

К ВОПРОСУ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ИНЖЕКТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ БЕТАТРОНА

К. С. ГРИШИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

В практике конструирования, настройки и эксплуатации бетатронов, магнитное поле которых имеет фазовую и статическую неоднородности, возникает целый ряд весьма важных вопросов, от правильного решения которых зависит успешная работа бетатрона.

Многие из них обычно сводятся к следующим:

1. Каковы истинные условия для движения электронов и какова действительная ширина рабочей зоны, в которой происходит ускорение электронов в магнитном поле с данными характеристиками?

2. Как определить место наиболее выгодного расположения инжектора для получения максимальной интенсивности излучения?

3. Какова должна быть величина напряжения инжекции, то есть какова должна быть фаза начала инжекции, чтобы обеспечить успешную работу бетатрона?

4. Какая структура магнитного поля является наиболее желательной и какие меры должны быть приняты к улучшению структуры данного поля для того, чтобы добиться максимального выхода лучей от бетатрона.

Ответ на подобные вопросы может быть получен в результате всестороннего тщательного исследования магнитного поля?

Исследование магнитного поля включает в себя, прежде всего, необходимый комплекс измерений, связанных с определением величины радиуса равновесной орбиты r_0 и с приведением его в соответствие с расчетной величиной. Далее следуют измерения амплитудных значений $B_{cp\ m}$ и B_m и выясняется зависимость $B_{cp\ m} = f(r)$ и $B_m = f(r)$. Затем проводятся измерения по определению азимутальной статической неоднородности магнитного поля на различных радиусах и определяется общая статическая структура поля в плоскости орбиты; наконец, следуют измерения по определению фазовой структуры поля.

Фазовая неоднородность оценивается относительно магнитного поля в какой-либо точке междуполюсного пространства бетатрона. Так как большинство из перечисленных вопросов относится к периоду инжекции, то для решения их необходимо знать мгновенную картину поля в различные моменты времени его нарастания. Прежде всего, необходимо исследовать вопрос о том, всегда ли и во всех ли точках междуполюсного пространства

соблюдаются те основные условия, которые необходимы для устойчивого ускорения электронов (это относится, главным образом, к величине n), т. е. всегда ли и везде ли соблюдается условие $0 < n < 1$? Действительно, если, начиная с некоторого момента времени ускорения электронов, магнитное поле на их пути станет таким, что $n < 0$ или $n > 1$, то электроны выйдут из устойчивого режима ускорения и будут потеряны.

При синфазном изменении магнитного поля бетатрона, для которого n не является величиной постоянной по радиусу, можно с достаточной точностью для отдельных малых участков между точками a и b кривой $B_m = f(r)$ считать справедливым соотношение

$$\frac{B_{ma}}{B_{mb}} = \left(\frac{r_b}{r_a} \right)^{n_{a-b}}, \quad (1)$$

где B_{ma} и B_{mb} — амплитудные значения поля в точках a и b , расположенных соответственно на радиусах r_a и r_b на данном азимуте θ .

Если $r_a - r_b \rightarrow 0$, то в пределах данного участка можно считать $n_{a-b} = \text{const}$.

Если известна зависимость $B_m = f(r)$ в виде экспериментальной кривой, то при синфазном изменении поля всегда для любой точки, расположенной на радиусе $r = \frac{r_a + r_b}{2}$, можно величину n подсчитать из выражения

$$n_{ma-b} = \frac{\lg \left(\frac{B_{ma}}{B_{mb}} \right)}{\lg \left(\frac{r_b}{r_a} \right)}, \quad (2)$$

и по точкам построить график $n = f(r)$. Не трудно показать, что мгновенные значения n в этом случае будут равны соответственно значениям n_m , подсчитанным для амплитудных значений B . В самом деле, для мгновенных значений можно записать

$$n_{a-b} = \frac{\lg \left(\frac{B_a}{B_b} \right)}{\lg \left(\frac{r_b}{r_a} \right)} = \frac{\lg \left(\frac{B_{ma} \cdot \sin \varphi}{B_{mb} \cdot \sin \varphi} \right)}{\lg \left(\frac{r_b}{r_a} \right)} = n_{ma-b}, \quad (3)$$

то есть $n_{a-b} = f(r) = n_{ma-b}$.

Если в одной из точек, лежащих в плоскости орбиты, принятой за основную точку поля, известна амплитуда напряженности поля B_m и статическая неоднородность поля ΔB_a в некоторой другой точке a относительно основной точки, то амплитуда поля B_{ma} в точке a может быть найдена как

$$B_{ma} = B_m + \Delta B_a.$$

В свою очередь, $\Delta B_a = \Delta B_{ra} + \Delta B_{\theta a}$, где ΔB_{ra} и $\Delta B_{\theta a}$ радиальная и азимутальная составляющие статической неоднородности поля в точке a относительно поля в основной точке. Так как в результате измерений всегда можно получить для основного азимута, на котором расположена основная точка, экспериментальную зависимость $B_{mr} = f(r)$, то амплитуда поля в точке a может быть подсчитана, как

$$B_{ma} = B_{mra} + \Delta B_{\theta a}, \quad (4)$$

где $B_{mra} = B_m + \Delta B_{ra}$ — амплитуда поля на основном азимуте в точке $r = r_a$.

При наличии статической неоднородности магнитного поля зависимость $n = f(r)$ для каждого азимута будет в общем случае различна, но в течение времени нарастания поля величина n в любой точке поля остается постоянной, и зависимость $n = f(r)$ для любого азимута будет неизменной.

Рассмотрим более общий случай, когда магнитное поле бетатрона имеет и статическую и фазовую неоднородности. Таким полем является поле реальных бетатронов.

Фазовая неоднородность поля в любой точке междуполюсного пространства всегда может быть измерена относительно поля в основной точке¹).

Если за начало отсчета времени принять момент прохождения полем нулевого значения в основной точке, то мгновенные значения поля в точке a можно подсчитать из выражения

$$B_a = B_{ma} \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_a), \quad (5)$$

где φ — фаза, соответствующая времени t нарастания поля в основной точке; $\Delta\varphi_a$ — фазовая неоднородность поля в точке a относительно поля в основной точке.

Аналогично для рассматриваемой ранее точки b имеем

$$B_b = B_{mb} \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_b).$$

Мгновенное значение n в интервале r_a — r_b между точками a и b в этом случае можно найти из выражения

$$n_{a-b} = \frac{\lg\left(\frac{B_a}{B_b}\right) - \lg\left[\frac{B_{ma} \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_a)}{B_{mb} \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_b)}\right]}{\lg\left(\frac{r_b}{r_a}\right) - \lg\left(\frac{r_b}{r_a}\right)}. \quad (6)$$

Не трудно заметить, что при наличии фазовой неоднородности магнитного поля величина n с течением времени непрерывно меняется. Это изменение особенно велико в начале нарастания магнитного поля, когда φ мало. Закономерность изменения n сильно зависит от величины и характера фазовой неоднородности.

Чтобы уяснить смысл уравнения (6) и оценить важность вытекающих из него общих выводов, полезно рассмотреть пример его использования для анализа магнитного поля конкретного бетатрона. В качестве такого бетатрона был использован бетатрон на 5 Мэв, возбуждаемый током промышленной частоты. Этот бетатрон имел $n = 2/3$, $r_0 = 9,5$ см, диаметр полюсов 25 см, диаметр центрального вкладыша 9 см.

На рис. 1 представлены результаты измерения амплитудных значений B_{cp} и B после установки орбиты на расчетный радиус. Измерения проведены в плоскости орбиты на азимуте 0° , принятом за основной. Здесь же приведены графики потенциальной функции $V_{\text{м}} \doteq \left(\frac{B_{cp}}{2} \cdot r\right)^2$ и $n = f(r)$, построенные на основе этих данных $B_{cp} = f(r)$ и $B = f(r)$ без учета радиальной фазовой неоднородности.

Наклон потенциальной кривой $V_{\text{м}} = f(r)$ дает величину и направление силы, действующей на электрон в данной точке при его колебаниях относительно равновесной орбиты. Электроны могут совершать колебания

¹) Для удобства использования результатов исследования за основную точку выгодно принимать точку предполагаемого размещения инжектора. Если основная точка не будет совпадать с точкой расположения инжектора, то необходимо провести пересчет времени так, чтобы в точке расположения инжектора иметь $t = 0$, когда в ней $B = 0$.

только при условии равенства их потенциальных энергий в точках максимальных отклонений от равновесной орбиты. Если исходить только из этого положения, то, пользуясь графиком $V_m = f(r)$, зона максимально допустимых амплитуд колебаний электронов (рабочая зона) может быть определена радиусами $r_{min} = 6,3$ и $r_{max} = 12,4$ см, где $V_m = V_{m\max}$. Естественно, что инжектор можно размещать только в пределах этой зоны. Однако, если обратиться к кривой $n = f(r)$, то зона дозволённых амплитуд колебаний (соответственно - зона возможных точек расположения инжектора) ограничивается радиусами $r_{min} = 6,2$ см, где $n = 0$ и $r_{max} = 11,7$, где $n = 1$.

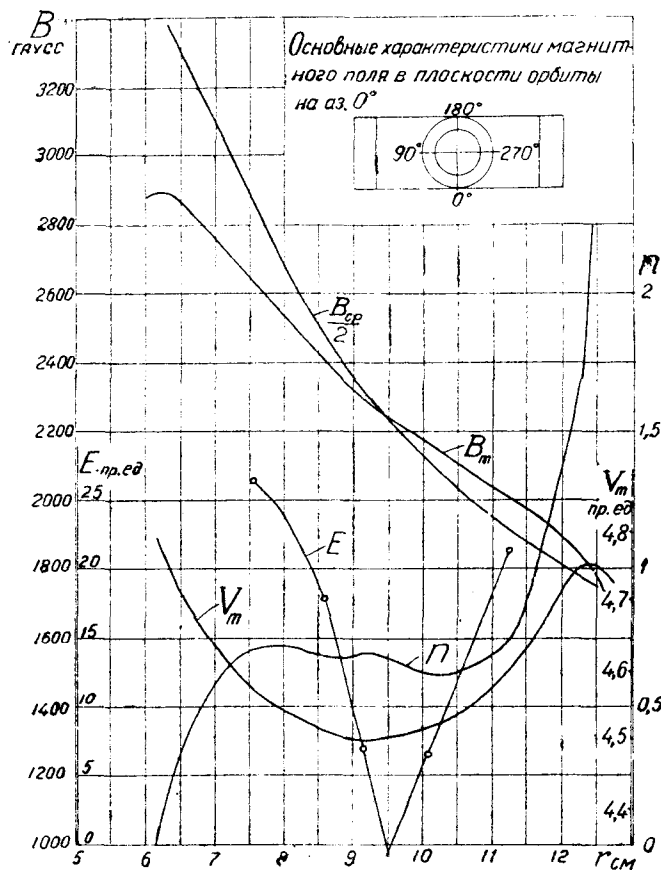


Рис. 1

Следует учесть, что $B_{cp} = f(r)$, из которой подсчитывалось V_m , является некоторой усредненной величиной, измеренной без учета фазовой и статической неоднородностей. Истинное значение V_m является функцией времени и зависит от степени фазовой и статической неоднородностей, а также от различия закона возрастания магнитного поля во времени в различных точках междуполюсного пространства бетатрона. Следует также иметь в виду, что n подсчитано с теми же допущениями. Поэтому ширина рабочей зоны (границы дозволённых колебаний электронов), определенная из этих графиков, является приблизительной и лишь в некоторой степени соответствует истинной ее величине в конце ускорения электронов.

Для определения истинных границ рабочей зоны были проведены измерения по определению статической и фазовой структуры магнитного поля. На рис. 2 представлены результаты измерения азимутальной статической неоднородности магнитного поля в плоскости орбиты относительно поля на основном азимуте (0°) и соответствующем радиусе. Амплитудные значения поля на азимуте 0° представлены в таблице на том же рисунке.

Для определения амплитуды магнитного поля в какой-либо точке плоскости орбиты достаточно к амплитуде поля на азимуте 0° и том же радиусе алгебраически прибавить величину статической неоднородности поля, найденную по графику рис. 2 для этой точки. Следует заметить, что статическая структура магнитного поля бетатрона в период нарастания магнитного поля остается подобной, а абсолютная статическая неоднородность в любой точке пропорциональна мгновенному значению поля.

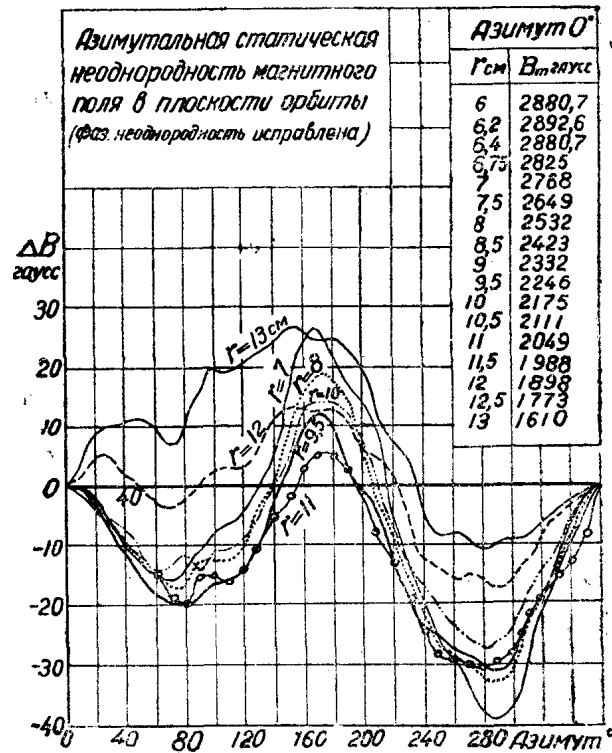


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты измерения фазовой неоднородности магнитного поля исследуемого бетатрона в плоскости орбиты. Разность фаз в азимутальном и радиальном направлениях оценивалась в микросекундах относительно фазы поля в точке расположения контрольного пикера. Если за основную принять точку, расположенную в плоскости орбиты на азимуте 0° и радиусе 10 см, то для определения фазовой неоднородности можно пользоваться шкалой, нанесенной на рис. 3.

На рис. 4 представлена фазовая структура магнитного поля того же бетатрона после исправления азимутальной фазовой неоднородности при помощи системы короткозамкнутых витков, охватывающих отдельные пакеты стоек электромагнита. Радиальная фазовая неоднородность в этом случае осталась почти без изменения в то время, как азимутальная неоднородность уменьшилась в 7,5 раз. Кроме того, переход от фазовой структуры (рис. 3) к структуре поля (рис. 4) почти не сказался на абсолютной величине в общем характере статической структуры магнитного поля. В обоих случаях данные рис. 1 и 2 практически остались неизменными. Всех вышеприведенных опытных данных достаточно для исследования структуры магнитного поля в плоскости орбиты в любой момент времени его нарастания. Для некоторых характерных азимутов, на которых мы желаем определить мгновенные значения n , полезно построить график $\Delta\varphi = f(r)$. Такой график, построенный по данным рис. 3 для азимута 0° и 90° , приведен на рис. 5.

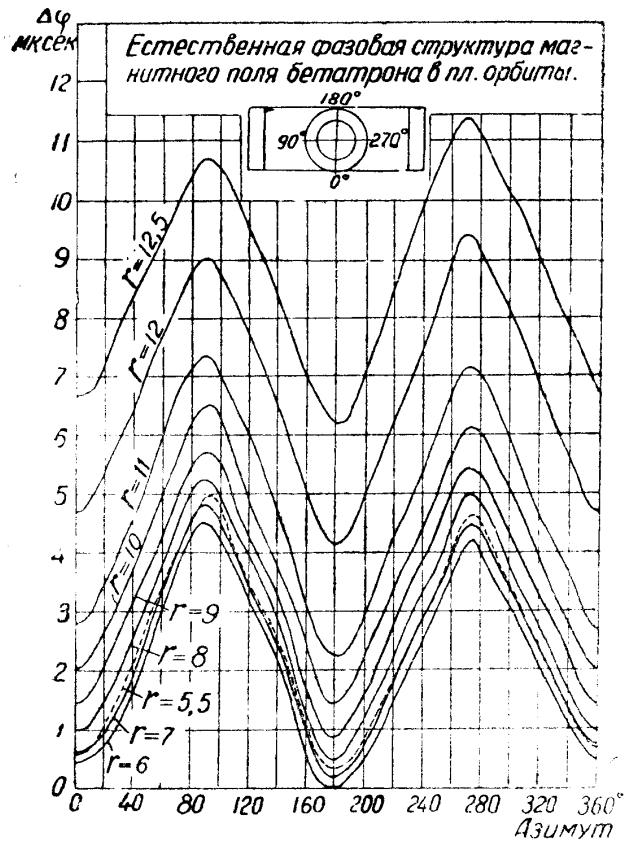


Рис. 3

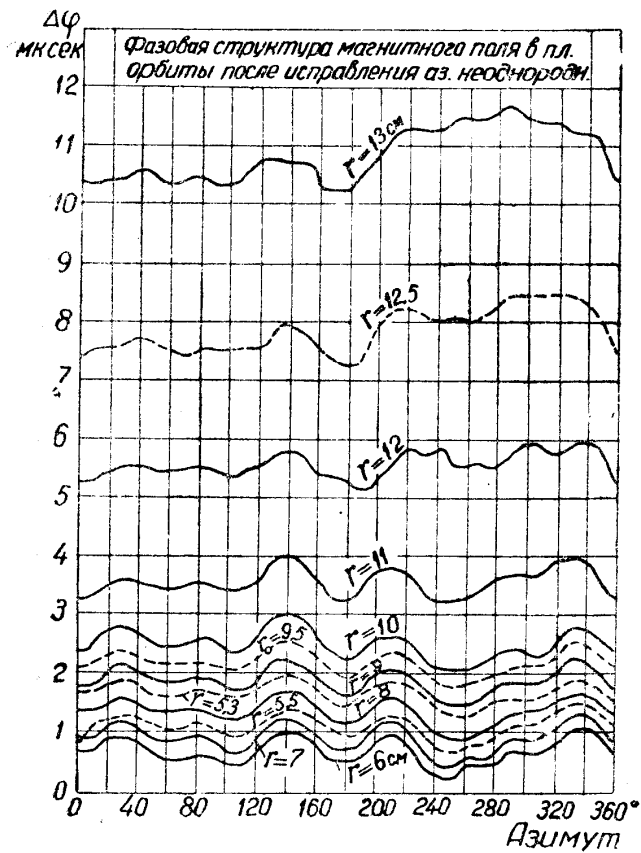


Рис. 4

На рис. 6 представлены мгновенные значения магнитного поля на азимуте 0° , подсчитанные по выражению (5) для различных моментов времени t . Для малых значений t можно заметить значительное отступление от

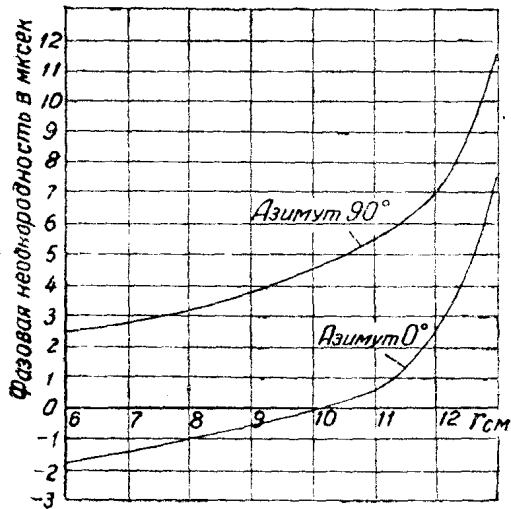


Рис. 5

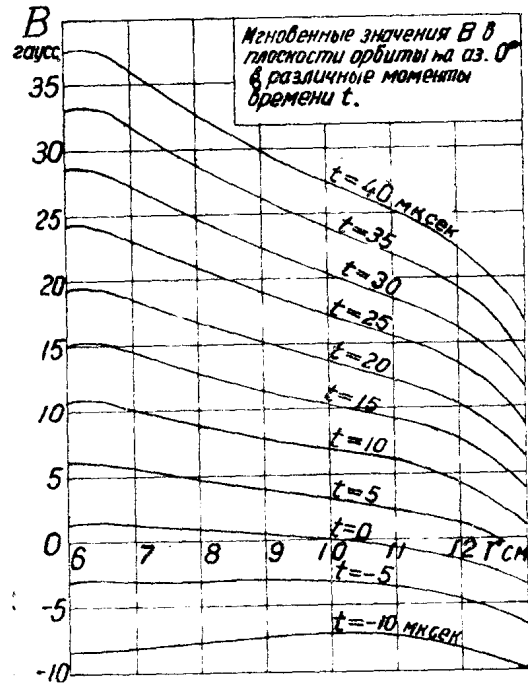


Рис. 6

необходимого закона $B = f(r)$. Это отклонение особенно велико для $t = 0$ и $t < 0$.

На рис. 7 и 8 приведены мгновенные значения n для различных моментов времени t , подсчитанные по формуле (6) для азимута 0 и 90° с

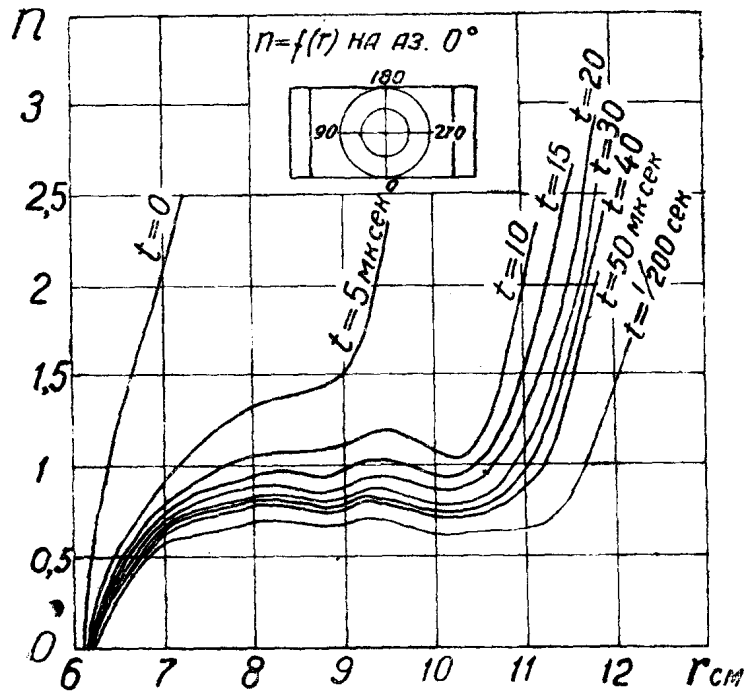


Рис. 7

использованием данных графиков рис. 1, 2 и 5. Здесь же приведены значения $n=f(r)$, подсчитанные для $t=1/200$ сек, т. е. для момента, когда магнитное поле в основной точке имеет амплитудное значение. Расчет n проводился для точек, отстоящих друг от друга на расстоянии 5 мм ($r_1-r_2=5$ мм).

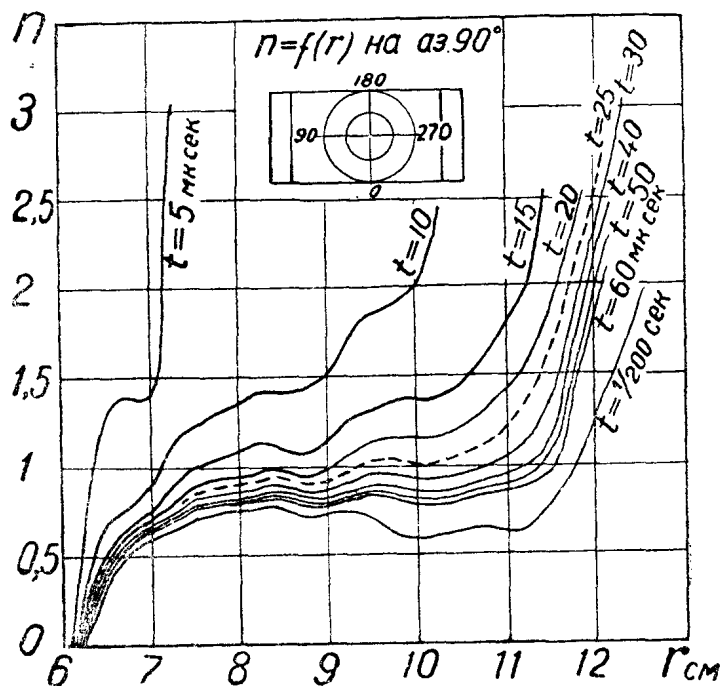


Рис. 8

Некоторая волнистость кривых $n=f(r)$ для азимута 0 объясняется характером радиальной статической структуры магнитного поля на данном азимуте. Это ясно видно на кривой для $t=1/200$ сек, построенной при амплитудном значении магнитного поля, когда фазовая неоднородность становится мало ощутимой; наиболее убедительно это показано также графиком $n=f(r)$ рис. 2, построенным вообще без учета фазовой неоднородности. Для азимута 90° эта волнистость усилена за счет азимутальной статической неоднородности.

При $r < 6$ см для любого момента времени t величина $n < 0$ вследствие того, что в медианной плоскости исследуемого бетатрона отсутствуют центральный зазор и силовые линии магнитного поля в зоне непосредственно примыкающей к центральному вкладышу, направлены выпуклостью к центру междуполюсного пространства.

Определение ширины рабочей зоны

Анализируя рис. 7 и 8, можно видеть, что при наличии фазовой неоднородности магнитного поля в течение его нарастания величина n не остается постоянной, как это мы наблюдаем для синфазно меняющегося поля при наличии только статической неоднородности, а непрерывно меняется. Это изменение особенно велико в начале нарастания магнитного поля, когда фазовая неоднородность имеет наибольшее влияние на структуру поля.

Например, на азимуте 0° (рис. 7) кривая мгновенных значений n в момент $t=0$ поднимается настолько круто, что на радиусе 6,4 см она уже переходит в область $n > 1$. При $t=5$ мксек крутизна ее значительно

уменьшается; в последующие моменты времени она начинает быстро приближаться к кривой, построенной для амплитудных значений напряженности B . Для азимута 90° (рис. 8) кривые мгновенных значений $n = f(r)$ с течением времени изменяются с еще большей скоростью.

Интересно проследить за изменением ширины рабочей зоны (где $0 < n < 1$) и за абсолютной величиной мгновенных значений n в течение времени нарастания магнитного поля. На азимуте 0° ширина рабочей зоны при $t = 0$ ограничивается радиусами $r_{min} = 6,06$ и $r_{max} = 6,4$ см, т. е. равна всего лишь $0,34$ см, а величина n внутри этого интервала меняется в зависимости от r почти линейно. При $t = 5$ мксек рабочая зона расширяется до $1,65$ см, ограничиваясь радиусами $r_{min} = 6,1$ и $r_{max} = 7,75$ см, а величина n внутри этой зоны возрастает сначала быстро, а затем более медленно. При $t = 15$ мксек, вследствие волнистого характера кривых $n = f(r)$, существует две зоны, в которых $0 < n < 1$; одна находится в пределах радиусов $r_{min} = 6,15$ см и $r_{max} = 9,1$; в ней n изменяется от 0 до 1. Вторая ограничена радиусами $r_{min} = 9,6$ и $r_{max} = 10,4$ см, в ней n изменяется от 1 до 1. Наличие таких двух зон обязано своим существованием характеру статической неоднородности магнитного поля. При $t = 15,25$ мксек обе эти зоны сливаются в одну; величина n с увеличением радиуса возрастает сначала быстро, а затем более медленно, оставаясь в интервале радиусов $8 - 10,5$ см близкой к единице. В течение дальнейшего времени возрастания поля рабочая зона продолжает расширяться, но уже значительно медленнее, а величина n внутри этой зоны все более уменьшается, постепенно приближаясь к значениям n для амплитудных B . Напомним, что все эти изменения n происходят за счет радиальной фазовой неоднородности магнитного поля.

На азимуте 90° изменения n и ширины рабочей зоны происходят в общем по тому же закону, однако наличие азимутальной фазовой неоднородности приводит к соответствующему смещению отдельных фаз процесса во времени.

Графики, подобные тем, какие приведены на рис. 7 и 8, построенные для других азимутов, необходимы для подробного анализа условий движения электронов в различные моменты времени ускорения. Для более общего анализа этих условий полезно на основе таких графиков построить зависимость $r = f(t)$ при $n = 1$ и $n = 0$. Такая зависимость, построенная по данным графиков рис. 7 и 8, приведена на рис. 9. Волнистость кривых $n = 1$ является также следствием упомянутого выше характера радиальной статической неоднородности магнитного поля.

При синфазном изменении магнитного поля величина n , как мы уже отмечали, остается неизменной в течение всего времени изменения поля. Поэтому графики $n = 0$ и $n = 1$ в координатах (r, t) выразятся прямыми линиями $r = \text{const}$. В нашем случае наличие радиальной фазовой неоднородности приводит к резкой деформации кривой $n = 1$ так, что зона $n > 1$ (на рисунке заштрихована) при малых значениях t проникает далеко в область меньших радиусов, сильно сокращая ширину рабочей зоны ($0 < n < 1$).

Кривая $n = 1$ для азимута 90° еще дальше смещена в сторону больших значений t за счет азимутальной фазовой неоднородности. Азимутальная статическая неоднородность сказалась лишь на увеличении волнистости кривой. За ширину рабочей зоны магнитного поля бетатрона можно считать ширину кольцевого пространства, в любой точке которого в каждый данный момент времени величина n находится в пределах $0 < n < 1$. График рис. 9 дает возможность с достаточной точностью определить ширину и место расположения рабочей зоны бетатрона в любой момент времени начала нарастания магнитного поля. Границы этой зоны определяются пунктирными кривыми, которые являются очерковыми линиями для кри-

вых ($n=0$ и $n=1$), построенных в данном случае для азимутов 0 и 90° . Для более точного нанесения этих границ нужно построить систему кривых $r=f(t)$ при $n=1$ для нескольких наиболее характерных азимутов. Здесь следует заметить, что для построения такой системы кривых нет необходимости производить полное построение графиков, аналогичных рис. 7 и 8. Для этого достаточно, пользуясь формулой (6), вычислить n в такие моменты времени, когда n на соответствующих радиусах близко к 1; по ним построить участки кривых $n=f(r)$, пересекающих ординату $n=1$. Точки пересечения дают значения r для соответствующих t .

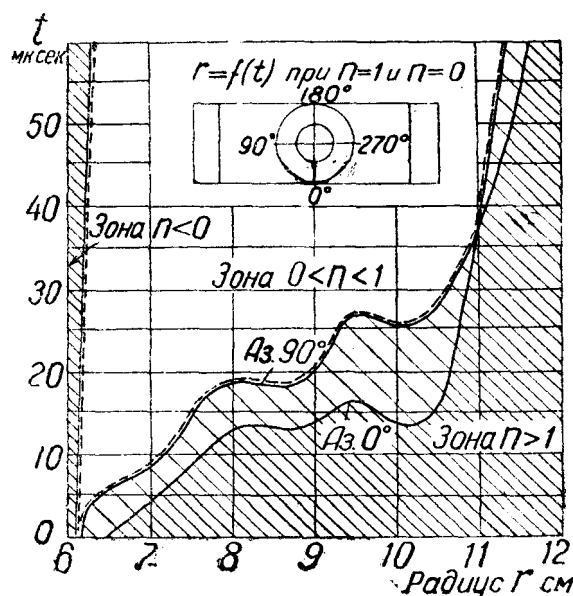


Рис. 9

При определении ширины рабочей зоны необходимо также учитывать следующее важное обстоятельство: наличие фазовой неоднородности магнитного поля приводит к тому, что радиус равновесной орбиты (r_0) в течение времени нарастания магнитного поля не остается постоянным. В самом деле, из рис. 6 можно видеть, что мгновенные значения индукции при малых t таковы, что бетатронное соотношение (2:1) может соблюдаться для точек, расположенных ближе к центру полюсов, чем это имеет место при амплитудных значениях поля. Мгновенные величины r_0 в начале нарастания магнитного поля будут меньше таковых в конце этого нарастания. Однако по мере нарастания поля мгновенные величины r_0 довольно быстро приходят в соответствие с величиной r_0 при амплитудном значении поля. Скорость этого процесса определяется скоростью уменьшения влияния фазовой неоднородности на общую структуру магнитного поля бетатрона.

Если конструкция бетатрона такова, что в медианной плоскости между центральными вкладышами (галетами) полюсов имеется воздушный зазор, то отклонения мгновенных значений r_0 от установившегося радиуса равновесной орбиты будут незначительными. Кроме того, зависимость $r=f(t)$ для $n=1$ в этом случае будет иметь вид U-образной кривой с минимумом, лежащим в области мгновенных значений r_0 . Как мы увидим дальше, в этом случае инжектор можно располагать в плоскости орбиты как внутри, так и вне круга орбиты радиуса r_0 (то есть $r_i < r_0$ или $r_i > r_0$).

Выбор места расположения инжектора и определение минимально необходимого напряжения инжекции

Выбор места расположения инжектора должен производиться на основе результатов детального анализа структуры магнитного поля, особенно в период инжекции, с учетом конструктивных особенностей электромагнита и камеры бетатрона. При этом нужно учитывать, что для улучшения условий обхода инжектора электронами при первых оборотах по орбите необходимо инжектор удалять от равновесной орбиты как можно дальше, т. е. величину $\Delta r = r_i - r_0$ иметь как можно большей. Инжектор следует располагать в магнитном поле бетатрона только в пределах его рабочей зоны. Наивыгоднейшим местом расположения инжектора является такая точка этой зоны, в которой в момент начала инжекции величина n имеет наибольшее значение ($n \approx 1$).

Обратимся вновь к графику рис. 9. Из рисунка видно, что внутренняя граница рабочей зоны определяется значениями $n = 0$. Исходя из последних соображений, устанавливать инжектор на $r_i < r_0$ не выгодно. Наиболее целесообразно размещать инжектор в какой-либо точке внешней границы рабочей зоны, где $n \approx 1$ на $r_i > r_0$, и производить внешнюю, в отношении равновесной орбиты, инжекцию. Это выгодно еще и потому, что мгновенное значение радиуса равновесной орбиты r_{0t} в момент инжекции меньше r_0 и, следовательно, Δr имеет наибольшую величину. Азимут наивыгоднейшего расположения инжектора для данного r_i определяется на графике той кривой ($\theta = \text{const}$), которая в момент начала инжекции ближе всего соприкасается с границей рабочей зоны. Например, если принять радиус расположения инжектора $r_i < 11$ см, то по графику рис. 9 наивыгоднейшим азимутом будет являться азимут 90° ; если же принять $r_i > 11$ см, то инжектор выгоднее размещать на азимуте 0° . Если $r_i = 11$ см, то инжектор можно располагать на любом азимуте, исходя уже из соображений удобства. Следовательно, график рис. 9 дает возможность точно определить координаты точки наивыгоднейшего расположения инжектора в магнитном поле данной структуры.

В случае, когда в плоскости орбиты между центральными дисками полюсов имеется воздушный зазор, рабочая зона на графике ограничивается U-образной кривой $n = 1$. В этом случае инжектор можно устанавливать как внутри круга орбиты ($r_i < r_0$), так и вне его ($r_i > r_0$). Координаты точки расположения инжектора (радиус и азимут) определяются в обоих случаях аналогично только что рассмотренному случаю.

Рассматривая рис. 9 можно подметить следующее важное обстоятельство, а именно: при наличии фазовой неоднородности магнитного поля инжекцию электронов нельзя осуществить в течение некоторого времени непосредственно после прохождения по полю нулевого значения. Оказывается, существует некоторое минимальное время $t_{i \min}$ вполне определенное для данного радиуса r_i расположения инжектора; лишь спустя это время, электроны, впускаемые в бетатрон, могут быть захвачены в устойчивый режим ускорения. Например, в случае, когда инжектор будет расположен на $r_i = 10,5$ см, инжекцию можно начинать спустя $27,5$ мксек после прохождения по полю нулевого значения в контрольной точке.

Если инжекцию начать раньше этого времени, например, при t в пределах от 16 до 27 мксек, то вероятность захвата электронов в устойчивый режим ускорения почти равна нулю, так как в течение этого интервала времени на некоторых азимутах $n > 1$.

Если же инжекцию начать еще раньше ($t < 16$ мксек), то все электроны, безусловно, будут потеряны.

В случае, если инжектор будет расположен на $r_i = 11,25$ см, инжекцию нужно начинать спустя 55 мксек после момента, когда поле в контрольной точке проходит через нуль.

Так как в течение этого времени $t_{i\ min}$ индукция магнитного поля на r_i успеет возрасти до определенной величины, то электроны должны впускаться при скоростях, соответствующих этой величине индукции, т. е. инжекция должна осуществляться при соответствующем напряжении на электродах пушки. Следовательно, при наличии фазовой неоднородности магнитного поля для данного радиуса инжекции существует некоторое минимально необходимое напряжение инжекции $U_{i\ min}$. Бетатрон будет работать лишь только в том случае, если инжекцию электронов осуществлять при напряжении $U_i > U_{i\ min}$. Выбор места расположения инжектора поэтому должен производиться с учетом необходимого напряжения инжекции так, чтобы это напряжение не выходило из разумных пределов.

Следует отметить еще один важный факт. Так как фазовая неоднородность, выраженная в микросекундах, не зависит от амплитуды магнитного поля бетатрона, то с повышением амплитуды поля кривые $n = 1$ на рис. 9 будут смещаться в сторону увеличения t , расширяя запретную зону ($n > 1$). Следовательно, при повышении амплитуды магнитного поля минимальная величина напряжения инжекции, необходимая для работы бетатрона, возрастает. Соответственно понижение амплитуды магнитного поля дает возможность пользоваться более низкими напряжениями инжекции.

Эффект этого явления наблюдался на исследуемом бетатроне. При повышении амплитуды поля исследуемого бетатрона фаза начала инжекции при неизменной величине напряжения инжекции в необходимой мере уменьшалась. Интенсивность излучения при этом увеличивалась, главным образом, за счет увеличения энергии электронов. Однако такое повышение интенсивности наблюдалось лишь до известного предела, после чего интенсивность резко падала до нуля. Такое исчезновение излучения можно объяснить только тем, что зона $n > 1$ проникала в область расположения инжектора и электроны преждевременно выходили из режима ускорения вследствие рассеяния и дефокусировки пучка.

Выбор места расположения мишени

Для целей дефектоскопии весьма желательно, чтобы размеры фокального пятна рентгеновых лучей были наименьшими.

В то время, как горизонтальные размеры фокального пятна в бетатроне малы, главным образом, за счет относительно малой скорости вывода электронного пучка на мишень, вертикальные его размеры определяются высотой сечения пучка электронов в момент их удара о мишень, то есть степенью аксиальной сфокусированности пучка. Так как амплитуды аксиальных и радиальных колебаний электронов, а следовательно, размеры сечения электронного пучка в бетатроне связаны отношением $\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{1-n}{n}}$,

где a —вертикальный и b —горизонтальный размеры сечения пучка, то для уменьшения a кажется целесообразным в период вывода электронов на мишень заставить их двигаться в магнитном поле с $n \simeq 1$, а мишень устанавливать в рабочей зоне на азимуте, где поле имеет наибольшую величину n .

Координаты точки наиболее выгодного расположения мишени могут быть найдены по графику рис. 9 для соответствующего момента времени t сброса электронов на мишень. Вследствие того, что границы рабочей зоны к концу ускорения электронов расширяются, то радиус наиболее выгодного расположения мишени будет больше радиуса, на котором расположен инжектор. Азимуты точек наиболее выгодного расположения инжектора и мишени могут быть также различны. Естественно, что в этом случае мишень и инжектор должны быть расположены либо по разные стороны равновесной орбиты, либо инжектор должен быть расположен вне плос-

кости орбиты в соответствующей наивыгоднейшей точке. В последнем случае тот факт, что в момент начала инъекции величина n в области расположения инжектора имеет наибольшее значение, благоприятно сказывается на условиях обхода инжектора электронами при первых оборотах на орбите. Такое расположение инжектора, в случае необходимости, также не будет препятствовать выводу электронов из камеры бетатрона.

На практике часто мишень располагают на тыльной стенке инжектора. Если такой же инжектор установить в наивыгоднейшей точке междуполюсного пространства бетатрона, то, как это не трудно видеть из рис. 9, и для мишени азимут остается наивыгоднейшим, хотя в момент удара электронов величина n в точке ее расположения будет меньше, чем в период инъекции. При выборе места расположения мишени следует учитывать конструктивные особенности электромагнита и камеры бетатрона. Во всяком случае, мишень должна быть расположена так, чтобы конструктивные детали электромагнита не мешали свободному выходу рентгеновых лучей.

Кроме того, окончательный выбор места наивыгоднейшего расположения мишени может быть произведен только с учетом тех изменений в структуре магнитного поля, которые получаются в результате протекания импульсов тока в обмотках смещения ускоренных электронов на мишень.

Некоторые мероприятия по улучшению структуры магнитного поля

Выше мы видели, что увеличение азимутальной фазовой неоднородности приводит к смещению кривых графика рис. 9 в сторону больших значений t , то есть к увеличению минимально необходимого напряжения инъекции ($U_{i \min}$) и соответственно—к сокращению ширины рабочей зоны магнитного поля. Соответственно уменьшение азимутальной фазовой неоднородности приводит к расширению рабочей зоны и понижению минимально необходимого напряжения инъекции. Кривые $\Theta = \text{const}$ (рис. 9) для различных азимутов в этом случае снижаются до уровня нижней кривой, с которой они в конце концов сливаются. В последнем случае инжектор и мишень могут быть с одинаковым эффектом установлены на любом азимуте.

При конструировании электромагнита бетатрона и настройке его магнитного поля особое внимание должно быть уделено вопросам уменьшения радиальной фазовой неоднородности, которая, как мы в этом уже убедились, играет наиболее вредную роль в период инъекции электронов. Методы исправления азимутальной фазовой и статической неоднородности достаточно хорошо разработаны. Пользуясь этими методами, можно не только уменьшить неоднородности магнитного поля, но и так повлиять на структуру этого поля, чтобы обеспечить наилучшие условия для движения электронов в период инъекции, ускорения и вывода их на мишень. Контроль этих условий легче всего осуществлять анализируя мгновенную картину магнитного поля, как это сделано в настоящей работе.

В заключение следует указать, что присутствие в магнитном поле таких деталей, как вакуумная камера, в проводящем слое стенок которой могут наводиться вихревые токи значительной величины, проводники смещающей обмотки и конструкция инжектора, вносит искажение в структуру магнитного поля. Поэтому при исследовании мгновенной картины поля необходимо вводить соответствующие поправки или, что, безусловно, точнее, производить необходимые измерения в присутствии этих деталей (или их моделей) в исследуемом магнитном поле. Вихревые токи, возникающие в проводящем слое стенок вакуумной камеры бетатрона, уменьшают в период инъекции величину n . Такое уменьшение n при наличии

фазовой неоднородности должно играть положительную роль, уменьшая $U_{i\ min}$ и расширяя рабочую зону магнитного поля.

Заключение

Предлагаемый метод исследования мгновенной картины магнитного поля бетатрона дает возможность с достаточной точностью оценить условия для движения ускоряемых электронов, найти место наиболее выгодного расположения инжектора и мишени, а также определить время начала инжекции и минимально необходимое напряжение инжекции для магнитного поля конкретной структуры при данном режиме работы бетатрона.

Пользуясь этим методом можно исследовать условия работы бетатрона и при других режимах, если место расположения инжектора и мишени остается неизменным. Кроме того, анализ мгновенной структуры магнитного поля позволяет обнаружить пути ее улучшения, следуя которым можно добиться максимальной интенсивности лучей от бетатрона.

Конечно, данный метод исследования не может претендовать на универсальность, однако в сочетании с другими известными методами исследования он может глубже вскрыть истинные условия движения электронов в период инжекции и тем самым решить наиболее трудную проблему, стоящую на пути развития бетатронов и синхротронов, а именно - проблему повышения интенсивности излучения.
