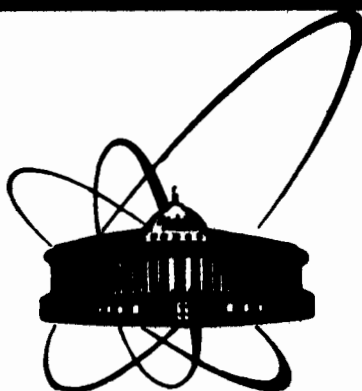


87-703



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-87-703

**В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, Ле Киен Тхань,
О.В.Ломакина, Э.Трейбал***

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ УСКОРЕНИИ
ПРОТОНОВ И H^- -ИОНОВ
В ЦИКЛОТРОНЕ**

*Институт ядерной физики ЧСАН, Ржеж

1987

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изохронные циклотроны являются наиболее распространенными базовыми установками в физических лабораториях и центрах по производству изотопов. Как правило, изохронные циклотроны используются и для проведения экспериментальных исследований по ядерной физике, и для широкого круга прикладных задач. В связи с этим представляет определенный интерес рассмотреть возможности решения прикладных задач совместно с выполнением ядернофизических исследований. Эта проблема в принципе разрешима при одновременном ускорении в изохронном циклотроне положительных и отрицательных ионов одного и того же элемента, например протонов и H^- -ионов, дейтронов и D^- -ионов и т.д. Каждый из ускоренных пучков выводится затем из камеры циклотрона в заданном направлении и используется по назначению. Таким образом, существенно возрастает эффективность эксплуатации базовой ускорительной установки.

В данном сообщении приведены результаты аналитических и численных исследований динамических процессов при одновременном ускорении протонов и H^- -ионов в изохронном циклотроне. Численные расчеты выполнены для изохронного циклотрона У-120М, работающего в Институте ядерной физике ЧСАН /г.Ржеж, ЧССР//^{1/}.

1. ФАЗОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

Аналитическое описание изменения фазы высокочастотного напряжения в момент прохождения ионом середины ускоряющего зазора в зависимости от кинетической энергии W базируется на выражении^{1/2/}

$$\frac{d\Phi}{d\nu} = \frac{d\Phi}{dW} \cdot \frac{dW}{d\nu} = 2\pi \cdot q \cdot \frac{\Delta T}{T_0}, \quad /1/$$

где $d\Phi/d\nu$ - изменение фазы за оборот, q - кратность ускорения, T_0 - период обращения иона в изохронном магнитном поле, ΔT - отклонение периода обращения иона от изохронного значения.

Если магнитное поле циклотрона изохронно для иона с энергией покоя E_0 и периодом обращения T_0 , то параметр изохронности поля $r_\infty = (c/2\pi) \cdot T_0$. В этом случае $\Delta\Phi \equiv 0$ и фаза иона в процессе ускорения не изменяется.

Предположим, что одновременно в циклотроне ускоряется ион с энергией покоя $E_0 + \Delta E_0$, период обращения которого $T_0 + \Delta T$. Тогда относительное изменение периода обращения этого иона на заданном радиусе описывается формулой

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{1}{\gamma^2} \cdot \frac{\Delta E_0}{E_0}, \quad /2/$$

где $\gamma = \frac{E}{E_0}$ - относительная полная энергия изохронного иона.

Подставляя /2/ в выражение /1/ и интегрируя от начальной (W_H) до конечной (W_K) кинетической энергии изохронного иона и от начальной (Φ_H) до конечной (Φ_K) фаз иона с периодом $T_0 + \Delta T$, можно найти сдвиг фазы иона с энергией покоя $E_0 + \Delta E_0$

$$\sin \Phi_K - \sin \Phi_H = 2\pi \cdot q \cdot \frac{\Delta E_0}{E_0} \cdot \frac{E_0^2}{E_H \cdot E_K} \cdot \frac{W_K - W_H}{\Delta W_m}, \quad /3/$$

ΔW_m - максимальный набор энергии иона за оборот, E_H, E_K - начальная и конечная полные энергии изохронного иона.

Конечная энергия неизохронного иона на этом радиусе будет отличаться на величину $\Delta W_K / W_K = -\Delta E_0 / (E_0 + W_K)$.

При одновременном ускорении однозарядных положительных и отрицательных ионов выбранного элемента изохронный рост магнитного поля должен соответствовать среднему значению энергии покоя \bar{E}_0 . Так как для этого случая $\Delta E_0 = \pm 0,51$ МэВ, то наибольший сдвиг фазы будет при одновременном ускорении протонов $/E_{01} = 938,28$ МэВ/ и H^- -ионов $/E_{02} = 939,3$ МэВ/. Коэффициент $E_0^2 / E_H \cdot E_K$ изменяется от единицы до 0,96 при $W_K = 40$ МэВ.

Из выражения /3/ можно найти максимально достижимые энергии при одновременном ускорении противоположно заряженных ионов с разностью энергий покоя $\Delta E_0 / E_0$. При этом следует принять $\sin \Phi_K = 1$ и $\sin \Phi_H = -1$, тогда

$$W_K - W_H = \frac{2}{\pi \cdot q} \cdot \frac{\bar{E}_0}{\Delta E_0} \cdot \frac{E_H \cdot E_K}{E_0^2} \cdot \Delta W_m. \quad /4/$$

Для протонов и H^- -ионов получим

$$W_K = W_H + 600 \cdot (\Delta W_m / q) / \text{МэВ}.$$

Для дейтронов и D^- -ионов, соответственно,

$$W_K = W_H + 1200 \cdot (\Delta W_m / q) / \text{МэВ}.$$

Для изохронного циклотрона У-120М примем $\Delta W_m = 0,1$ МэВ, $q = 1$. Тогда из выражения /3/ при $E_0 = 938,79$ МэВ можно полу-

чить формулу для сдвига фаз протонов или H^- -ионов при одновременном ускорении их в циклотроне У-120М:

$$\sin \Phi_K = \sin \Phi_H \pm 0,334 \cdot \nu_c, \quad /5/$$

где ν_c - число сотен оборотов иона в циклотроне, "+" - соответствует H^- -ионам, "-" - протонам, $\nu_c = \frac{W_K - W_H}{100 \cdot \Delta W_m}$.

При правильной настройке частоты f_0 фаза сгустка H^- -ионов будет сдвигаться в положительном направлении, фаза сгустка протонов практически симметрично в отрицательном направлении. Из формулы /5/ видно, что если из ионного источника У-120М ионы выходят с нулевыми фазами $\Phi_H = 0$, то при $\Phi_K = 30^\circ$ $W_K = 15$ МэВ; при $\Phi_K = 45^\circ$ $W_K = 21,2$ МэВ; при $\Phi_K = 60^\circ$ $W_K = 25,9$ МэВ. Так как отрицательные ионы выводятся перезарядкой, а положительные - электростатическим дефлектором, то конечные фазы сгустков могут несколько отличаться, и коррекцией ускоряющей частоты в нужную сторону можно оптимизировать фазовые сдвиги протонов и H^- -ионов.

Общий фазовый сдвиг H^- -ионов относительно протонов можно получить из формулы /5/:

$$\sin \Phi_{2K} - \sin \Phi_{1K} = \sin \Phi_{2H} - \sin \Phi_{1H} + 0,668 \cdot \nu_c, \quad /6/$$

где индекс 2 относится к H^- -ионам и индекс 1 - к протонам.

Приведенные выше оценки показывают, что для получения на У-120М максимальных энергий протонов и H^- -ионов /порядка 40 МэВ/ необходимо, чтобы конструкция ионных источников и пулера обеспечивали получение начальных фаз порядка 30° для протонов и -30° для H^- -ионов. При $\Phi_H = -30^\circ$ и $\nu_c = 4$ из /5/ получим $\Phi_K \approx 57^\circ$ / $W_K = 40$ МэВ/. Такие начальные фазы можно, например, обеспечить с помощью поворота обоих ионных источников и пулера около центра магнита на угол 30° относительно ускоряющей кромки дуанта против направления вращения протонного пучка.

При одновременном ускорении дейтронов и D^- -ионов $\Delta E_0 / E_0$ в два раза меньше, чем для протонов и при ускорении на У-120М двух пучков до энергий ~ 20 МэВ и $\Phi_H = 0$, сдвиг фазы на конечном радиусе каждого из пучков составит около 18° .

2. ИСХОДНЫЕ АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ

Большинство описанных ниже численных расчетов траекторий протонов и H^- -ионов в У-120М проведено на Фортране с использованием вычислительной машины ЕС-1010 и с помощью модифицированного варианта программы PROVKA^{3/} для расчетов динами-

ческих характеристик циклических ускорителей. Модификация программы касалась способа задания электрического и магнитного полей, видоизменения стандартной библиотечной версии DSAM для работы в режиме подпрограммы для решения системы дифференциальных уравнений методом "предиктор - корректор" с двойной точностью и преобразования программы PROVKA в систему подпрограмм DRAHA с упрощенным обращением. Магнитное поле вводилось в память ЭВМ в виде экспериментальных значений поля, измеренных в средней плоскости ускорителя в узлах координатных линий полярной сетки с 43 точками на обороте, с шагом 2 см вдоль радиуса. Значения поля в промежуточных точках вычислялись с помощью двумерной кубической интерполяции. Ускоряющее поле вычислялось в декартовой системе координат в виде произведения нор-

мированной функции $\frac{\partial u}{\partial y}$ на временную составляющую $\cos \omega(t + t_0)$

и на амплитуду дуантного напряжения V:

$$\frac{\partial U}{\partial y} = V \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \cos \omega(t + t_0). \quad /7/$$

Действие функции

$$\frac{\partial u}{\partial y} = [1 + \cos(\frac{\pi y}{\Delta})] \cdot \frac{1}{2\Delta}$$

предполагалось ограниченным в интервале $-\Delta \leq y \leq \Delta$. Константа t_0 характеризует фазу дуантного напряжения в момент $t = 0$, как правило, в момент начала движения иона.

Вытягивающее поле дуанта в зазоре "ионный источник - пулер" считалось пространственно однородным, действующим только при первом входе иона в дуант. Геометрическое расположение, однородной области задавалось координатами щели ионного источника, величиной зазора и углом поворота по отношению к кромке дуанта.

Численное интегрирование траектории иона проводилось вдоль азимутальной координаты иона с заданным шагом $\Delta \phi$.

Для вычисления траекторий ионов с помощью системы подпрограмм DRAHA необходимо составить основную программу. В ней надо организовать нужный счет траекторий и обработку получаемых данных, вызывая соответствующие подпрограммы из системы DRAHA. Подпрограммы не содержат, как правило, никаких параметров. Магнитное поле задается в виде таблиц с магнитной ленты. Электрическое поле определяется амплитудой дуантного напряжения, частотой, начальной фазой и протяженностью Δ . Среди подпрограмм системы DRAHA основными являются TRTH2 и TRTHE2, вычисляющие координаты и энергию иона после прохождения одного шага интегрирования без учета и с учетом электрического поля соответственно. Подпрограмма PRIN печатает все важные параметры иона, подпрограмма NEW инициализирует необходимые переменные при переопределении начальных параметров иона в разных

вариантах расчета. Вид уравнений движения задан в отдельной подпрограмме FCT, вычисление значений полей проводится в подпрограммах-функциях HPOLE /магнитное поле/, DUDX, DUDY /проекция напряженности электрического поля/. Непосредственный вызов подпрограмм DSAM, FCT, HPOLE, DUDX, DUDY в данной постановке задачи не требуется.

Основная программа организует вычисление цилиндрических координат траектории (r, ϕ) заданной частицы в медианной плоскости, времени t и кинетической энергии W с помощью решения следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dr}{d\phi} = r'$$

$$\frac{dr'}{d\phi} = 2 \frac{r'^2}{r} + r - \frac{e}{\beta \gamma E_0} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2}\right)^{1/2} \cdot (r^2 + r'^2) \cdot B_z + \frac{e}{\beta^2 \gamma E_0} \left(1 + \frac{r'^2}{r^2}\right) \cdot (r^2 \xi_r - r' \cdot r \xi_\phi),$$

$$\frac{ds}{d\phi} = \beta \cdot c \cdot \frac{dt}{d\phi} = (r^2 + r'^2)^{1/2}, \quad \frac{dW}{d\phi} = \frac{dW}{ds} \cdot \frac{ds}{d\phi}, \quad /8/$$

$$\frac{dW}{ds} = e \left(\frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{ds} + \frac{\partial U}{\partial y} \cdot \frac{dy}{ds} \right),$$

где $\gamma = 1 + \frac{W}{E_0}$, $\beta = \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^{1/2}$, ξ_r, ξ_ϕ - проекции вектора на-

пряженности электрического поля в цилиндрических координатах, B_z - напряженность магнитного поля в средней плоскости ускорителя /предполагается $B_r = B_\phi = 0$ /, E_0 - энергии покоя иона, $\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}$ - производные потенциала электрического поля по декартовым координатам x, y , $\frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}$ - \cos и \sin угла, образованного между вектором скорости иона и осью x , e - заряд иона, c - скорость света, s - криволинейная координата, измеряемая вдоль траектории иона.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПУЧКОВ

Во всех приведенных ниже расчетах математически моделировалась следующая картина. В центре ускорительной камеры располо-

жена головка двойного ионного источника с двумя независимыми разрядными камерами. Выходные щели обоих источников размещены в плоской танталовой пластине, которая повернута к кромке на угол 30° . Параллельно этой пластине размещена пластина пулера с двумя вертикальными щелями для прохождения двух пучков, прикрепленная на кромке дуанта на расстоянии 0,6 см от пластины источников. Между пластинами образуется переменное во времени однородное электрическое поле, которое по очереди вытягивает из правой и левой разрядных камер положительно и отрицательно заряженные ионы. Часть ионов после начального ускорения проходит через соответствующую щель пулера, поворачивает назад, обходит головку ионного источника и захватывается в ускорение, образуя два пучка частиц с фазовой протяженностью в несколько десятков градусов каждый. Амплитуда ВЧ-напряжения на дуанте при всех приведенных ниже расчетах равна 50 кВ, протяженность электрического поля дуанта $\Delta = 2$ см. Частота $f_0 = 25,758$ МГц подобрана в соответствии с таблицей реального изохронного магнитного поля, создаваемого при токе возбуждения в основной обмотке 500 А. Расположением обеих пластин и соответствующих щелей по отношению к центру ускорителя и кромке дуанта определяются такие параметры радиального движения пучков, как амплитуда свободных колебаний и диапазон начальных фаз пролета.

На рис.1 показаны результаты расчета, выполненного с целью определения оптимального положения ионных источников и пластины пулера. При заданных значениях фазы, частоты и амплитуды дуантного напряжения, а также декартовых координат x_i, y_i щелей ионных источников полностью определяются форма траектории и фазовые характеристики ионов на последующих оборотах. На рис.1 в декартовых координатах x_i, y_i изображены линии одинаковой амплитуды радиальных колебаний на 3-м обороте ускорения ионов, вылетающих из источников при фазе $\omega t_0 = 0$.

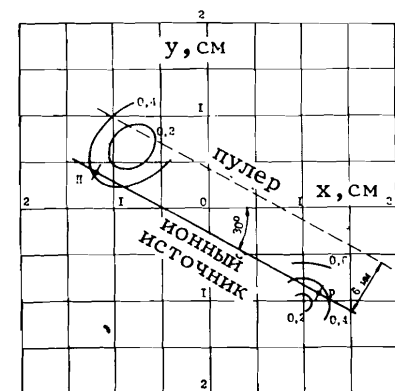


Рис.1

В левой части рисунка показаны линии, соответствующие разным положениям источника ионов H^- , справа - область возможных положений щелей протонного источника. Вблизи изображенных минимумов, под углом 30° к кромке дуанта, проведена линия плоскости ионных источников, которая по конструктивным соображениям должна быть общей для обеих щелей. На ней определены окончательные значения x_i, y_i выходных щелей источника протонов и источника H^- -ионов.

Исследования поведения амплитуды радиальных колебаний при больших оборотах показали, что положения щелей источников, при которых амплитуды рассматриваемых колебаний минимальны в конце ускорения, заметно отличаются от определенных в рассмотренном расчете. При этом полученные положения щелей протонного и H^- -ионного источников настолько смещены в разные стороны, что оказывается невозможным расположить общую пластину ионных источников с наклоном к линии дуанта под углом 30° .

На рис.2 изображены начальные траектории протонов /сплошными линиями/ и H^- -ионов /точками/ для различных значений ωt_0 . Координаты вылета ионов из источников равны оптимальным положениям x_{i0}, y_{i0} , определенным на основании результатов рис.1. Ломаной пунктирной линией обозначен край дуанта с выступом пулера. На траекториях группами точек обозначены места, в которых находится ион в момент достижения на дуанте максимального ускоряющего напряжения. Головкой ограничивается диапазон фаз ωt_0

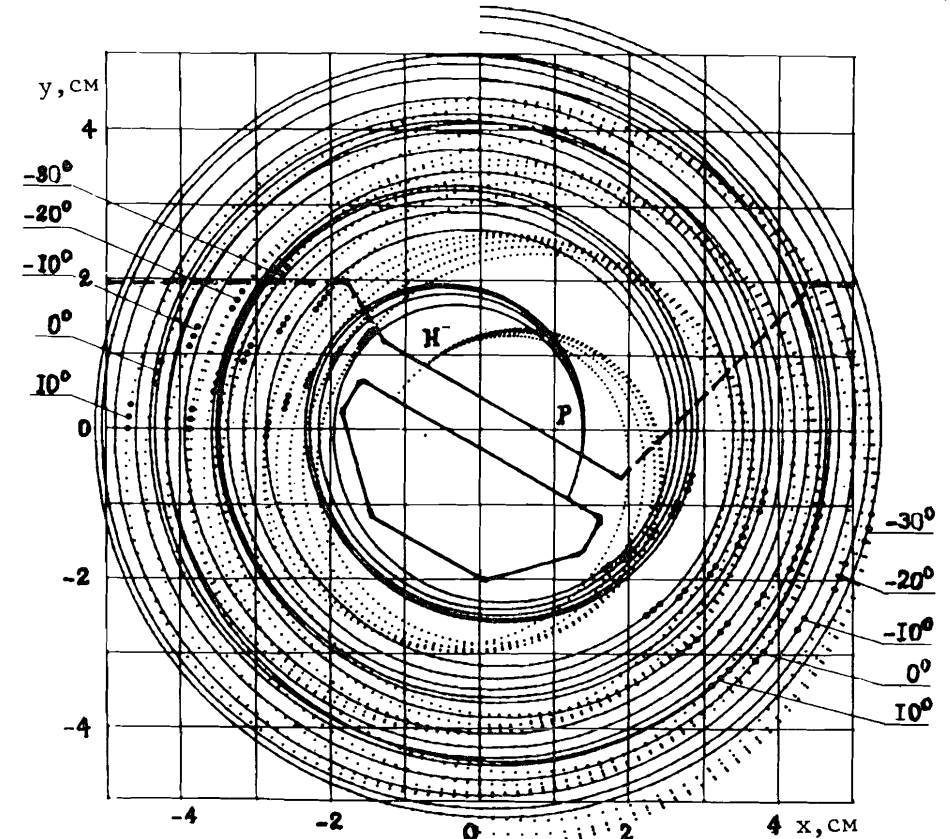


Рис.2

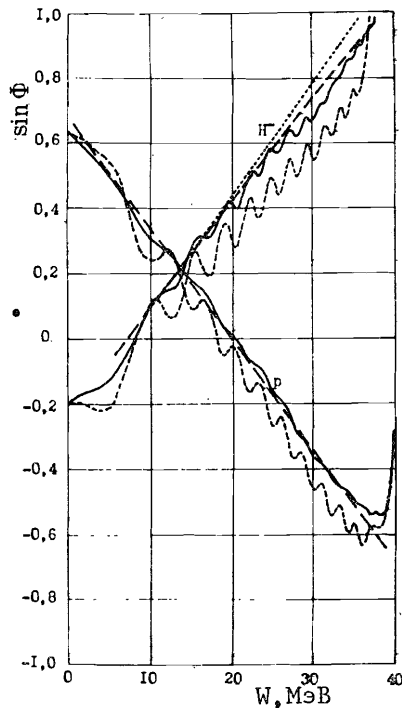


Рис. 3

протонов и H^- -ионов со стороны положительных значений до величины нескольких десятков градусов. Фазы ионов H^- , кроме того, ограничены пулером со стороны отрицательных значений. Следует отметить, что несмотря на относительно тщательное математическое описание центра циклотрона, реальная картина будет несколько отличаться от рассчитанной частично из-за влияния косых краев выступа пулера, которые при расчете не учитывались, частично из-за отсутствия при расчете вертикальной составляющей движения.

На рис. 3 приведена серия вычисленных типичных зависимостей значения $\sin \Phi$ ускоряемого иона от его кинетической энергии W . Сплошными линиями изображено фазовое движение протона и иона H^- при $\omega t_0 = 0$, вылетевших из точек x_{i0} , y_{i0} , координаты которых определены по предыдущим результатам. Пунктирные осциллирующие линии

отличаются от сплошных сдвигом точек вылета соответствующих ионов на 10 мм вдоль кромки дуанта в сторону $x > 0$ при соблюдении 6 мм расстояния между рабочими плоскостями "источники - пулер". Монотонно растущая и спадающая пунктирные линии рассчитаны по аналитической формуле /3/. Они показывают хорошее совпадение результатов аналитического и численного расчета. Прямая H^- , изображенная точками, соответствует той же формуле /3/, без учета квадратичного члена. Во всех приведенных расчетах частота f_0 подобрана в соответствии с таблицей реального изохронного магнитного поля, создаваемого при токе возбуждения основной обмотки 500 А. / $B_k \approx 1,75$ Тл/. Исходя из рис. 3 можно предположить, что одновременное ускорение протонов и H^- -ионов с точки зрения радиальной стабильности и фазового движения осуществимо и хорошо описывается аналитическими формулами. Фазовые колебания, которые накладываются на монотонный уход фазы, определенный аналитической формулой, связаны с радиальными прецессионными /свободными/ колебаниями, и их амплитуда растет с ростом радиальных колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В описанной геометрии источников p, H^- и пулера можно одновременно ускорять оба типа ионов до энергии порядка 35 МэВ.
2. С помощью численных расчетов определено оптимальное положение ионных источников, обеспечивающее относительно небольшие амплитуды радиальных колебаний.
3. Из источников, размещенных в одной головке, вытягиваются два пучка ионов с фазовой протяженностью $30 \pm 40^\circ$ каждый.
4. Фазовое движение, вычисленное с помощью численного интегрирования уравнений движения, хорошо согласуется с данными, полученными с помощью аналитической формулы.
5. Сдвиг ионного источника на 1 см вдоль кромки дуанта ведет к увеличению амплитуд фазовых и радиальных колебаний, но устойчивость движения при этом сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г. и др. - В сб.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1977, т.2, с.154.
2. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, 9-8496, Дубна, 1974.
3. Дмитриевский В.П. и др. - В сб.: Материалы III Совещания по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем. Р9-7339. Дубна: ОИЯИ, 1973, с.102.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 сентября 1987 года.

Дмитриевский В.П. и др.

P9-87-703

Динамические процессы при одновременном
ускорении протонов и H^- -ионов в циклотроне

Приведены результаты аналитических и численных исследований динамических процессов при одновременном ускорении протонов и H^- -ионов в изохронном циклотроне. Численные расчеты выполнены для изохронного циклотрона У-120М Института ядерной физики ЧСАН /Ржеж, ЧССР/. Показано, что в этом циклотроне возможно одновременное ускорение протонов и H^- -ионов до энергии ~ 35 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Dmitrievskiy V.P. et al.

P9-87-703

Dynamic Processes at Simultaneous
Acceleration of Protons and H^- -Ions
in a Cyclotron

The results of analytical and numerical investigations of the dynamic processes at the simultaneous acceleration of protons and H^- -ions by an isochronous cyclotron are presented. The numerical calculations have been performed for the U-120M isochronous cyclotron installed in the Institute of Nuclear Physics (Rež, CSSR). It has been shown that in this cyclotron the simultaneous acceleration of protons and H^- -ions is feasible up to the energy of about 35 MeV.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987