

Изучение возможности ускорения H^- -ионов в циклотроне К-130 в Ювяскюля

P. Heikkinen, E. Liukkonen, P. Nieminen

Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland

С.А. Артамонов, В.А. Волченков, А.В. Зубарев, Г.А. Рябов

Петербургский институт ядерной физики РАН, Россия

Введение. Циклотрон в Ювяскюля проектировался в основном для ускорения тяжелых ионов. После запуска появилась необходимость ускорения пучков лёгких ионов с высокой интенсивностью для производства изотопов и для изучения физики деления. При выводе высокоинтенсивных пучков с использованием прецессии возникает проблема активации камеры ускорителя из-за ограниченной эффективности вывода $\sim 60-70\%$. Одним из методов повышения эффективности вывода является ускорение H^- -ионов с последующим 100%-м выводом пучка за счет смены заряда иона при его взаимодействии с обдирочной фольгой. Ускорение H^- -ионов связано с решением ряда дополнительных проблем. Были рассчитаны потери H^- -ионов из-за электродиссоциации и за счёт столкновения с молекулами остаточного газа. Кроме того, были проведены расчёты траекторий пучка и его огибающих в процессе вывода.

Потери на электромагнитную диссоциацию. Электромагнитная диссоциация в значительной степени определяется энергией пучка и величиной магнитного поля. Хотя предельная для циклотрона К-130 энергия протонного пучка равна 90 МэВ, для производства изотопов достаточно ограничиться энергией ~ 75 МэВ, что соответствует максимальному значению поля в холме ~ 1.6 Т. Расчёт потерь интенсивности I отрицательных ионов за счет электрической диссоциации проведен на основе уравнения

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\gamma\tau}, \quad \text{где} \quad \tau(E) = \frac{A}{E} \exp\left[\frac{D}{E}\right].$$

Здесь τ — среднее время жизни отрицательного иона; γ — релятивистский фактор; A и D — константы, которые наилучшим образом аппроксимируют все имеющиеся к настоящему времени опытные данные; E — сильное электрическое поле, которое возникает в системе отсчета, связанной с ионом, при его движении со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} : $E = 3\beta\gamma B$, где β — относительная скорость иона; B измеряется в Т; E — в МВ/см.

В расчетах были использованы наиболее распространенные в научной литературе значения констант A и D :

вариант 1: $A = 7,96 \cdot 10^{-14}$ с·МВ/см, $D = 42,56$ МВ/см [1];

вариант 2: $A = 2,47 \cdot 10^{-14}$ с·МВ/см, $D = 44,90$ МВ/см [2].

Подробности процедуры расчета потерь на электродиссоциацию в изохронных циклотронах можно найти в работе [3].

В качестве входных данных при расчетах потерь в К-130 конечный радиус ускорения принимался равным $r_{extr.} = 93,3$ см, что соответствует финальной энергии ускорения $W_k = 75,0$ МэВ. Напомним, что циклотрон имеет трехсекторную магнитную структуру и набор энергии за оборот $(\Delta W)_0 = 107$ кэВ.

Потери H^- -ионов на электромагнитную диссоциацию в циклотроне Ювяскюля в зависимости от энергии представлены на рис. 1 и составляют величину, меньшую чем 2%. Потери экспоненциально нарастают на радиусах ускорения, больших чем 85 см, и проис-

ходят в районе холмов. Следует также отметить, что параметры A и D вариантов 1 и 2 дают близкие значения потерь.

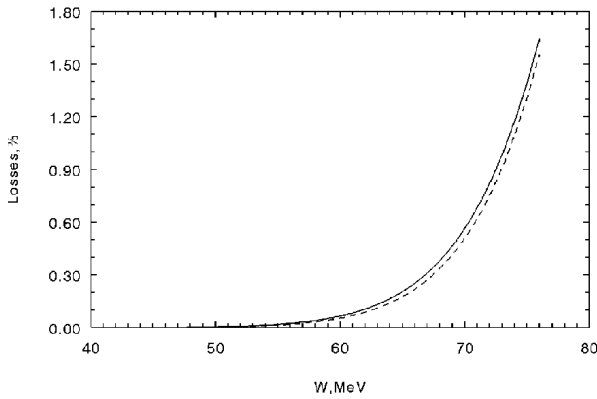


Рис. 1: Потери H^- -ионов (в %) в изохронном циклотроне К-130 из-за электромагнитной диссоциации при использовании параметров A, D варианта 1 (сплошная линия) и варианта 2 (пунктирная линия).

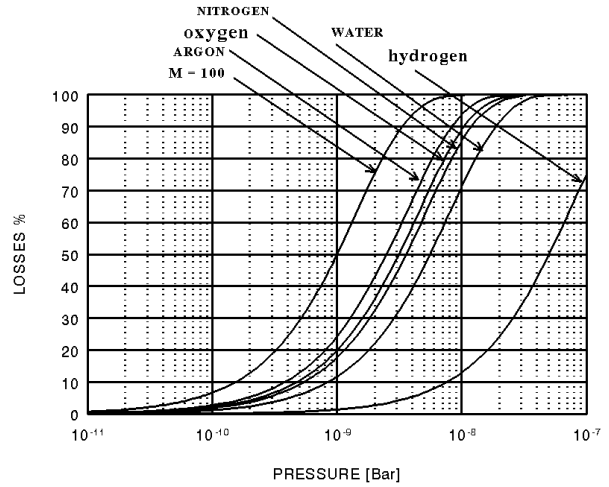


Рис. 2: Потери пучка H^- -ионов на остаточном газе при ускорении в циклотроне К-130.

Таким образом, при конечной энергии $W_k \sim 75$ МэВ и $B_{max} \sim 16$ Т потери H^- -ионов из-за электромагнитной диссоциации очень малы. В то же время увеличение магнитного поля или конечной энергии на 5–10% вызывает резкий рост потерь. В этом смысле выбранная энергия W_k и поле B_{max} близки к оптимальным.

Потери H^- -ионов на остаточном газе циклотрона. Развал слабосвязанных H^- -ионов в столкновениях с молекулами остаточного газа ускорителя — один из факторов, который может препятствовать их ускорению до энергии 75 МэВ. При расчете потерь в процессе ускорения использовалась полуэмпирическая формула для сечений развала: $\sigma = \kappa \cdot M/v^2$ (σ — полное сечение развала H^- ; v — скорость налетающей частицы; M — молекулярная масса молекулы-мишени; $\kappa = (40,0 \pm 5,0)$ см⁴·сек⁻² — постоянная, общая для всех газов). При расчете потерь в процессе инжекции (энергия ионов 15 КэВ, длина пути 16 м) величины сечений брались из эксперимента. Подробно все исходные данные, метод расчёта и ссылки представлены в работе [4].

На рис. 2 показаны расчетные потери для некоторых газов как функция давления. Видно, что потери при ускорении быстро растут с ростом молекулярной массы остаточного газа, что делает их величину чувствительной к парциальному составу вакуума ускорителя. По данным измерений парциальный состав вакуума в циклотроне К-130: H_2O — 60%; N_2 — 24%; O_2 — 9%; H_2 — 3, 3%; (Ar, CO_2) — 2, 7%. Расчеты показывают, что при таком парциальном составе потери пучка будут происходить в основном за счет соударений с молекулами H_2O и N_2 и для рабочих давлений в камере ускорителя $(1 - 3) \cdot 10^{-7}$ мбар не превысят 6%. Потери в тракте инжекции (малые энергии ионов) слабо зависят от сорта молекул остаточного газа и для рабочих давлений $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ мбар не превысят 1%.

Вывод с помощью обдирки H^- -ионов. Расчёт вывода протонов за счёт обдирки H^- -ионов сводится к решению ряда более частных задач:

- следует определить положение обдирочной фольги по радиусу и азимуту в области, свободной от дуантов и механизмов камеры, таким образом, чтобы протонный пучок после обдирки был направлен в район существующей выводной системы;

- нужно направить выведенный пучок в существующий тракт с минимальными его переделками с помощью дополнительного канала и магнитов;
- следует сфокусировать выведенный пучок для обеспечения 100%-й эффективности вывода.

Расчёты оптики пучков выполнялись с помощью программы “Орбита”, которая разработана в ПИЯФ [5,6]. В качестве независимой переменной в программе используется длина траектории, что удобно при расчёте траекторий с любым знаком заряда и любой величиной импульса. Осевая траектория рассчитывается в декартовой системе координат, связанной с магнитом, а оптическая матрица перехода рассчитывается в подвижной системе координат, связанной с осевой траекторией. В качестве начальных условий на азимуте обдирочной фольги брались согласованные с периодической структурой эллипсы с эмитансом $\varepsilon_x \sim \varepsilon_z = 9 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$.

На рис. 3 представлены траектории протонов с энергией 75 МэВ и равновесным радиусом $r = 93,3 \text{ см}$ при трёх азимутальных положениях обдирочной фольги. В качестве оптимального положения фольги принят вариант с $\theta = 104,3$ градуса.

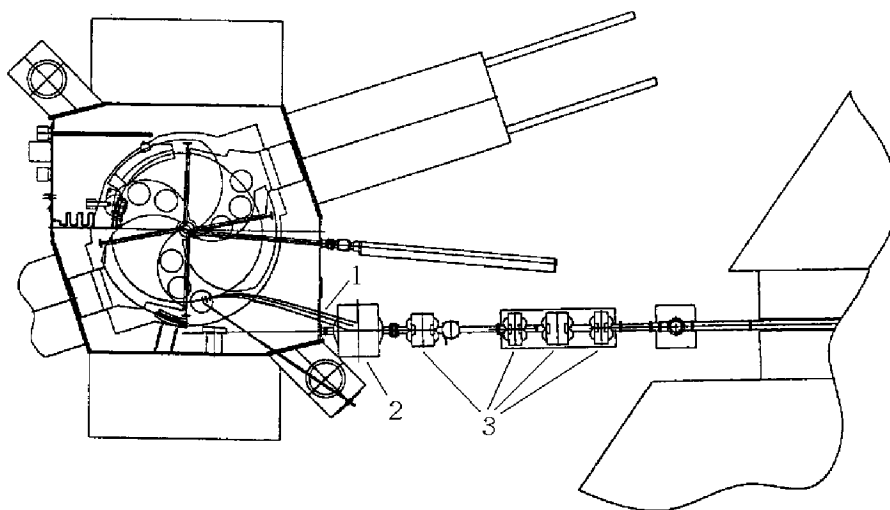


Рис.3. Общий вид циклотрона К-130 и тракт транспортировки пучка:
1 – траектории протонов после обдирки H^- -ионов; 2 – дополнительный магнит М; 3 – квадрупольи L1–L4.

На рис. 4 представлены огибающие пучка вдоль осевой траектории. Согласно приведенным данным пучок после обдирки при достижении стенки камеры расходится в обеих плоскостях. На этом же рисунке показаны огибающие пучка при установке вдоль трассы пучка внутри камеры пассивной вертикально фокусирующей секции длиной 30 см с фокусирующими градиентами 3–5 Т/м. Согласно данным расчёта введение такой секции значительно уменьшает размер пучка на стенке камеры. На рис. 3 представлен тракт транспортировки пучка после его модификации. По сравнению с существующим трактом первый по ходу пучка квадруполь необходимо отодвинуть вдоль тракта для того, чтобы освободить место для нового дипольного магнита длиной 50 см, с углом поворота 23° и полем $\sim 0,9 \text{ Т}$.

На рис. 5 представлены огибающие пучка вдоль тракта от стриппера до промежуточного фокуса, расположенного на расстоянии 4 м от триплета линз с размером пятна пучка в фокусе $\sim 1 \text{ см}$.

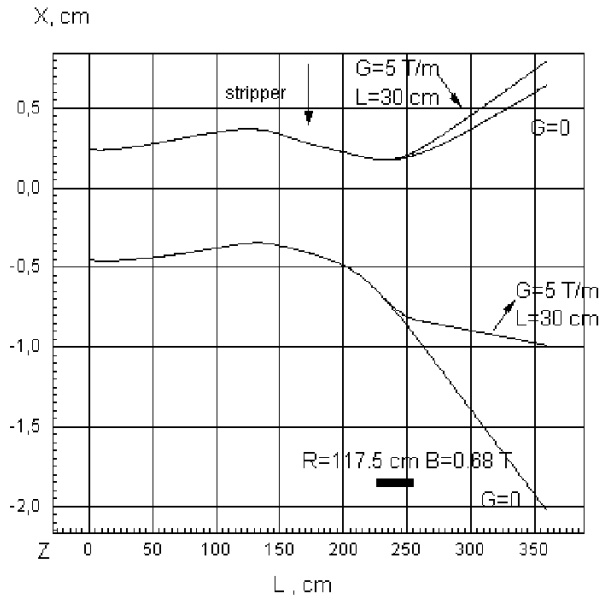


Рис. 4: Огибающие протонного пучка в рассеянном поле циклотрона вдоль осевой траектории и влияние фокусирующей секции.

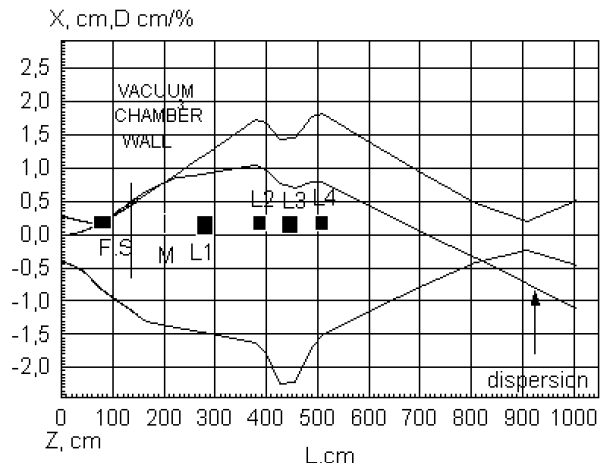


Рис. 5: Огибающие протонного пучка в тракте: стриппер расположен на $L = 0$, $L1 - L4$ – квадруполь; FS – фокусирующая секция; M – дополнительный диполь.

Заклучение. Предварительные результаты исследования показывают, что возможно ускорение пучка H^- до энергии 75 МэВ с незначительными потерями за счет электродиссоциации и за счет соударений с молекулами остаточного газа. Также оказывается возможным направить выведенный методом обдирки пучок в существующий тракт транспортировки путем добавления одного только дипольного магнита вне камеры ускорителя. Реализация этого проекта позволит значительно увеличить интенсивность выведенного протонного пучка.

Список литературы

1. G.M.Stinson et al. // NIM, v.74 ,1969, p.333.
2. R.T.Lee. TRIUMF, TRI-DN-89-32, Canada, 1989.
3. Н.К.Абросимов, С.А.Артамонов, В.А.Елисеев, Г.А.Рябов. XV Совецание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, т.2, 1996, с. 244–247.
4. А.В. Зубарев. Потери пучка H^- ионов на остаточном газе изохронного циклотрона в Гатчине, материалы этой конференции.
5. В.А. Волченков, Г.А. Рябов. Препринт ФТИ-328, Ленинград, 1971.
6. N.K Abrossimov, G.A Ryabov, V.A. Volchenkov. Internal Report DESY M-92-07.