

A-467

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 6715

АЛЕКСАНДРОВСКИЙ
Михаил Рафаилович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕТАТРОНА
И ЕГО КОРРЕКЦИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.14.11 -
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в СКБ Московского электрозавода
им. В.В.Куйбышева.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Б.Б.Гельперин

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор В.А.Москалев,
кандидат технических наук В.И.Гордон

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерных исследований АН СССР (г. Москва)

Автореферат разослан " " 1972 года.

Защита диссертации состоится " " 1972 года
в часов на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных
проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна,
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

9 - 6715

АЛЕКСАНДРОВСКИЙ
Михаил Рафаилович

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕТАТРОНА
И ЕГО КОРРЕКЦИЯ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.14.11 -
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Бетатронные установки как источники излучения широко применяются в ряде отраслей народного хозяйства. Одной из основных проблем бетатроностроения является повышение интенсивности излучения. Интенсивность излучения бетатрона в значительной степени определяется параметрами его магнитного поля. В связи с этим в настоящей работе уделено особое внимание исследованиям связей интенсивности с параметрами поля, а также исследованиям искажений структуры поля в результате воздействия различных факторов, которые не учитываются или недостаточно учитываются при проектировании. Такими факторами являются: изменение параметров поля на протяжении цикла ускорения, зависимость магнитной проницаемости от индукции в стали $\mu = f(B)$, краевые эффекты, влияние обмоток и т.д. В диссертации рассматриваются следующие вопросы:

1. Исследование магнитного поля бетатрона с учетом влияния факторов, снижающих интенсивность излучения. Поиски новых путей исследования магнитного поля бетатрона.

2. Исследование методов коррекции магнитного поля бетатрона. Разработка новых эффективных методов с целью устранения влияния приведенных выше факторов и повышения интенсивности излучения.

В главе I рассмотрено современное состояние вопроса и тенденции развития бетатронной техники. Анализ литературы показывает, что при проектировании и исследовании бетатронов недостаточно учитывается влияние ряда важных факторов на структуру поля, что приводит к снижению интенсивности излучения. Дается обзор исследований, проведенных автором для определения связей интенсивности излучения с параметрами магнитного поля и с целью повышения интенсивности. Определено соответствие выбранных и рассчитанных параметров поля оптимальным.

Глава II посвящена исследованиям и учету факторов, влияющих на интенсивность излучения бетатрона, связанных с его магнитным полем. На основе проведенного теоретического анализа изменения структуры поля^{1/} впервые разработана методика аналитического определения его параметров

на протяжении всего цикла ускорения. Расчет по этой методике позволяет оптимизировать значения параметров поля, а также размеров межполюсного пространства. Известный, принятый на бетатроне расчет параметров основан на допущении, что величина коэффициента спада поля n постоянна во времени и равна своему значению на равновесной орбите n_0 внутри кольцевой зоны, ограниченной внутренним радиусом профилированной части полюсов r_1 и радиусом r_0 . Магнитный поток внутри этой зоны в кольце с радиусами r_1 и r_2

$$\Phi_{12} = 2\pi H_0 r_0^n \int_{r_1}^{r_2} r^{1-n} dr = \frac{2\pi H_0 r_0^n}{2-n} (r_2^{2-n} - r_1^{2-n}), \quad (1)$$

где H_0 — напряженность поля на равновесной орбите. Исходя из этого уравнения, в литературе, в частности, в работах А.А.Воробьева и М.Ф.Филиппова, выведены расчетные формулы, связывающие основные параметры и размеры межполюсного пространства. Вычисление магнитного потока необходимо и достаточно для определения основных параметров поля. Однако выражение (1) определяет параметры поля лишь в середине цикла ускорения, когда их искажения минимальны, и не учитывает нарушений структуры поля на протяжении всего цикла ускорения. Между тем экспериментальные исследования подтверждают, что характеристика $n(r)$, даже в пределах рабочей области, не является постоянной во времени. В связи с этим исходное соотношение (1) заменено нами соотношением, учитывающим изменение n вдоль радиуса и во времени. Кроме того, в рассматриваемые аналитические выражения введена зависимость параметров поля от времени. С учетом этого мгновенное значение магнитного потока

$$\Phi_{12}(t) = 2\pi H_0(t) \cdot r_0^{n_0(t)} \int_{r_1}^{r_2} r^{1-n(r,t)} dr, \quad (2)$$

После некоторых преобразований уравнения (2) получаем:

$$\Phi_{12}(t) = 2\pi H_0(t) \cdot r_0^{n_0(t)} \cdot \left\{ r \int_{r_1}^{r_2} r^{-n(r,t)} dr - \int \int \int_{r_1}^{r_2} r^{-n(r,t)} dr \right\} \quad (3)$$

В ряде случаев, например, при использовании численного расчета поля, удобно применять другую формулу, полученную с учетом соотношения

$$n(r,t) = - \frac{\partial \ln H(r,t)}{\partial \ln r} \quad (4)$$

из выражения (2):

$$\Phi_{12}(t) = 2\pi \left\{ r \int_{r_1}^{r_2} H(r,t) dr - \int \int \int_{r_1}^{r_2} H(r,t) dr \right\} \quad (5)$$

Выведено уравнение, из которого определяется радиус равновесной орбиты бетатрона на протяжении всего цикла ускорения:

$$r_0^2(t) - r_0^{n_0(t)} \int_{r_1}^{r_2} r^{1-n(r,t)} dr = \frac{\bar{H}_c(t) \cdot r_c^2}{2H_0(t)}, \quad (6)$$

где $\bar{H}_c(t)$ — среднее значение напряженности поля в круге радиуса r_c . Для решения уравнения (6) применена ЭВМ "Проминь-М" и построена номограмма. Аналитическое определение r_0 на протяжении всего цикла ускорения позволяет заранее определить, на какую величину снижается r_0 в результате различных искажений поля^{11/}. По уравнению (6) проведен расчет r_0 на протяжении всего цикла ускорения на бетатроне 25 МэВ.

На основе проведенного расчета показана возможность повышения индукции в центральной части электромагнита бетатрона. Насыщение стали, обусловленное повышением индукции, приводит в конце цикла ускорения к смещению r_0 , что снижает интенсивность излучения. На бетатроне 25 МэВ интенсивность падает при номинальном напряжении 220 в на 12%, а при увеличении напряжения до 230 в — на 28%. Для того чтобы избежать снижения интенсивности, предложено настраивать r_0 так, чтобы его значение в середине цикла ускорения превышало номинальное на 5-7 мм. (Эта величина заранее рассчитывается по уравнению (6)). Тогда значение r_0 в конце цикла ускорения, несмотря на его снижение, не достигает такой величины, которая может привести к снижению интенсивности. В результате повышения индукции на бетатроне 25 МэВ получена возможность повысить на 18% энергию излучения при том же весе электромагнита или при сохранении той же энергии снизить на 21% вес и улучшить технико-экономические показатели. На серийных бетатронах типа В5М-25 и В5Д-25 применен первый из предло-

зонных вариантов. Энергия этих бетатронов повышена с 25 до 28,5-29 Мэв.

Другим итогом аналитического исследования положения равновесной орбиты в динамике явился полученный теоретически важный результат о влиянии изменения структуры поля в начале цикла ускорения на процесс захвата электронов в ускорение. Уменьшение τ_0 в начале цикла ускорения, определяемое выражением (6), улучшает условия обхода электронами инжектора. Однако колебания ускоряемых электронов в начале цикла ускорения около мгновенных орбит, перемещающихся по направлению к равновесной орбите с уменьшенным радиусом, приводят к значительным потерям электронов во внутренней области ускорительной камеры. Это вызывает необходимость регулировки данного процесса. Такая регулировка проведена нами на ряде бетатронов на 25 Мэв путем предварительной настройки τ_0 на оптимальное значение, которое, как показывает расчет, превышает номинальное. Это позволяет повысить интенсивность излучения порядка 10-30%.

Для исследования и учета ряда факторов, влияющих на интенсивность излучения бетатрона, связанных с его магнитным полем, проведено также моделирование межполюсного пространства различными методами. Результаты моделирования использованы при проектировании серийных бетатронов. При моделировании в электролитической ванне проведены работы по шпигации обмоток с помощью ряда электродов, погруженных в электролит, с выравниванием токораспределения между ними. При этом использованы труды В. С. Душкова, В. А. Карасева, И. М. Тетельбаума. Выявлена возможность определения структуры поля в момент инжекции путем использования результатов моделирования на "плоских" моделях, питаемых постоянным током, и средних статистических данных о магнитных измерениях на действующих бетатронах. Проанализированы результаты проведенного определения на моделях оптимальной формы полюсов бетатронов на 15, 25, 35, 45 и 50 Мэв. Даны практические рекомендации по выбору формы и размеров отдельных элементов конструкции, которые внедрены на серийных бетатронах. Так, на бетатроне ВМ-45 на 45 Мэв выявлена возможность отказаться от скоса на вну-

тренней стороне профилированной части полюсов, а также от применения блока вкладышей. Впервые проведено математическое моделирование насыщенной магнитной цепи бетатрона на электропроводящей бумаге. Учет зависимости $\mu = f(B)$ в стали является важным преимуществом этого метода, позволяющим исследовать картину поля при различных магнитных состояниях стали, включая сильное насыщение порядка 2,2 тл и выше.

Для расчета магнитного поля бетатрона впервые в нашей стране предложен численный метод, примененный совместно с В. Ф. Бабенко^{/10/}. Метод позволил проверить правильность общего конструктивного решения, а также полученные другими методами результаты исследования и учета влияния различных факторов, искажающих поле, и уточнить вопрос о точности методов, используемых при проектировании. Вычисления проводились на ЭВМ ВЭСМ-6 методом сеток. На первом этапе в качестве расчетной области выбиралась 1/4 часть осевого сечения электромагнита, а на втором - рабочая область и её окрестности. Примененная на втором этапе мелкая сетка с размером ячейки 1,2 мм² обуславливает высокую точность расчета (для n -лучше 0,5%). Расчет проводился для случаев, когда H_0 равнялось своему максимальному значению, а также 1/3 и 2/3 от этого значения. Расчетные значения $n(r)$ в медианной плоскости с точностью до 0,8% совпадают с экспериментальными данными.

Необходимым этапом явилась проверка результатов расчета и моделирования "под пучком". Предложена и применена методика отработки элементов конструкции "под пучком" при максимальной интенсивности излучения. Исследования, проведенные по этой методике, позволили, в частности, определить оптимальную форму центральной части воздушного зазора серийных бетатронов и отказаться от применения блока вкладышей на этих бетатронах, что заметно упрощает конструкцию^{/2/}.

Разработана система допусков на изготовление электромагнита бетатрона и на устройства для измерений магнитного поля. Допуски обоснованы необходимостью соблюдения значений параметров поля в пределах, не

оказывающих заметное влияние на интенсивность излучения, с учетом возможности производства. В бетатроне В5М-25 наиболее жестким допуском, обусловленным необходимостью сохранения заданного значения γ_0 , является допуск на аксиальный размер полюсов - 0,065 мм.

Глава III посвящена исследованиям положения равновесной орбиты и его влияния на интенсивность излучения. Исследована зависимость γ_0 от величины воздушного зазора между полюсами и зависимость интенсивности излучения от γ_0 в бетатронах 15,25 и 50 Мэв. Определены количественные соотношения, необходимые для регулировки γ_0 и широко используемые в настоящее время при настройке и запуске бетатронов. В частности, установлено, что на бетатроне 25 Мэв изменение размера воздушного зазора на 1 мм смещает γ_0 на 15 мк^3 . Выведено уравнение, с помощью которого определяется точность измерений γ_0 . Радиус γ_0 , как известно, расположен там, где разность напряженностей вихревого электрического поля ΔE , измеренная вдоль радиуса, минимальна. Точность вычислений ΔE в основном зависит от погрешности измерений δD диаметров измерительных витков D_m и D_{m-1} . Найдено, что с учетом этой погрешности

$$\Delta E = K \cdot \frac{R_{m-1} \Delta D - D_{m-1} \Delta R + \delta D (2R_{m-1} + \Delta R)}{D_m D_{m-1}}, \quad (7)$$

где R_m и R_{m-1} - сопротивления измерительной схемы, $\Delta D = D_m - D_{m-1}$, $\Delta R = R_m - R_{m-1}$. Рекомендованная точность определения диаметров витков $\delta D = 0,01$ мм позволила значительно повысить точность измерений γ_0 на серийных бетатронах В5М-25 и В5Д-25 - с 5 до 1,5-2 мм.

Поставлен и исследован вопрос о критичности интенсивности излучения к γ_0 при различных конфигурациях межполюсного пространства. Установлено, что эта критичность заметно повышается при отклонении формы и размеров межполюсного пространства от оптимальных. Так, на бетатроне 25 Мэв отклонение γ_0 на 7,5 мм (4,2%) от оптимума приводит при формах, близких к оптимальным, к изменению интенсивности на 6-12%, а при отличных от оптимальных - более чем вдвое. Таким образом, выбор оптимальной формы меж-

полюсного пространства позволяет снизить критичность интенсивности излучения к γ_0 , что облегчает наладку и эксплуатацию бетатрона.

Глава IV посвящена исследованиям параметров магнитного поля в воздушном зазоре бетатрона на протяжении всего цикла ускорения. По принятой на бетатронах методике измерений параметры поля измеряются, как правило, в фиксированный момент цикла ускорения. В результате важные физические процессы, связанные с изменением структуры поля во времени, могут остаться вне поля зрения. Поэтому измерения параметров поля проведены нами на протяжении всего цикла ускорения, причем для измерений в начале цикла применены пермалюевые датчики, в конце цикла - индукционный метод с использованием электронного интегратора. Эта методика применена на бетатронах 25 и 50 Мэв. Проанализированы методы измерений и определена чувствительность и точность измерений. Примененные методы позволили измерить параметры поля бетатрона с высокой точностью 1-2,5%. Исследование параметров поля на протяжении всего цикла ускорения необходимо как для анализа работы бетатрона и целей проектирования, так и для разработки и исследования методов коррекции поля. В связи с этим в работе показана целесообразность изменения и дополнения принятой на бетатроне методики магнитных измерений.

Большое внимание уделено измерениям γ в начале цикла ускорения. Измерения проведены как до, так и после момента инъекции t_i . Измерения в моменты времени $t < t_i$ обусловлены тем, что при малых t рассматриваемые искажения поля проявляются резче и легче обнаруживаются. На серийном бетатроне В5М-25, для которого $t_i = 28,4$ мксек, измерения проведены при значениях t , равных 6,0; 12,1; 24,2; 39,2 мксек. На бетатроне 50 Мэв, для которого $t_i = 15,7$ мксек, - при 11,1; 15,7; 20,8 мксек. Помимо измерений амплитудной γ_a и фазовой γ_ϕ неоднородностей поля, в отличие от принятой на бетатроне методики, проведено также измерение суммарной неоднородности γ_Σ . При этом значительно сокращается объем гармонического анализа и облегчаются измерения в разные моменты цикла ускорения. Появ-

ляется возможность сравнения γ_{Σ} и ее составляющих, измеренных разными методами, в разных единицах измерений. Для такого сравнения введены расчетные формулы. Так, для случая, когда γ_{Σ} необходимо выразить в а/см, а γ_{ϕ} измерена в мин и γ_{α} - в процентах, формула имеет вид:

$$\gamma_{\Sigma}^{[a/cm]} = \frac{\gamma_{\phi}^{[мин]} \cdot H_i}{t_i} + \frac{\gamma_{\alpha}^{[\%]} \cdot H_i}{100^{[\%]}} \left(1 - \frac{\gamma_{\phi}^{[мин]}}{t_i} \right), \quad (8)$$

где H_i - напряженность поля в момент инжекции в а/см. Исследованы закономерности изменения размеров рабочей области на протяжении всего цикла ускорения. Установлено, что размеры внутренней и наружной относительно z_0 части рабочей области изменяются во времени несимметрично. Особенно большая несимметричность наблюдается в момент инжекции, что способствует увеличению потерь ускоряемых электронов. Проанализировано влияние краевых эффектов на размер рабочей области слабофокусирующих ускорителей. На основе статистического анализа построена зависимость, определяющая связь размера рабочей области ускорителей с их энергией, согласно которой рабочая область заметно снижается с ростом энергии. Одной из причин этого является влияние краевых эффектов. Исследовано влияние радиальной фазовой неоднородности и токов в межливтовой изоляции магнитопровода на размер рабочей области и на // в момент инжекции. Указаны меры борьбы с этими нежелательными явлениями. Для иллюстрации действия факторов, искажающих параметры поля, и определения возможности их коррекции рассмотрены результаты настройки и запуска бетатрона на 50 Мэв в КГУ, проведенных в соответствии с основными положениями диссертации. Получена высокая интенсивность излучения - 800 Р/мин/м^{4,8/}. Исследования магнитного поля на этом бетатроне дали ряд оригинальных результатов^{9,13/}, среди которых следует особо отметить выявление возможности коррекции γ_{ϕ} с помощью стальных деталей, установленных в поле рассеяния.

Глава V посвящена исследованию методов коррекции магнитного поля бетатрона. Разработаны эффективные методы коррекции, которые практически применены в бетатронах и позволили повснять их интенсивность излу-

ния^{15/}. Большое внимание уделено коррекции амплитудной неоднородности^{16,12/}, которая в силу ряда причин мало исследована, несмотря на то, что в бетатроне двухярменной конструкции она достигает значительной величины, как правило, имеет несимметричный характер относительно оси ординат и снижает интенсивность излучения. В разложении γ_{α} , вследствие ряда технологических причин, имеется значительная синусная составляющая I гармоники. Определена зависимость γ_{α} от величины выравнивающего перекося магнитной системы, создаваемого с целью компенсации I гармоники. Перекос осуществляется изменением воздушных зазоров между колоннами на определенную величину S . Выведена формула для определения максимального изменения амплитудной неоднородности $\Delta \gamma_{\alpha \max}$ на азимутах 90 и 270° X).

$$\Delta \gamma_{\alpha \max} = \left[1 + \frac{2(\tau_{нар} + b_{ок})}{z_0} \cdot \frac{R_{M \text{ м/кол}}}{R_{мо}} \cdot \frac{H_{м/кол}}{H_0} \right] \frac{2 z_0 S}{h_{0(\phi)} (\tau_{нар} + b_{ок})} 100\% \quad (9)$$

где $\tau_{нар}$ - наружный радиус полюса, $b_{ок}$ - ширина "окна", $h_{0(\phi)}$ - размер воздушного зазора между полюсами на z_0 на азимуте 0 или 180°, $R_{мо}$ и $R_{M \text{ м/кол}}$ - магнитные сопротивления воздушных зазоров между полюсами и между колоннами, H_0 и $H_{м/кол}$ - напряженности поля в этих зазорах. Формула (9) выведена на основе учета геометрических размеров, магнитных сопротивлений и напряженностей поля в воздушных зазорах и может быть записана в виде:

$$\Delta \gamma_{\alpha \max} = (1 + K) \Delta \gamma_{\alpha' \max} \quad (10)$$

где коэффициент

$$K = \frac{2(\tau_{нар} + b_{ок})}{z_0} \cdot \frac{R_{M \text{ м/кол}}}{R_{мо}} \cdot \frac{H_{м/кол}}{H_0} \quad (11)$$

определяет влияние изменения зазоров между колоннами, а множитель

$$\Delta \gamma_{\alpha' \max} = \frac{2 z_0 S}{h_{0(\phi)} (\tau_{нар} + b_{ок})} 100\% \quad (12)$$

определяет влияние изменения зазора между полюсами при перекося. Выведенные формулы позволяют заранее рассчитать требуемую величину изменения воздушных зазоров, что существенно облегчает снижение амплитудной

X) Отсчет азимутальных углов производится со стороны облучаемого объекта в направлении вращения ускоряемых электронов.

неоднородности. Так, подсчитано, что для коррекции величины $\Delta\chi_{\alpha, \max}$ равной 1%, необходимо осуществить перекоо магнитной системы бетатрона на 50 Мэв типа Б-50/50 на 0,88 мм, бетатрона 25 Мэв типа Б5М-25 на 0,52 мм и бетатрона на 15 Мэв типа Б-15/4,5 на 0,89 мм. Теоретические данные хорошо совпадают с экспериментальными. Примером такой коррекции χ_{α} служит её настройка на бетатроне 15 Мэв, где χ_{α} составляла 4,4%, что значительно превышает установленные допуски, а интенсивность излучения всего 55% от номинальной. Проведенная коррекция позволила повысить интенсивность до проектного значения и ввести бетатрон в эксплуатацию.

Для коррекции II гармоники кривой χ_{α} , вызванной несимметричностью магнитной системы, нами испробован ряд способов. Наилучшие результаты дает применение ступенчатой формы сечения магнитопровода с небольшим количеством ступенек в сочетании с так называемыми "магнитными пунтами стька", впервые примененными на бетатроне. Шунты устанавливаются с наружной стороны колонн в тех зонах, где плотность магнитного потока наибольшая. Их применение выравнивает распределение плотности потока по сечению магнитопровода. Исследование ступенчатого сечения показывает, что в бетатроне двухъярмной конструкции наиболее рационально применять сечение с небольшим количеством ступенек. Внедренная на серийных бетатронах Б5М-25 и Б5Д-25 трехступенчатая форма сечения позволила снизить амплитудную неоднородность с 2,5-3 до 1-1,5%, фазовую неоднородность в 2-2,5 раза и повысить интенсивность излучения на 20-30%.

Разработан вопрос о коррекции синусных составляющих гармоник разложения фазовой неоднородности в ряд Фурье, регулировка которых на бетатроне двухъярмной конструкции практически отсутствовала. В качестве одного из методов предлагается производить поворот полюсов, что позволяет экспериментально подобрать наилучшую фазовую структуру поля. На бетатроне 25 Мэв типа Б-4 поворот позволил снизить синусную составляющую с 0,75 до 0,45 мВ и повысить интенсивность излучения на 2%. Проведен расчет действия цепей, корректирующих фазовую неоднородность,

установленных в воздушных зазорах между полюсами и ярмами и также позволяющих воздействовать на синусные составляющие. Эта установка, однако, связана с увеличением воздушных зазоров, что приводит к повышению требуемой намагничивающей силы и к дополнительному нагреву электромагнита. Разработана схема замещения магнитной цепи бетатрона, по которой возможно проводить предварительное определение минимальных ампервитков корректирующих обмоток. Это позволяет свести до минимума необходимое увеличение воздушных зазоров и успешно использовать данный метод коррекции. Перспективным путем снижения χ_{ϕ} является также предложенное применение выравнивающих полюсов, устанавливаемых между ярмами и полюсными наконечниками. Полюса собраны из стальных пластин, располагаемых параллельно вертикальной плоскости, проходящей через азимуты 0 и 180°.

Проведен анализ применяемых методов коррекции коэффициента n в момент инжекции и предложен оригинальный метод коррекции n в районе инжектора n' . Коррекция осуществляется с помощью рамки, по форме близкой к прямоугольной, располагаемой на радиусах, превышающих r_0 . Для определения распределения напряженности поля, создаваемого рамкой H_p в средней геометрической плоскости воздушного зазора на окружности её "среднего" радиуса, выведена формула

$$H_p = - \frac{4\pi J w}{h_{z_p}} \cdot \left[\operatorname{th} \frac{\pi}{h_{z_p}} \left(x + \frac{\lambda}{2} \right) - \operatorname{th} \frac{\pi}{h_{z_p}} \left(x - \frac{\lambda}{2} \right) \right], \quad (13)$$

где w - число витков одной из двух секций рамки, расположенных на верхней и нижней сторонах ускорительной камеры, J - ток в витках, λ - расстояние между крайними витками, h_{z_p} - воздушный зазор на окружности "среднего" радиуса рамки. Метод способствует повышению интенсивности излучения. Так, он позволил повысить интенсивность излучения бетатрона на 50 Мэв типа Б-50/50 на 20%.

В В О Д Н

1. Исследована зависимость интенсивности излучения бетатрона от параметров его магнитного поля и определено влияние различных факторов на структуру поля и на интенсивность излучения.

2. На основе проведенного теоретического анализа изменения структуры поля на протяжении цикла ускорения разработан метод аналитического исследования параметров поля путем введения в уравнения зависимости параметров от времени. Разработана методика расчета параметров поля на протяжении всего цикла ускорения. Проведен расчет γ_0 бетатрона на 25 МэВ на протяжении всего цикла ускорения с применением ЭВМ. Определено влияние изменения структуры магнитного поля, приводящего к снижению γ_0 в начале цикла ускорения, на процесс захвата электронов в ускорение.

3. Показано, что в известных пределах возможно допустить насыщение стали в центральной части электромагнита бетатрона и при этом настроить поле так, чтобы избежать снижения интенсивности. Это позволяет, например на бетатроне 25 МэВ повысить на 18% энергию излучения при том же весе электромагнита или при сохранении той же энергии снизить на 21% вес и улучшить технико-экономические показатели установки.

4. Показана необходимость измерения параметров поля на протяжении всего цикла ускорения и целесообразность изменения и дополнения принятой на бетатроне методики измерений. Проведены измерения на протяжении всего цикла ускорения на серийном бетатроне на 25 МэВ и на бетатроне 50 МэВ. Исследованы теоретически важные вопросы о влиянии краевых эффектов на размер рабочей области на слабофокусирующих ускорителях разных энергий и о закономерностях изменения размеров рабочей области бетатрона на протяжении цикла ускорения. Показан несимметричный характер этого изменения.

5. Проведен анализ методов измерений параметров поля бетатрона. Даны практические рекомендации по методике и технике измерений, касающиеся повышения точности измерений γ_0 , сравнения неоднородностей поля, измеренных разными методами, расположения запускающего датчика и др.

6. Исследована зависимость γ_0 от размера воздушного зазора в бетатронах разных типов и энергий, а также зависимость интенсивности излу-

чения от γ_0 . Впервые поставлен вопрос о критичности интенсивности к γ_0 при различных конфигурациях воздушного зазора и о необходимости её исследования. Выбор оптимальной формы воздушного зазора позволяет снизить эту критичность, что облегчает наладку и эксплуатацию бетатрона.

7. Определено влияние различных факторов на структуру поля путем моделирования межполюсного пространства. Впервые проведено математическое моделирование насыщенной магнитной цепи бетатрона на электропроводящей бумаге, позволившее учесть зависимость $\mu = f(B)$ в стали; проведено моделирование в электролитической ванне, которое позволило определить влияние обмоток на структуру поля и провести измерения внутри зоны, где $\delta \neq 0$; выяснены дополнительные возможности моделирования на "плоских" физических моделях при использовании средних статистических данных, полученных на действующих установках.

8. Проведен расчет магнитного поля бетатрона численным методом на ЭВМ БЭСМ-6. Расчет позволил с высокой точностью проверить оптимальность конфигурации межполюсного пространства, а также правильность учета влияния различных факторов на структуру поля. Обоснована необходимость применения численного метода для расчета поля бетатрона.

9. Предложен и применен для выбора оптимальной формы магнитной системы и для проверки результатов расчета и моделирования метод обработки элементов конструкции "под пучком" при максимальной интенсивности излучения. Одним из результатов использования этого метода является определение оптимальной формы центральной части воздушного зазора, позволившее отказаться от применения блока вкладки на серийных бетатронах.

10. Разработаны эффективные и приемлемые для производства методы коррекции характеристик магнитного поля, позволившие повысить интенсивность излучения: предварительная настройка равновесной орбиты в погонные, рассчитанное по разработанной методике; метод коррекции коэффициента λ в момент инжекции в районе инжектора; различные методы коррекции неоднородностей поля, предусматривающие применение выравнивающих по-

люсов, "магнитных шунтов стыка", поворота полюсов, перекоса магнитной системы на заранее рассчитанную по введенным соотношениям величину и др. Введена зависимость амплитудной неоднородности от размеров и параметров воздушных зазоров, что облегчает её коррекцию. Разработан вопрос о коррекции синусных составляющих гармоник разложения кривой фазовой неоднородности, регулировка которых в бетатроне практически отсутствовала.

11. Разработана система допусков на изготовление электромагнита бетатрона и на устройства для измерений его магнитного поля.

12. Результаты проведенных исследований практически применены на ряде бетатронных установок, успешно эксплуатируемых в настоящее время, на которых получена высокая интенсивность излучения. Среди последних можно особо отметить бетатрон на 50 Мэв в Киевском государственном университете, запущенный в короткий срок, и бетатрон на 25 Мэв в Венгрии.

Значительная часть результатов исследований, физического и математического моделирования, выполненных в диссертации, использована также при проектировании серийных бетатронов типа Б5М-25, Б5Д-25 и Б1М-45.

Материалы диссертации доложены на УП Межвузовской конференции по электронным ускорителям (Томск, 1968), Всесоюзном совещании по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине (Ленинград, 1971), заседании Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики АН СССР (Москва, 1970), У Международном симпозиуме по бетатронам в Румынии (Бухарест, 1971), Всесоюзной научной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" (Томск, 1972) и опубликованы в работах:

1. М.Р.Александровский. К расчету межполюсного пространства электромагнита бетатрона. Атомная энергия, 32, вып.5, 404, 1972.
2. В.В.Гельперин, М.Р.Александровский, А.С.Валаев, Л.А.Фукс. Влияние формы центральной части воздушного зазора на интенсивность излучения в бетатроне 25 Мэв. Электронные ускорители, Атомиздат, 46-50, 1970.
3. В.В.Гельперин, М.Р.Александровский, Л.А.Фукс. Определение оптималь-

ного радиуса равновесной орбиты бетатрона с целью получения максимальной интенсивности излучения. ПТЭ, 1, 215-216, 1968.

4. М.Р.Александровский, В.В.Гельперин, Д.В.Коровкин, В.И.Прокопчук, В.И.Стрижак. Бетатрон на 50 Мэв. Труды Всесоюзного совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Ленинград, 52, 1-19, 1971.
5. М.Р.Александровский. Исследование и расчет методов коррекции неоднородностей магнитного поля бетатрона двухъярменной конструкции. Тезисы докладов Научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики АН СССР. Энергетический институт им. Г.М.Кржижановского, Москва, 22-23, 1970.
6. М.Р.Александровский. Коррекция амплитудной неоднородности магнитного поля бетатрона. ПТЭ, 3, 18-20, 1972.
7. М.Р.Александровский. Способ повышения интенсивности излучения бетатрона. Авторское свидетельство № 315315. Виллетень изобретений 28, 228, 1971.
8. М.Р.Александровский, В.И.Прокопчук, Д.А.Седов, В.И.Стрижак. Бетатрон на 50 Мэв для исследовательских целей. Труды У Международного симпозиума по бетатронам в Румынии. Бухарест, 1971.
9. М.Р.Александровский, В.И.Прокопчук, Д.А.Седов, В.И.Стрижак. Особенности коррекции поля на бетатроне 50 Мэв. Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Изд. ТГУ, Томск, 19, 1972.
10. М.Р.Александровский, В.Ф.Вабенко. Расчет магнитного поля бетатрона. Там же, 20.
11. М.Р.Александровский. Методика расчета радиуса равновесной орбиты бетатрона на протяжении всего цикла ускорения. Там же, 21.
12. М.Р.Александровский. Методы коррекции амплитудной неоднородности магнитного поля бетатрона двухъярменной конструкции. Там же, 21-22.

13. В. И. Прокопчук, Д. А. Седов, В. И. Стрижак, М. Р. Александровский, В. В. Гельперин. Ветатрон на 50 Мэв для физических исследований. ПТЭ, 1, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 октября 1972 года.