

0-381

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ОГНЕВ Андрей Александрович

Разработка режимов многоцелевого использования циклотрона

**(Специальность 0,5.14.11—Электрофизические установки
и ускорители)**

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

Дубна — 1975

УДК 621.384.63

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

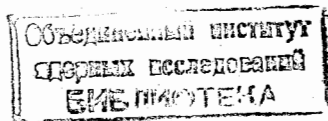
На правах рукописки

ОГНЕВ Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ
МНОГОЦЕЛЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛОТРОНА

(Специальность 05. 14. 11 - Электро-
физические установки и ускорители)

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Дубна - 1975

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени
Физико-энергетическом институте.

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Н.Н.Краснов.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
А.А.Глазков,
кандидат технических наук
Р.Ц.Оганесян.

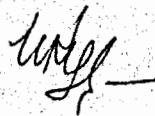
Ведущая организация - Институт ядерной физики
Казахской Академии Наук.

Автореферат разослан "16" ~~сентября~~ ^{сентября}.... 1975 г.
Защита диссертации состоится "16" ~~декабря~~ ^{декабря}.. 1975 г.
в конференц-зале ЛЯР на заседании Объединенного
Ученого Совета ЛЯР и ДНФ ОИЯИ.
по адресу: г.Дубна, Объединенный институт ядерных
исследований, Лаборатория ядерных реакций.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ....

Ученый секретарь Совета

И.П.Кузнецова



Бурное развитие науки и техники в настоящее время характерно тем, что происходит проникновение ряда достижений ядерной физики в такие области науки и техники как биология, медицина, металлургия, машиностроение и т.д. Поэтому использование ускорителей не только как инструмента для проведения ядерно-физических исследований, но и как промышленной установки для решения прикладных задач в смежных областях науки и техники имеет в настоящее время большое народно-хозяйственное значение.

Среди задач прикладного характера, которые решаются с помощью циклотрона, можно выделить: производство радиоактивных изотопов [1, 2], изучение износа деталей машин методом поверхностной активации [3], активационный анализ на заряженных частицах, изучение радиационных повреждений материалов [4,5,6]. Каждая из перечисленных проблем ставит перед экспериментаторами, занимающимися наладкой и настройкой ускорителя, свои, в зависимости от конкретной задачи, специфические требования, которые в ряде случаев противоречат друг другу. Например, при производстве радиоактивных изотопов, кроме необходимости получения пучков различных ионов высокой интенсивности, необходимо иметь большие размеры пучка для снижения удельной тепловой нагрузки на мишень. В то же время для повышения качества проводимых физических экспериментов и выполнения работ по поверхностной активации деталей машин размеры пучка должны быть минимальными и т.д.

Настоящая работа посвящена созданию различных режимов, позволяющих использовать циклотрон ФЭИ как для производства изотопов, облучения деталей машин и механизмов с целью изучения поверхностного износа, изучения радиационной стойкости материалов, так и для проведения ядерно-физических экспериментов, когда требуется хорошее качество пучка.

Работа состоит из введения и трех глав:

- I - способы получения различных режимов;
- II - контроль и улучшение качества пучков;
- III - характеристики некоторых специальных режимов работы циклотрона.

В первой главе рассматриваются способы получения режимов ускорения различных ионов до различных энергий, вопросы достижения высоких интенсивностей внутреннего и выведенного пучков циклотрона, а также вопросы, связанные с управлением и контролем за вертикальным и радиальным движением пучка. Показано, что с помощью принципиально простого и недорогого способа формирования магнитного поля с помощью внешних дисковых явим на циклотроне получены режимы ускорения различных ионов [7].

Тип частицы	Энергия, Мэв	Частота генератора, МГц	Напряженность магнитного поля, кэв	Отклонение напряжения, кэв	Ток пучка в импульсе, мка	
					внутренний	внешний
p	22,5	15,9	10,7	57	5000	1200
p	11,4	11,7	15,5	48	2500	600
p	7,1	8,9	11,7	34	5000	1200
d	22,8	11,7	11,5	48	4500	1100
d	14,2	8,9	11,7	34	5000	1200
³ He	32,0	11,1	11,0	45	100	25
³ He	7,5	15,9	10,7	19	100	250
⁴ He	45,6	11,7	15,5	48	2000	500
⁴ He	28,0	8,9	11,7	34	2500	600

Как видно из таблицы, для получения девяти режимов используются два основных уровня магнитного поля: $B_1=10,7$ кэс и $B_2=15,5$ кэс. Кроме этих значений индукции в ряде случаев ускорение ведется при индукциях 11,0 кэс и 11,7 кэс. Однако дополнительное имитирование магнитного поля для этих значений

индукций не проводилось. Это связано с тем, что при повышении индукции от 10,7 кэс до 11,7 кэс получаемая форма спада магнитного поля, как показывают расчеты фазового движения и эксперименты, является еще удовлетворительной, так как энергия ускоренных ионов относительно невелика и лежит в области 7 Мэв/нуклон.

При промышленном производстве изотопов, когда рентабельность работы установки играет не последнюю роль, важным является вопрос достижения максимальной интенсивности пучка на конечном радиусе ускорения [8].

Величина интенсивности пучка циклотрона определяется, в основном, двумя факторами: величиной тока пучка, получаемого из ионного источника, и потерями пучка в процессе ускорения. Существующие конструкции ионных источников позволяют получать достаточно высокоинтенсивные пучки легких ионов с малой зарядностью. Вопрос сведения к минимуму потерь в процессе ускорения в какой-то мере индивидуален для каждого ускорителя и требует дополнительного изучения. Уменьшение потерь пучка в процессе ускорения важно не только для получения большой интенсивности, но и уменьшения активации элементов конструкции, что в свою очередь очень важно для радиационно-безопасного проведения наладочных и ремонтных работ. Для того, чтобы количественно оценить результат настройки, необходимо иметь теоретическую кривую потерь пучка в процессе ускорения для сравнения ее с экспериментальной кривой зависимости тока пучка от радиуса.

Сделана теоретическая оценка потерь пучка в процессе ускорения. Проведенные расчеты показали, что при выбранной геометрии дуантов, щели ионного источника, форме спада магнит-

ного поля и величине ускоряющего напряжения отношение значений токов на $R = 14$ см и $R = 42$ см (после этого значения радиуса вертикальные потери должны отсутствовать) должно быть $\left(\frac{J_{R=14}}{J_{R=42}}\right)_T = 1,4$. Экспериментально полученное отношение токов в период наладки циклотрона составило $\left(\frac{J_{R=14}}{J_{R=42}}\right)_T \approx 3,0 \pm 4,0$.

Исследования вертикального движения показали, что основной причиной, приводящей к дополнительным вертикальным потерям пучка на циклотроне ФЭИ, было несоответствие электрической и магнитной плоскостей. Получены расчетные соотношения, позволяющие определять изменение положения пучка при несоответствии электрической и магнитной плоскостей [9]. Введение дополнительных катушек, создавших радиальную компоненту магнитного поля на малых и средних радиусах, позволило уменьшить потери пучка в процессе ускорения до $\frac{J_{R=14}}{J_{R=42}} = 2,2$.

Подробно рассмотрен вопрос об управлении и контроле за радиальным движением ионов [10, 11]. Разработана методика контроля положения орбиты с помощью двух пробников. Пробники могут перемещаться вдоль ускоряющего зазора между дуантами. Изменяя радиусы пробников R_1 и R_2 , при которых значения токов на оба пробника одинаковы, можно найти зависимость $\Delta \cdot \frac{R_1 - R_2}{2}$ как функцию, например, R_2 . Величина Δ в этом случае будет равна проекции радиуса прецессии центра орбиты на ось, соединяющую пробники. $\Delta = r_p \cos \varphi$, где r_p - радиус прецессии, φ - угол прецессии.

Знание зависимости $\Delta f(r_0)$ достаточно для определения амплитуды и фазы вынужденного радиального движения центра орбиты. Создана и широко используется при производстве радиоактивных изотопов методика управления радиальным "забросом" пучка на внутреннюю мишень путем искусственного введения первой гармоники магнитного поля в нужной фазе. Приводятся несколько

экспериментальных распределений плотностей тока пучка на мишени в зависимости от фазы радиальных колебаний. Использование возможности управления радиальным размером пучка при наличии высокой интенсивности внутренних пучков позволило на циклотроне вести производство изотопов, когда скорость их наработки ограничивалась лишь теплостойкостью мишеней [12, 13].

В разделе главы I - обеспечение высокой интенсивности внешних пучков - приводятся результаты исследований по увеличению коэффициента отклонения пучка путем формирования начальной зоны орбит с помощью подвижного одноцелевого коллиматора [14]. Подвижный коллиматор устанавливался на ионном источнике. С помощью такого коллиматора исключаются из дальнейшего ускорения ионы с нежелательными начальными фазами и ограничивается допустимый начальный разброс центров орбит. Конструкция коллиматора позволяет в зависимости от требуемого режима менять энергию цели путем замены молибденовых накладок, которые крепятся к держателям, хорошо охлаждаемым водой. Коллиматор имеет возможность перемещаться вдоль ускоряющего промежутка и может быть выведен на расстояние, превосходящее радиус установки мишени и радиус конечной орбиты. Приводятся расчеты траекторий ионов на первом обороте для определения положения цели коллиматора, а также расчетные и экспериментальные зависимости тока пучка на конечном радиусе, коэффициента отклонения от положения центра цели коллиматора. Показано, что данный способ формирования зоны центров, а также тщательная коррекция амплитуды первой гармоники азимутальной несимметрии магнитного поля и контроль за положением орбиты с помощью двух пробников позволили увеличить коэффициент отклонения пучка с 45% до 70%. Несмотря на уменьшение интенсивности внутреннего пучка за счет

коллимации в 1,6 раза (ширина щели 10 мм), ток отклоненного пучка удалось увеличить примерно в 2,5 раза по сравнению со случаем без коллимации, т.к. величина среднего значения тока отклоненного пучка ограничивалась тепловой стойкостью отклоняющей системы. Уменьшение начального разброса центров орбит за счет коллимации привело к уменьшению горизонтального размера отклоненного пучка на мишени, поэтому при производстве изотопов на отклоненном пучке создана и используется система модуляции напряжения дефлектора (~ 2 кв) для увеличения горизонтального размера пучка. Получаемое распределение плотности пучка на мишени имеет форму близкую к прямоугольной, что исключает локальный перегрев облучаемой мишени.

Введение модуляции позволило увеличить производительность наработки изотопов на отклоненном пучке в среднем на 30 %.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с улучшением таких характеристик пучка, как уменьшение ширины энергетического разброса частиц в выведенном пучке, исследования временной структуры пучка циклотрона, а также описаны устройства, используемые при исследовании перечисленных характеристик пучка. Измерения энергетического разброса частиц в пучке проводились с помощью кремниевого поверхностно-барьерного счетчика. Показано, что при использовании подвижного однощелевого коллиматора пучка на первом обороте (ширина щели ~ 3 мм) при наличии системы стабилизации ускоряющего напряжения на дуантах и уменьшении тока дуги катодного источника на полутораметровом циклотроне ФЭИ получен пучок ионов ${}^4\text{He}^{2+}$ с шириной энергетического спектра на полувысоте $\sim 0,2$ % при значении среднего тока на мишени ~ 2 мка [15]. Приведены также экспериментальные значения ширины энергетических спектров пучка для различных размеров щели коллиматора и значений тока дуги катодного источника. В этой же

главе дается описание устройств для контроля за средним значением значений энергий пучка как с помощью полупроводникового спектрометра, так и с помощью измерителя энергии по пробегу частиц в веществе, и приводится расчет ошибок определения среднего значения энергии для каждого из методов.

В разделе "Временная структура пучка" описывается методика измерения отскакивающей макроимпульсов тока на мишени (импульсов, частота следования которых определяется модуляцией напряжения на дуантах). Показана основная причина искажения отскакивающей — нестабильность ускоряющего напряжения; приводятся ряд экспериментальных осциллограмм. Измерения и исследования микроструктуры пучка производились с помощью специально собранной установки, на которой изучалась, в основном, стабильность положения ступки относительно фазы высокочастотного напряжения на дуантах. Экспериментально установлено, что изменение положения фазы ступки относительно высокочастотного напряжения на дуантах лежит в пределах $1,5^\circ$. Измерения собственной длительности микроступок проводились с помощью стробоскопического осциллографа 561В. Показано, что одной из основных причин, приводящей к увеличению длительности микроступок, измеряемых на удаленной мишени, является вход в отклоняющую систему двух ступок с соседних орбит.

На циклотроне ФЭИ увеличение ширины ступки в ряде случаев до 8,0 нсек вместо расчетной 3,0 нсек было связано с приходом на мишень двух ступок длительностью ~ 4 нсек, но сдвинутых по времени друг относительно друга на 4,2 нсек. Оба эти ступки идентифицируются как одна ступка длительностью 8 нсек. Наличие двух ступок наблюдается также и при измерениях энергетического спектра пучка. Результаты эксперимента подтверждены расчетом.

Приводится рекомендация устранения эффекта двойного прохождения сгустков - искусственное введение первой гармоники нужной фазы, за счет чего увеличивается расстояние между орбитами при входе в отклоняющую систему. Приводятся экспериментальные данные по длительности сгустка $< 3,9$ нсек, которые относительно хорошо согласуются с расчетным значением $3,0$ нсек.

Глава III посвящена описанию двух специальных режимов работы циклотрона: режима с уменьшением частоты следования сгустков в 4 раза [16] и режима, когда на мишени, расположенной в конце монопровода, имитируются условия облучения изделий и образцов энергетическим спектром вида $\varphi(E) = \frac{const}{E^n}$. Уменьшение частоты следования сгустков применяется на циклотроне ФЭИ в экспериментах с использованием методики времени пролета. Приводятся сравнения некоторых способов уменьшения частоты следования сгустков [17, 18, 19]. Изложены расчеты параметров отклоняющей системы для уменьшения частоты сгустков на выведенном пучке циклотрона. В расчетах по определению отклонения ионов в ловушке двух типов электродов (плоские и параболические) учтены собственная длительность сгустка и изменение напряжения на пластинах за время пролета.

Анализ возможности применения различных систем уменьшения частоты следования сгустков в четыре раза показал, что наиболее приемлемым для циклотрона ФЭИ является использование отклоняющей системы ускорителя, когда на дефлектор, кроме постоянного напряжения, подается синусоидальное модулирующее напряжение с частотой, равной $f_r/4$ и амплитудой ~ 5 кв. Такой способ уменьшения частоты следования сгустков имеет как некоторые преимущества, так и недостатки по сравнению с другими способами

Достоинством такого способа можно считать то, что возникновение разрядов на электродах отклоняющего устройства не приводит к неполному "промигиванию" сгустков. Кроме этого, нет необходимости создания дополнительных устройств типа канала в центре циклотрона или пластин для отклонения сгустков. Недостатком такого способа является то, что три сгустка из четырех не проходят через отклоняющую систему и дополнительно активируют ее, а также возникают некоторые трудности в разделении постоянного напряжения на дефлекторе и переменной составляющей.

Приводятся блок-схема устройства для уменьшения частоты следования сгустков и экспериментальные спектры γ -квантов с мишени с включенным напряжением модуляции и без него. Опыт работы циклотрона в течение 6 лет показал достаточную надежность и стабильность режима при проведении экспериментов.

Последний раздел главы III посвящен использованию циклотронного пучка для решения одной из прикладных задач - исследования радиационных повреждений в материалах и полупроводниковых структурах. Показана возможность имитации различных радиационных условий: когда образцы облучаются частицами с энергетическим спектром вида $\frac{\partial N}{\partial E} \propto const$, или когда в исследуемом материале обеспечивается условие равномерности потерь энергии по глубине пробега, или когда необходима равномерная плотность числа заторможенных частиц на длине полного пробега. Приведен один из способов расчета формирователей спектров вида $\frac{\partial N}{\partial E} \propto \frac{const}{E^{3/2}}$ и $\frac{\partial N}{\partial E} \propto \frac{const}{E^{1/2}}$. Методика получения спектров основана на известном явлении торможения заряженных частиц в веществе. На пути пучка ставится вращающийся диск, на котором расположены поглотители. Толщина различных поглотителей определяет энергию ионов, а время пребывания поглотителя

под пучком (угловые протяженности поглотителей заданных толщин) - число частиц заданной энергии. За один оборот диска на исследуемом образце имитируются условия облучения энергетическим спектром. Описана конструкция устройства, дан анализ ошибок в расчетах и измерениях. Приведены экспериментальные спектры.

Главные результаты настоящей работы можно кратко перечислить в виде следующих выводов:

I. На циклотроне ФЭИ получены 9 режимов ускорения различных ионов. Полученные режимы ускорения ионов по значению энергий и величинам токов являются максимальными в настоящее время для классических циклотронов типа У-150. Существенно повышен коэффициент отклонения ионов (~ 70 %).

II. Полученные режимы работы циклотрона позволили с высокими технико-экономическими показателями вести промышленное производство изотопов, облучение деталей машин с целью определения их износа, ядерно-физические эксперименты.

III. Проведены исследования вертикального и радиального движения ионов, показан эффект сильного влияния смещения электрических и магнитных плоскостей на вертикальное движение. Предложена и внедрена система контроля за радиальным движением частиц методом двух пробников.

IV. Проведенный широкий круг исследований и полученные результаты по улучшению качества пучка ставят циклотрон ФЭИ в один ряд с исследовательскими циклотронами с хорошим качеством пучков. Разработано и внедрено устройство для уменьшения частоты следования отступов.

V. Предложен и реализован на практике режим имитации условий для изучения радиационных повреждений в материалах.

VI. Надежность полученных режимов работы и наличие контроля за пучком ускоренных ионов позволили на циклотроне ФЭИ добиться высокого коэффициента использования ускорителя.

"Чистое" время работы ускорителя с пучком составляет 72 % от календарного времени.

Основные материалы, положенные в основу диссертации, докладывались на всесоюзной и международной конференциях [1, 2] и опубликованы в ряде статей и отчетов [6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. П.П.Дмитриев, Н.Н.Краснов, Н.А.Коняхин, А.А.Огнев, В.М.Туев.
Доклад на Всесоюзной научно-технической конференции.
г. Минск, 1968 г. Атомиздат.
2. *N.N. Krasnov, P.P. Dmitriyev, J.O. Konstantinov, N.A. Konjakin, A.A. Ognev, A.A. Ponomarev, A.E. Romanchenko, W.M. Tudev. Radioisotope production in the J. Ph. P. E. cyclotron. International Conference on the use of Cyclotron in chemistry, metallurgy and biology, p. 168, Oxford, 1969.*
3. И.О. Константинов.
Физические основы активации материалов заряженными частицами как метода определения износа деталей машин и механизмов.
Диссертация, ФЭИ, Обнинск, 1969 г.
4. *S. K. Alisson, S.D. Warshaw. Rev. Mod. Physik, 25, 799, 1953.*
5. *Morus Cail, N. Olson, Tomas Pyon Jean. Proton and fast neutron damage studies in Si and Ge using channeling, Radiat Eff. 15, 1-2, 51-52, 1972.*
6. Р.Р.Аванесян, В.М. Попов, Б.И. Семейлов, Б.Н.Алексеев, Н.Н.Краснов, А.А.Огнев.
Методика облучения элементов электронной техники протонным пучком. Электронная техника, серия Р-9, Радиокомпоненты, вып. 5, 79, 1971 .
7. Н.Н.Краснов, А.Н. Можин, А.А. Огнев, А.А.Пonomарев
ПТЭ, 4, 22, 1965 .
8. Н.Н. Краснов, А.А. Огнев, А.А. Пonomарев.
ПТЭ, 4, 19, 1970 .

9. Н.Н. Краснов, А.А.Огнев, А.А. Пonomарев.
ПТЭ, 4, 219, 1965 .
10. Н.Н. Краснов, А.А. Огнев, А.А. Пonomарев.
ПТЭ, 2, 16, 1968 .
11. Н.Н. Краснов, А.А. Огнев, А.А. Пonomарев.
ПТЭ, 2, 27, 1970 .
12. Н.А. Коняхин, Н.Н. Краснов, В.М. Туев.
ПТЭ, 2, 31, 1969 .
13. Н.А.Коняхин, Н.Н.Краснов, В.М. Туев.
ПТЭ, 2, 34, 1969 .
14. Н.Н.Краснов, А.А.Огнев, А.А.Пonomарев,
ПТЭ, 3, 35, 1971 .
15. Н.Н. Краснов, А.А. Огнев, В.Н. Миронов.
ПТЭ, 4, 22, 1973 .
16. Н.С. Бирюков, Б.В.Дуравлев, Н.Н. Краснов, А.А. Огнев,
В.И. Пляскин, А.А. Пonomарев, О.А. Сальников.
ПТЭ, 5, 26, 1970 .
17. В.С. Панасек.
"Атомная энергия", 3, 41, 1957 .
18. А.В. Антоков, М.В. Блохов, Н.И. Веников, С.П.Калинин,
А.А.Курашов, П.Е.Егоров, А.А.Чесалов.
Препринт ИАЗ-502, Москва, 1963 г.
19. *W.P. Johnson, H.G. Blosser, P. Sigg. S. Internationale Cyclotron Conference, p. 325, Butterworths, London, 1969.*

ТБ-02510 от 3/IX-1975 г. Обьем I усл.п.л. Тираж 120 экз.
Заказ № 447 Бесплатно

Отпечатано на ротационно ФВМ, септември 1975 г.