

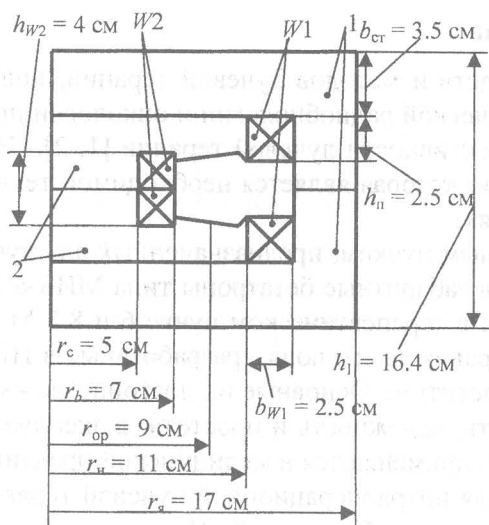


Рис.4. Конструкция электромагнита бетатрона с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной для медицинских целей (с $W_k = 14$ МэВ), где 1 – обратный магнитопровод; 2 – полюса с центральным сердечником в монолитном исполнении; $W1$ – обмотка возбуждения; $W2$ – компенсационная обмотка

8. Максимальное поле облучения 10×30 см.

В электромагните применены полюса гребневой конструкции. Величина воздушного зазора на равновесном радиусе $l_0 = 34$ мм. Схема питания позволяет регулировать энергию ускоренных электронов в пределах 3...12 МэВ и оперативно корректировать поле излучения. Если сравнивать бетатрон с такой конструкцией электромагнита с бетатроном МИБ-10Э [5], то он будет обладать лучшими техническими характеристиками, так как кинетическая энергия ускоренных электронов будет больше в ~ 1.5 раза, массогабаритные параметры емкостного накопителя меньше в ~ 1.5 раза при сохранении массогабаритных параметров электромагнита.

Таким образом, конструкция электромагнита бетатрона с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной позволяет расширить возможности применения бетатронов в целях дефектоскопии и медицинских целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 352 с.
2. Москалев В.А. Бетатроны. – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.
3. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием. // ПТЭ, 2002. №1. – С.5-9.
4. Чертов А.С. Бетатрон с размагничиванием магнитопровода. Диссертация. – Томск, 2002.
5. В.Л. Чахлов, В.Г. Волков, А.А. Звонцов и др. – Изв. Вузов: Физика, 2000. №4. – С.134-135.

УДК 621.384.6

М.М. РЫЧКОВ, В.Л. ЧАХЛОВ, А.С. ЧЕРТОВ

БЕТАТРОН С РАЗМАГНИЧИВАНИЕМ МАГНИТОПРОВОДА С ВЫВЕДЕННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В работе рассмотрена магнитная система бетатрона с размагничиванием магнитопровода, в которой обмотка возбуждения включена последовательно и встречно с компенсационной обмоткой. Экспериментальное исследование магнитной системы бетатрона с размагничиванием магнитопровода проведено на базе электромагнита серийно-выпускаемого бетатрона МИБ-6. Для данной магнитной системы разработана схема питания, обеспечивающая вывод электронов за пределы излучателя в конце цикла ускорения. Осуществлен запуск бетатрона с размагничиванием магнитопровода на кинетическую энергию ускоренных электронов в выведенном пучке 6 МэВ, с частотой следования импульсов излучения 50 Гц. Приведены кривые распределения дозных полей выведенного электронного пучка.

Введение

Современные достижения в развитии средств и методов лучевой терапии, новые научные данные в экспериментальной и клинической радиобиологии и онкологии привели к значительному повышению роли и эффективности лучевой терапии [1, 2]. Это стимулирует и развитие ускорительной техники, которая является необходимой технической базой в научных и лечебных учреждениях.

Среди бетатронов с выведенным электронным пучком, предназначенных для лучевой терапии, следует отметить переносные малогабаритные бетатроны типа МИБ-6Э и БМ-10Э на кинетическую энергию электронов в терапевтическом пучке 6 и 8,5 МэВ, соответственно, с азимутальной вариацией управляющего поля, разработанные в НИИ интроскопии при Томском политехническом институте. Основные их достоинства - малые массогабаритные параметры, маневренность, надежность и простота в эксплуатации. Эти бетатроны в течение ряда лет успешно применяются в медицинской практике, как в томских, так и в зарубежных клиниках для интраоперационной лучевой терапии (ИОЛТ) и лечения разнообразных поверхностных новообразований. Однако, как показала практика [2], одним из недостатков этих установок является пространственное смещение оси пучка и изменение конфигурации поля облучения при изменении энергии ускоренных электронов, что приводит к длительным операциям настройки и корректировки пространственного положения пучка с привлечением высококвалифицированных специалистов. Данный факт ограничивает использование этих перспективных установок, так как в большинстве случаев применения выведенного пучка необходимо оперативное регулирование энергии выведенных электронов и конфигурации поля излучения.

Конструкция электромагнитной системы

В основе исследуемой системы лежит конструкция бетатрона с размагничиванием магнитопровода БРМ [3]. Хотя данная система предназначена для получения тормозного излучения, при некоторых изменениях его конструкции такую систему можно успешно применить для вывода пучка и устранить недостатки, присущие медицинским бетатронам. Достоинство такой системы состоит в том, что управляющее поле в рабочем зазоре формируется двумя обмотками с примерно равным числом витков, и при одинаковых параметрах излучения в бетатроне такой конструкции по сравнению с классическим бетатроном радиальные размеры намагничивающей обмотки можно уменьшить. Такое конструктивное решение позволяет уменьшить поля рассеяния с полюсов. По проведенным на модернизированном электромагните ПМБ-6 измерениям (рис.1), потоки рассеяния Φ_p (поток через площадку $r_{ст}-r_{ос}$, где $r_{ст}$ - внутренний радиус стойки обратного магнитопровода, $r_{ос}$ - радиус освобождения частицы) с уменьшенной обмоткой и стандартной отличаются примерно в 2 раза. При этом величина Φ_p определялась по выражению:

$$\Phi_p = 2\pi \int_{r_{ос}}^{r_{ст}} r B_z(r) dr \quad (1)$$

Уменьшение полей рассеяния, соответственно, приводит к увеличению эффективности вывода т.к. увеличивается эффективное сечение выводного окна вследствие того, что электроны покидают рабочее пространство ускорителя с большими углами между вектором скорости частицы и радиус-вектором ее положения.

ничивания) I_0 , который задает магнитное состояние магнитопровода электромагнита бетатрона (рис.3). При протекании тока I_0 по обмотке $W1$ в замкнутом магнитопроводе создается постоянный магнитный поток $-\Phi_{с.н.}$. В момент времени t_1 с приходом управляющих импульсов на тиристоры $V3 \dots V5$ включаются два тиристора, имеющие требуемую полярность емкостного накопителя $Cн$ и он начинает разряжаться на включенные последовательно и встречно обмотки $W1$ и $W2$. В процессе ускорения t_y выполнение бетатронного соотношения 2:1 на расчетном радиусе полностью осуществляется за счет выбранного соотношения витков обмоток $W1$, $W2$ и технологических зазоров в цепях магнитопровода. В момент времени t_1 включается также тиристор V_k и корректирующий конденсатор C_k , заряженный до требуемого напряжения через резисторы $R1 \dots R2$, начинает разряжаться на обмотку $W2$ через резистор $R3$. Ток разряда конденсатора C_k направлен встречно току компенсационной обмотки $W2$ и ее магнитодвижущая сила уменьшается, что вызывает появление дополнительного магнитного потока

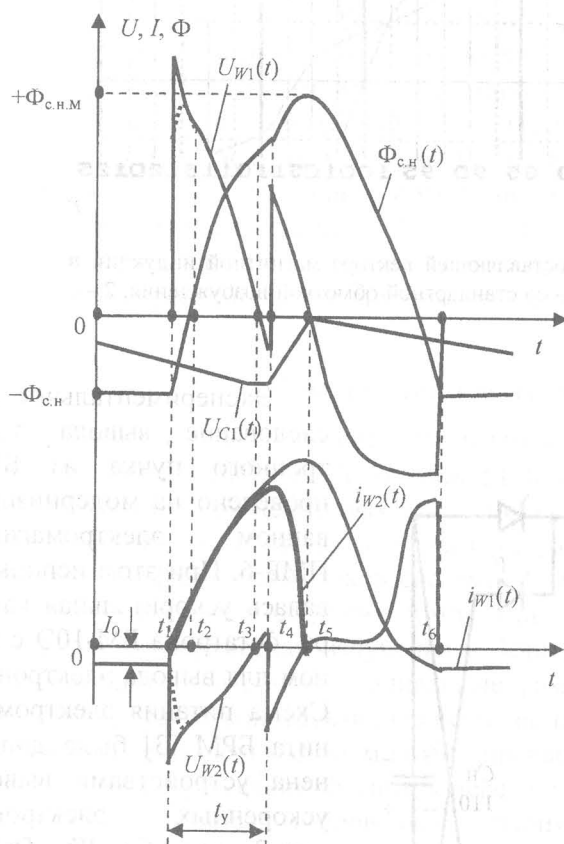


Рис.3. Изменения во времени токов, напряжений, магнитных потоков в схеме питания бетатрона с размагничиванием, где: $\Phi_{с.н.}(t)$ — магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода; $U_{C1}(t)$ — напряжение на конденсаторе $C1$; $U_{W1}(t)$ — напряжение на обмотке возбуждения $W1$; $U_{W2}(t)$ — напряжение на компенсационной обмотке $W2$ (пунктиром показаны изменения напряжений $U_{W1}(t)$ и $U_{W2}(t)$ при отключенной цепи коррекции); $i_{W1}(t)$ — ток обмотки возбуждения $W1$; $i_{W2}(t)$ — ток компенсационной обмотки $W2$

через центральный сердечник магнитопровода в интервале времени $t_1 \div t_2$, который компенсирует начальное сжатие равновесной орбиты, вызванное нелинейностью петли гистерезиса на начальном этапе перемагничивания магнитопровода. Изменение напряжения на конденсаторе C_k осуществляется переменным резистором $R1$ и выбирается исходя из максимальной интенсивности излучения. Для рассматриваемой схемы наиболее оптимальным моментом начала вывода пучка является момент времени t_3 , когда напряжение на емкостном накопителе $Cн$ близко к 0 и равно активному падению напряжения на обмотке $W2$. В интервале времени $t_3 \div t_4$ обмотка $W2$ закорачивается диодом $D7$, при этом ее ток и магнитодвижущая сила уменьшаются. Это вызывает появление дополнительного магнитного потока через центральный сердечник магнитопровода, и радиус равновесной орбиты увеличивается со скоростью порядка 10^3 м/с. В момент времени t_4 включается тиристор $V1$, запитывая обмотку смещения $Wс$ при зарядке конденсатора $Cв$ от конденсатора $C1$. В обмотке смещения, представляющую сектор протяженностью 180° и уложенную в межполюсном пространстве электромагнита, формируется импульс тока $Iв$, и относительно азимутально-симметричного управляющего

поля создается секторное поле, направленное встречно управляющему, и обеспечивающее вывод электронного пучка через выводное окно ускорительной камеры. При этом диод $D7$ закрывается, ток обмотки $W2$ начинает уменьшаться с гораздо большей скоростью т.к. ток разряда конденсатора $C1$ направлен встречно току обмотки $W2$, а ток обмотки $W1$ переходит в цепь конденсатора $C1$ и тиристора $I1$. В течение интервала времени $t_4 \div t_5$ происходит ввод энергии от конденсатора $C1$ в колебательный контур для компенсации потерь энергии в нем за цикл ускорения, а ток обмотки $W2$ спадает до нуля. При полном разряде конденсатора $C1$ (момент времени t_5) включается диод $D7$, тиристор $I1$ выключается и конденсатор $C1$ вновь заряжается током I_0 . Заряд конденсатора $C1$ а следовательно и энергию, вводимую в колебательный контур, можно регулировать (до 30%) временем включения тиристора Ic , что и использовалось для стабилизации энергии ускоренных электронов. Более глубокую регулировку энергии выведенных электронов можно осуществить либо изменением емкости конденсатора $C1$, либо изменением напряжения питания. При этом частотные характеристики колебательного контура т.е. время ускорения не изменяются, и в отличие от бетатронов классической конструкции, энергия электронов определяется не временем смещения ускоренных частиц при неизменном времени ускорения, а величиной реактивной энергии колебательного контура.

Экспериментальное исследование пространственного распределения электронного излучения

Для описанного выше режима работы были сняты распределения дозных полей в плоскости равновесной орбиты (рис.4). При этом использовался дозиметр "Robotron" M2300 с плоской камерой 70 127 в комплекте с прилагаемым к камере сборным полиэтиленовым фантомом. Камера 70 127 согласована с прилагаемым полиэтиленовым

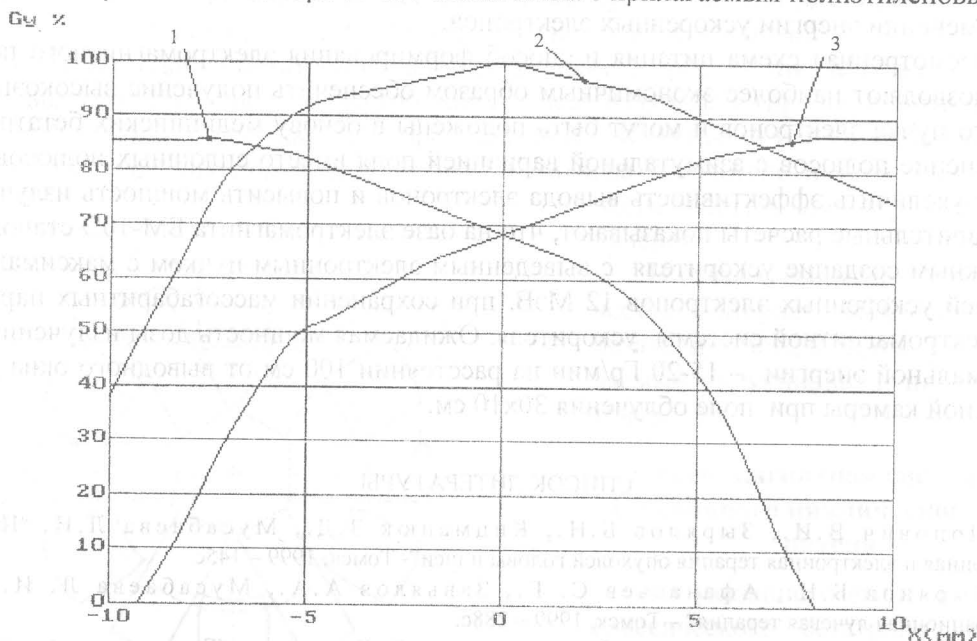


Рис 4. Распределения дозных полей в плоскости равновесной орбиты при различных временах вывода электронного пучка, где: 1 – 800мкс, 2- 850 мкс, 3-900 мкс

фантомом и может быть установлена как на поверхности, так и на глубинах в диапазоне, соответствующем энергии электронов в терапевтическом пучке бетатрона, с достаточной дискретностью. Измерения проводились при различных временах включения тиристора U_c , т.е. включение секторной обмотки осуществлялось при различных значениях равновесной орбиты. Распределения дозных полей в медианной плоскости выведенных электронов представлены на рис.4. Из рисунка видно, что ось пучка и пространственное распределение электронного излучения являются функциями задержки включения тиристора U_c .

Заключение

Таким образом, на основе экспериментально полученных результатов, можно выделить ряд преимуществ новой системы:

1. За счет применения обмотки возбуждения с меньшими радиальными размерами удалось уменьшить поля рассеяния с полюсов и обмоток и тем самым увеличить эффективность вывода электронного пучка и интенсивность излучения.

2. Для расширения равновесной орбиты в конце цикла ускорения не требуется специальной схемы и не нужно в рабочем зазоре размещать витки предварительного расширения равновесной орбиты как в стандартном бетатроне.

3. Медленное расширение равновесной орбиты (приблизительно 10^2 м/с) в конце цикла ускорения за счет изменения разницы магнитодвижущих сил намагничивающей и компенсационной обмотки позволяет достаточно точно синхронизировать процессы предварительного симметричного расширения и последующего секторного возмущения равновесной орбиты.

4. Изменение фазы включения тиристора ввода энергии приводит к изменению положения оси пучка, что можно использовать для стабилизации положения оси пучка при изменении энергии ускоренных электронов.

Рассмотренная схема питания и способ формирования электромагнитного поля в БРМ позволяют наиболее экономичным образом обеспечить получение высокоэнергетического пучка электронов и могут быть положены в основу медицинских бетатронов. Применение полюсов с азимутальной вариацией поля вместо сплошных полюсов позволит увеличить эффективность вывода электронов и повысить мощность излучения. Предварительные расчеты показывают, что на базе электромагнита БМ-10Э становится возможным создание ускорителя с выведенным электронным пучком с максимальной энергией ускоренных электронов 12 МэВ, при сохранении массогабаритных параметров электромагнитной системы ускорителя. Ожидаемая мощность дозы излучения при максимальной энергии – 15-20 Гр/мин на расстоянии 100 см от выводного окна ускорительной камеры при поле облучения 30×10 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попович В.И., Зырянов Б.Н., Кицманюк З.Д., Мусабаева Л.И. "Интраоперационная и электронная терапия опухолей головы и шеи"- Томск, 1999 – 145с.

2. Зырянов Б.Н., Афанасьев С. Г., Завьялов А.А., Мусабаева Л. И. "Интраоперационная лучевая терапия" – Томск, 1999 – 288с.

3. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., и др. "Бетатрон с подмагничиванием". ПТЭ.-2002. - № 1. С 5-9.