

Модернизация линейного ускорителя И-100 для ускорения ионов углерода

Ю.М. Антипов, А.В. Василевский, А.П. Мальцев, В.А. Тепляков
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В настоящее время обсуждается возможность организации терапии радиорезистентных онкологических заболеваний с помощью ускоренных ионов углерода на базе существующего в ИФВЭ ускорительного комплекса [1]. Ускорительный комплекс ИФВЭ имеет в своем составе линейный ускоритель-инжектор ЛУ-30, бустер, протонный синхротрон У-70 и также линейный ускоритель И-100 (бывший инжектор синхротрона У-70), который предполагается использовать для инъекции в бустер ионов углерода. Линейный ускоритель И-100 спроектирован для ускорения протонов до энергии 100 МэВ [2]. Канал ускорения И-100 состоит из электростатического форинжектора, согласующего канала с банчером, трех резонаторов и дебанчера.

Рассмотрим вначале, какие изменения в продольном и поперечном движении частиц происходят при переходе от протонов к ионам углерода.

1. Продольное движение

При переходе к ионам углерода нужно сохранить синхронизм ускорения, т.е. обеспечить выполнение соотношений [3]

$$n\beta\lambda = L, \quad n\Delta\beta = \Delta L/\lambda.$$

Здесь L — длина периода; β — скорость частицы в единицах скорости света; n — кратность ускорения; λ — длина волны ВЧ-колебаний; $\Delta\beta$ — прирост скорости частицы; $\Delta L = L_{k+1} - L_k$ (k — номер периода ускорения). Для этого необходимо подобрать варьируемые величины Uv и ψ , обеспечивающие выполнение выражения для прироста скорости в ускоряющем зазоре:

$$\Delta\beta = (Ze/Am_n c^2) Uv \cos(\psi) (1 - \beta^2)^{3/2} / \beta.$$

Здесь Ze — заряд иона; Am_n — масса иона; U — максимальное напряжение на зазоре; v — эффективность ускорения (фактор пролетного времени); ψ — равновесная фаза.

Подбор этих величин не может быть произвольным. В И-100 при ускорении протонов кратность ускорения $n = 1$. Величины L и ΔL фиксированы в “железе”. Сохранить прирост скорости $\Delta\beta$ прежним при переходе от ускорения протонов с отношением заряда к массе ($Z/A = 1$) на ускорение ионов углерода с ($Z/A \leq 1/2$) путем увеличения напряжения на зазоре U нельзя из-за опасности пробоев в резонаторах. Поэтому при переходе к ускорению ионов углерода необходимо снижать прирост скорости $\Delta\beta$, переходя на более высокую кратность ускорения $n > 1$. Это приводит к изменению фактора пролетного времени

$$v = (1/E_0) \int_L E_g(z) \cdot \cos(2\pi(z - z_0)) / (\beta_{cp} \cdot \lambda) dz$$

из-за снижения средней скорости в зазоре β_{cp} . Здесь E_0 — средняя напряженность электрического поля на оси канала; $E_g(z)$ — напряженность поля в зазоре; z_0 — электрический центр зазора.

Аппроксимируя распределение поля в зазоре $E_g(z)$ квадратной волной ($E_g(z) = const > 0$ внутри зазора и $E_g(z) = 0$ — вне зазора), можно получить связь между фактором пролетного времени и кратностью ускорения:

$$v_i = (1/n)v_p \sin(n\pi g/\lambda\beta_p) / \sin(\pi g/\lambda\beta_p)$$

(индексы i и p соответствуют ионам и протонам, g — длина зазора). В ускорителе И-100 отношение $g/\lambda\beta_p \approx 0,25$ в первом резонаторе и $g/\lambda\beta_p \approx 0,22$ — во втором и третьем резонаторах.

Рассмотрим условия ускорения в И-100 ионов углерода различной зарядности.

На кратности $n = 2$ имеем

$$\beta_i = (1/2)\beta_p, \quad \Delta\beta_i = (1/2)\Delta\beta_p, \quad v_i = 0,707v_p.$$

Для выполнения условий синхронизма при неизменной фазе ускорения нужно положить:

Ион	C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}	C_{12}^{+3}
U_i/U_p	0,707	0,849	1,06	1,41

Как видно, при ускорении C_{12}^{+4} на кратности $n = 2$ напряжение в резонаторе нужно форсировать: $U_i = 1,06U_p$. Можно напряжение не повышать, снизив равновесную фазу до $\psi = 32^\circ$ вместо $\psi = 37^\circ$. Ускорять ионы с зарядом $Z < 4$ на кратности $n = 2$ нельзя, так как уже для иона C_{12}^{+3} $U_i = 1,41U_p$, что недопустимо. Скомпенсировать это снижением фазы невозможно.

Вариант ускорения ионов углерода в И-100 на кратности $n = 2$ имеет ряд недостатков. Один из них — энергия ионов на выходе третьего резонатора (22,1 МэВ/нукл.) слишком велика для вводных устройств бустера. Если же ускорять ионы лишь в первом резонаторе (энергия будет подходящей — 9 МэВ/нуклон), то тогда остальные резонаторы нужно будет перестраивать на режим транспортировки. Возможность дебанчировки ускоренного пучка при этом теряется. На кратности $n = 3$ имеем

$$\beta_i = (1/3)\beta_p, \quad \Delta\beta_i = (1/3)\Delta\beta_p, \quad v_i \approx (1/3)v_p.$$

Для выполнения условий синхронизма нужно при неизменной фазе ускорения положить

Ион	C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}	C_{12}^{+3}
U_i/U_p	0,667	0,8	1,0	1,33

Энергия на выходе третьего резонатора (9,63 МэВ/нуклон.) при этом равна приемлемой величине для перевода пучка в бустер. В этом варианте можно использовать дебанчировку пучка.

При $n = 3$ появляется возможность ускорения ионов C_{12}^{+3} , для чего требуется поднять напряжение в резонаторах на 13% и снизить фазу с 37° до 20° , что находится на грани допустимого.

Наибольший интерес при $n = 3$ представляет вариант ускорения ионов C_{12}^{+4} . В этом случае резонансные условия выполняются при $U_i = U_p$ и $\psi_i = \psi_p$, т.е. при переходе от ускорения протонов к ускорению ионов C_{12}^{+4} не требуется перестраивать режим ускорителя.

2. Поперечное движение

В ускорителе И-100 используется структура фокусировки ФОДО. Поперечное движение частиц в жесткофокусирующем канале устойчиво, если $|\cos(\mu)| < 1$, где μ — набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки. Известно, что $\cos(\mu)$ является функцией жесткости квадрупольных линз K и фактора дефокусировки γ :

$$\cos(\mu) = f_1(K) + \gamma f_2(K).$$

Здесь

$$K + D \cdot (Ze \cdot G \cdot (1 - \beta^2)^{1/2} / (Am_n c \beta))^{1/2};$$

$$\gamma = (\pi/2)(S/\beta\lambda)^2 (Ze / (Am_n c^2)) (1/\beta) E_0 \lambda v |\sin(\psi)| (1 - \beta^2)^3;$$

D — длина линзы; G — градиент магнитного поля; S — период фокусировки. Нетрудно видеть, что при переходе от протонов к ионам углерода фактор дефокусировки возрастает из-за снижения β . Жесткость линз либо растёт, либо уменьшается в зависимости от заряда иона и кратности ускорения.

Для сохранения аксептанса канала, нужно форсировать градиенты в линзах, однако градиенты линз первого резонатора И-100 увеличивать нельзя из-за опасности межвитковых пробоев. Целесообразно градиенты сохранить неизменными. При этом условия фокусировки для ионов углерода с разными зарядами при кратностях $n = 2$ и $n = 3$ будут следующими:

Кратность	$n = 2$			$n = 3$			
	C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}	C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}	C_{12}^{+3}
$\cos(\mu)$	0,571	0,739	0,863	-0,068	0,31	0,637	1,573
$A[\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}]$	1,0	0,6	0,3	2,45	1,77	0,84	—

В структуре ФОДО фокусировка C_{12}^{+3} при $n = 3$ невозможна. В принципе, фокусировку C_{12}^{+3} можно обеспечить, переходом от ФОДО к ФОФОДОДО, но при этом возникают трудности в согласовании пучка между резонаторами.

Итак, наибольший интерес представляет вариант ускорения ионов C_{12}^{+4} на кратности $n = 3$. Во-первых, ионы C_{12}^{+4} значительно легче получать, чем C_{12}^{+6} и C_{12}^{+5} (для $Z < 5$ ионизируется L -оболочка, а для $Z \geq 5$ ионизируется K -оболочка, что соответствует значительному увеличению энергии ионизации); во-вторых, для них не требуется перестраивать режим ускорения и фокусировки при переходе от протонов к ионам.

Преобразование C_{12}^{+4} в C_{12}^{+6} можно осуществить на выходе И-100 с помощью перезарядной мишени. Оценки показывают, что в условиях вакуума И-100 можно не опасаться рекомбинации ионов углерода.

3. Лазерный ионный источник

Для получения протонов в И-100 используется ионный источник с дуговым разрядом. Получить интенсивный пучок ионов C_{12}^{+4} в источнике этого типа нельзя, поэтому в качестве источника ионов углерода C_{12}^{+4} рассматривается вариант лазерного источника.

Получением пучков многозарядных ионов, образующихся при взаимодействии лазерного излучения с веществом, занимаются уже более двадцати лет. Техника лазерных ионных источников в настоящее время достаточно хорошо разработана [4], на ее основе можно спроектировать и создать надежный и достаточно светосильный источник.

Длительность процесса образования многозарядных ионов составляет всего лишь несколько десятков наносекунд. Желаемая для инжекционного ускорительного комплекса длительность ионного пучка в несколько микросекунд возникает благодаря дрейфу ионов от мишени до плоскости экстракции. Разброс ионов по скоростям приводит в конце расширительного дрейфового промежутка к желаемому временному увеличению длительности.

Необходимыми элементами лазерного ионного источника являются:

- лазер (CO_2 лазер с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм и выходной энергией ≈ 10 Дж),
- оптическая система, фокусирующая лазерное излучение на мишень,
- мишенный механизм, позволяющий через несколько импульсов лазера изменять облучаемую точку мишени,
- расширительный дрейфовый промежуток, длина которого соответствует требуемой временной длительности ионного импульса,
- экстракционная ионная оптика.

При разработке лазерного источника для ускорителя И-100 решено использовать опыт работы с лазерными источниками в ОИЯИ [5], ИТЭФ и ТРИНИТИ [6,7], позволяющий рассчитывать на создание источника со следующими ожидаемыми параметрами:

продолжительность работы источника без замены элементов	10^6 срабатываний,
стабильность источника	$\pm 20\%$.
интенсивность ускоренного пучка ионов углерода	$\sim 2 \cdot 10^{10}$ ионов/имп.
длительность импульса	~ 10 мксек.

Напряжение инжекции ионов C_{12}^{+4} (230 кВ) предполагается взять от рабочего импульсного трансформатора ИТ-800. Желательно сохранить возможность оперативного перехода от ускорения ионов к протонам и наоборот, поэтому трассу ионной оптики для ввода в И-100 пучка ионов углерода предполагается расположить под углом к пучку протонов, поставив на входе в банчер поворотный магнит.

Выводы

1. В ускорителе И-100 можно ускорять и фокусировать ионы C_{12}^{+6} , C_{12}^{+5} , C_{12}^{+4} , C_{12}^{+3} .
2. Наибольший интерес представляет ускорение ионов C_{12}^{+4} на кратности $n = 3$, при этом получаем:

Напряжение инжекции	230 кВ.
Энергия на выходе 3-го резонатора	9,63 МэВ/нуклон.
Максимальный инвариантный эмиттанс ускоренного пучка	$0,8 \pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$.
Ожидаемая интенсивность ускоренного пучка ионов C_{12}^{+4}	$\sim 2 \cdot 10^{10}$ ионов/имп.

3. На выходе И-100 ионы C_{12}^{+4} будут преобразования в ионы C_{12}^{+6} на перезарядной мишени.

Список литературы

- [1] Медицинский облучательный центр с пучком ионов углерода на базе ускорительного комплекса ИФВЭ (Концептуальный проект) — Труды данной конференции, 1998.
- [2] Капчинский И.М., Мальцев А.П., Плотников В.К. Расчетные значения физических параметров линейного ускорителя И-100. Препринт ИФВЭ 67-38. – Серпухов, 1967.
- [3] Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. – М.: Атомиздат, 1966.
- [4] Sherwood T.R. Laser Ion Sources for Particle Accelerators. Preprint CERN-PS-95-020-НI, June 1995.
- [5] Безногих Ю.Д., Говоров А.И., Зиновьев Л.П. и др. Ускорение ядер лития, углерода и магния в синхрофазотроне ОИЯИ ОТ CO_2 лазерного источника. Препринт ОИЯИ Р9-84-246, 1984.
- [6] Report on the meeting on laser ion sources. CERN 13-14 July 1993. TERA INT 93/10 July 1993.
- [7] Dubenkov V., Sharkov B., Golubev A. et al. Acceleration of Ta^{10+} ions produced by laser ion source in RFQ MAXILAC. GSI-95-02 REPORT FEBRUAR 1995 ISSN 0171-4546.