

До открытия специальности 190200, в соответствии с приказом Минвуза СССР № 614 от 2 июня 1978 г. был организован факультет по переподготовке кадров для нового перспективного направления науки и техники "Неразрушающие физические методы контроля" на базе НИИ интроскопии. За время 1978–1996 гг. было подготовлено 225 специалистов по неразрушающему контролю.

В 1991 г. на основе НИИ интроскопии и кафедры ФМПКС открыт аттестационный региональный центр специалистов по неразрушающему контролю. В соответствии с лицензией Госгортехнадзора России № 12К-2001/4798 от 28.08.96 г. центру предоставлено право осуществлять деятельность по обучению и аттестации специалистов НК первого и второго уровней квалификации по радиационному, магнитному, вихре токовому и капиллярному методам контроля.

Институт выполняет работы по экспедиционному (наземному) обследованию технического состояния промышленных и магистральных трубопроводов в соответствии с требованиями РД-39-132-94. Измерения проводятся аттестованными приборами и по утвержденным методикам.

На базе кафедры оборудования и технологии сварочного производства в НИИ интроскопии работает центр по подготовке и аттестации специалистов сварочного производства (рабочих).

В заключение можно сделать следующие выводы. НИИ интроскопии ТПУ на данном этапе является достаточно стабильной организацией и имеет положительную динамику развития как в экономическом, так и в научно-техническом аспектах. У него есть все возможности для дальнейшего роста, а именно: научный задел, кадровый потенциал, производственные мощности, материальные и финансовые ресурсы. Все это позволяет ему играть важную роль в едином научно-образовательном комплексе Томского политехнического университета.

УДК 621.384.6

В. Л. ЧАХЛОВ, А. А. ЗВОНЦОВ

МАЛОГАБАРИТНЫЕ БЕТАТРОНЫ С АЗИМУТАЛЬНОЙ ВАРИАЦИЕЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Малогабаритные бетатроны с азимутальной вариацией управляющего магнитного поля выпускаются в НИИ интроскопии ТПУ уже около 20 лет. В обзоре обсуждается состояние и перспективы дальнейших исследований, направленных на повышение технико-экономических показателей бетатронов.

В выпускаемых в настоящее время малогабаритных бетатронах применяется два вида управляющих магнитных полей: азимутально-однородное (классическое) и азимутально-периодическое, которое часто называют полем с азимутальной вариацией. Возможности бетатронов с классическим управляющим полем достаточно хорошо исследованы.

Рассмотрим особенности бетатронного режима ускорения с применением для целей фокусировки управляющих магнитных полей с азимутальной вариацией, которые наиболее просто реализуются в бетатронах [1–4]. Такие поля давно применяются в изохронных циклотронах [5]. Фокусирующие свойства полей изохронных циклотронов достаточно хорошо исследованы [5–9]. Взяв за основу эти исследования, рассмотрим особенности фокусировки частиц таким полем в бетатронах.

Основные отличия бетатронного режима ускорения от циклотронного заключаются в том, что в процессе ускорения в поле с азимутальной вариацией должно быть обеспечено стабильное положение равновесной орбиты со средним по азимуту радиусом R ($R = \text{const}$). Считая в некоторый момент времени магнитное поле постоянным, его периодическое изменение по азимуту можно для средней плоскости зазора записать в виде ряда Фурье [6]:

$$H_z(r, \theta) = \overline{H_z}(r) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{Nk}(r) \cos Nk[\theta - \varphi_{Nk}(r)] \right\}, \quad (1)$$

где N – число элементов периодичности; k – номер высшей гармоники; A_{Nk} , φ_{Nk} – амплитуда и фаза Nk -й гармоники поля. A_{Nk} обычно измеряется в единицах $\overline{H_z}(r)$; $\overline{H_z}(r)$ – усредненное по азимуту θ поле на некотором радиусе r .

Параметры поля (1) могут быть вычислены по данным магнитных измерений распределения поля $H_z(r, \theta)$ с использованием стандартной программы разложения функций в ряд Фурье.

Между импульсом частицы $p = mv$ и усредненным по θ радиусом R орбиты существует соотношение такое же, как и в азимутально-однородном поле:

$$R = mv c / (e \overline{H_z}(R)). \quad (2)$$

Но при наличии азимутальной вариации равновесная орбита отличается от окружности радиуса R на величину [5,6]:

$$aR = (a_0 + a_1)R. \quad (3)$$

Положение равновесной орбиты ищется методом итераций, поэтому приведем только приближенные значения для a_0 и a_1 [6]:

$$a_0 \approx - \sum_{k=1}^{\infty} \left[(A_{Nk})^2 \frac{3(Nk)^2 - 2}{4[(Nk)^2 - 1]^2} + \frac{A_{Nk} A'_{Nk}}{2[(Nk)^2 - 1]} \right], \quad (4)$$

$$a_1 \approx \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{Nk}}{(Nk)^2 - \sigma^2} \cos Nk(\theta - \varphi_{Nk}) \approx \frac{A_N}{N^2} \cos(N\theta - \varphi_N),$$

где $\sigma^2 = 1 - n$; $n = - \left. \frac{R d \overline{H}}{H(R) dr} \right|_{r=R}$ – показатель среднего поля; $A'_{Nk} = R \frac{dA_{Nk}}{dr}$.

Таким образом, равновесная орбита кроме периодической составляющей a_1 имеет постоянную составляющую a_0 со знаком "минус". Знак "минус" говорит о том, что радиус равновесной орбиты в периодическом поле сокращается по сравнению с радиусом орбиты в однородном поле при равных значениях H_z компоненты поля. Это сокращение зависит от амплитуды гармоник, показателя спада-ния среднего поля и их производных. Сокращение радиуса увеличивается при снижении числа элементов периодичности поля N . Характер равновесной траектории, определяемый a_1 , совпадает с законом (1) вариации магнитного поля. В малогабаритных установках a_0 и a_1 при $N \geq 3$ составляет по данным расчетов доли миллиметра, так что бетатронное соотношение (2:1), рассчитанное для среднего поля $\overline{H_z}(r)$, практически мало меняется.

Колебания частиц относительно замкнутой орбиты в линейном приближении описывается уравнениями Хилла [5,6]. Частоты бетатронных колебаний v_r и v_z , которые характеризуют фокусирующие свойства поля, можно записать следующим образом:

$$v_r^2 = 1 - n + \Delta v_r, \quad (5)$$

$$v_z^2 = n + 0,5 \sum_{k=1}^{\infty} (A_{Nk})^2 + \Delta v_z,$$

где Δv_r – добавка частоты радиальных колебаний за счет вариации магнитного поля, производных от амплитуд гармоник и показателя спада-ния среднего поля по радиусу, а также за счет спиральности поля; Δv_z – добавка частоты вертикальных колебаний за счет "спиральности" поля, а также учитывающая изменение по радиусу амплитуд гармоник поля и показателя спада-ния среднего поля n ; Δv_r , Δv_z – из-за их громоздкости не приводятся.

Из выражения (5) следует, что азимутальная вариация управляющего поля в бетатронах расширяет область устойчивого движения пучка. Прежде всего в бетатронах с азимутально-периодическим управляющим полем можно применять поле с показателем спада-ния n близким к нулю. Кроме того, на радиусах, близких к наружному краю полюса, т.е. там где $n \approx 1$, азимутальная вариация обеспечивает дополнительную фокусировку. Вследствие этого граница области устойчивого движения пучка расширяется за указанную точку, возможно и за пределы полюса. Это объясняется тем, что азимутальная вариация наблюдается и в полях рассеяния. Вариация в полях рассеяния обеспечивается "гребневой" конструкцией полюсов [1–4].

Спиральная структура поля с вариацией вызывает большую добавку радиально-фокусирующих сил и, как следствие этого, большее расширение области устойчивости в радиальном направлении. Для оценочных расчетов можно воспользоваться приближенным выражением

$$v_r^2 = 1 - n + \frac{A_N^2}{N^2} \operatorname{tg}^2 \eta, \quad (6)$$

где η – угол "спиральности" поля.

В настоящее время этот эффект в ускорительной технике практически не используется. Использование его в бетатронах может привести к сокращению наружного радиуса полюсов.

Повышенные фокусирующие свойства поля обеспечивают соответствующую плотность ускоряемого пучка и влияют на "захват" частиц в режим ускорения, процесс смещения частиц на мишень и вывод ускоренных частиц за пределы излучателя. В оценке этих процессов важное значение имеет коэффициент уплотнения равновесных орбит α , который позволяет оценить относительное изменение длины орбиты при изменении импульса частицы p . Для азимутально-периодических магнитных полей α определяется следующим образом [7]:

$$\alpha \approx 1/\nu_r^2. \quad (7)$$

Фактически α определяет набор частиц с определенным энергетическим разбросом, которые могут "пойти" в режим ускорения, либо шаг орбиты в процессе "смещения" частиц на мишень.

Для поля с азимутальной вариацией и с учетом только основной гармоники коэффициент уплотнения орбит равен [8,9]

$$\alpha = \frac{1}{1 - n + (S^2 + \varepsilon_N d)/2N^2}, \quad (8)$$

$$\text{где } \varepsilon_N = \frac{H_N}{H_z}; \quad S = \frac{r dH_N}{H_z dr}; \quad d = \frac{r^2 d^2 H_N}{H_z dr^2}.$$

Согласно (8), влияние вариации поля на коэффициент α особенно сильно вблизи границы области устойчивости в радиальном направлении, т.е. при $n \rightarrow 1$. Так, если в азимутально-однородном поле при $n \rightarrow 1$ $\alpha \rightarrow \infty$, что соответствует веерообразному рассыпанию ускоряемых частиц при их смещении к этой точке, то в поле с вариацией в точке, где $n=1$, имеем

$$\alpha \approx \frac{2N^2}{S^2 + \varepsilon_N d}. \quad (9)$$

Подробные исследования, проведенные для изохронных циклотронов, показывают, что градиент вариации вызывает сжатие орбит, а вторая производная – расширение [8,9]. Этими эффектами можно пользоваться для организации эффективного смещения (вывода) ускоренных частиц и в бетатронах. Так, шаг орбиты в процессе смещения частиц на мишень определяется следующим образом:

$$\Delta r = \alpha r \frac{\Delta W_{об}}{E}, \quad (10)$$

где $\Delta W_{об}$ – прирост энергии за оборот; r – мгновенный равновесный радиус.

Согласно (8), (9), (10), шаг орбиты увеличивается по мере ее приближения к границе области устойчивости, но в точке, где $n=1$, Δr имеет конечное значение, определяемое величиной α .

Считая радиус равновесной орбиты неизменным во времени, из (10) и (7) получаем величину энергетического разброса для частиц, которые можно "захватить" в режим ускорения:

$$\Delta E = E \nu_r^2 (\Delta R/R). \quad (11)$$

В данном случае ΔR – ширина области устойчивого движения частиц, охватываемая ускорительной камерой.

Следует заметить, что в периодическом поле размеры пучка зависят от азимута, причем по мере приближения "рабочей точки" к радиальной границе области устойчивого движения, огибающая пучка искажается все больше [7]. При этом поперечные размеры пучка будут резко зависеть от азимута. Это обстоятельство может влиять на эффективность "захвата" частиц в режим ускорения, связанное с положением инжектора в рабочем пространстве, и на этап формирования устойчивого движения пучка, т.е. в конечном итоге на мощность дозы излучения.

Азимутальная вариация управляющего поля приводит к изменению конструкции полюсов и магнитопровода. В настоящее время большое распространение получили шестигребневые полюса с шестью или тремя стойками. Шестистоечный магнитопровод применяется в бетатроне МИБ-4 [10] и в бетатроне МИБ-6Э. В разработанном в последнее время бетатроне МИБ-10 применяется трехстоечный магнитопровод с шестьюгребневым полюсом [4]. Применение трехстоечного магнитопровода позволило увеличить азимутальную протяженность выводного окна более чем в 1,5 раза и увеличить сечение вентиляционных окон для обдува намагничивающей катушки. В малогабаритных бетатронах на энергию 2–3 МэВ применялись четырехгребневые полюса с четырехстоечным [11] или Ш-образным [12] магнитопроводом. Основное преимущество электромагнитов с вариацией поля заключается в том, что

промежутки между гребнями позволяют разместить инжектор над средней плоскостью рабочего зазора. При такой установке инжектора существенно снижаются потери частиц от соударения с ним в процессе их вывода за пределы ускорителя. Кроме того, массу ферромагнитного материала магнитопротода можно снизить на 20% за счет его более равномерной загрузки.

Таким образом, для повышения технико-экономических характеристик малогабаритных бетатронов необходимо:

- 1) разработать методы повышения фокусирующих свойств азимутально-периодических полей в условиях ограниченных габаритов установок;
- 2) более подробно исследовать процесс инжекции и "захвата" частиц в режим ускорения, а также процесс смещения частиц на мишень или вывода их за пределы ускорителя;
- 3) разработать конструкции электромагнита, позволяющие формировать периодические поля с повышенными фокусирующими свойствами.

Одним из способов повышения фокусирующих свойств управляющего поля может быть дополнительная модуляция поля по азимуту

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 360008 СССР МКИ Н 05 Н 11/00. Электромагнит бетатрона / В.Л. Чахлов, А.А. Звонцов, А.А. Филимонов. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 6, с.216.
2. Звонцов А.А., Чахлов В.Л., Филимонов А.А. Бетатрон с азимутальной вариацией управляющего поля // Известия ТПИ. - 1974. - Т.279. - С.32.
3. Звонцов А.А., Чахлов В.Л., Филимонов А.А. Электромагнит бетатрона с азимутальной вариацией управляющего поля // ПТЭ. - 1975. - № 2. - С.40-42.
4. Патент России N1568877 МКИ Н 05 Н 11/00. Магнитопротод бетатрона / А.А. Звонцов, В.П. Казьмин, А.А. Филимонов. - Оpubл. в Б.И., 1993, № 47-48, с.191-192.
5. Желепов В.П., Дмитриевский В.П., Замолодчиков Б.И., Кольга В.В. Сильноточные ускорители частиц высоких энергий - "фабрики мезонов" // УФН. - 1965. - Т.85. - Вып.4. - С.651.
6. Басаргин Ю.Г., Белов В.П. Некоторые вопросы динамики движения частиц в циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля // Сб.: Электрофизическая аппаратура. - 1965. - № 3. - С.3-23.
7. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. - М.: ГИФМЛ, 1962. - 352 с.
8. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Полумордвинова Н.И. Высокоэффективный вывод пучка для кольцевого циклотрона высокой интенсивности. Дубна, 1981 / Препринт ОИЯИ Д 9-81-280.
9. Борисов О.Н., Заплатин Н.П. и др. О возможности использования краевого магнитного поля секторного циклотрона для вывода частиц // Труды XI Всес. сов. по ускор. заряж. частиц. Дубна, 1989. - Т.11. - С.196-199.
10. Модернизированный малогабаритный бетатрон типа МИБ-4 для дефектоскопии / Г.И. Буров, В.П. Зворыгин, В.С. Логинов и др. // Докл. IV Всес. сов. по применению ускор. заряж. частиц в народ. хоз. Ленинград, 28-30 сентября 1982. - Л.: НИИ ЭФА, 1982. - Т.1. - С.23.
11. Чахлов В.Л., Пушин В.С., Буров Г.И. и др. Малогабаритный бетатрон с четырьмя элементами периодичности управляющего магнитного поля // ПТЭ. - 1986. - № 4. - С.23.
12. Звонцов А.А., Зрелов Ю.Д., Касьянов В.А. и др. Малогабаритный импульсный бетатрон на 2,5 МэВ // Ускорители-92: Тез. докл. 7-го совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. - М.: ЦНИИ атоминформ., 1992. - С.105-106.

УДК 620.179.13

В. П. ВАВИЛОВ, А. И. ИВАНОВ, В. В. ШИРЯЕВ, В. А. ПУШНЫХ,
Д. Г. КУРТЕНКОВ, К. Д. ТРОФИМОВ, И. А. АНОШКИН, О. Г. СЛЕСАРЕНКО

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОМСКОМ НИИ ИНТРОСКОПИИ

В статье выполнен обзор исследований Томского НИИ интроскопии в области разработки алгоритмического и программного обеспечения теплового неразрушающего контроля, создания тепловых дефектоскопов и практических инфракрасных съемок в целях технической диагностики.

Введение

В начале 70-х гг. в бывшем СССР Н.А.Бекешко, Ю.А.Попов, А.Е.Карпельсон, А.Б.Упадышев из Московского НИИ интроскопии начали работы в области активного теплового неразрушающего контроля (НРК). Одновременно, усилиями М.М.Мирошникова (ГОИ им. С.И.Вавилова, Ленинград) и А.Г.Жукова (НПО "Исток", Фрязино) были созданы образцы отечественных тепловизоров, которые