

Ускорение ионов в линейном ускорителе И-100

Ю.М. Антипов, Б.А. Фролов, Ю.П. Горин, А.П. Мальцев, С.И. Пилипенко,
В.А. Тепляков, В.С. Ваньев, А.В. Василевский
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В настоящее время исследуется возможность организации Центра ионной лучевой терапии для лечения 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.

При переходе от ускорения протонов к ускорению более тяжелых ионов на действующем ускорителе возникает проблема сохранения синхронизма ускорения. Обычно она решается переходом на более высокую кратность ускорения. Ускоритель ЛУ-30, служащий инжектором протонов в У-70 и работающий на π -моде, нельзя использовать на повышенной кратности. Поэтому для инъекции ионов углерода в бустер было решено приспособить И-100, который в настоящее время используется для облучения образцов – биологических, материаловедческих, радиохимических и т.д.

В 1999 году в ИФВЭ начаты работы по экспериментальной проверке возможности ускорения ионов углерода в И-100. Результаты современного состояния теоретических и экспериментальных исследований по этой проблеме изложены ниже.

1. Исследование ускорения в И-100 ионов с $Z/A \leq 0,5$

Чем выше заряд иона, тем труднее его получить. Возникает естественный вопрос, до какой минимальной зарядности ионов углерода можно спуститься в конкретных условиях И-100?

Условия синхронизма [3]

$$n \cdot \beta \cdot \lambda = L, \quad n \cdot \Delta\beta = \Delta L / \lambda, \quad (1)$$

где L – длина периода, β – скорость частицы в единицах скорости света, n – кратность ускорения, λ – длина волны ВЧ-колебаний, можно выполнить, изменяя величины vU и φ в выражении для прироста скорости $\Delta\beta$ в ускоряющем зазоре

$$\Delta\beta = (Ze/Am_n c^2) \cdot v \cdot U \cdot \cos(\varphi) \cdot (1 - \beta^2)^{3/2} / \beta. \quad (2)$$

Здесь Ze – заряд иона, Am_n – масса иона, U – амплитуда напряжения на зазоре, v – фактор пролетного времени, φ – равновесная фаза.

При переходе от протонов ($Z/A = 1$) к ионам с $Z/A \leq 0,5$ невозможно сохранить тот же самый прирост скорости $\Delta\beta$ путем простого увеличения $v \cdot U$ из-за опасности пробоев. Приходится снижать прирост скорости $\Delta\beta$ и переходить к кратностям $n > 1$. При этом изменяется фактор пролетного времени, равный

$$v = (1/E_0) \int_L E_g(z) \cdot \cos(2\pi(z-z_0)) / (\beta_{cp} \cdot \lambda) dz. \quad (3)$$

Здесь E_0 – средняя напряженность электрического поля на оси канала, $E_g(z)$ – напряженность поля в зазоре, z_0 – электрический центр зазора. В том случае, когда апертура трубки дрейфа значительно меньше длины трубок, что справедливо в И-100 всюду кроме первых 15–20 трубок дрейфа I^{em} резонатора, распределение поля $E_g(z)$ можно с достаточной точностью аппроксимировать квадратной волной ($E_g(z) = \text{const} > 0$ внутри зазора и $E_g(z) = 0$ вне зазора). В этом случае легко получить связь между фактором пролетного времени и кратностью ускорения:

$$v_i = (1/n) \cdot v_p \cdot \sin(n\pi g / \lambda\beta_p) / \sin(\pi g / \lambda\beta_p) \quad (4)$$

(индексы i и p соответствуют ионам и протонам, g – длина зазора). Отношение $g/\lambda\beta_p$ (коэффициент зазора) в ускорителе И-100 примерно постоянно ($g/\lambda\beta_p \approx 0,25$). При переходе на повышенную кратность фактор пролетного времени во всех зазорах (кроме первых 15÷20 трубок дрейфа) снижается в фиксированное число раз. Таким образом, синхронизм можно обеспечить простым подбором напряжения U без переделок резонаторов. Рассмотрим условия ускорения в И-100 ионов углерода различной зарядности во II^{om} и III^{em} резонаторах. На кратности $n = 2$ имеем

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

Для компенсации уменьшения U_i при неизменной фазе ускорения напряжения U_i в Π^{OM} и Π^{EM} резонаторах должны быть изменены при ускорении различных ионов углерода так, как указано в табл. I:

Таблица I

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

Из таблицы видно, что ускорение ионов углерода с $Z = 5,6$ в Π^{OM} и Π^{EM} резонаторах возможно при пониженном напряжении, а иона с $Z = 4$ – при допустимом форсировании.

Однако для первого резонатора И-100, а более точно, для его начальной части (первые 15–20 трубок дрейфа), простое приближение (4) для фактора пролетного времени не выполняется. При переходе на повышенную кратность “провисание” электрического поля внутри трубок дрейфа на величину порядка радиуса апертуры, сравнимую в этой части ускорителя с длиной трубок, значительно уменьшает фактор пролетного времени на оси ускорителя, делает его существенно зависящим от радиальной координаты, а также непропорционально изменяет его вдоль начальной части ускорителя.

Наиболее правильным решением этой проблемы была бы, вероятно, модернизация начальной части ускорителя, подобная той, которая выполнена на ускорителе ЛУ-20 в ЛВЭ ОИЯИ (перегородка в начальной части ускорителя, замена дрейфовых трубок на новые с оптимизированными для этой задачи характеристиками). В данный момент наше положение делает такое решение трудно реализуемым.

Мы экспериментально исследовали возможности ускорения ионов с $Z/A \leq 0,5$ в существующем варианте И-100. Первая попытка ускорения на кратности $n = 2$ ионов C_{12}^{+5} , поставляемых лазерным источником, показала малую эффективность и неустойчивость процесса ускорения этих ионов при номинальных значениях параметров ускорителя. Так как лазерный источник не мог обеспечивать в начале 2000 года заметного количества ионов с большим зарядом C_{12}^{+6} , то для изучения возможностей ускорения ионов с $Z/A = 0,5$ мы использовали штатный ионный дуговой источник форинжектора И-100, в который вместо водорода подавался дейтерий. Ионизационные характеристики водорода и дейтерия практически неразличимы, поэтому регулировка источника в этом случае свелась лишь к подбору оптимальных режимов электростатической оптики форинжектора. Экспериментально было доказано достаточно устойчивое и хорошо воспроизводимое ускорение ионов дейтерия. Максимальный выходной ток дейтерия составил ≈ 2 мА при токе на входе первого резонатора ≈ 30 мА.

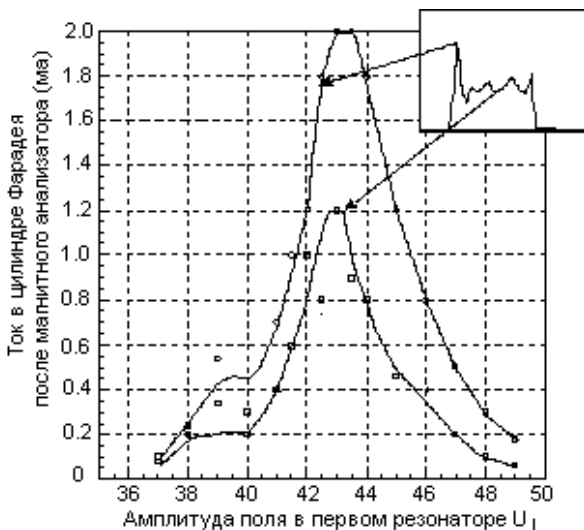


Рис. 1. Зависимость тока ускоренных ионов дейтерия от амплитуды поля в первом резонаторе.

Однако исследования выявили необычный характер режима ускорения. В отличие от “стандартного” монотонного увеличения коэффициента захвата, которое должно происходить при увеличении поля U выше порога, обнаружилась резкая резонансно-подобная зависимость (рис.1), имеющая максимум при $U_i = 0,87U_p$ (U_p – номинальное значение электрического поля при ускорении протонов). Более того, оказалось, что ускорение происходит при согласованных значениях ускоряющего электрического U_i и фокусирующего магнитного V_i полей в первом резонаторе. Уменьшение тока в питающих обмотках дрейфовых трубок на 10% в сравнении с номинальным значением (а соответственно, и уменьшение V_i) приводит к резкому падению интенсивности. Увеличение магнитного поля V_i на 10% заметно сдвигает максимум эффективности в сторону больших значений U_i . Полученные данные по ускорению дейтерия можно использовать для масштабных оценок режимов ускорения ионов углерода разных зарядностей в первом резонаторе, которые приведены в табл. II

Таблица II

Ион	C_{12}^{+6}	C_{12}^{+5}	C_{12}^{+4}
U_i/U_p	0,87	1,0	1,30
V_i/V_p	1	1,2	1,5

Как видно, для ионов с $Z = 4$ и 5 на кратности $n = 2$ напряжённости ускоряющего электрического и фокусирующего магнитного полей (U_i и V_i) в I-ом резонаторе нужно форсировать. Для C_{12}^{+5} этот форсаж находится на грани допустимых технических возможностей. Ускорять ионы с зарядом $Z \leq 4$ на кратности $n = 2$ нельзя, так как уже для иона $C_{12}^{+4} U_i \approx 1,3 U_p$, а $V_i \approx 1,5 B_p$, что недопустимо.

Изучение ускорения ионов дейтерия во втором резонаторе продемонстрировало, что после соответствующего подбора фазы ускоряющего поля во втором резонаторе получается устойчивый режим, слабо зависящий от уровня электрического поля U_i в пределах $0,7 \div 1,0 U_p$. Такое поведение следовало ожидать из вышеупомянутых теоретических оценок.

Итак, экспериментальные исследования с дейтерием показали, что наибольший интерес представляют варианты ускорения ионов C_{12}^{+5} и C_{12}^{+6} на кратности $n = 2$.

На кратности $n = 2$ энергия ионов на выходе третьего резонатора (22,1 МэВ/нуклон) слишком велика для вводных устройств бустера. При ускорении пучка на кратности $n = 2$ в первом и втором резонаторах, и использовании третьего резонатора в режиме транспортировки, выходная энергия на выходе И-100 будет 16,6 МэВ/нуклон. Такая энергия приемлема для ввода в бустер при допустимом форсировании вводных устройств бустера. В этом случае существует возможность дебанчировки ускоренного пучка. При ускорении C_{12}^{+5} преобразование C_{12}^{+5} в C_{12}^{+6} можно осуществить на выходе И-100 с помощью перезарядной мишени.

2. Лазерный ионный источник

Из вышеизложенного следует, что для ускорения в И-100 ионов углерода ионный источник должен создавать в достаточном количестве ионы в зарядовых состояниях C_{12}^{+5} или лучше C_{12}^{+6} . Для эффективного образования ионов углерода с зарядами $Z = 5$ и 6 требуется создать плазму с температурой большей соответствующих потенциалов ионизации, т.е. в диапазоне $500 \div 1000$ эВ. Такая плазма не может быть получена в существующем ионном источнике с дуговым разрядом. Поэтому в качестве поставщика ионов углерода мы выбрали вариант лазерного ионного источника.

Получением пучков многозарядных ионов, образующихся при взаимодействии лазерного излучения с веществом, занимаются уже более двадцати лет [4]. Первые работы по этой тематике были выполнены в ОИЯИ. В ЛВЭ ОИЯИ лазерный ионный источник используется и в настоящее время для создания различных пучков многозарядных ионов и, в частности, ионов углерода. При создании нашего лазерного источника были использованы многие конструктивные решения и даже некоторые элементы лазерного источника ЛВЭ, за что мы искренне благодарны сотрудникам ЛВЭ ОИЯИ.

В качестве источника лазерного излучения мы использовали газовый ТЕА CO_2 лазер с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм и выходной энергией ~ 10 Дж. Лазер работает на смеси газов CO_2 , N_2 и He в пропорции 1:1:8. Давление газовой смеси 0,9 атм. Активный объём лазера состоит из двух разрядных промежутков с размерами $18 \times 30 \times 700$ мм³. Электроды – хромированный Al. В качестве модулятора используется водородный тиратрон типа ТГИ 5000/50. Рабочее напряжение 32 кВ. Оптический резонатор лазера образован плоским латунным зеркалом и выходным окном из пластины Ge. Апертура выходного излучения 18×30 мм², угловая расходимость $(1 \div 2)$ мрад.

Мишенный блок (рис. 2) состоит из оптической системы, фокусирующей лазерное излучение на мишень, мишенного механизма, позволяющего менять облучаемую точку мишени, и расширительного дрейфового промежутка. Лазерное излучение фокусировалось линзой из NaCl с фокусным расстоянием 120 мм под углом 45° к направлению расширительного дрейфового промежутка.

Длительность процесса образования многозарядных ионов составляет всего лишь несколько десятков наносекунд. Желаемая для инжекционного ускорительного комплекса длительность ионного пучка в несколько микросекунд возникает благодаря тепловому разбросу скоростей ионов в плазме и дрейфу ионов от мишени до плоскости экстракции.

Ввиду нестационарности плазменного потока, приемлемые ионно-оптические характеристики пучка можно получить, фиксируя границу отбора ионов. Это достигается с помощью двухсеточного плазменного диода с зазором между сетками $d = 10 \div 20$ мм и апертурой 20 мм, размещенного на расстоянии $L = 1300$ мм от мишени. Выбор длины дрейфового промежутка обусловлен не только желаемой длительностью пучка, но и тем, чтобы плотность тока плазмы $j_{\text{плазмы}}$ не была бы слишком высокой на границе отбора. В результате эксперимента длина дрейфового промежутка была выбрана таким образом, чтобы условие фиксации границы плазмы на первом сеточном электроде

$$j_{\text{плазмы}} \leq j_{\text{крит.}} = 174 \times \sqrt{\frac{Z}{A}} \frac{U^{3/2}}{d^2}$$

(j — плотность тока в mA/cm^2 , U — напряжение в кВ, d — зазор в миллиметрах) выполнялось для $d = 10\div 20$ мм и при напряжении между сетками $U \sim 10\div 30$ кВ.

При исследовании характеристик лазерного источника после плазменного диода проводилась сепарация ионов по зарядам с помощью магнитного спектрометра. Поворотный магнит с индукцией $B < 0,4$ Т и радиусом поворота $R = 240$ мм заворачивал ионы углерода на 90° . Для регистрации тока ионов в прямом и отклоненном пучках использовались цилиндры Фарадея, в которых динаatronный эффект подавлялся магнитным полем. Полный импульс тока ионов углерода после плазменного диода, а также импульсы тока для различных зарядов, выделенные масс-спектрометром, показаны на рис. 3. Видно, что в полученных условиях образуется значительное количество ионов с зарядами $Z \leq 5$. Плотность тока для $Z = 5$ составила $\sim 12 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

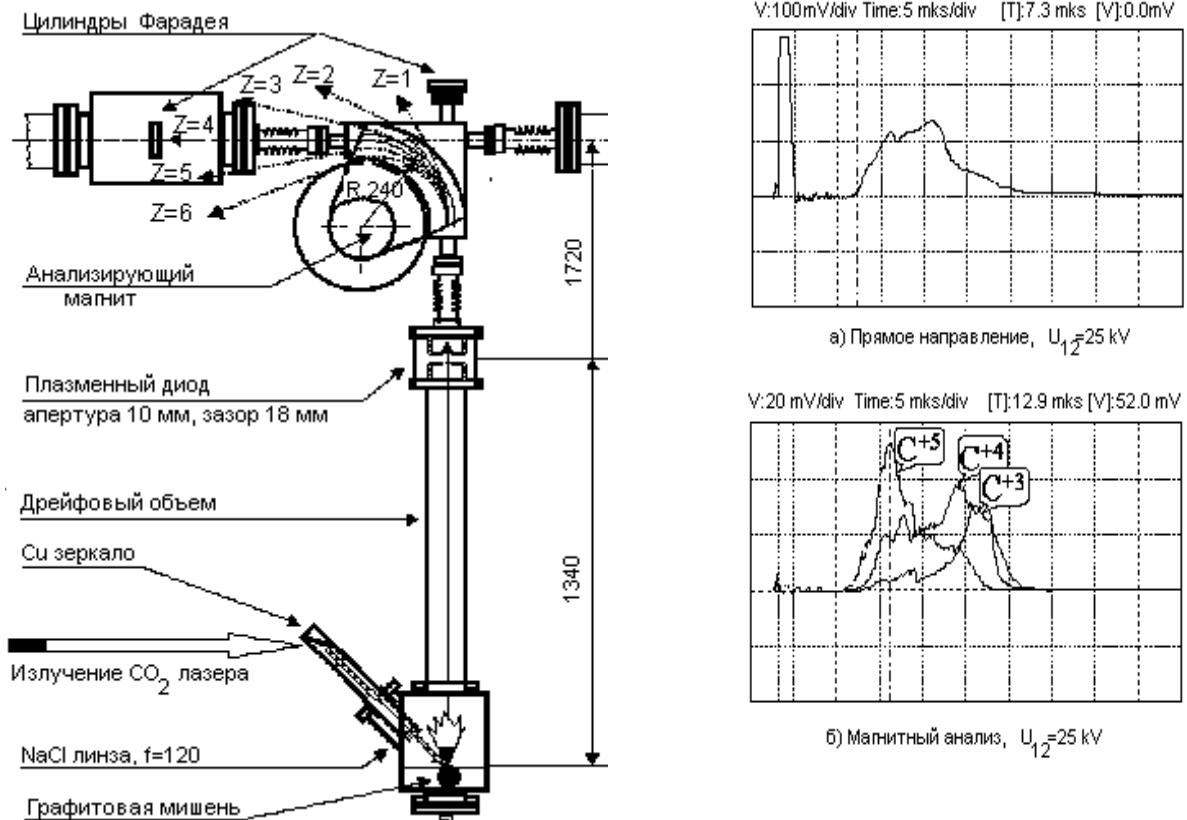


Рис. 2. Схема лазерного источника ионов углерода и магнитного спектрометра.

Рис. 3. Диаграммы сигналов с цилиндров Фарадея: а) в прямом пучке для полного тока, б) в отклоненном пучке для ионов углерода разных зарядностей.

3. Ионно-оптическая система

Чтобы сохранить возможность оперативного перехода от ускорения ионов к протонам и наоборот, трассу ионной оптики для ввода в И-100 пучка ионов углерода предполагается расположить перпендикулярно к оси пучка протонов. Для ввода пучка ионов углерода на ось ускорителя на входе в банчер ставится поворотный магнит. Он служит также для отсева ионов углерода других зарядностей.

Для работ по ионной лучевой терапии лазерный источник должен обеспечивать $\sim 10^9$ частиц/импульс (при частоте импульсов И-100 $\sim \frac{1}{2}$ Гц). Энергия ионов в лазерной плазме $W_0 \approx 1000$ эВ (скорости ионов в плазме $\beta \sim 4 \cdot 10^{-4}$). При расчетах ионной оптики предполагалось: плотность тока для $Z = 5$ $j_5 = 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$, радиус эмиссионного отверстия $r = 10$ мм, максимальный ток для ионов всех зарядностей $I = 50$ мА. Приведенный эмиттанс пучка оценивался порядка $\sim 10^{-5}$ см.рад.

Для извлечения ионов из плазмы и их ускорения до энергии инжекции предлагается использовать ионно-оптическую систему из пяти электродов (рис. 4). Задача первого промежутка — извлечение ионов и

первичное формирование пучка, на последующих осуществляется доускорение ионов и окончательное формирование пучка. Первый и последний электроды имеют заданные потенциалы: $U_1 = U_{\text{инж}}$, $U_5 = 0$ кВ (энергия инжекции $U_{\text{инж}} = 420$ кВ для C_{12}^{+5} и $U_{\text{инж}} = 350$ кВ для C_{12}^{+6}). Потенциал второго электрода U_2 и эффективная длина первого ускоряющего промежутка d выбраны из условия равенства плотности тока, поступающего на границу плазмы, и плотности тока, вычисляемой по закону “3/2” для плоского диода с геометрией Пирса. Изменяя потенциал третьего электрода и четвертого электродов, можно управлять параметрами пучка на выходе ионно-оптической системы.

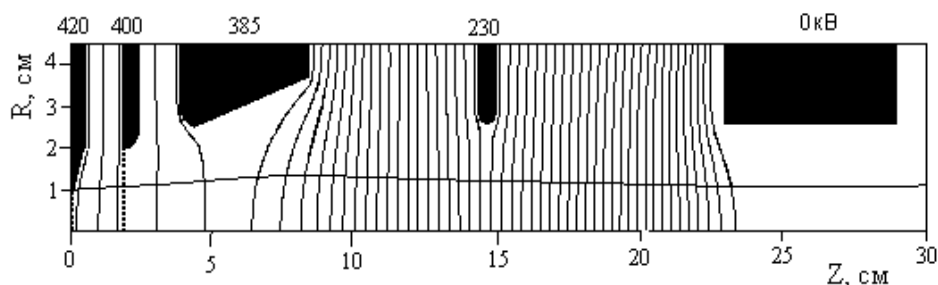


Рис. 4. Геометрия ионно-оптической системы и огибающая пучка ионов C_{12}^{+5} .

Для вывода пучка на ось ускорителя И-100 предполагается использовать поворотный магнит с неоднородным полем, нормальным входом и выходом, с радиусом поворота $R = 0,3$ м и жесткостью $0,145$ Тм. Показатель спада поля $n = 0,5$ позволяет получать на выходе отклоняющей системы пучок с одинаковыми параметрами в поперечных плоскостях. После вывода пучка на ось ускорителя И-100 осуществляется согласование эмиттанса пучка с акцептансом ускорителя. Для этого используется система из четырех магнитных квадрупольных линз, в первом порядке аналогичная осесимметричной линзе. Квадруплет состоит из двух одинаковых дублетов, причем порядок чередования полей второго дублета обратен порядку первого, а поля в одинаковых линзах повернуты друг относительно друга на 90° .

Выводы

В И-100 можно ускорять и фокусировать на второй кратности ионы C_{12}^{+6} , C_{12}^{+5} . При этом получаем:

- Напряжение инжекции иона C_{12}^{+6} 350 кВ
- Напряжение инжекции иона C_{12}^{+5} 420 кВ
- Энергия на выходе 2-го резонатора 16,6 МэВ/нуклон
- Максимальный инвариантный эмиттанс ускоренного пучка $0,8 \pi$ см²мрад.
- Ожидаемая интенсивность ускоренного пучка ионов углерода $\sim 10^9$ ионов/имп.

В этом варианте имеется возможность оперативного перехода от ускорения ионов к протонам и наоборот. В случае ускорения ионов C_{12}^{+5} на выходе И-100 они будут преобразованы в ионы C_{12}^{+6} на перезарядной мишени.

Список литературы

- [1] Ю.М. Антипов и др. Медицинский облучательный центр с пучком ионов углерода на базе ускорительного комплекса ИФВЭ (Концептуальный проект). XVI Совещание по ускорителям заряженных частиц, ГИЦ РФ ИФВЭ, Протвино, 20-22 октября 1998. – Сборник докладов в 2-х томах, том 2, с. 212-220, Протвино 1999.
- [2] И.М. Капчинский, А.М. Мальцев, В.К. Плотников. Расчетные значения физических параметров линейного ускорителя И-100. Препринт ИФВЭ 67-38, Серпухов, 1967.
- [3] И.М. Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. – М. Атомиздат, 1966.
- [4] T.R. Sherwood. Laser Ion Sources for Particle Acceleration. Preprint CERN-PS-95-020-НI, June 1995.