На правах рукописи

Иванилова Татьяна Сергеевна

Моделирование захвата и вывода электронного пучка бетатрона с азимутальной вариацией поля

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Адищев Юрий Николаевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Чахлов Владимир Лукьянович;

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Попик Василий Михайлович.

Ведущая организация: Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН (Ленинградская обл., г. Гатчина).

Защита состоится «21» декабря 2010 г. в 16 часов 30 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, ауд. 329.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, кандидат физико-математических наук, доцент А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Бетатроны в настоящее время пользуются большим спросом на мировом рынке. В НИИ Интроскопии при ТПУ налажен серийный выпуск бетатронов, в том числе и бетатронов с радиально-гребневыми полюсами. Повышенный интерес к этому типу ускорителей обусловлен тем, что они представляют собой надежный, малогабаритный и сравнительно дешевый источник электронного и тормозного излучения. Единственное, что ограничивает практическое применение бетатрона – недостаточная величина интенсивности генерируемого излучения, определяемая количеством электронов, захваченных в процесс ускорения, а в случае получения электронных пучков – и эффективностью вывода частиц из ускорителя.

Несмотря на достаточно большой срок использования бетатрона с азимутальной вариацией поля на практике, в процессах захвата электронов в ускорение и вывода электронного пучка за пределы ускорителя до сих пор остались моменты, требующие уточнения. В первую очередь, это относится к исследованию динамики частиц, и определению оптимальных условий работы бетатрона с азимутальной вариацией поля.

Это объясняется тем, что ранее вопросы по захвату и выводу электронного пучка рассматривались в основном путем анализа решений линеаризованных уравнений движения, а также с включением в них нелинейных членов, справедливых для малых отклонений электронов от равновесной орбиты, что существенно искажало реальную картину данных процессов. Кроме того, применение имеющихся на данный момент теоретических моделей конфигурации магнитного поля бетатрона с азимутальной вариацией для исследования динамики частиц в процессе вывода ограничено.

Таким образом, численное исследование динамики электронов в электромагнитном поле бетатрона с азимутальной вариацией поля в момент захвата и вывода электронного пучка является весьма актуальной задачей. Возможности современной электронно-вычислительной техники позволяют проводить моделирование указанных процессов с учетом реальных условий.

Цель работы

Целью работы является определение оптимальных условий захвата электронов в ускорение и вывода электронного пучка бетатрона с азимутальной вариацией поля.

В соответствии с поставленной целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разработать программу для моделирования процесса инжекции и захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля с учетом реальных условий протекания процесса;

2. Разработать программу для моделирования процесса вывода ускоренного электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля с учетом реальных условий протекания процесса;
3. Проверить адекватности разработанных моделей путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными;
4. Численно исследовать влияние на процесс захвата электронов в ускорение в бетатроне таких факторов, как: импульсное поле контрактора, азимутальный и радиальный размеры контракторной обмотки, задержка фазы инжекции;
5. Численно исследовать влияние гребневой конструкции полюсов электромагнита бетатрона на захват и вывод электронного пучка. Определить оптимальное положение гребней полюсов ускорителя.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Уточнены выражения для компонент индукции магнитного поля бетатрона с азимутальной вариацией поля. Полученные выражения достаточно точно описывают конфигурацию магнитного поля, как в рабочем зазоре ускорителя, так и за его пределами.

Численно исследован процесс инжекции и захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля с учетом энергетического разброса частиц, определяемого амплитудой, длительностью и задержкой импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя. Впервые получены зависимости величины захваченного заряда в ускорение от величины заряда, инжектированного в ускорительную камеру бетатрона с азимутальной вариацией поля, в абсолютных единицах.

Численно исследовано влияние импульсного поля кольцеобразного контрактора и контрактора в виде секторной обмотки на захват электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля. Показана возможность применения укороченной секторной обмотки в качестве контрактора, при этом оптимальной является обмотка с азимутальной протяженностью $\psi = 180°$.

Определены параметры инжектированных частиц, захваченных в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля. Установлено, что при оптимальной задержке импульса инжекции на вершине импульса тока с проводящего слоя камеры наблюдается провал, обусловленный как захватом электронов в ускорение, так и выпадением большей части частиц пучка на инжектор с параметрами траекторий, близкими к параметрам траекторий захваченных в ускорение электронов.

Впервые теоретически показано, что в момент вывода электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля частицы освобождаются из-под действия фокусирующих сил на границе между гребнем и впадиной полюсов ускорителя.

Численно определены основные параметры электронного пучка (распределение электронов по углам вылета, фазовые диаграммы, временное

распределение частиц), выведенного из бетатрона типа МИБ-6Э с азимутальной вариацией поля, согласующиеся с экспериментальными данными.

Исследовано влияние положения гребней полюсов ускорителя на процессы захвата и вывода электронов в бетатроне с азимутальной вариацией поля.

Теоретическая и практическая ценность работы

Диссертационное исследование вносит вклад в развитие представлений о физической картине процессов инжекции и захвата электронов в ускорение, а также вывода ускоренного электронного пучка бетатрона с азимутальной вариацией поля.

Приведен метод расчета оптимальной задержки импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита бетатрона, который может быть полезен при настройке ускорителя на максимум излучения.

Рекомендовано применение в бетатроне с азимутальной вариацией поля более эффективного контракторного устройства в виде укороченной секторной обмотки с азимутальной протяженностью $\psi = 180^{\circ}$, что позволит повысить надежность работы ускорителя.

Показано, что для захвата электронов в ускорение и вывода электронного пучка из бетатрона типа МИБ-6 с азимутальной вариацией поля оптимальным положением гребней полюсов ускорителя является их смещение по ходу движения пучка относительно стандартного положения на угол от 30° до 35°, что соответствует совмещению гребней полюса с положением стоек обратного магнитопровода.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обоснование применения в бетатроне с азимутальной вариацией поля более эффективного контракторного устройства в виде укороченной секторной обмотки с азимутальной протяженностью $\psi = 180^{\circ}$;
2. Наличие большого провала на вершине импульса тока с проводящего слоя камеры соответствует оптимальной задержке импульса инжекции относительно момента появления тока в витках обмотки электромагнита бетатрона;
3. Оптимальным положением гребней полюсов для захвата электронов в ускорение и вывода электронного пучка из бетатрона типа МИБ-6 с азимутальной вариацией является смещение гребней по ходу движения пучка относительно стандартного положения на угол от 30° до 35°;
4. Освобождение частиц из-под действия фокусирующих сил в момент вывода электронного пучка бетатрона с вариацией поля происходит на границе между гребнем и впадиной полюсов ускорителя.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в получении аналитических выражений, разработке алгоритма расчетов, проведении численных экспериментов, обработке данных и установлении характерных особенностей процессов инжекции и захвата электронов в ускорение в электромагнитное поле бетатрона с азимутальной вариацией и вывода ускоренного пучка за пределы магнитопровода ускорителя. Автором получены все представленные в работе результаты моделирования процессов инжекции и захвата электронов в ускорение, и вывода пучка из бетатрона, сформулированы выводы по результатам работы.

Результаты экспериментального исследования влияния задержки импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя на величину заряда, ускоренного в бетатроне, и потери электронов на стенках камеры (раздел 2.4), – получены совместно с В.В. Кашковским.

Апробация диссертационной работы и публикации

Результаты диссертационной работы докладывались на: IV и V Международных научно-практических конференциях «Физико-технические проблемы атомной энергетики» (Томск, 2007, 2010); 11-й и 12-й научных сессиях МИФИ (Москва, 2008, 2009); IV, V и VI Международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2007, 2008, 2009); Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе» (Томск, 2009); III Российской научно-практической конференции «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения» (Томск, 2009), научно-техническом семинаре НИИ Интроскопии при ТПУ (Томск, 2010).

По теме диссертации опубликовано 2 статьи в российской научной печати, а также 2 тезиса докладов и 5 докладов на российских и международных конференциях.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 84 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 116 страниц. Работа содержит: рисунков – 44, таблиц – 3.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, проведен краткий обзор литературы, сформулирована цель

работы, обозначены решаемые задачи и дано краткое описание материала диссертации.

В **первой** главе получены и приведены основные формулы для построения: 1) модели инжекции и захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля; 2) модели вывода ускоренного электронного пучка бетатрона с азимутальной вариацией поля. Детально рассмотрена теория *электретного механизма захвата электронов в ускорение в бетатроне* [1].

Для описания конфигурации магнитного поля в рабочем зазоре бетатрона с азимутальной вариацией использована теоретическая модель [1], при этом для расширения диапазона применения модели в выражениях для компонент магнитной индукции азимутально-симметричную часть поля заменили экспериментально снятым распределением:

$$B_r(r,\varphi,z) = -\frac{\sqrt{n_0}}{r_0}\frac{1}{r}\int_0^r rB_z(r,z=0)dr \cdot \mathrm{sh}\left(\sqrt{n_0}\cdot\frac{z}{r_0}\right) -$$
$$-\delta\cdot r_0 B_0\cdot k_2\cdot\left[a_2 J_{\nu+1}(k_2 r)+b_2 N_{\nu+1}(k_2 r)\right]\cdot \mathrm{sh}(k_2 z)\cdot\cos(\nu\varphi)+ \qquad (1)$$
$$+\xi\cdot r_0 B_0\cdot(\nu/r)\cdot\left[a_3 J_\nu(k_3 r)+b_3 N_\nu(k_3 r)\right]\cdot \mathrm{sh}(k_3 z)\cdot\cos(\nu\varphi),$$

$$B_\varphi(r,\varphi,z) = \delta\cdot r_0 B_0\cdot k_2\cdot\left[a_2 J_{\nu+1}(k_2 r)+b_2 N_{\nu+1}(k_2 r)\right]\cdot \mathrm{sh}(k_2 z)\cdot\sin(\nu\varphi) -$$
$$-\xi\cdot r_0 B_0\left\{(\nu/r)\cdot\left[a_3 J_\nu(k_3 r)+b_3 N_\nu(k_3 r)\right]-\right. \qquad (2)$$
$$\left.-k_3\cdot\left[a_3 J_{\nu+1}(k_3 r)+b_3 N_{\nu+1}(k_3 r)\right]\right\}\cdot \mathrm{sh}(k_3 z)\cdot\sin(\nu\varphi),$$

$$B_z(r,\varphi,z) = B_z(r,z=0)\cdot \mathrm{ch}\left(\sqrt{n_0}\cdot\frac{z}{r_0}\right)+$$
$$+\delta\cdot r_0 B_0\cdot\left\{k_2\cdot\left[a_2 J_\nu(k_2 r)+b_2 N_\nu(k_2 r)\right]-\right. \qquad (3)$$
$$\left.-(2\cdot\nu/r)\cdot\left[a_2 J_{\nu+1}(k_2 r)+b_2 N_{\nu+1}(k_2 r)\right]\right\}\cdot \mathrm{ch}(k_2 z)\cdot\cos(\nu\varphi),$$

где r, φ, z – радиальная, азимутальная и вертикальная координаты; r_0 и B_0 – радиус равновесной орбиты бетатрона и величина индукции магнитного поля на этом радиусе; $B_z(r,z=0)$ – радиальное распределение вертикальной составляющей индукции поля, усредненное по азимуту; δ и ξ – определяют относительный вклад в суммарное поле ускорителя магнитных полей, обеспечивающих периодичную по азимуту структуру поля, определяемых r и z – компонентами векторного потенциала $\mathbf{A}$; a_2, a_3, b_2, b_3 – амплитуды; k_2, k_3 – параметры разделения; $J_\nu(k_2 r)$, $N_\nu(k_2 r)$, $J_{\nu+1}(k_2 r)$, $N_{\nu+1}(k_2 r)$ – функции Бесселя и Неймана порядка ν и $(\nu+1)$; n_0 – усредненный по азимуту показатель спадания n магнитного поля на равновесной орбите.

Параметры разделения и амплитуды в выражениях (1)-(3) определяются из краевых условий, которым должно удовлетворять магнитное поле бетатрона

на равновесной орбите [1].

Выражения (1)-(3) позволяют достаточно точно описать распределение магнитного поля, как в рабочем зазоре ускорителя, так и за его пределами.

Одной из основных задач при моделировании процесса захвата электронов в ускорение в бетатроне является определение оптимальной величины временной задержки импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя. Для уменьшения количества возможных вариантов задержек и выбора оптимальной задержки рассмотрели задержку, соответствующую случаю, когда вершина импульса инжекции (рис. 1, кр. *1*) соприкасается с кривой (рис. 1, кр. *2*) максимально возможного значения энергии захваченных в ускорение электронов. При этом кривая энергии электронов, ускоряемых на равновесной орбите (рис. 1, кр. *3*), будет пересекать импульс энергии инжектированных частиц в двух точках: на переднем и заднем фронтах импульса.

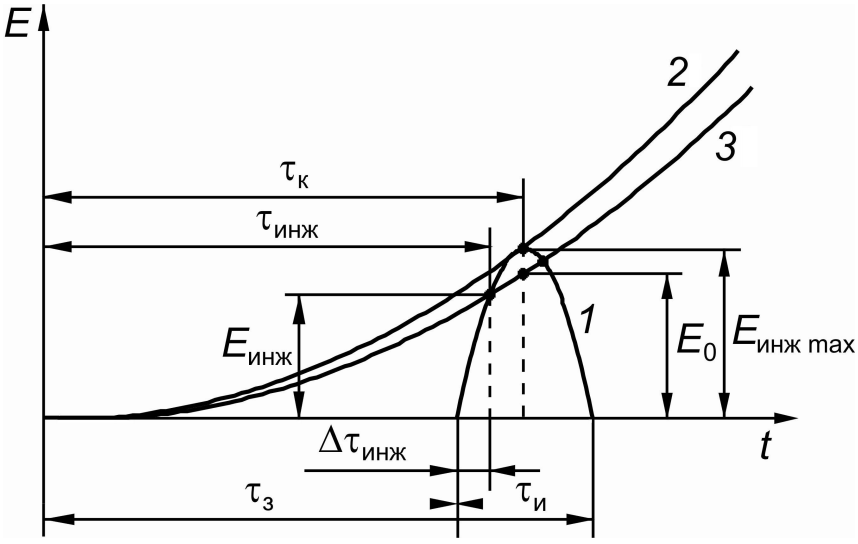


Рис. 1. Импульс инжекции электронов: кр. *1* – импульс напряжения инжекции, умноженный на заряд электрона; кр. *2* – максимально возможное значение энергии инжектированных частиц, захваченных в ускорение; кр. *3* – кинетическая энергия электронов на равновесной орбите

В этом случае выражение для времени задержки импульса инжекции имеет вид

$$\tau_з = \frac{\tau_{эм}}{\pi}\arcsin\left\{\sqrt{\frac{E_{инж}\left(E_{инж}+2m_0c^2\right)}{E_{max}\left(E_{max}+2m_0c^2\right)}}\right\} - \frac{\tau_и}{2}\arcsin\frac{E_{инж}}{E_{инж\ max}}, \qquad (4)$$

при этом энергия инжектированных электронов $E_{инж}$ в (4) определяется трансцендентным уравнением

$$\frac{E_{\text{инж}}}{E_{\text{инж max}}} = \cos\left[\frac{\tau_{\text{эм}}}{\tau_{\text{и}}}\arcsin\left\{\sqrt{\frac{E_{\text{инж}}\left(E_{\text{инж}}+2m_0c^2\right)}{E_{\max}\left(E_{\max}+2m_0c^2\right)}}\right\} - \right.$$

$$\left. - \frac{\tau_{\text{эм}}}{\tau_{\text{и}}}\arcsin\left\{\frac{r_0 B_0}{r_{n=1}B_z\left(r_{n=1}\right)}\sqrt{\frac{E_{\text{инж max}}\left(E_{\text{инж max}}+2m_0c^2\right)}{E_{\max}\left(E_{\max}+2m_0c^2\right)}}\right\}\right]. \quad (5)$$

Здесь $\tau_{\text{эм}}$ – длительность импульса тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя; $E_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия электронов, ускоряемых в бетатроне; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса инжекции; $E_{\text{инж max}}$ – максимальное значение энергии инжектируемых электронов; $B_z\left(r_{n=1}\right)$ – индукция поля на радиусе, где показатель спадания *n* равен единице.

Результаты последующего моделирования и эксперимента показали, что оптимальная величина задержки импульса инжекции соответствует второй точке пересечения.

В заключение главы приведены выражения для электромагнитного поля бетатрона с учетом действия импульсного поля контрактора и поля секторной обмотки вывода пучка.

Во **второй** главе рассмотрена модель инжекции и захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля как с применением импульсного поля контрактора, так и без. Модель учитывает целый ряд факторов, влияющих на процесс захвата электронов в ускорение: импульсная инжекция частиц; задержка импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя; влияние поля заряда выпавших на стенку электронов; влияние импульсного поля контрактора; азимутальные и радиальные размеры контракторных обмоток и т. д.

Все расчеты проведены для двух видов малогабаритных бетатронов с азимутальной вариацией поля: типа МИБ-6 и типа МИБ-4. Моделируемые параметры ускорителей приведены в табл. 1.

Моделирование инжекции электронов заключалось в розыгрыше методом Монте-Карло начальных параметров частиц: энергии, координат *r* и *z*, углов вылета из инжектора α и γ. Нить накала катода инжектора располагали на азимуте $\varphi = 0°$ и радиусе $r_{\text{инж}}$. Ширину щели анодной коробочки инжектора приняли равной 2 мм, высоту коробочки – 1 см. При этом учитывали, что в реальных условиях имеется так называемая «промашка» инжектора $\Delta r_{\text{инж}}$ (рис. 2).

Начальные координаты вылета электронов из инжектора *r* и *z* определяли исходя из размеров щели и радиуса расположения нити накала катода инжектора. Начальные углы вылета частиц из инжектора в горизонтальной плоскости ускорителя находились в интервале $\alpha = 90° \pm 10°$, в вертикальной плоскости – в пределах $\gamma = \pm 5°$ от горизонтальной плоскости.

Таблица 1. Основные характеристики бетатронов типа МИБ-6 и типа МИБ-4

Наименование	МИБ-6	МИБ-4
Максимальная энергия ускоренных электронов E_{max}, МэВ	6	4
Максимальная энергия инжектированных электронов $E_{инж\ max}$, кэВ	30	30
Число пар гребней ν	6	4
Радиус равновесной орбиты r_0, см	6	5,2
Радиус места расположения нити накала катода инжектора $r_{инж}$, см	7,8	6,5
Длительность импульса тока в намагничивающей обмотке ускорителя $\tau_{эм}$, мс	2,5	2
Длительность импульса инжекции $\tau_и$, мкс	5	3
Показатель спадания магнитного поля n	0,69	0,61
Радиус, где показатель спадания поля $n=1$	7,4	6,66
Радиус орбиты освобождения, определенный по азимутально-симметричной части поля $r_к$, см	8,13	7,42
Минимальная граница колебаний частиц пучка по радиусу $r_г$, см	4,66	3,38
Оптимальная задержка импульса инжекции $\tau_з$, мкс	19,42	22,56
Оптимальная величина вариации поля по азимуту $\delta(r)$	0,10	0,06

Энергию электронов, инжектированных в магнитное поле бетатрона, определяли следующим образом. При заданных длительностях импульса инжекции $\tau_и$ и импульса тока в намагничивающей обмотке ускорителя $\tau_{эм}$ из уравнения (5) численно находили два значения энергии инжекции $E_{инж}$ частиц, которые соответствовали двум точкам пересечения на переднем и заднем фронтах импульса инжекции. Далее, из выражения (4) получали соответственно два значения для времени задержки $\tau_з$ импульса инжекции. В расчетах оптимальное время задержки соответствовало такому положению импульса инжекции на временной оси t, когда вторая точка пересечения перемещается на передний фронт импульса.

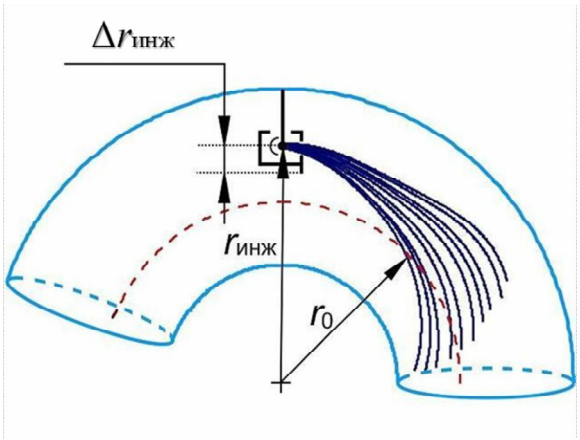


Рис. 2. Расчетные траектории инжектированных частиц на первом обороте в электромагнитном поле бетатрона типа МИБ-6

Моделирование впуска электронов в камеру проводили с учетом энергетического разброса, получаемого частицами в момент инжекции и определяемого длительностью, амплитудой и задержкой $\tau_з$ импульса инжекции. Для этого длительность импульса инжекции $\tau_и$ разбивали на короткие промежутки $\Delta\tau$. Затем, внутри каждого интервала $\Delta\tau$ методом Монте-Карло проводили розыгрыш времени

влета электронов в электромагнитное поле бетатрона, и по синусоидальному закону изменения напряжения на инжекторе находили энергию инжектированных частиц $E_{\text{инж}}$. Далее задавали нарастание электромагнитного поля бетатрона во времени.

Поскольку в момент инжекции электроны получают разброс по энергиям, координатам и углам около равновесных значений, то частицы вылетают из щели анодной коробочки инжектора в виде расходящегося веера траекторий и заполняют рабочий объем ускорительный камеры. При этом большая часть инжектированного электронного пучка выпадает на стенки камеры или гибнет на инжекторе еще на первых оборотах в электромагнитном поле бетатрона.

Результаты моделирования показали, что электроны, инжектируемые в момент захвата (вблизи вершины импульса напряжения инжекции), образуют нестационарный ток со временем жизни частиц в пучке порядка трех оборотов. Следовательно, вклад действия поля нестационарного тока на захват электронов в ускорение в бетатроне не столь существенен, как считалось ранее.

Для объяснения явления изменения первоначальных параметров траекторий движения инжектированных электронов, обхода инжектора и захвата частиц в ускорение использован *электретный механизм захвата* [1], в основу которого положено образование объемного электрического заряда в боковой стенке ускорительной камеры электронами, не захваченными в ускорение и попавшими вглубь диэлектрического материала стенки. По проведенным оценкам, электроны проникают в стенку камеры на глубину порядка 0,7-0,8 мкм. Напряженность электрического поля заряда при этом достигает критического значения в пределах (20-30) кВ/мм, при котором в стекле начинаются разрядные явления.

В результате стохастического разряда накопленного заряда, электроны по проводящим каналам выходят на проводящее покрытие камеры и создают локальное по азимуту электрическое поле. Это поле воздействует на приближающиеся к внутренней стенке инжектированные электроны, и изменяет как величину энергии, так и направление движения частиц, что способствует захвату вновь инжектированных электронов в ускорение.

Для получения количественных соотношений между захваченным и инжектированным зарядами электронов в камере бетатрона типа МИБ-6 и типа МИБ-4 с азимутальной вариацией поля провели моделирование процесса инжекции и последующего ускорения частиц в электромагнитном поле ускорителей. В обоих случаях разыгрывали порядка $N = 5 \cdot 10^5$ историй. Ускорение электронов в электромагнитном поле бетатронов МИБ-6 и МИБ-4 до конечной энергии $E_{\max}$ происходило за 10^6 и $9 \cdot 10^5$ оборотов частицы по равновесной орбите r_0, соответственно. Поскольку при моделировании не учитывали рассеяние электронов на молекулах остаточного газа в камере, то для оценки захвата частиц в режим ускорения достаточно было рассмотреть ускорение электронов до энергии ~ 1 МэВ.

Результаты моделирования показали, что без применения импульсного поля контрактора бетатрон работает малоэффективно. Максимальные величины

захваченного в ускорение заряда электронов $q_{\text{захв}}$ в бетатронах типа МИБ-6 и типа МИБ-4 составили: 0,23 нКл и 0,03 нКл, соответственно. При этом в бетатроне типа МИБ-6 величина захваченного заряда на порядок больше, чем в бетатроне типа МИБ-4. Следовательно, на эффективность захвата частиц в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля существенное влияние оказывает гребневая конструкция полюсов.

Для улучшения условий захвата инжектированных электронов в ускорение в поле бетатрона с азимутальной вариацией необходимо использовать контрактор, который применяется на всех типах бетатронов производства НИИ Интроскопии и позволяет повысить мощность дозы тормозного излучения [2]. В качестве контрактора применяют либо два витка с током, включенные между собой последовательно и расположенные выше и ниже равновесной орбиты, либо обмотку с витками в виде двух пар разрезанных колец, расположенную над и под ускорительной камерой по ширине рабочего зазора ускорителя. При этом принцип действия их одинаков и сводится к изменению основного управляющего поля бетатрона импульсным полем контрактора.

Исследование влияния импульсного поля контрактора на эффективность захвата электронов в ускорение проводили для бетатронов типа МИБ-6 и типа МИБ-4 с азимутальной вариацией поля. В качестве контрактора использовали витки с током, которые располагали в виде кольца над и под ускорительной камерой в рабочем зазоре ускорителя.

При моделировании в заданный момент времени инжекции электронного пучка в камеру бетатрона по виткам обмотки контрактора пропускали импульс тока, который создавал магнитное поле длительностью равное $\tau_{\text{конт}} = 10$ мкс. Причем момент появления тока в обмотке опережал момент подачи импульса напряжения на инжектор на величину ~ 6,4 мкс, так что импульс напряжения инжекции находился на заднем фронте импульса тока в витках контрактора. Величину амплитуды индукции поля контрактора выбрали равной 3% от величины индукции B_0 основного поля на равновесной орбите, т. е. величина вносимого возмущения была сравнительно небольшой. По радиусу поле обмотки спадало по такому же закону, что и азимутально-симметричная часть суммарного поля бетатрона, при этом направление вектора индукции совпадало с направлением вертикальной составляющей индукции основного управляющего поля. При расчете рассмотрели два случая: радиальный размер поля контрактора ограничивался минимальной границей колебаний частиц $r_{\text{г}}$ пучка в камере бетатрона и радиусом равновесной орбиты r_0, или радиусом орбиты освобождения $r_{\text{к}}$. Величина амплитуды и длительность импульса тока в витках обмотки оставались постоянными.

Инжектированные электроны, проходя через область действия электромагнитного импульсного поля контрактора, одновременно ускорялись электрическим полем и меняли направление первоначального движения. В результате у частиц появлялась дополнительная возможность избежать столкновения с инжектором или гибели на стенках камеры и начать ускоряться

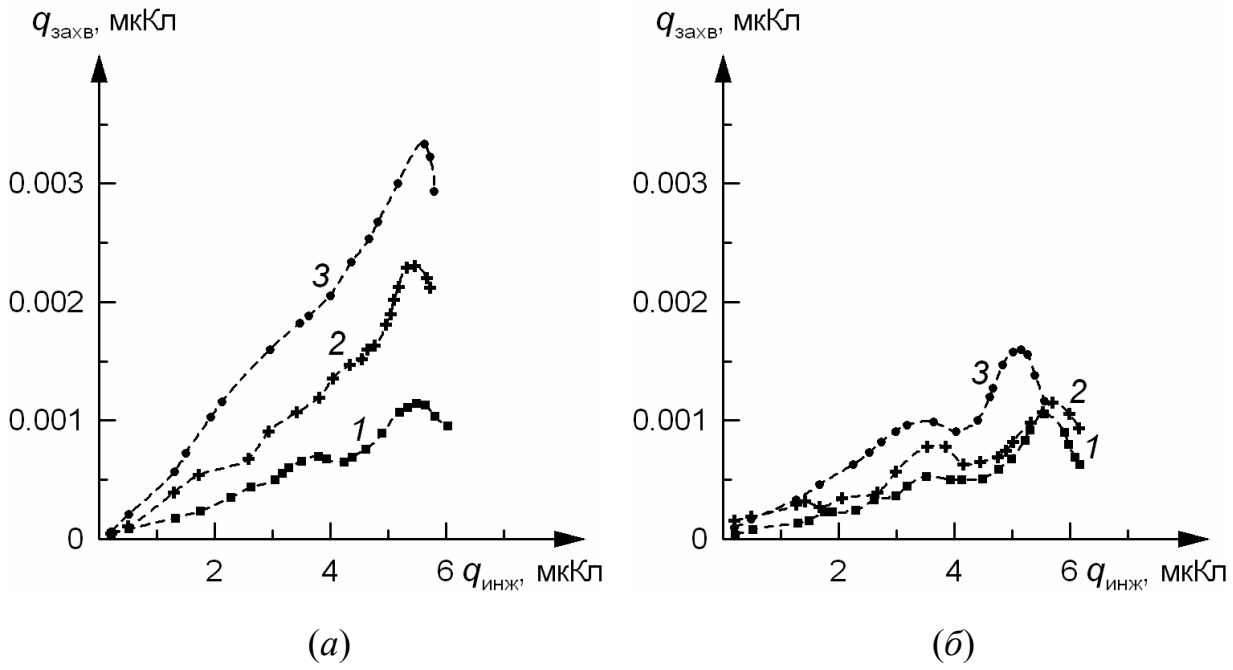
в электромагнитном поле бетатрона. Захват частиц в ускорение был обусловлен изменением первоначальных параметров движения инжектированных электронов в результате действия на них как электрического поля заряда на проводящем покрытии внутренней стенки камеры, так и дополнительного импульсного поля контрактора.

Как показали результаты моделирования, без учета поля заряда на стенке камеры захват в ускорение инжектированных частиц не наблюдается. Это еще раз подтверждает вывод о том, что определяющую роль в механизме захвата электронов в ускорение в бетатроне имеет процесс локального накопления, в течение нарастания переднего фронта импульса инжекции, критической величины заряда электронов, не попавших в ускорение, и последующего стохастического разряда накопленного заряда с выходом частиц на проводящее покрытие камеры.

Результаты моделирования показали, что применение импульсного электромагнитного поля контрактора в бетатроне типа МИБ-6 привело к повышению эффективности захвата электронов в ускорение ~ в 3 и более раз. Так, при величине инжектированного в камеру заряда $q_{\text{инж}} \approx 4{,}5$ мкКл ($2{,}81 \cdot 10^{13}$ эл.) величина захваченного в ускорение заряда без импульсного поля контрактора составляла $q_{\text{захв}} = 0{,}2$ нКл ($1{,}25 \cdot 10^{9}$ эл.), с импульсным полем – $q_{\text{захв}} = 1{,}5$ нКл ($9{,}4 \cdot 10^{9}$ эл.) и $q_{\text{захв}} = 0{,}65$ нКл ($4{,}1 \cdot 10^{9}$ эл.) при радиальном размере обмотки $r_{\text{г}} < r < r_0$ и $r_{\text{г}} < r < r_{\text{к}}$, соответственно. В бетатроне типа МИБ-4 эффективность захвата электронов в ускорение за счет применения импульсного поля контрактора увеличилась в среднем ~ в 10 раз и более.

Одновременное использование контрактора и обмотки вывода ускоренного электронного пучка в бетатроне приводит к местному перегреву витков обмотки и контрактора в местах их соприкосновения, нарушению изоляции, электрическому пробою и выходу из строя. С целью улучшения надежности системы инжекции исследована возможность применения в качестве контракторного устройства бетатрона секторной обмотки, расположенной над и под ускорительной камерой, а также определено влияние азимутального и радиального размеров обмотки на величину заряда, захваченного в ускорение. Контрактор располагали в рабочем зазоре ускорителя так, что середина обмотки находилась на азимуте $\varphi = 90°$ от места расположения инжектора, поскольку инжектированные электроны оседают на внутреннюю боковую стенку камеры преимущественно в этой области.

Анализ зависимостей захваченного заряда от величины инжектированного заряда в ускорительную камеру бетатрона типа МИБ-6 (рис. 3), полученных в абсолютных единицах, показал, что выбор размеров секторной обмотки оказывает существенное влияние на эффективность захвата электронов в ускорение, поскольку определяет степень локального изменения топографии магнитного поля в рабочем зазоре ускорителя. При этом наилучший захват инжектированных частиц в ускорение происходит при использовании наиболее протяженного по азимуту импульсного поля контрактора $\psi = 180^{\circ}$.



(*а*) (*б*)

Рис. 3. Зависимость захваченного заряда от величины инжектированного заряда в ускорительную камеру бетатрона типа МИБ-6: кр. *1* – протяженность секторной обмотки контрактора 60º; кр. *2* – 360º (кольцеобразный контрактор); кр. *3* – 180º. Радиальный размер обмотки: *а* – $r_г < r < r_0$; *б* – $r_г < r < r_к$

Результаты моделирования (рис. 3), пересчитанные на мощность дозы тормозного излучения с мишени бетатрона на расстоянии 1 м, в зависимости от величины тока с проводящего слоя камеры (при частоте следования импульсов в намагничивающей обмотке бетатрона типа МИБ-6 ~ 50 Гц) показали наличие максимумов при токе со слоя, равном ~ 100 мкА. Согласно расчетам, в случае применения стандартного кольцеобразного контрактора, значение мощности дозы в максимуме составляет $P = 1{,}1$ сГр/мин. При использовании секторной обмотки $\psi = 180^\circ$ мощность дозы в максимуме равна $P = 1{,}6$ сГр/мин. Полученные данные согласуются с реально наблюдаемыми на практике [3]. Например, в работе [3] приведена мощность дозы тормозного излучения с мишени бетатрона МИБ-6 (на расстоянии 1 м от мишени). При частоте 200 Гц мощность дозы равна $P = 3{,}0$ сГр/мин, что одного порядка с результатами моделирования, в случае применения стандартного кольцеобразного контрактора, при перерасчете с частоты 50 Гц на частоту 200 Гц.

Таким образом, применение секторной обмотки в качестве контрактора бетатрона позволяет получить величину захваченного в ускорение заряда не меньше, чем при обычном кольцеобразном контракторе, а в случае применения обмотки протяженностью $\psi = 180^\circ$ – значительно больше.

На основе моделирования процесса инжекции и захвата электронов в ускорение определили параметры инжектированных частиц, захваченных в ускорение в бетатроне типа МИБ-6 с вариацией поля. Получено, что из большого количества инжектированных электронов в ускорение захватываются только те частицы, которые на первом обороте после вылета из инжектора двигались в сторону больших радиусов (с углами $\alpha < 90°$), а затем на

последующих оборотах, после взаимодействия с полем заряда на внутренней стенке камеры, изменяли параметры своего движения и обходили инжектор. Средняя энергия электронов, захватываемых в ускорение, равна $E_{инж} \approx 29{,}3$ кэВ. Захват происходил вблизи вершины импульса напряжения инжекции в течение интервала времени, равном ~ 1,2 мкс.

Следовательно, захват электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля происходит вблизи вершины импульса инжекции и ограничен определенными начальными параметрами, с которыми частицы инжектируются в ускорительную камеру.

На величину заряда, захваченного в ускорение в бетатроне, влияет также выбор величины задержки импульса инжекции относительно момента появления тока в намагничивающей обмотке электромагнита ускорителя. На рис. 4, *а* показана расчетная зависимость захваченного в ускорение заряда, в пересчете на мощность дозы тормозного излучения с мишени бетатрона типа МИБ-6 с вариацией поля на расстоянии 1 м, от времени задержки импульса инжекции (при частоте следования импульсов ~ 50 Гц). Видно, что наиболее эффективный захват электронов в ускорение происходил при величине задержке импульса инжекции, равной $\tau_з = 19{,}42$ мкс, полученной из выражений (4)-(5).

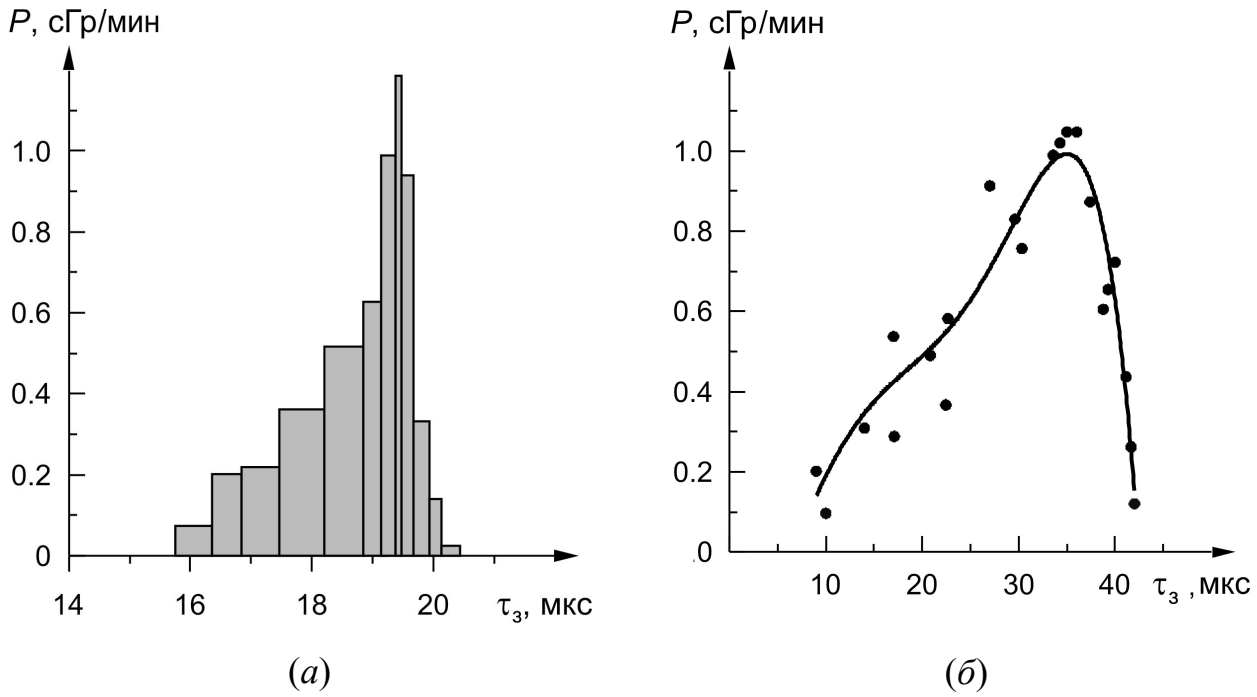


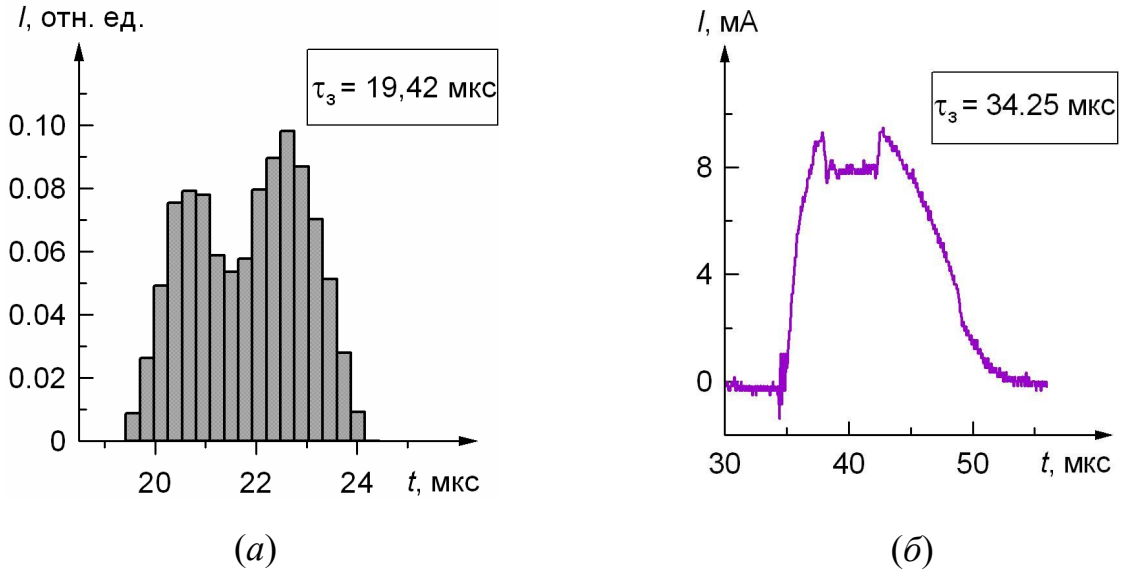
Рис. 4. Эффективность захвата электронов в ускорение в бетатроне типа МИБ-6 (*а*) и измеренное распределение мощности дозы тормозного излучения с внутренней мишени бетатрона МБ-6 с азимутально-симметричным полем (*б*) в зависимости от времени задержки импульса инжекции

Для сравнения на рис. 4, *б* приведены результаты экспериментального измерения мощности поглощенной дозы тормозного излучения с мишени бетатрона МБ-6 с азимутально-симметричным полем (на расстоянии 1 м) в зависимости от времени задержки $\tau_з$ импульса инжекции. Максимальная

кинетическая энергия ускоренных электронов была равна E_{max}= 6 МэВ, длительность импульса тока в обмотке электромагнита составляла $\tau_{эм}$ = 4 мс при частоте следования импульсов ~ 50 Гц. Длительность и амплитуда импульса напряжения, подаваемого на катод инжектора, были равны 14 мкс и 46,22 кВ, соответственно.

Результаты моделирования и эксперимента показали, что оптимальному времени задержки импульса инжекции, как уже отмечалось выше, соответствуют вторая точка пересечения импульса инжекции (рис.1) и кривой кинетической энергии электронов, ускоряемых на равновесной орбите.

На следующем этапе исследований определили зависимость потерь электронов на стенках ускорительной камеры от времени задержки импульса инжекции. Электроны, не захваченные в ускорение, выпадают на стенки, образуя ток с проводящего слоя (высокоомного покрытия) камеры. Анализ полученных осциллограмм и гистограмм показал, что верхняя часть импульса тока в определенный момент времени имеет изломанную форму с одним или двумя провалами. Наличие провала объясняется захватом электронов в ускорение и потерями на анодной коробочке инжектора инжектированных частиц с параметрами траекторий, близкими к параметрам траекторий электронов, захваченных в ускорение. При этом, как показали результаты моделирования и эксперимента, для оптимальной величины задержки импульса инжекции характерно наличие большого провала на вершине импульса тока с проводящего слоя камеры (рис. 5).



(*а*) (*б*)

Рис. 5. Плотность распределения частиц, не захваченных в ускорение и выпавших на стенки камеры бетатрона типа МИБ-6 (*а*) и осциллограмма импульса тока с проводящего покрытия камеры бетатрона типа МБ-6 (*б*) с азимутально-симметричным полем

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для двух различных типов бетатронов показало их качественное согласие, что подтверждает правильность используемой методики расчета инжекции и захвата электронов в ускорение в бетатроне.

На заключительном этапе изучения процесса захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля исследовали влияние положения гребней полюсов ускорителя на величину заряда, захваченного в ускорение (рис. 6). При моделировании гребни смещали относительно их стандартного положения (когда инжектор и середина одного из гребней расположены на одинаковом азимуте $\varphi = 0^{\circ}$) по ходу движения электронного пучка с азимутальным шагом $\Delta\varphi = 5^{\circ}$, при фиксированной величине заряда, инжектированного в камеру (~ 500 000 разыгрываемых историй).

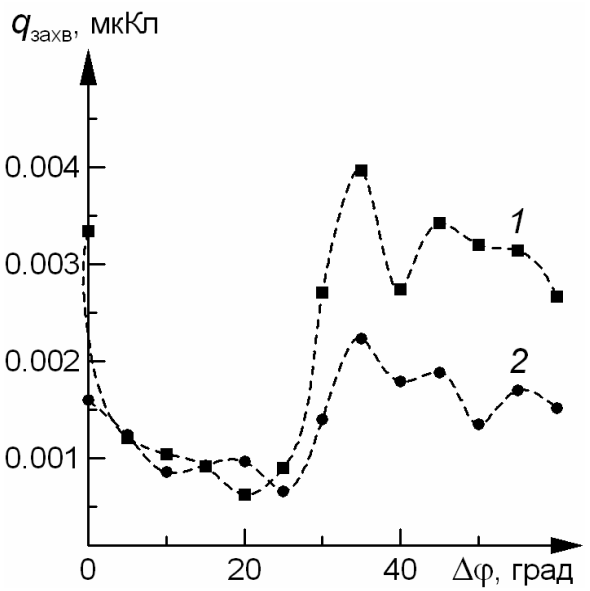


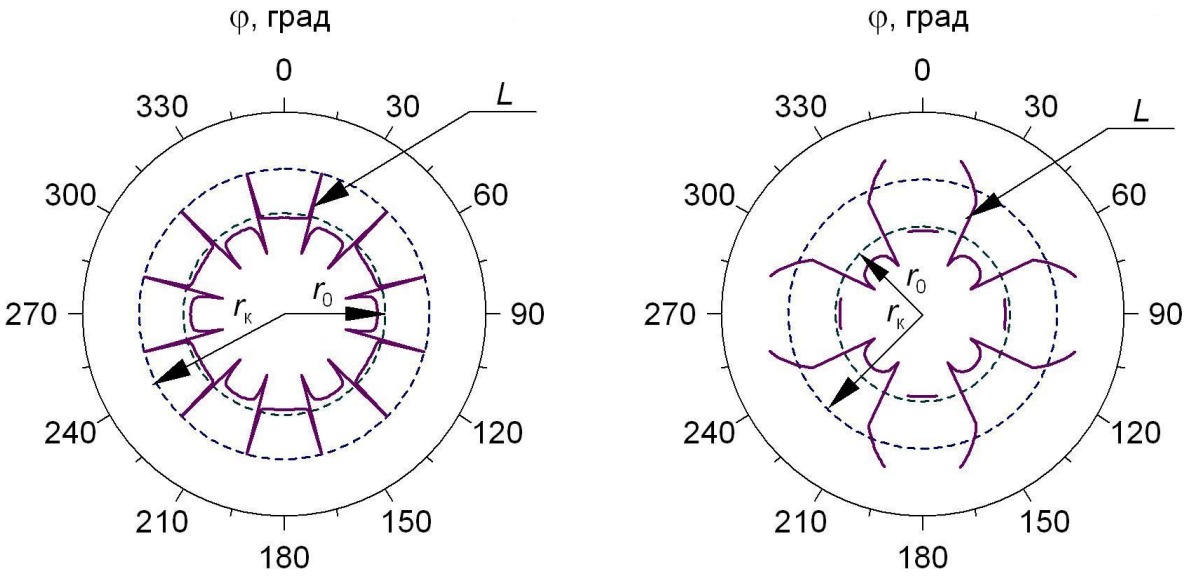
Рис. 6. Зависимость величины захваченного в ускорение заряда электронов от азимутального угла смещения положения гребней полюсов $\Delta\varphi$ относительно их стандартного положения в бетатроне типа МИБ-6. Радиальный размер обмотки контрактора: кр. *1* – $r_г < r < r_0$; кр. *2* – $r_г < r < r_к$

Согласно расчетам, для захвата электронов в ускорение в бетатроне типа МИБ-6 с азимутальной вариацией поля оптимальным положением гребней полюсов является положение, когда азимутальный угол по ходу движения пучка между положением инжектора и серединой гребня составляет $\Delta\varphi = 35^{\circ}$. При этом наблюдается увеличение величины захваченного заряда ~ в 1,2-1,4 раза.

В **третьей** главе промоделированы процессы вывода электронов из камеры и формирование выводимого электронного пучка в краевом поле бетатрона с азимутальной вариацией. При этом главной целью исследования являлось выявление влияния радиально-гребневой конструкции полюсов ускорителя на динамику частиц в процессе вывода пучка.

Согласно расчетам, положение границы освобождения электронов из-под действия фокусирующих сил в бетатроне с радиально-гребневыми полюсами отличается от положения границы, определенного по азимутально-симметричной части суммарного поля ускорителя (рис. 7). Если в азимутально-однородном поле граница освобождения представляет собой круговую орбиту, то в периодичном поле по азимуту границей освобождения является граница между впадиной и гребнем полюсов бетатрона.

Все последующие расчеты проводили для электронного пучка, ускоряемого в камере бетатрона типа МИБ-6Э (МИБ-6 с выводом электронного пучка), основные характеристики которого даны в табл. 1.



(*а*) (*б*)

Рис. 7. Границы освобождения электронов из-под действия фокусирующих сил поля бетатрона: *а* – типа МИБ-6; *б* – типа МИБ-4; r_0 – радиус равновесной орбиты; $r_к$ – радиус орбиты освобождения, определенный по азимутально-симметричной части суммарного поля ускорителя; *L* – граница освобождения

Изучение динамики частиц в процессе вывода основывалось на численном моделировании процесса ускорения инжектированных электронов до энергии ~ 6 МэВ и последующего вывода частиц из ускорителя. При этом разыгрывали $N_{ист} = 10^5$ историй. Ускорение электронов до конечной энергии осуществляли за $N_{max} = 5 \cdot 10^3$-10^4 оборотов частицы по равновесной орбите.

Результаты моделирования показали, что поперечные размеры пучка остаются практически неизменными на протяжении всего цикла ускорения. Это подтверждается и ранее сделанными выводами в работе [1] о том, что в процессе ускорения электронов в бетатроне адиабатическое затухание бетатронных колебаний частиц незначительно.

На основе найденного распределения частиц пучка в конце цикла ускорения далее промоделировали вывод электронов из камеры бетатрона магнитным способом с помощью секторной обмотки вывода определенной протяженности ψ по азимуту, по виткам которой в заданный момент времени пропускали импульсный ток. При моделировании радиальный размер обмотки выбирали в пределах радиусов $r_г < r < r_к$. Азимутальную протяженность обмотки ψ варьировали в диапазоне 60-180º. Величину амплитуды возмущающего поля на равновесной орбите выбирали в пределах 7,5-23% от величины индукции B_0 на орбите r_0.

Под действием импульсного поля секторной обмотки вывода происходит нарушение устойчивого движения электронов вблизи равновесной орбиты, приводящее к раскачке бетатронных колебаний. В результате одновременного действия вариации поля и импульсного поля обмотки траектории частиц на

последних оборотах приобретают сложную форму и, достигнув орбиты освобождения, электроны попадают в краевое поле.

Поскольку в бетатроне с вариацией поля границей освобождения электронов из-под действия фокусирующих сил является граница между гребнем и впадиной полюсов ускорителя, то частицы выводимого пучка выходят в краевое поле с определенных азимутов, коррелированных с положением гребней полюсов, в узком интервале углов $\alpha = 60\text{-}90^{\circ}$. На практике эта дискретность не наблюдается, поскольку электроны при выходе из камеры обладают различными углами вылета α, что приводит к перемешиванию траекторий частиц в краевом поле, где происходит окончательное формирование выводимого электронного пучка бетатрона.

В результате исследований определили основные параметры (радиальное распределение электронов по углам вылета, фазовые диаграммы и временное распределение частиц) электронного пучка, выведенного из бетатрона типа МИБ-6Э, на различных этапах процесса вывода.

Полученное в результате моделирования радиальное распределение частиц выведенного электронного пучка по углам вылета (на фиксированном азимуте $\varphi = 300^{\circ}$) в краевом поле бетатрона и за его пределами хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [1].

Фазовые диаграммы пучка также показали хорошее согласие с результатами эксперимента [4]. Определенные по углам вылета в вертикальной и медианной плоскости ускорителя положения мнимых источников были сдвинуты по азимуту на угол $\sim 13^{\circ}$ вдоль оси пучка, что подтверждает ранее сделанные выводы в работе [4], указывающие на то, что электронный пучок, выведенный из бетатрона с азимутальной вариацией поля, является астигматичным.

Полученное временное распределение частиц выведенного электронного пучка относительно момента появления тока в витках обмотки вывода соответствует реально наблюдаемым осциллограммам импульса излучения. При длительности импульса тока в обмотке ~ 25 мкс длительность электронного излучения составила ~ 8 мкс. При этом между моментом возникновения тока в витках обмотки вывода и появлением импульса излучения наблюдается задержка во времени, что соответствует практическим наблюдениям [1] и говорит о пороговом характере процесса вывода.

Таким образом, хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает адекватность используемой модели вывода электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля.

С целью улучшения надежности работы бетатрона МИБ-6Э с вариацией поля и выводом электронного пучка предложено секторную обмотку вывода протяженностью $\psi = 180^{\circ}$ одновременно использовать в качестве контракторного устройства. При этом оптимальным положением секторной обмотки в межполюсном пространстве ускорителя является положение, когда середина обмотки находится на азимуте $\varphi = 90^{\circ}$.

На заключительном этапе исследования определили, насколько

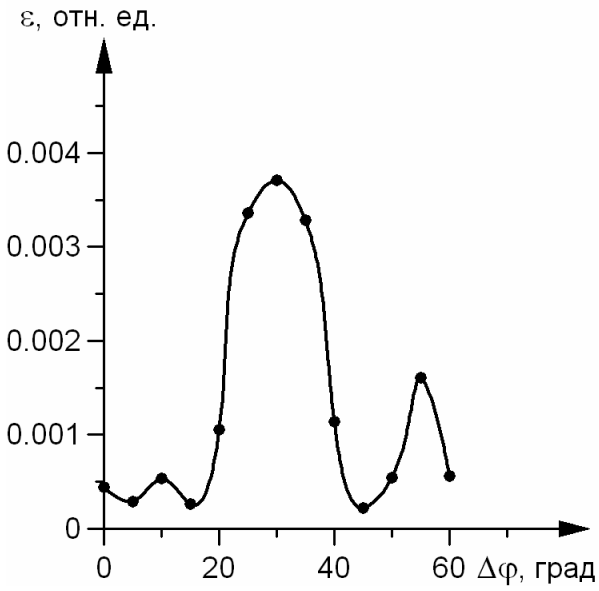


Рис. 8. Зависимость эффективности вывода электронов из бетатрона типа МИБ-6Э от положения гребней полюсов относительно их стандартного положения

существенно поворот гребней полюсов относительно их стандартного положения влияет на процесс вывода электронного пучка из бетатрона типа МИБ-6Э (рис. 8), поскольку изменение положения гребней приводит к смещению границ освобождения электронов относительно выводного окна.

При моделировании вывод пучка осуществляли обмоткой с азимутальной протяженностью $\psi = 180^\circ$. Положение середины гребней полюсов смещали относительно стандартного положения по азимуту с шагом $\Delta\varphi = 5^\circ$ в направлении движения электронного пучка в камере бетатрона.

Согласно расчетам, наилучшим для вывода положением гребней полюсов ускорителя является их смещение относительно положения инжектора на угол $\Delta\varphi = 30^\circ \pm 5^\circ$ (или их совмещение по азимуту со стойками обратного магнитопровода).

Основные результаты работы

Основные результаты диссертационного исследования сводятся к следующему.

В работе уточнены выражения для компонент магнитной индукции, учитывающие реальное распределение поля бетатрона с азимутальной вариацией на больших радиусах. При этом в уравнения магнитного поля введены поправки, учитывающие действие импульсных полей контрактора и обмотки вывода.

Предложена методика определения оптимального времени задержки высоковольтного импульса напряжения, подаваемого на катод инжектора, относительно момента появления тока в обмотке электромагнита бетатрона.

Полученные расчетные зависимости величины захваченного в ускорение заряда от величины инжектированного заряда в камеру бетатронов типа МИБ-6 и типа МИБ-4 с азимутальной вариацией поля (в абсолютных единицах) на основе *электретного механизма захвата* [1] показали необходимость применения во время инжекции импульсного поля контрактора, что позволяет на порядок увеличить величину захваченного в ускорение заряда.

Сравнение эффективностей захвата электронов в ускорение с учетом действия импульсного поля кольцеобразного контрактора и секторной обмотки контрактора различной протяженности по азимуту ($\psi = 60\text{-}180^\circ$) показало

возможность применения последней в качестве контракторного устройства, при этом наиболее эффективной оказалась секторная обмотка с азимутальной протяженностью $\psi = 180^{\circ}$.

В результате моделирования и экспериментального исследования влияния задержки импульса инжекции относительно момента появления тока в витках обмотки электромагнита на потери электронов на стенках камеры определено, что наличие большого провала на вершине импульса тока с проводящего слоя камеры соответствует оптимальной задержке импульса инжекции.

Показано, что на захват частиц в ускорение в бетатроне типа МИБ-6 с азимутальной вариацией поля существенно влияет положение гребней полюсов ускорителя, приводящее к увеличению величины захваченного заряда ~ в 1,2-1,4 раза, в результате сдвига положения гребней на угол $\Delta\varphi = 35^{\circ}$ относительно их стандартного положения.

Определено, что в момент вывода электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля частицы освобождаются из-под действия фокусирующих сил на границе между гребнем и впадиной полюсов ускорителя, тогда как в бетатроне с азимутально-однородным полем, граница освобождения представляют круговую орбиту. Таким образом, частицы вылетают в краевое поле с определенных азимутов, коррелированных с положением гребней полюсов, в узком интервале углов.

Промоделирован процесс вывода электронного пучка из бетатрона типа МИБ-6Э с азимутальной вариацией поля, и определены основные параметры выведенного пучка: радиальное распределение частиц по углам вылета, фазовые диаграммы и временное распределение частиц, – хорошо согласующиеся с экспериментальными данными работы [1].

С целью улучшения надежности работы бетатрона МИБ-6Э с азимутальной вариацией поля и выводом электронного пучка предложено секторную обмотку протяженностью $\psi = 180^{\circ}$ для вывода пучка одновременно использовать в качестве контракторного устройства.

Показано, что наилучшим для вывода положением гребней полюсов бетатрона типа МИБ-6Э является их смещение относительно стандартного положения на угол от 30° до 35° по ходу пучка (т. е. их совмещение по азимуту со стойками обратного магнитопровода), что соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [4].

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Иванилова Т.С., В.В. Кашковский. Граница освобождения электронного пучка в бетатроне с полюсами гребневого типа // Изв. ТПУ. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 55-56.
2. Иванилова Т.С., Кашковский В.В. Моделирование вывода электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 11/2. – С. 117-123.
3. Иванилова Т.С., Кашковский В.В. Динамика электронного пучка в

бетатроне с азимутальной вариацией поля в процессе вывода // IV Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 15-18 мая 2007 г.): Сборник трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 39-40.

4. Иванилова Т.С. Моделирование вывода электронного пучка из бетатрона с азимутальной вариацией поля // V Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 20-23 мая 2008 г.): Сборник трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 41-43.
5. Иванилова Т.С., Кашковский В.В. Моделирование процесса захвата электронов в ускорение в бетатроне с радиально-гребневыми полюсами // Научная сессия МИФИ – 2008: Сборник научных трудов. –М.: Изд. МИФИ, 2008. – Т. 5. – С. 24-25.
6. Иванилова Т.С., Кашковский В.В. Моделирование захвата электронов в ускорение в бетатроне с азимутальной вариацией поля // Научная сессия МИФИ – 2009: Сборник научных трудов.– М.: НИЯУ МИФИ, 2009. – Т. 2. – С. 135-138.
7. Иванилова Т.С., Кашковский В.В. Сравнение экспериментальных и расчетных параметров захваченного заряда при инжекции электронов в бетатрон // Международная научная конференция «Становление и развитие научных исследований в высшей школе»: Сборник трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 72-79.

Список литературы

[1]. Кашковский В.В. Динамика и параметры электронных пучков бетатронов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 196 с.

[2]. Чахлов В.Л., Романов В.В., Нестеров А.С. Исследование эффективности применения контрактора в бетатроне ПМБ-6 // Труды научн.-иссл. инст. яд. физ. элекр. и автом. при Томск. политех. ин.-те. – М.: Атомиздат, 1973. – Вып. 3. «Ускор. зар. частиц». – С. 9-12.

[3]. Москалев В.А., Чахлов В.Л. Бетатроны. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. –267 с.

[4]. Кашковский В.В. Системы формирования электронного пучка, выводимого из бетатрона: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск: ТПИ, 1985. – 262 л.