в помещение, где он установлен, в связи с чем требуется хорошая приточно-вытяжная вентиляция этого помещения. Скорость воздуха в вентиляционных каналах бетатрона составляет 5—20 *м/сек*.

Выбор частоты питающего тока бетатрона

При выборе частоты тока питания следует учитывать, что с ее увеличением усложняется схема установки, уменьшается надежность работы и резко увеличивается вес электромагнита, так как с увеличением частоты допустимая индукция в стали снижается. С другой стороны, при этом увеличивается интенсивность излучения бетатрона. Хотя для подвижных установок требуется большая интенсивность излучения, для них принята промышленная частота (50 *гц*) с наименее сложным оборудованием, что тем более необходимо, так как персонал, эксплуатирующий эти установки, технически малоквалифицирован (врачи, медицинские сестры). В стационарных установках, вес которых не имеет

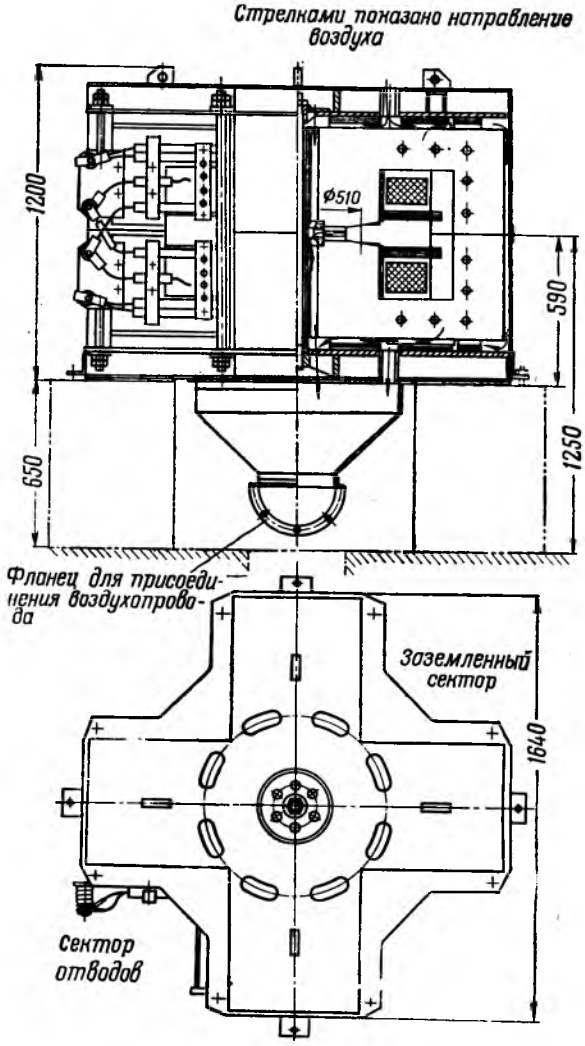

Рис. 9. Стационарный 4-яремный бетатрон на 20 *Мэв*.

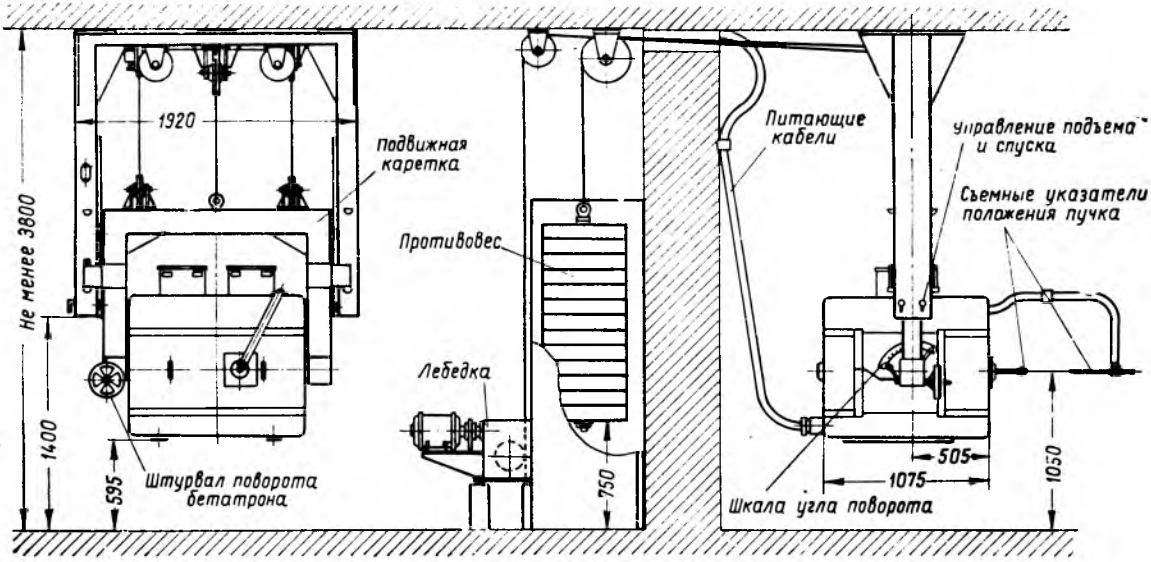

Рис. 10. Подвесной поворотный бетатрон на 25 *Мэв* для медицинских целей.

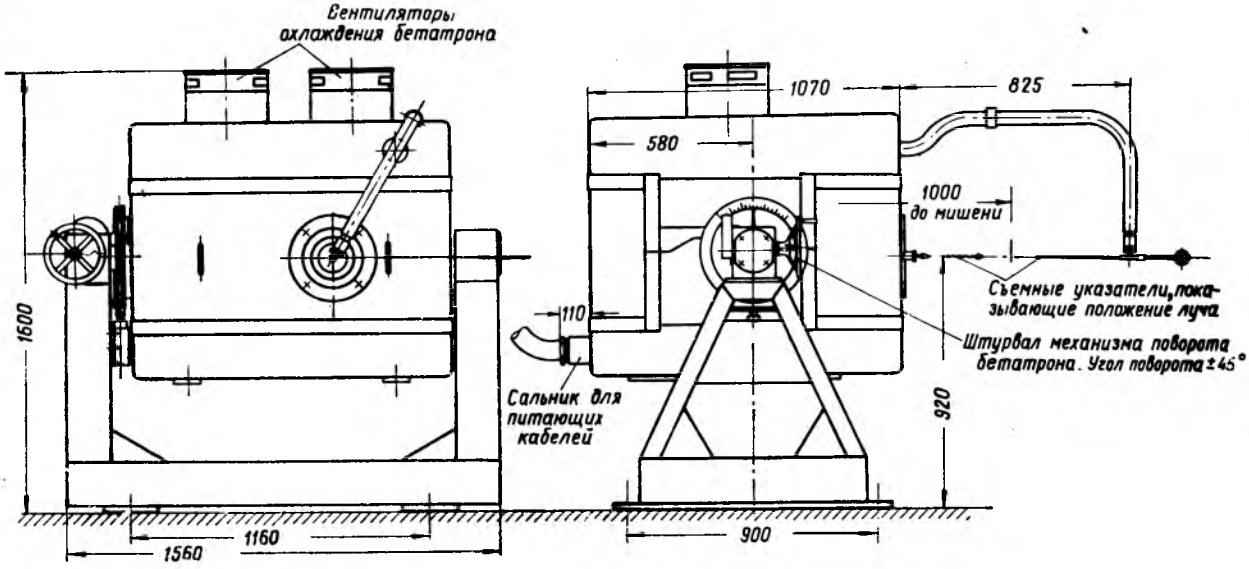

Рис. 11. Поворотный бетатрон на 25 *Мэв* для дефектоскопии.

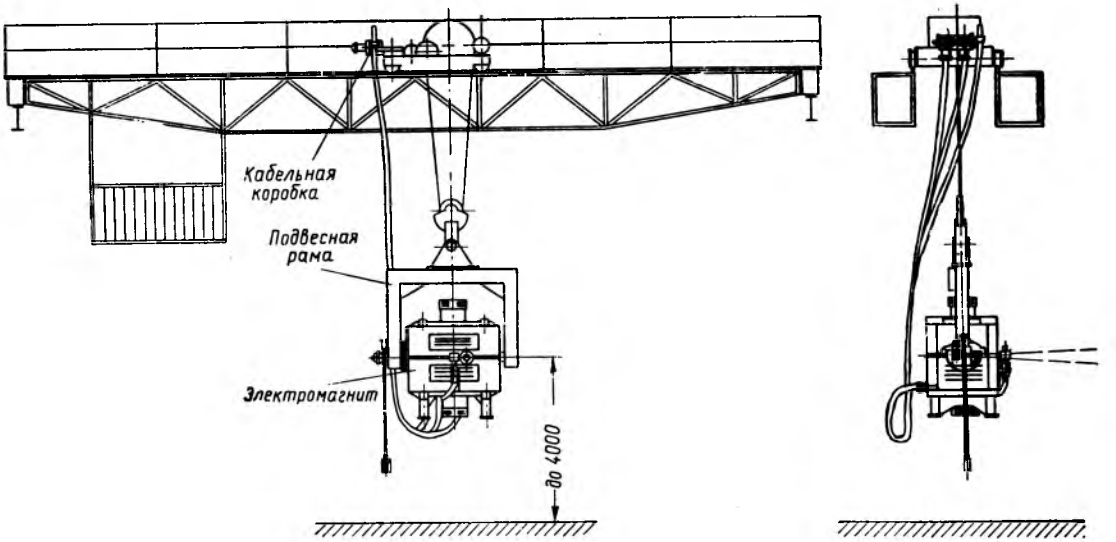

Рис. 12. Подвесной бетатрон на 25 *Мэв* для дефектоскопии.

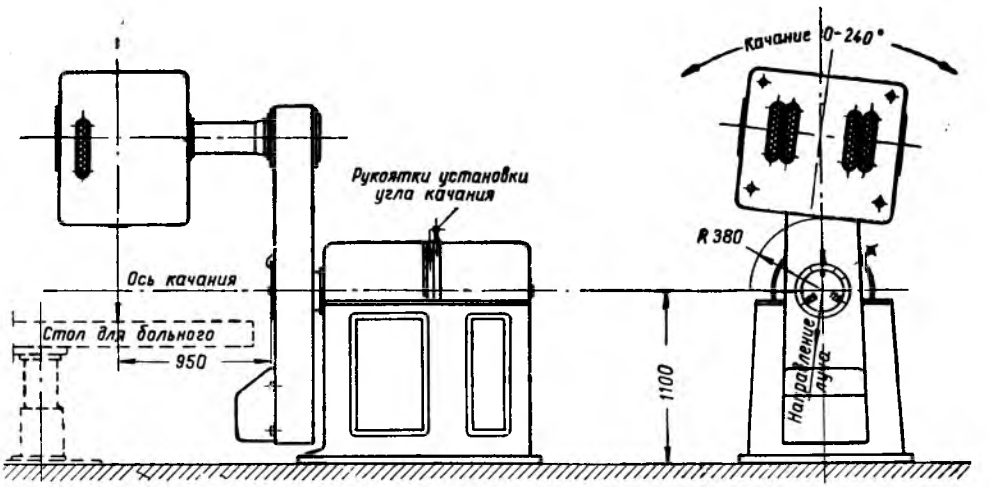

Рис. 13. Качающийся бетатрон на 15 *Мэв* маятникового типа для медицинских целей.

особого значения, можно усложнить схему и увеличить вес, получая при этом выигрыш в интенсивности излучения. МТЗ изготовлял стационарные установки с частотой питания 150, 300 и 600 *гц*. В качестве генератора высокой частоты применялся ламповый генератор или статический утроитель частоты.

Параметры бетатронов конструкции МТЗ

На МТЗ разработаны следующие основные конструкции бетатронов:

1. Стационарный 4-яремный бетатрон на 20 *Мэв* (рис. 9).

2. Подвесной поворотный бетатрон для медицинских целей на 25 *Мэв* (рис. 10). Подвесная конструкция позволяет устанавливать магнит как для горизонтального облучения (при этом мишень отстоит от пола на 1050 *см*), так и для вертикального облучения. Конструкция обеспечивает перемещение в вертикальном направлении на 600 *мм* и поворот электромагнита вокруг горизонтальной оси на 120° с фиксацией положения пучка в пределах +90 — —30° от вертикали. Все вертикальные перемещения осуществляются при помощи моторного привода, а угловые — при помощи ручного.

Набор диафрагм и выравнивающих фильтров обеспечивает на расстоянии 1 *м* от мишени следующие дозные поля облучения: круглые диаметром 40 и 80 *мм* и прямоугольные с размерами 100 × 150 *мм*, 80 × × 100 *мм*, 60 × 80 *мм* и 50 × 180 *мм* (в этих пределах неравномерность дозного поля не превышает 10%).

Бетатрон снабжен свинцовой защитой, обращенной к больному. Толщина свинцового экрана рассчитана так, что мощность дозы неиспользуемого γ-излучения не превышает 0,5% мощности дозы на оси пучка (с фильтром).

3. Бетатрон на 25 *Мэв* для дефектоскопии поворотного или подвесного исполнения. Поворотный бетатрон (рис. 11) обеспечивает возможность изменения направления оси пучка на ±30° от горизонтали. Подвесной бетатрон (рис. 12) обеспечивает возможность перемещения на 20 *м* от места установки пульта управления и изменения направления оси пучка на 90° вниз и на 30° вверх от горизонтали.

Таблица 3

Характеристики бетатронов

Параметры	Тип бетатрона					
	стационарный 4-яремный (рис. 9)	подвижной поворотный для медицинских целей (рис. 10)	поворотный для дефектоскопии (рис. 11)	подвесной для дефектоскопии (рис. 12)	качающийся маятникового типа для медицинских целей (рис. 13)	стационарный для исследовательских целей
Энергия ускоренных электронов, *Мэв*	20	10—25	10—25	10—25	6—15	10—50
Вес активной стали, *кг*	4750	1625	1625	1625	420	15 000
Вес электромагнита, *кг*	6600	2700	2700	2700	650	18 500
Вес верхней съемной части, *кг*	3000	1200	1200	1200	300	9000
Система охлаждения	Принудительное воздушно-циркуляционное	Принудительное воздушное	Принудительное воздушное	Принудительное воздушное	Принудительное воздушное	Принудительное циркуляционное
Производительность вентилятора, $м^3/ч$	3000	2×500	2×500	2×500	600	5000
Частота тока питания, *гц*	150	50	50	50	50	50
Интенсивность γ-излучения на расстоянии 1 *м* от мишени, *р/мин*	100	30	30	30	4,5	200—250
Вес свинцовой защиты, *кг*	—	585	—	—	400	—
Ускорительная камера	Откачиваемая	Отпаянная	Отпаянная	Отпаянная	Отпаянная	Откачиваемая

4. Качающийся бетатрон на 15 *Мэв* маятникового типа для медицинских целей (рис. 13). Электромагнит бетатрона может качаться на любой угол в пределах 210°. Это обеспечивает максимум дозы облучения в центре качания (опухоль), тогда как на поверхности здоровой кожи (на входе и выходе пучка из тела) мощность дозы гораздо меньше.

Расстояние от центра качания до мишени составляет 800 *мм*. Бетатрон снабжен таким же набором диафрагм и фильтров, как и медицинский бетатрон на 25 *Мэв*, с добавлением еще одной диафрагмы 70 × 30 *мм*. Свинцовая защита доводит мощность дозы неиспользуемого γ-излучения до 0,5% от мощности дозы на оси пучка (с фильтром). Управление движением бетатрона производится как дистанционно (с пульта управления), так и из помещения, где установлен бетатрон.

5. Стационарный бетатрон на 50 *Мэв* для исследовательских целей. Этот бетатрон 2-яремной конструкции из холоднокатаной стали находится в настоящее время в стадии изготовления.

Основные характеристики описанных бетатронов приведены в табл. 3.

Поступила в Редакцию 14/II 1959 г.