



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2003-14
ОУ У-70

Ю.М. Антипов, Н.Е. Анферов, В.А. Батарин, Ю.П. Горин,
В.В. Давыдов, А.П. Мальцев, В.В. Нижегородцев, С.И. Пилипенко,
Е.К. Стародубровский, А.В. Суренский, В.А. Тепляков,
Е.Ф. Троянов, Н.Е. Тюрин

**УСКОРЕНИЕ ДЕЙТРОНОВ
В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ И-100**

Протвино 2003

Аннотация

Антипов Ю.М., Анферов Н.Е., Батарин В.А. и др. Ускорение дейтронов в линейном ускорителе И-100: Препринт ИФВЭ 2003-14. – Протвино, 2003. – 10 с., 6 рис., 1 табл., библиогр.: 9.

Пучки дейтронов высоких энергий представляют большой интерес для фундаментальных и прикладных исследований. Создание на ускорительном комплексе ИФВЭ таких пучков с энергиями $0,1 \div 35$ ГэВ/нуклон существенно расширяют возможности исследований с релятивистскими дейтронами в нашей стране. Ускорение дейтронов создает также предпосылки для получения в ИФВЭ пучков других легких ядер.

В качестве инжектора легких ионов в ИФВЭ можно использовать протонный линейный ускоритель типа Альвареца И-100.

В данной работе приводятся результаты исследований по ускорению дейтронов в линейном ускорителе И-100.

Abstract

Antipov Yu.M., Anferov N.E., Batarin V.A. et al. Deuterons Acceleration in I-100 Linac: IHEP Preprint 2003-14. – Protvino, 2003. – p.10, figs. 6, table 1, refs.: 9.

High energy deuteron beams are of great interest for fundamental and applied researches. Creation of such beams on IHEP accelerator complex in energy range $0,1 \div 35$ GeV/u significantly widens the research possibilities with relativistic deuterons in our country. Accelerated deuterons are also a precondition for other light nuclei acceleration in IHEP.

IHEP Alvarez type proton I-100 linac can be used as light ions injector.

In this work the results of deuterons acceleration studies in I-100 linac are presented.

Введение

Получение пучков легких релятивистских ядер представляет существенный интерес как для фундаментальных, так и прикладных исследований.

Для фундаментальных исследований представляют заметный интерес пучки дейтронов высоких энергий. Пучки дейтронов с энергиями до 6 ГэВ/нуклон существуют в нашей стране лишь в ЛВЭ, ОИЯИ [1,2]. На этих пучках выполнен ряд интересных экспериментов, указывающих на многие необычные явления, происходящие при взаимодействии дейтронов. Это и кумулятивный эффект, и указания на существование многих возбужденных состояний в 2-нуклонных системах. Создание на ускорителе У-70 пучков дейтронов с энергиями до 35 ГэВ/нуклон и их использование для изучения взаимодействий дейтронов на существующих в ИФВЭ широкоапертурных скоростных экспериментальных установках существенно расширило бы возможности исследований с релятивистскими дейтронами в нашей стране.

Пучки ускоренных дейтронов в диапазоне энергий ≤ 1 ГэВ представляют интерес для прикладных исследований в области ядерной энергетики (установки типа ускоритель+подкритический реактор). Перспективными областями применения подобных комбинированных систем могут быть: безопасное производство энергии, переработка ядерного топлива, использование ^{232}Th в ядерном цикле. Обычно в этих системах предполагается использовать интенсивные ускоренные пучки протонов. Однако уже даже в самых первых работах по этой тематике было замечено, что наиболее эффективными могут быть пучки дейтронов.

Ускорение дейтронов создает предпосылки для получения пучков других легких ядер – в частности, ядер углерода.

К настоящему времени многочисленные исследования в зарубежных и отечественных лабораториях доказали, что самым совершенным методом лучевой терапии онкологических заболеваний является терапия, сочетающая облучение пучками протонов и ионов углерода. Проектирование и строительство новых центров, использующих методику протон-ионной лучевой терапии, ведется в Японии, Германии, Италии, Австрии и Китае.

Имеется предложение [3] по созданию подобного центра на базе ускорителей ИФВЭ.

Ускорительный комплекс ИФВЭ имеет в своем составе линейный ускоритель-инжектор ЛУ-30, бустер, протонный синхротрон У-70 и также линейный ускоритель И-100 [4].

В линейных ускорителях при переходе от ускорения протонов к ускорению более тяжелых ионов возникает проблема сохранения синхронизма ускорения, которую обычно решают переходом на более высокую кратность.

Ускоритель ЛУ-30, служащий в настоящее время инжектором протонов в У-70 и работающий на π -моду, использовать на повышенной кратности нельзя. Поэтому для инжекции легких ионов в бустер было решено использовать протонный линейный ускоритель типа Альвареца И-100.

С 2000 года в ИФВЭ начаты работы по экспериментальной проверке возможности ускорения легких ядер в И-100.

Результаты современного состояния исследований по ускорению дейтронов в линейном ускорителе И-100 изложены ниже.

1. Краткий теоретический анализ проблемы ускорения дейтронов

При ускорении дейтронов в существующем протоном ускорителе типа Альвареца выбор режима ускорения определяется существующими ограничениями ускоряющей и фокусирующих структур.

В принципе, существуют два варианта ускорения дейтронов с постоянной ВЧ-фазой.

Первый вариант – 2π -мода (или ускорение на кратности 1), которая используется в стандартном случае при ускорении протонов. В этом варианте ускоряемая частица проходит один период ускоряющей структуры за время, соответствующее одному периоду ускоряющего ВЧ-поля. В этом случае скорость у дейтронов должна быть такая же, как и у протонов, а кинетическая энергия и импульс дейтрона в два раза больше, чем для протона. Для реализации этого гипотетического варианта требуется, чтобы энергия инжекции и напряженности ускоряющего и фокусирующего полей были бы увеличены в два раза. Очевидно, что для уже существующего ускорителя такой вариант неприемлем. (Имеющиеся в И-100 возможности по увеличению ускоряющего ВЧ-поля – 10%, а фокусирующего – 20%).

Второй вариант – 4π -мода (или ускорение на кратности 2), при которой ускоряемая частица проходит один период ускоряющей структуры за время, соответствующее двум периодам ускоряющего ВЧ-поля (теоретический анализ ускорения дейтронов в этой моде выполнен в работах [5,6]). Скорость дейтронов при этом в два раза меньше протонной, импульс дейтронов равен импульсу протонов, а кинетическая энергия дейтронов в 2 раза меньше протонной. Так как импульс дейтронов соответствует стандартному (протонному) варианту, то и напряженность фокусирующих полей должна оставаться неизменной. Уменьшение кинетической энергии в два раза, казалось бы, требует в два раза меньших энергии инжекции и напряженности ускоряющего ВЧ-поля. На первый взгляд, кажется, что никаких препятствий для реализации такого варианта не должно быть. Однако детальное рассмотрение показывает, что на самом деле препятствия существуют.

Приращение энергии ΔE синхронно движущейся частицы в каждой ячейке линейного ускорителя равно (смотри, например, [7])

$$\Delta E = e \cdot U \cdot v \cdot \cos(\varphi). \quad (1)$$

Здесь e – заряд частицы, U – амплитуда напряжения на зазоре, φ – равновесная фаза, v – фактор пролетного времени. Фактор пролетного времени характеризует долю ускоряющей компоненты переменного электрического поля, он равен

$$v_n = (1/E_0) \int_L E_g(z) \cdot \cos(2\pi \cdot n \cdot (z - z_0)) / L \cdot dz. \quad (2)$$

Здесь E_0 – средняя напряженность электрического поля на оси канала, $E_g(z)$ – напряженность поля в зазоре, z_0 – электрический центр зазора, n – кратность ускорения, L – длина периода (суммарная длина дрейфовой трубки и зазора).

В том случае, когда апертура трубок дрейфа значительно меньше их длины, что справедливо в И-100 всюду, кроме первых 15-20 трубок дрейфа первого резонатора, распределение поля $E_g(z)$ можно с достаточной точностью аппроксимировать в виде постоянной величины $E_g(z)=\text{const}>0$ внутри зазора и $E_g(z)=0$ в дрейфовой трубке. В этом случае легко получить связь между фактором пролетного времени и кратностью ускорения:

$$v_n = \sin(n\pi g/L) / (\pi g/L) \quad (3)$$

(n – кратность ускорения, g – длина зазора).

Отношение g/L (коэффициент зазора) в ускорителе И-100 примерно постоянно ($g/L \approx 0,25$). При $g/L=0,25$ в этом приближении факторы пролетного времени для первой и второй кратности соответственно равны

$$v_1 = 0,900, \quad v_2 = 0,637. \quad (4)$$

Требуемый уровень ускоряющего ВЧ-поля – U_d при ускорении дейтронов на второй кратности будет равен

$$U_d = 0,5 \cdot (v_1 / v_2) U_p \text{ или} \\ U_d = 0,706 U_p. \quad (5)$$

Итак, в этом приближении видимых проблем для ускорения дейтронов на второй кратности в И-100, вроде бы, не существует.

Но, как уже было отмечено, это приближение справедливо лишь тогда, когда длина пролетных трубок заметно больше их апертуры. Там, где апертура сравнима с длиной трубок, предыдущие оценки факторов пролетного времени оказываются существенно неверными. Причиной этого является то, что ускоряющее электрическое поле на оси ускорителя “провисает” в апертуру трубки на величину порядка радиуса апертуры. Это, в частности, происходит в начальной части первого резонатора И-100. Диаметр апертуры входных трубок дрейфа (трубки № 100÷127*) равен 2 см, а длина, например, трубки № 101 всего 6 см.

В работе [6] показано, что из-за эффекта “провисания” с хорошей точностью ранее вычисленные факторы пролетного времени (4) дополнительно уменьшаются на оси ускорителя в K раз, где

$$K = 1 / I_0(2\pi \cdot n \cdot a / L), \quad (6)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя, a – радиус апертуры трубки дрейфа.

Качественно это дополнительное уменьшение можно понять следующим образом: чем больше апертура пролетной трубки, тем хуже экранирует трубка тормозящую временную компоненту ВЧ-поля.

Дейтроны, движущиеся с половинной скоростью, проводят в два раза большее время в слабо экранированных областях, подвергаясь там воздействию тормозящего ВЧ-поля. Из-за этого размер сепаратриссы сокращается (в приосевой области до нуля), эффективность ускорения падает.

* Принята следующая система нумерации трубок дрейфа:

- первая цифра – номер резонатора;
- две последующие цифры – порядковый номер трубки в резонаторе.

Сильнее всего эффект “провисания” чувствуется на оси ускорителя ($r=0$), при движении на максимальном удалении от оси ускорителя ($r=a$) экранировка работает достаточно эффективно, и соответственно фактор пролетного времени достаточно хорошо определяется приближением (4). При промежуточном значении радиальной координаты ($0 < r < a$) фактор пролетного времени также занимает промежуточное значение.

Значения факторов пролетного времени, определенных для различных радиальных положений ускоряемой частицы соотношениями (4) и (6) в зависимости от номера пролетной трубки при ускорении на кратностях 1 и 2 ($n=1$ и $n=2$), показаны на **рис. 1**.

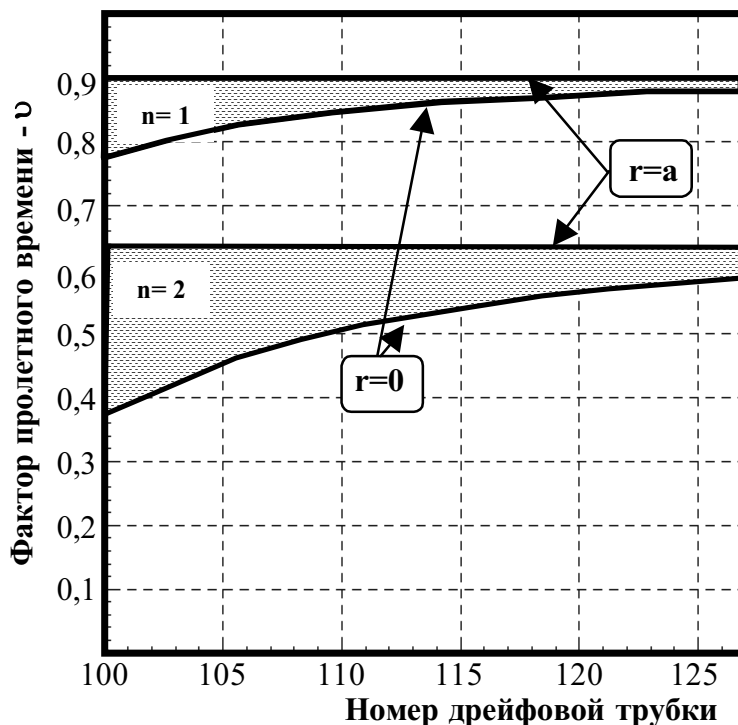


Рис. 1. Теоретические оценки факторов пролетного времени в зависимости от номера дрейфовой трубки первого резонатора И-100 и кратности ускорения.

Из **рис. 1** видно, что при ускорении на второй кратности фактор пролетного времени в начальной части ускорителя сильно меняется в зависимости от радиуса r . Значения фактора пролетного времени $\nu_2(r)$ в начале ускорителя малы, а именно $\nu_2(0) \approx 0,4$.

Все это делает захват в режим ускорения на второй кратности, с теоретической точки зрения, весьма проблематичным.

Для решения проблемы эффективного ускорения ядер на второй кратности в ЛВЭ ОИЯИ выполнили модернизацию [8] линейного ускорителя: установлена перегородка в начальной части ускорителя, создан независимый ВЧ-генератор для этой новой секции ускорителя, произведена замена дрейфовых трубок на оптимизированные для ускорения на второй кратности.

Однако в данный момент для И-100 подобное решение является практически неосуществимым.

2. Экспериментальное исследование ускорения дейтронов в И-100

Работы по экспериментальному исследованию ускорения дейтронов в ускорителе И-100 были начаты в мае 2000 года. В качестве ионного источника ионов дейтерия использовался штатный плазменный ионный источник [9] форинжектора И-100, в который вместо водорода подавался дейтерий. Так как ионизационные характеристики водорода и дейтерия практически неразличимы, то настройка источника свелась к подбору оптимальных режимов входной электростатической оптики форинжектора. Ток дейтронов на входе И-100 находился на уровне $50 \div 100$ мА.

2.1. Первоначальный этап исследований

При напряжении форинжектора равном $U_{\text{фор}}(d)=350$ кВ, необходимом для ускорения на второй кратности в соответствии с простой моделью ($U_{\text{фор}}(d)=1/2 \cdot U_{\text{фор}}(p)$), и номинальном уровне ускоряющего ВЧ-поля нам удалось получить выходной ток ускоренных дейтронов лишь $\approx 0,05$ мА. Это отвечало крайне малому коэффициенту захвата, на уровне 0,1%.

Однако исследования режимов ускорения в небольшой области повышенных значений напряжения форинжектора – $U_{\text{фор}}(d)$ и в широкой области уровня ускоряющего ВЧ-поля в первом резонаторе – $U_1(d)$ показали, что коэффициент захвата может быть значительно увеличен, если напряжение инжектора поднять до $U_{\text{фор}}=380$ кВ, уменьшив при этом уровень ВЧ-поля в первом резонаторе до 88% от протонного номинала ($U_1(d)=0,88 U_1(p)$).

Найденные зависимости коэффициента захвата от уровней ускоряющего ВЧ-поля (см. **рис. 2**) сразу выявили необычный характер ускорения.

В отличие от ожидаемого “стандартного” увеличения коэффициента захвата, который, казалось бы, должен наблюдаться при увеличении $U_1(d)$ выше порогового значения, была обнаружена резонансно-подобная зависимость с четким максимумом при $U_1(d)=0,88 U_1(p)$.

Коэффициент захвата оказался также очень критичным к уровню фокусирующего поля. Уменьшение тока в обмотках квадруполей дрейфовых трубок всего лишь на 10% приводило к падению коэффициента захвата в 5 раз.

Все эти факты (повышенная энергия инжекции, резкая зависимость коэффициента захвата от уровней ускоряющего и фокусирующего полей) с очевидностью свидетельствовали о нестандартном режиме ускорения.

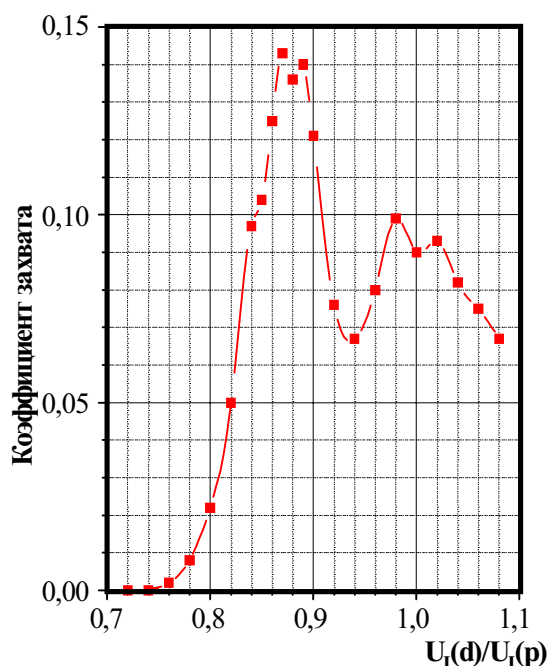


Рис. 2. Зависимость коэффициента захвата от относительного уровня ускоряющего ВЧ-поля.

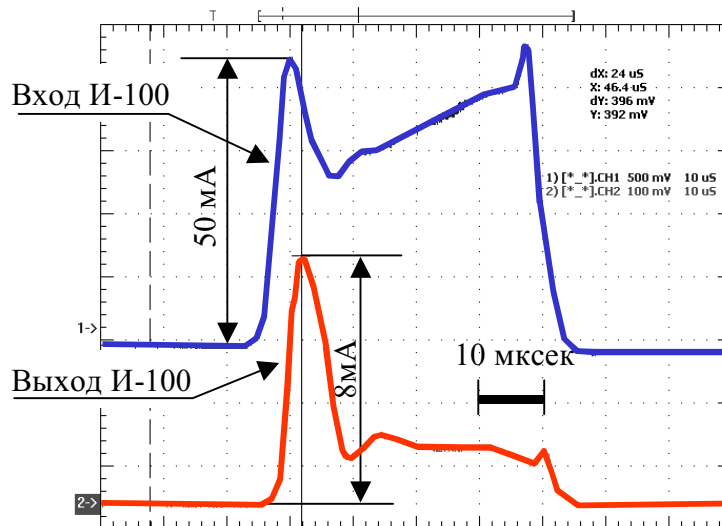


Рис. 3. Осциллограмма импульсов тока дейтронов на входе и выходе И-100 при $U_{\text{фор}}=380$ кВ.

Осциллограмма импульсов тока дейтронов на входе и выходе И-100 в режиме ускорения при $U_{\text{фор}}=380$ кВ показана на **рис. 3**.

Как видно из осциллограммы, несмотря на то, что длительность входного импульса дейтронов составляет ≈ 50 мксек, импульс ускоренных дейтронов представляет собой узкий пик в начале (ширина на полувысоте ≈ 5 мксек), за которым следует “плато” существенно меньшей интенсивности.

Это, скорее всего, означает, что захват в ускорение в этом режиме очень критичен к входным параметрам пучка и те небольшие изменения в энергии и оптических характеристиках инжектируемого пучка, которые происходят во время процесса инжекции, выводят режим из оптимального.

Однако полученная интенсивность дейтронного пучка (≈ 8 мА) и его временная длительность уже были пригодны для инжекции в бустер.

Следует отметить, что в этом режиме правильная настройка банчера (фаза и амплитуда) позволила заметно увеличить интенсивность ускоренного пучка (максимальный эффект банчера достигал ~ 2).

После настройки фазы ВЧ-поля второго резонатора был получен устойчивый режим ускорения в двух резонаторах, слабо зависящий от уровня ВЧ-поля во втором резонаторе в пределах $U_{\text{II}}(d) = 0,7 \div 1,0 U_{\text{II}}(p)$. Такое поведение и следовало ожидать из ранее приведенных теоретических оценок.

Энергия ускоренных дейтронов контролировалась с помощью магнитного анализатора на выходе И-100. Третий резонатор при этом не возбуждался, а использовался как канал транспортировки пучка.

2.2. Исследования в широком диапазоне напряжений форинжектора

После детального исследования режима ускорения дейтронов при $U_{\text{фор}}=380$ кВ и выбора оптимальных для ускорения в этом режиме параметров входной оптики форинжектора и уровня ускоряющего ВЧ-поля мы изучили процесс ускорения дейтронов в максимально доступном диапазоне напряжений форинжектора ($U_{\text{фор}} < 750$ кВ).

Полученная при такой настройке ускорителя зависимость тока ускоренных дейтронов от напряжения форинжектора показана на **рис. 4А**. Как видно из **рис. 4А**, зависимость ускоренного тока дейтронов во всем доступном диапазоне напряжений форинжектора представляет многочисленные узкие пики, соответствующие тому, что инжектируемая частица “проскальзывает” начальные ускоряющие промежутки, а затем “захватывается” в ускорение уже внутри первого резонатора. Очевидно, что относительная величина пиков зависит от настройки ускорителя.

Проанализировав форму выходных импульсов тока ускоренных дейтронов для каждого пика, мы пришли к выводу, что наиболее “привлекательным” является шестой пик с $U_{\text{фор}}=580\text{кВ}$. В дальнейшем особое внимание было посвящено изучению именно этого шестого пика (подробности смотри далее), для которого мы получили наилучшие выходные параметры тока ускоренных дейтронов.

Зависимость тока ускоренных дейтронов от напряжения форинжектора в широком диапазоне напряжений при оптимальной настройке ускорителя на пик $U_{\text{фор}}=580\text{ кВ}$ показана на **рис. 4В**.

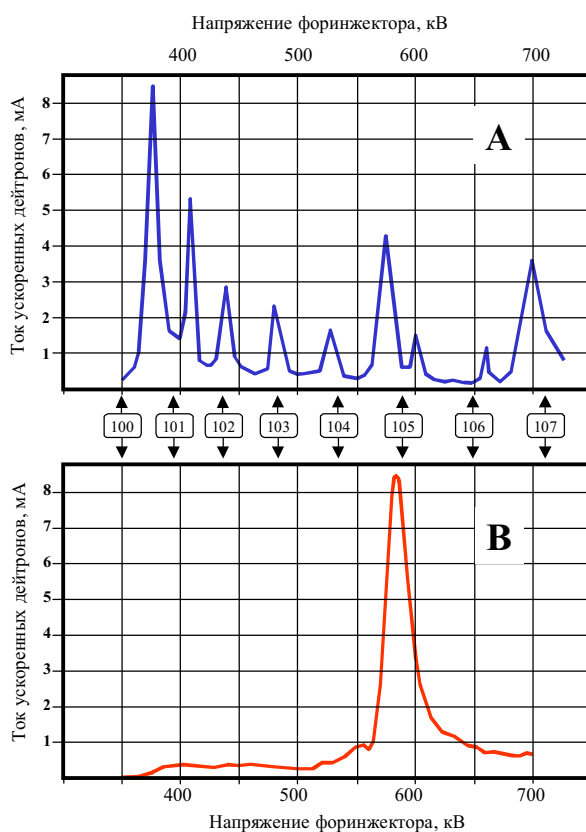


Рис. 4. Зависимость тока ускоренных дейтронов от напряжения форинжектора: **А** – режимы ВЧ и банчера оптимальны для пика $U_{\text{фор}}=380\text{ кВ}$; **В** – после оптимизации режимов для пика 580 кВ. Значками отмечены равновесные энергии дейтронов на входе в соответствующие дрейфовые трубки.

Вид кривой на **рис. 4В** заметно отличен от кривой **рис. 4А**. Отсутствие в этой зависимости других пиков кроме $U_{\text{фор}}=580\text{ кВ}$ является косвенным подтверждением оптимального характера такой настройки ускорителя.

2.3. Исследования при напряжении форинжектора $U_{\text{фор}}=580$ кВ

При исследовании режимов ускорения дейтронов при напряжении форинжектора $U_{\text{фор}}=580$ кВ и влияния банчера при разных настройках по фазе и амплитуде было обнаружено, что оптимальный режим возникает при отключении этой системы. По-видимому, частица при выключенном банчере “проскальзывает” до захвата в ускорение несколько ускоряющих промежутков, которые обеспечивают достаточно эффективную группировку частиц. Найденная для этого режима зависимость коэффициента захвата дейтронов от относительного уровня ускоряющего ВЧ-поля в первом резонаторе показана на **рис. 5**.

Следует отметить, что оптимальный уровень ВЧ-поля в первом резонаторе для этого режима равен $\sim 77\%$ от протонного номинала ($U_1(d) \approx 0,77 \cdot U_1(p)$), что близко к простой теоретической оценке (5).

Осциллограмма импульсов тока дейтронов на входе и выходе И-100 при $U_{\text{фор}}=580$ кВ показана на **рис. 6**.

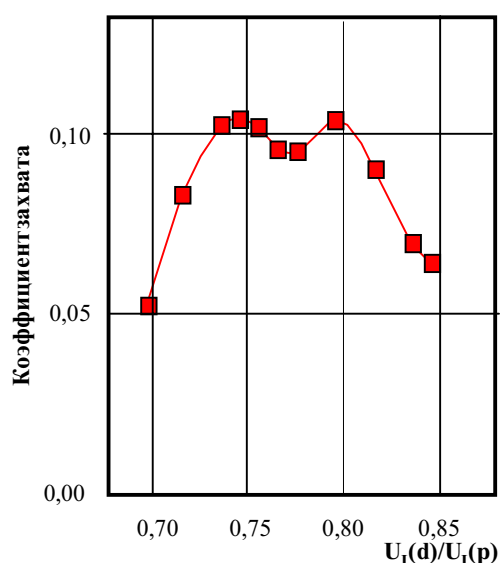


Рис 5. Зависимость коэффициента захвата от относительного уровня ускоряющего ВЧ-поля при $U_{\text{фор}}=580$ кВ.

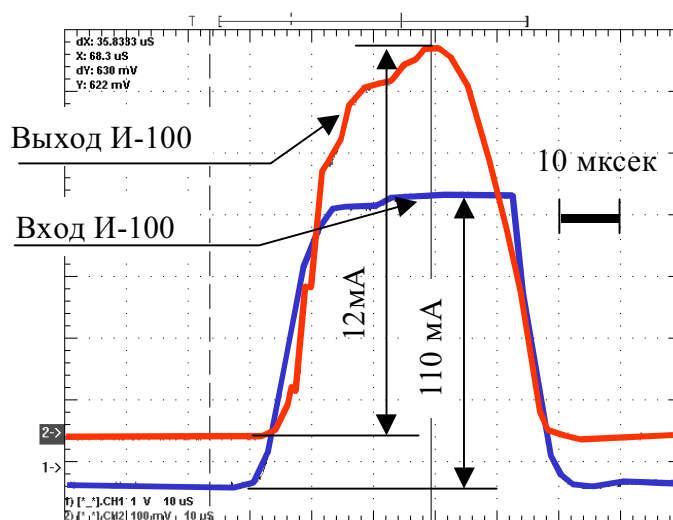


Рис. 6. Осциллограмма импульсов тока дейтронов на входе и выходе И-100 при $U_{\text{фор}}=580$ кВ.

Как видно из осциллограммы, в этом режиме форма импульсов на входе и, самое главное, на выходе И-100 качественно отличается от режима при $U_{\text{фор}}=380$ кВ (**рис. 3**).

Длительность входного импульса дейтронов составляет ≈ 50 мксек, импульс тока ускоренных дейтронов представляет собой широкий пик с довольно гладкой “вершиной” (с шириной на полувысоте практически такой же, как и у входного импульса).

Это означает, что захват в ускорение в этом режиме менее критичен к входным параметрам пучка и те небольшие изменения в энергии и оптических характеристиках пучка, которые происходят во время процесса инжекции и которые заметно ухудшали выходной импульс при $U_{\text{фор}}=380$ кВ, в данном случае уже не выводят режим из оптимального.

Полученная в этом режиме интенсивность дейтронного пучка (≈ 12 мА) в 1,5 раза превышает достигнутую при $U_{\text{фор}}=380$ кВ.

Все это означает, что режим при $U_{\text{фор}}=580$ кВ является наиболее предпочтительным для ускорения дейтронов в ускорителе И-100.

3. Масштабные оценки режимов ускорения ионов углерода

Предполагая, что для ускорения ионов углерода будет использован режим аналогичный найденному для ускорения дейтронов при $U_{\text{фор}}=580$ кВ, а также учитывая отличия в Z/A (Z – заряд иона, A – массовое число), можно получить масштабные оценки режимов ускорения ионов углерода для разных зарядностей.

Эти оценки приведены в **таблице**, где:

- $U_{\text{фор}}$ – напряжение форинжектора;
- U_i, U_p – номинальные значения ускоряющего электрического ВЧ-поля;
- V_i, V_p – номинальные значения фокусирующих магнитных полей при ускорении ионов (i) и протонов (p).

Таблица

ион	$d, {}^{12}\text{C}^{+6}$	${}^{12}\text{C}^{+5}$	${}^{12}\text{C}^{+4}$
$U_{\text{фор}}$	580 кВ	696 кВ	870 кВ
U_i/U_p	0,77	0,92	1,16
V_i/V_p	1	1,2	1,5

Как видно, для ускорения на второй кратности ионов углерода с зарядом $Z=5$ напряжение инжекции $U_{\text{фор}}$ и напряжённость ускоряющего электрического ВЧ-поля U_i вполне приемлемые, фокусирующее магнитное поле V_i нужно форсировать на 20%, что, в принципе, возможно.

Ускорять в И-100 ионы углерода с зарядом $Z=4$ (и меньшими зарядами) нельзя.

Заключение

Итак, экспериментальные исследования с ускорением дейтронов в линейном ускорителе И-100 на второй кратности показали:

- ускоритель И-100 эффективно ускоряет дейтроны;
- оптимальный режим ускорения дейтронов достигается при $U_{\text{фор}}=580$ кВ;
- полученная интенсивность дейтронного пучка и его временная длительность пригодны для инжекции в бустер и последующего использования пучка как в прикладных, так и фундаментальных исследованиях;
- в И-100 возможно ускорение ионов ${}^{12}\text{C}^{+6}$ и ${}^{12}\text{C}^{+5}$.

Список литературы

- [1] И.Н.Семенюшкин. Дубненский синхрофазотрон. Состояние и перспективы развития ускорительного комплекса ЛВЭ. // ЭЧАЯ, 1996, том 27, вып. 3.
- [2] Kovalenko A.D. Nuclotron Status and Future In 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna, Austria, 26 - 30 Jun 2000. – E.P.S., Geneva, 2000. – pp.e-proc. 554.
- [3] Ю.М. Антипов, А.В. Василевский, А.П. Воробьев и др. Центр протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ. (Развитие проекта.) – XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000. Сборник докладов. Том 2, с. 302-307.

- [4] И.М.Капчинский, А.П.Мальцев, В.К.Плотников. Расчетные значения физических параметров линейного ускорителя И-ЮО. – Препринт ИФВЭ 67-38, Серпухов, 1967.
- [5] Takao Kato. Simulation of deuteron acceleration in the KEK 20MeV linac. Preprint KEK 827, September 1982, KEK, Japan, 1982.
- [6] Shoroku Ohnuma. Acceleration of deuterons in Alvareztype linac. Preprint FNAL TM373-0200, FNAL, USA, 1972.
- [7] И.М.Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях.– М.: Атомиздат, 1966.
- [8] A.M.Baldin, E.D.Donets, E.E.Donets, A.I. Govorov et al. Upgrades of the Nuclotron Injector for acceleration of ions with $Z/A=0.28$. Proceedings of the 18th International Linac Conference, TUP12, Geneva, CERN, 1996.
- [9] В.В.Нижегородцев. Плазменный ионный источник. Авт.свидетельство № 439232. Бюллетень изобретателя 1975, № 27, с. 178; также в Трудах 5 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1976, том 1, с. 369.

Рукопись поступила 23 мая 2003 года.

Ю.М. Антипов, Н.Е. Анферов, В.А. Батарин и др.
Ускорение дейтронов в линейном ускорителе И-100.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.
Редактор Л.Ф. Васильева. Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 26.05.2003. Формат 60 x 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1. Тираж 130. Заказ 71. Индекс 3649.
ЛР № 020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2003-14, ИФВЭ, 2003
