

P9-2008-22

О. В. Савченко

НОВЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ
В ФАЗОТРОН **ОИЯИ** И РАСШИРЕНИЮ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Савченко О. В.

P9-2008-22

Новые предложения по внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ
и расширению возможностей его использования

Предложены и рассмотрены новые варианты внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ. Основная особенность третьего варианта состоит в использовании для ускорения пучка H^- -ионов до энергии 16 МэВ разработанного и созданного в ОНУ изохронного циклотрона У-115Т с током пучка до 500 мкА и малогабаритного (диаметром около 1 м) кольцевого накопителя H^- -ионов, рассчитанного на такую же энергию и жесткость магнитной фокусировки, обеспечивающей удержание до $4 \cdot 10^{12}$ H^- -ионов в течение 3,5 мс. В четвертом варианте в качестве накопителя предлагается использовать кольцевую зону внутри камеры фазотрона.

Рассмотрен быстрый, однооборотный вывод протонного пучка с увеличенной на порядок интенсивностью из камеры фазотрона ОИЯИ на основе импульсного магнитного дефлектора и дополнительного ферромагнитного канала.

Обозначены возможные области применения выведенного протонного пучка с длительностью импульса ~ 10 нс и частотой следования 250 Гц, и в частности создание в ОИЯИ импульсного нейтронного источника сверхвысокого разрешения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Savchenko O. V.

P9-2008-22

New Proposals for the External Injection into the JINR Phasotron and
Broadening of Its Application Possibilities

New methods of external injection into the JINR Phasotron are proposed and considered. The basic feature of the third method consists in using the H^- -ions beam for acceleration up to the energy 16 MeV in the U-115T isochronous cyclotron with a beam intensity up to $500 \mu A$, developed and created at the Department of New Accelerators, and the compact (about 1 m in diameter) storage ring for H^- -ions, designed for the same energy and rigidity of the magnetic focusing, providing retention up to $4 \cdot 10^{12}$ H^- -ions during 3.5 ms. In the fourth method the annular zone inside the Phasotron chamber is proposed to be used as a storage ring.

Fast, one-turn extraction of the proton beam with an intensity increased by an order of magnitude from the JINR Phasotron chamber on the basis of the impulsive magnetic deflector and supplementary ferrous magnetic channel is considered.

Possible fields of application of the extracted proton beam with a duration of the impulse of ~ 10 ns and frequency recurrence 250 Hz are outlined, in particular, creation at the JINR of a pulsed neutron source of a superhigh resolution.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

В 1968 году в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был разработан проект реконструкции синхроциклотрона в малую мезонную фабрику (фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля, или установка «Ф») с энергией протонов 700 МэВ, средним током внутреннего пучка 50 мкА и интенсивностью выведенного протонного пучка 25 мкА [1]. В 1985 г. реконструкция ускорителя была закончена и после проведения всех пусконаладочных работ рутинная интенсивность внутреннего пучка оказалась на уровне ~ 5 мкА, а интенсивность выведенного пучка в режиме «быстрого» вывода (длительность импульса — 30 мкс) составила около 2,5 мкА [2].

Такая интенсивность выведенного протонного пучка оставила примерно на прежнем уровне интенсивности пучков отрицательных мюонов на выходе мю-канала в месте расположения установки для изучения μ -катализа в смеси изотопов водорода по сравнению с тем, что было до реконструкции синхроциклотрона (при токе внутреннего пучка 2,3 мкА) [2, 3], полностью исключила проведение клинических исследований на медицинских пучках отрицательных π -мезонов и нейтронов высоких энергий и ограничила адронную терапию в медико-техническом комплексе ЛЯП ОИЯИ только пучками протонов.

Кроме того, реконструированным ускорителем была утрачена ранее существовавшая способность ускорять дейтроны, α -частицы и более тяжелые ионы с энергией около 200 МэВ на нуклон, использование которых могло бы существенно расширить возможности адронной терапии.

В процессе наладки фазотрона было выяснено, что сильноточность реконструированного ускорителя определяется процессами, происходящими в его центральной зоне в течение первого фазового колебания, где доминирующим ограничением является слабость вертикальной фокусировки, и что после прохождения радиуса 30–50 см потери пучки при дальнейшем ускорении практически отсутствуют [4].

С целью выправить сложившееся положение с интенсивностью внутреннего протонного пучка фазотрона ОИЯИ и преодолеть ограничения в его центральной зоне автором этой статьи в 1990 г. было выдвинуто предложение [5] и сделаны первые оценки [6] возможности осуществления внешней инжекции пучка на радиус 30–50 см от расположенного рядом с фазотроном

линейного ускорителя H^- -ионов на энергию 6–15 МэВ, частотой повторения импульсов 250 Гц, длительностью 10–20 мкс и током в импульсе 50 мА. Инжекция пучка на выбранный радиус фазотрона осуществляется в два этапа. Сначала H^- с эффективностью около 60 % перезарядается в H^0 на газовой мишени толщиной 1,0–2,0 мкг/см², расположенной вне магнитного поля фазотрона, а затем на тонкой фольге толщиной 15–20 мкг/см², установленной на выбранном радиусе, происходит перезарядка H^0 в H^+ с эффективностью около 100 %. Первоначальная схема внешней инжекции в фазотрон, предложенная в [5, 6], показана на рис. 1.

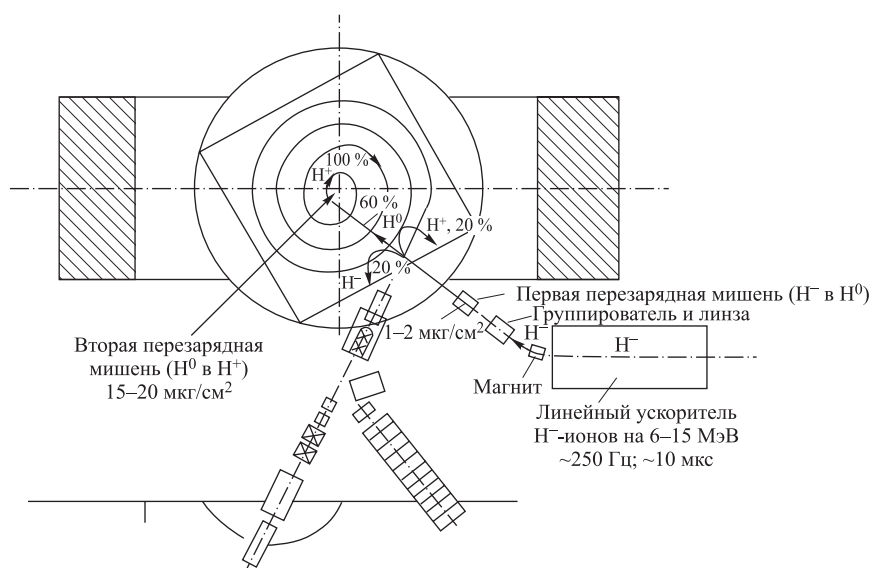


Рис. 1. Первоначальный вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ (1990 г.)

Эта схема позволяет, ничего не нарушая и не меняя в режиме работы фазотрона, обойти ограничения на предельную интенсивность в центральной зоне ускорителя и существенно, примерно на порядок, повысить средний ток внутреннего пучка фазотрона до величины, близкой к 50 мкА, которая и была предусмотрена проектом установки «Ф»[1].

В 1997 году в Отделе новых ускорителей (ОНУ) Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был сделан более детальный анализ [7], уточняющий и дополняющий оценки первоначально предложенной схемы [5, 6] внешней инжекции в фазотрон, показана принципиальная возможность ее осуществления в диапазоне энергии 1–40 МэВ и отмечено отсутствие проблем, связанных с созданием источников H^- -ионов с требуемыми параметрами.

Однако практическое осуществление этой первоначальной схемы внешней инжекции наталкивалась на необходимость создания линейного ускорителя H^- -ионов на энергию около 10 МэВ, стоимость которого (согласно приближенной оценке, – 1 млн долларов США за 1 МэВ энергии) составила бы около 10 млн долларов США, что при существующих финансовых ограничениях в ОИЯИ делало весьма проблематичной возможность реализации такого варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

Для выхода из создавшегося положения автором было предложено рассмотреть возможность реализации второго варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ, показанного на рис. 2 [8].

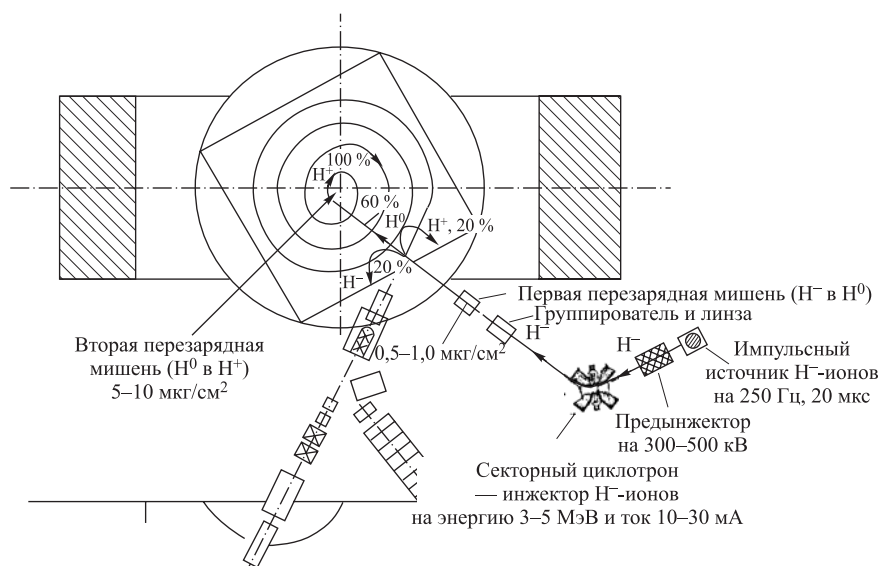


Рис. 2. Второй вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ (1999 г.)

В этом варианте H^- -ионы от подходящего источника, работающего в импульсном режиме с частотой повторения 250 Гц, длительностью импульса 20 мкс и током в импульсе около 50 мА, ускоряются в предварительном инжекторе до энергии 300–500 кВ и выводятся в секторный сильноточный циклотрон-инжектор, рассчитанный на энергию 3–5 МэВ, интенсивность внутренней пучки 10–30 мА и работающий в обычном, постоянном режиме ускорения.

После 5–10 оборотов и набора энергии 3–5 МэВ H^- -ионы выводятся из циклотрона, проходят через банчер в случае необходимости согласо-

ния микроструктуры пучка циклотрона с микроструктурой пучка фазотрона, фокусируются квадрупольными линзами в направлении второй перезарядной мишени, перезаряжаются в нейтральные атомы H^0 на газовой мишени и т. д.

Для осуществления второго варианта инжекции в фазотрон ОИЯИ представлялось наиболее целесообразным использовать имеющиеся разработки ОНУ в области сильноточных циклотронов, и в частности — основные компоновочные решения, примененные в циклотроне ЦИ-10 с проектной интенсивностью 20 мА [9].

Последующие детальные расчеты в ОНУ подтвердили принципиальную возможность осуществления второго варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ на основе циклотрона ЦИ-5 [10, 11], однако сделанная оценка стоимости реализации этого варианта (3–4 млн долларов США) [12] оставляет это предложение до сих пор нереализованным из-за финансовых ограничений в ОИЯИ.

Целью настоящей работы является предложение и рассмотрение двух новых вариантов внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ, реализация которых может оказаться существенно менее затратной по сравнению с первыми двумя вариантами из-за использования имеющихся разработок ОНУ, а также предложение по новой системе вывода протонного пучка с эффективностью, близкой к 100 %, расширяющего возможности использования фазотрона ОИЯИ при проведении физических и прикладных исследований.

1. НОВЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В ФАЗОТРОН ОИЯИ

Общая схема третьего варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ изображена на рис. 3. Основная отличительная особенность этой схемы внешней инжекции по сравнению с первыми двумя схемами состоит в том, что сначала H^- -ионы в течение 3,0–3,5 мс ускоряются в обычном (несильноточном) циклотроне, выведенный пучок из которого направляется все это время в расположенный рядом накопитель H^- -ионов. Затем каждые 4 мс в течение ~ 20 мкс H^- -ионы выводятся из накопителя, фокусируются квадрупольной линзой на вторую перезарядную мишень и далее преобразуются на первой газовой перезарядной мишени в поток нейтральных атомов водорода — H^0 .

В качестве циклотрона для ускорения H^- -ионов может быть использован изохронный циклотрон У-115Т на энергию протонов 20 МэВ, разработанный и созданный в ОНУ [13] на базе серийного магнита СП-57, который еще сохранился в ОНУ, возможно, вместе с другими деталями от этого ускорителя. Такой циклотрон рассчитан на ток внутреннего пучка до 500 мкА, что с большим запасом обеспечивает накопление за время 3,5 мс свыше $4 \cdot 10^{12}$ H^- -

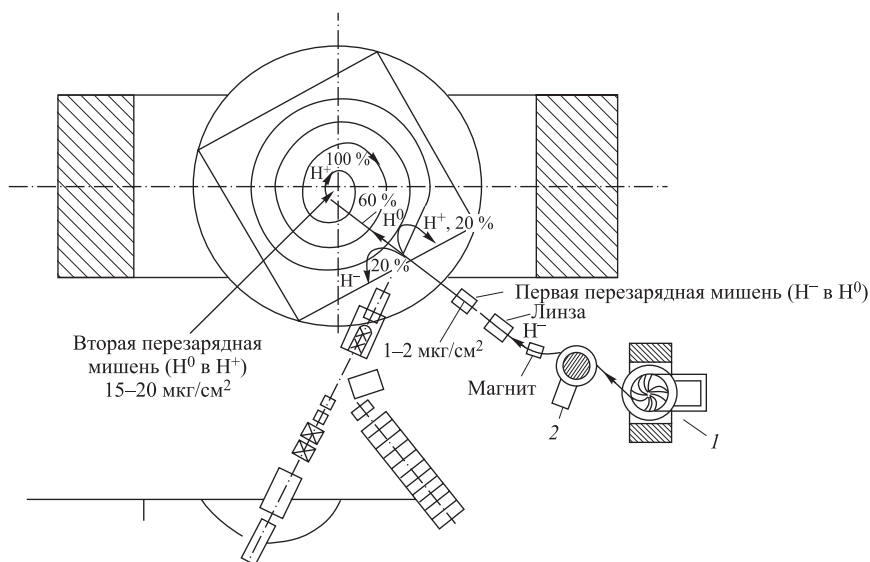


Рис. 3. Новый, третий вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ (2008 г.): 1 — изохронный циклотрон типа У-115Т на энергию H^- -ионов 16 МэВ и ток до 500 мкА, разработанный и собранный с применением магнита СП-57; 2 — кольцевой накопитель H^- -ионов с электростатическими дефлекторами и высокочастотной системой для ввода и вывода пучка H^- -ионов с энергией 16 МэВ

ионов, необходимых для внешней инжекции за один цикл ускорения фазотрона с учетом потерь при вводе и выводе пучка из циклотрона и накопителя, а также эффективности перезарядки H^- в H^0 на газовой мишени.

Источником H^- -ионов на интенсивность до 1 мА может быть как внутренний источник, так и, при неподходящих его размерах, внешний источник с аксиальным вводом пучка и последующим переводом его в медианную плоскость ускорителя с помощью спирального инфлектора, разработанного в ОНУ [14].

Для согласования частоты вращения и временной микроструктуры пучка фазотрона и внешнего инжектора среднюю магнитную индукцию на конечном радиусе 48 см в циклотроне У-115Т можно понизить с 1,35 до 1,2 Тл, что соответствует энергии H^- -ионов на этом радиусе около 16 МэВ, а внешний радиус и среднюю магнитную индукцию в кольцевом накопителе также выбрать соответственно равными 48 см и 1,2 Тл. В этом случае отпадает необходимость в дополнительном устройстве (банчере) для группировки пучка по времени от внешнего инжектора.

На рис. 4 изображена примерная схема возможной компоновки кольцевого накопителя H^- -ионов, который является единственным элементом но-

вого варианта инъекции, подлежащим изначальной разработке. Сравнительно небольшие размеры накопителя (диаметр 1 м и высота 0,7 м) существенно упрощают его изготовление и наладку. Накопитель снабжен электростатической системой ввода и вывода пучка H^- -ионов и полукольцевым дуантом, соединенным с высоковольтным генератором, частота которого изменяется по заданной программе в небольшом (порядка 1 %) интервале частот вращения H^- -ионов.

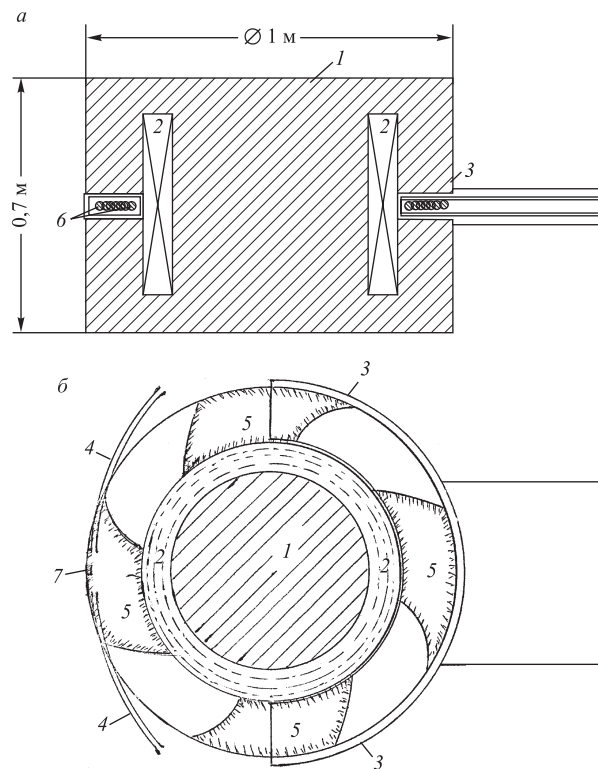


Рис. 4. Общий вид кольцевого накопителя H^- -ионов: *a* — разрез по вертикали; *b* — разрез в медианной плоскости; 1 — стальной магнитовод; 2 — обмотка возбуждения; 3 — полукольцевой дуант; 4 — электростатические дефлекторы для ввода и вывода пучка; 5 — участки спиральных магнитных шимм для фокусировки пучка; 6 — область кольцевого зазора, занятая накопленным пучком; 7 — возбудитель

Принцип ввода пучка H^- -ионов из изохронного циклотрона в кольцевой накопитель подобен разработанному в ОНУ, хорошо апробированному и отлаженному способу медленного вывода протонного пучка из фазотрона ОИЯИ посредством временной растяжки пучка с помощью С-электрода [15].

Уравнения электродинамики обратимы во времени, поэтому при изменении направления движения выведенных протонов на обратное и медленном (в течение 3,5 мс) увеличении (а не уменьшении, как при выводе) частоты высоковольтного генератора, входящего в систему временной растяжки пучка, протоны будут постепенно тормозиться (косинус равновесной фазы станет отрицательным) и группироваться вблизи конечной орбиты в области пространства, определяемой амплитудами радиально-фазовых и бетатронных колебаний пучка. В кольцевом накопителе при начальной энергии 16 МэВ уменьшение энергии H^- -ионов будет составлять несколько МэВ, так что радиальная ширина магнитной дорожки, заполняемая пучком, должна быть в пределах 10–15 см. При выводе пучка H^- -ионов из кольцевого накопителя частота высоковольтного генератора быстро (за время около 20 мкс) уменьшается на тот же самый интервал частот, и H^- -ионы, как и протоны при быстром выводе из фазотрона, увеличивая энергию, покидают за это время кольцевой накопитель и направляются в сторону первой перезарядной мишени.

Применение электростатических дефлекторов в кольцевом накопителе позволит, как и в случае электростатических дефлекторов, рассчитанных для фазотрона [16, 17], увеличить эффективность ввода и вывода H^- -ионов до 80–90 % и тем самым уменьшить требования к интенсивности пучка, выведенного из изохронного циклотрона У-115Т.

Имеется два главных фактора, которые могут ограничивать время циркуляции пучка H^- -ионов в кольцевом накопителе. Это — электрическая диссоциация H^- -ионов в магнитном поле накопителя и взаимодействие H^- -ионов с молекулами остаточного газа в вакуумной камере накопителя.

Среднее время жизни пучка H^- -ионов с энергией 16 МэВ в кольцевом накопителе, обусловленное электрической диссоциацией в магнитном поле накопителя $B = 1,2$ Тл, можно определить из выражения (2) работы [18]:

$$\tau = A/E \cdot \exp L/E \approx 10^{14} \text{ с},$$

где $E = 3\beta \cdot \gamma V(\text{Тл}) = 0,68$ МВ/см, $\beta = 0,185$ и $\gamma = 1,017$ — относительная скорость и релятивистский фактор H^- -иона; $B = 1,2$ Тл; $A = 7,96 \cdot 10^{-14}$ с · МВ/см; $L = 42,56$ МВ/см,

При времени накопления $3,5 \cdot 10^{-3}$ с полученное значение τ полностью исключает потери H^- -ионов из-за эффекта электрической диссоциации.

Уменьшение интенсивности пучка H^- -ионов (I) по отношению к начальной интенсивности (I_0) из-за взаимодействия с молекулами остаточного газа в камере кольцевого накопителя можно определить из выражения (7) работы [18]:

$$I = I_0 \exp \left[-10^{27} \cdot p \cdot \int_0^{t_n} \sigma(\beta) \cdot \beta \cdot dt \right] = I_0 \exp \left[-10^{27} p \cdot \sigma(\beta) \beta \cdot t_n \right],$$

где p — давление остаточного газа (торр); σ — полное сечение взаимодействия H^- -иона с молекулой остаточного газа (см^2), t_n — время накопления ионов (с).

Доминирующим является сечение перехода H^- -иона в H^0 ($\sigma_{-1,0}$), которое в случае перезарядки на молекулах водорода (H_2) при энергии H^- -иона 16 МэВ определяется из выражения (10) работы [18]:

$$\sigma_{-1,0}|\text{H}_2 = 0,412 \cdot 10^{-16} / T^{0,77} (\text{см}^2) = 0,53 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2,$$

где $T = 16$ МэВ — энергия H^- -иона.

Для давления газа 10^{-7} торр, которое необходимо обеспечить только в небольшой (объемом около 30 л) вакуумной камере накопителя:

$$I = I_o \exp(-0,34) \approx 0,7I_o.$$

Такая величина потерь (около 30 %) вполне приемлема, и кроме того, это максимально возможное значение потерь, так как H^- -ионы равномерно во времени поступают в накопитель и среднее время пребывания H^- -иона в накопителе будет примерно в два раза меньше, чем время накопления 3,5 мс.

Для обеспечения поперечной фокусировки H^- -ионов в кольцевом накопителе наиболее простым решением является копирование в масштабе 1:1 существующей конфигурации пространственной вариации магнитного поля фазотрона в области радиусов 40–50 см, осуществляемой с помощью отрезков спиральных шимм, как это показано на рис. 4.

Однако это может оказаться недостаточным из-за эффектов пространственного заряда пучка, так как жесткость фокусирующего магнитного поля фазотрона была первоначально рассчитана на ускорение пучка протонов с интенсивностью до 50 мкА ($1,25 \cdot 10^{12}$ протонов в каждом цикле ускорения), а для обеспечения этой интенсивности с учетом потерь при выводе и эффективности перезарядки H^- в H^0 число накопленных H^- -ионов за один цикл ускорения должно быть не менее $3 \cdot 10^{12}$. Поэтому возникает необходимость в усилении жесткости фокусирующей магнитной системы кольцевого ускорителя путем увеличения наклона участков спиральных магнитных шимм (увеличения Q_r , Q_z), которое представляется также исключительно важным с точки зрения возможного увеличения среднего тока фазотрона свыше 50 мкА, если при детальном расчете динамики пучка в фазотроне с учетом пространственного заряда окажется, что на радиусах более 40 см количество протонов, ускоряемых в одном цикле ускорения, может заметно превысить величину $1,25 \cdot 10^{12}$ протонов.

Изохронный циклотрон У-115Т с током пучка до 500 мкА может обеспечить накопление за время 3,5 мс до 10^{13} H^- -ионов. Если жесткость магнитной системы накопителя будет достаточной для удержания такого количества протонов, то открывается принципиальная возможность повышения среднего

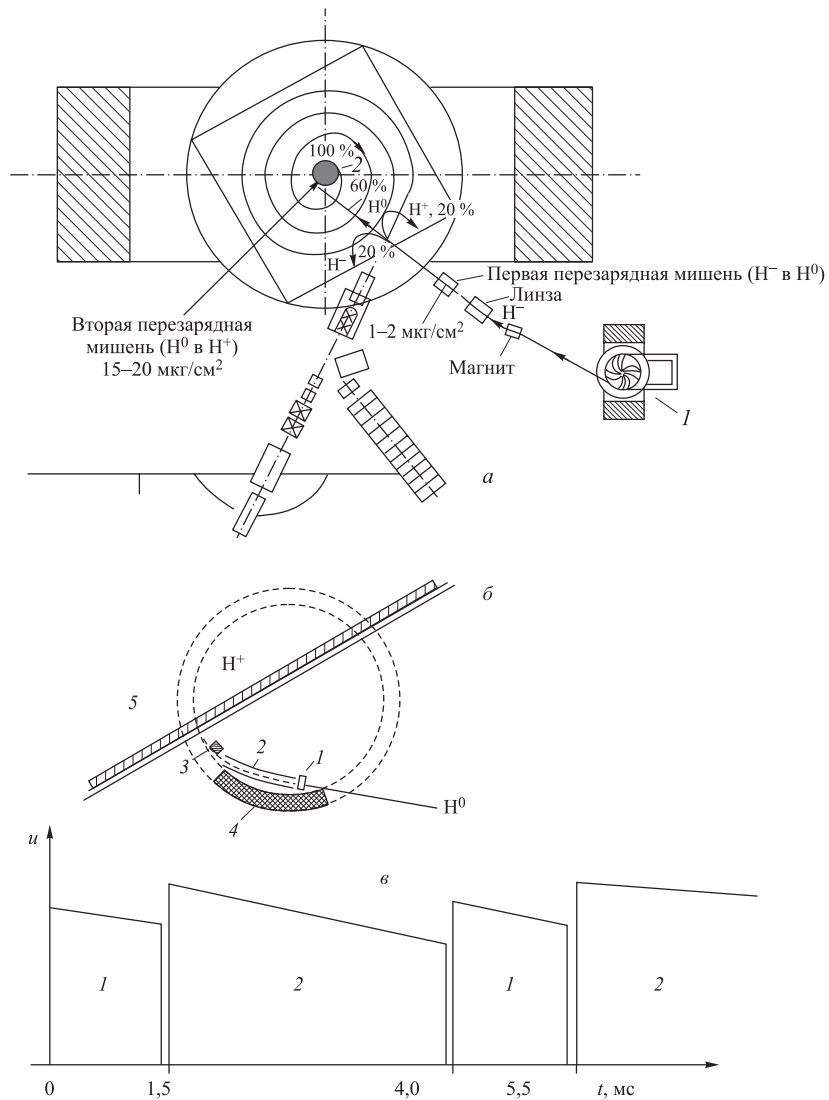


Рис. 5. Четвертый вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ (2008 г.). *a* — общая схема внешней инжекции: 1 — изохронный циклотрон типа У-115Т; 2 — зона кольцевого накопителя. *б* — размещение элементов кольцевого накопителя в центральной зоне фазотрона ОИЯИ: 1 — перезарядная (H^0 в H^+) мишень; 2 — электростатический дефлектор; 3 — регенератор; 4 — дополнительный С-электрод; 5 — дуант. *в* — временная диаграмма высокочастотного напряжения на дополнительном С-электроде (1) и дуанте фазотрона (2)

тока фазотрона до уровня 100–150 мкА, недостижимого в двух первых вариантах внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

Следует кратко остановиться еще на одном, возможно, наименее затратном, четвертом варианте внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ (рис. 5, а), в котором вместо наружного кольцевого накопителя используется кольцевая область внутри камеры фазотрона, снабженная небольшим С-электродом, а также электростатическим дефлектором с регенератором для ввода пучка и исключения многократного прохождения протонов через вторую перезарядную (H^0 в H^+) мишень (рис. 5, б).

С помощью заданной частотной программы С-электрода, расположенного в радиальном промежутке 45–55 см, энергия протонов медленно (в течение $\sim 1,5$ мс) увеличивается с 16 до 23 МэВ, и они накапливаются внутри выбранной кольцевой области.

Затем напряжение на С-электроде выключается, и сразу включается дуантное напряжение с измененной (отсеченной) на начальном участке частотной программой, а далее протоны ускоряются в течение $\sim 2,5$ мс в обычном режиме до конечного радиуса (рис. 5, в).

Однако надо иметь в виду, что размещение в центральной зоне фазотрона нового С-электрода и электростатического дефлектора делает этот вариант внешней инжекции технически трудновыполнимым и достаточно сложным в наладке и эксплуатации и поэтому менее предпочтительным, чем третий вариант внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ.

Окончательное заключение о выборе одного из предложенных вариантов внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ можно будет сделать только после проведения детальных численных расчетов.

2. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО НОВОМУ ВЫВОДУ ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА И РАСШИРЕНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Преимущества повышения интенсивности внутреннего пучка фазотрона до 50 мкА или более при существующей эффективности вывода 50–60 % с помощью железно-токового канала не могут быть реализованы на внешних пучках фазотрона из-за уровня радиационных ограничений при эксплуатации ускорителя (в камере фазотрона не должно теряться более 3 мкА внутреннего пучка).

Разработанные в ОНУ электростатические системы вывода протонного пучка из фазотрона [16, 17] повышают коэффициент вывода до 80–90 %. Однако электростатические дефлекторы в этих системах вывода пучка должны устанавливаться внутри дуанта ускорителя, что потребует дополнительных

затрат на изготовление нового или доработку старого дуанта, на улучшение вакуума в камере ускорителя и усложнит эксплуатацию фазотрона.

Предлагаемый метод однооборотного вывода пучка с помощью импульсного магнитного дефлектора и дополнительного ферромагнитного канала, представленный на рис. 6, устраняет многие из этих трудностей.

Согласно этому методу, сгусток протонов за время одного оборота отклоняется магнитным дефлектором на расстояние около 10 см в сторону центра ускорителя, проходит далее поворот и целиком забрасывается благодаря этому отклонению в апертуру ферромагнитного канала с магнитным полем, сниженным в апертуре канала примерно на 0,7 Тл, и затем уже вне камеры ускорителя сопрягается с направлением выхода пучка из железно-токового канала, попадая в апертуру первого отклоняющего магнита тракта Т.

Метод однооборотного вывода основан на том благоприятном обстоятельстве, что протоны в конце цикла ускорения, например на радиусе 245 см, где энергия протонов составляет около 550 МэВ, согласно измерениям [19], имеют радиальный размер 22 мм на полувысоте распределения и 43 мм — на уровне 0,1 высоты. Измерения вертикального размера пучка в этой работе приводят к оценке менее 10 мм на полувысоте распределения.

Азимутальный размер пучка, исходя из измерений временной микроструктуры пучка при выводе (ширина на полувысоте около 10 нс), составляет примерно 50° или по длине около 2 м на радиусе 245 см.

На этом радиусе период вращения протонов — 65 нс, и это означает, что время установления тока в импульсом магнитном дефлекторе с азимутальной протяженностью около 90° не должно превышать 40 нс до момента прихода начала сгустка протонного пучка.

В обычном виде импульсный магнитный дефлектор представляет собой пару двухпроводных линий расположенных одна над другой (рис. 6), изогнутых по направлению движения пучка и нагруженных каждая на волновое сопротивление около 100 Ом. Для отклонения пучка в таком дефлекторе на 10 см при длине 4 м необходимо увеличение магнитного поля примерно на 600 Гс, что достигается при горизонтальном и вертикальном расстояниях между проводниками линий, равных соответственно 8 и 4 см, применением импульсного тока величиной около 3000 А. Для волнового сопротивления порядка 100 Ом это потребовало бы импульсного источника напряжения, рассчитанного на $3 \cdot 10^5$ В, что не может быть реализовано из-за отсутствия коммутирующих приборов на такие параметры тока и напряжения, а также допустимого значения пробойной величины электрического поля, которая для вакуумной камеры фазотрона составляет ~ 50 кВ/см.

Мощные керамические импульсные водородные тиратроны типа ТГИ 1-1000/25, ТГИ 1-2500/50, ТГИ 1-5000/50 и др. с токами до 5000 А и напряжением до 50 кВ имеют длительность фронта импульса около 100 нс, частоту импульсов до 1000 Гц, нестабильность времени задержки от импульса к им-

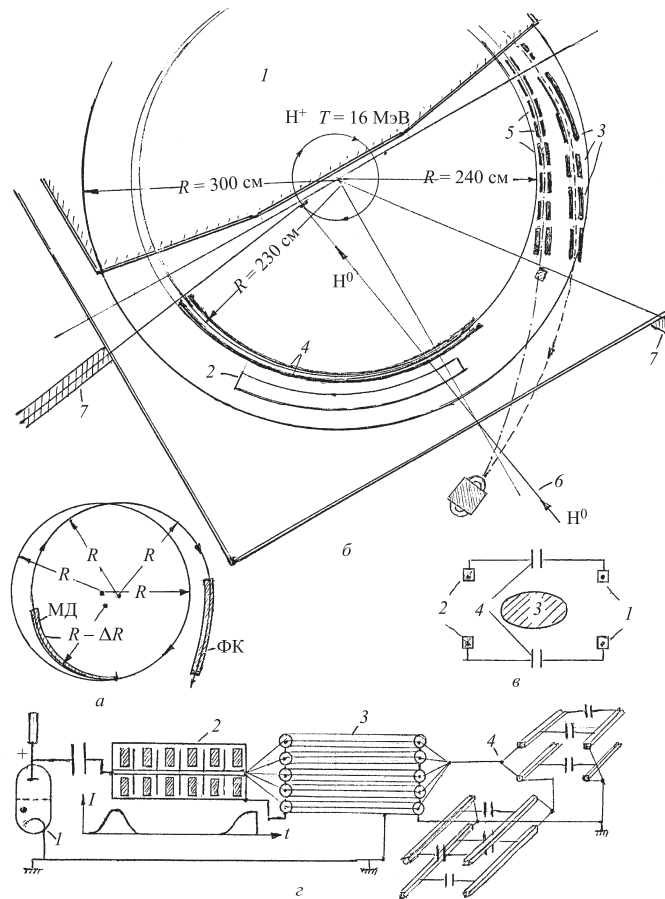


Рис. 6. Принципиальная система однооборотного вывода протонного пучка из фазотрона ОИЯИ: *а* — поясняющая схема заброса пучка импульсным магнитным дефлектором (МД) в ферромагнитный канал (ФК). *б* — расположение системы однооборотного вывода в камере фазотрона: 1 — дуант фазотрона; 2 — С-электрод системы растяжки пучка фазотрона; 3 — существующий железно-токовый канал; 4 — импульсный магнитный дефлектор; 5 — ферромагнитный канал; 6 — направления ввода H^0 ; 7 — пробники вакуумной камеры ускорителя. *в* — поперечный разрез импульсного магнитного дефлектора: 1 и 2 — проводники для прямого и обратного направления тока; 3 — область, занятая пучком; 4 — конденсаторы для уменьшения импеданса двухпроводной линии. *г* — схема импульсного питания магнитного дефлектора: 1 — тиратрон ТГИ1-10000/50; 2 — обостритель переднего фронта импульса на ферритовых кольцах; 3 — связка коаксиальных кабелей для передачи импульса; 4 — схема распределения тока по проводникам дефлектора

пульсу ~ 1 нс и в наносекундном диапазоне длительности импульса могут устойчиво работать при коммутирующем токе, значительно превышающем номинальное значение [20].

Для согласования параметров тиратрона ТГИ 1-5000/50 с параметрами магнитного дефлектора волновое сопротивление двухпроводной линии надо уменьшать примерно в 6 раз до величины не более 16 Ом, что можно осуществить увеличением погонной емкости двухпроводной линии в 36 раз путем размещения конденсаторов емкостью около 100 пФ через каждые 10 см длины линии. Время установления тока в такой модифицированной линии, равное времени распространения фронта импульса (t_n) на ее длине, увеличится при этом в ~ 6 раз и составит, в случае подведения импульсного питания к середине дефлектора длиной 4 м $t_n = 6 \cdot 6,7 \approx 40$ нс, где 6,7 нс — время распространения импульса в обычной двухпроводной линии на длине 2 м. При таком способе питания импульсный ток тиратрона при напряжении 50 кВ разветвляется и подается параллельно на вход четырех двухпроводных линий с эквивалентным волновым сопротивлением $16/4 = 4$ Ом и суммарным током ≈ 12 кА, что еще допустимо для тиратрона ТГИ1-5000/50 или еще лучше — для тиратрона ТГИ1-10000/50.

Многokратное уменьшение длительности фронта импульса от тиратрона может быть достигнуто применением так называемых обострителей, использующих явление возбуждения ударных электромагнитных волн в линиях передачи с нелинейными свойствами.

Такая низкоимпеданская нелинейная квазикоаксиальная линия на ферритах, разработанная в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [21], имеет волновое сопротивление 3,5–5,0 Ом и при 300 ячейках, уложенных на длине 75 см, уменьшает длительность фронта от 100 до 10 нс, а при 600 ячейках дает на выходе длительность фронта порядка 1 нс.

Все это подтверждает техническую осуществимость импульсного магнитного дефлектора с требуемыми параметрами для однооборотного вывода пучка с радиуса 240 см.

Импульсный магнитный дефлектор целиком забрасывает сгусток протонов на вход ферромагнитного канала, середина апертуры которого отстоит от радиуса 240 см на расстояние 10 см во внешнюю сторону.

Ферромагнитный канал, подобный уже разработанному в ОНУ [22], при увеличении размеров его боковых пластин по ширине до 4 см, высоте до 6 см и горизонтальной апертуре 4 см сможет обеспечить уменьшение магнитного поля в его апертуре на 0,7 Тл и вывод протонного пучка с энергией 540 МэВ из камеры фазотрона в направлении тракта Т.

Следует, однако, отметить, что экспериментально определенная временная длительность сгустка протонов ~ 10 нс, соответствующая азимутальным (фазовым) размерам пучка $\sim 50^\circ$ ПШПВ (полная ширина на полувысоте распределения), возможно, обусловлена особенностями существующей системы

вывода протонного пучка с помощью возбудителя и железно-токового канала (радиальная неустойчивость наступает в первую очередь для частиц, имеющих максимальную амплитуду начальных свободных радиальных колебаний), в то время как при однооборотном выводе надо принимать во внимание увеличенную фазовую протяженность пучка (до $\sim 100^\circ$ ПШПВ), соответствующую равновесной фазе для $\cos \varphi_s = 0,25$, что потребует уменьшения времени установления тока в магнитном дефлекторе до ~ 20 нс и тем самым некоторого усложнения системы питания путем подачи напряжения через высоковольтный импульсный трансформатор.

Выбранная энергия протонов 540 МэВ, соответствующая радиусу пучка 240 см, позволяет расположить импульсный магнитный дефлектор вне зоны размещения С-электрода, а ферромагнитный канал установить рядом с существующим железно-токовым каналом, не затрагивая никаких его элементов, включая шиммы для компенсации магнитного поля. Ферромагнитный канал может быть сделан съемным (вставляться и выниматься) аналогично тому, как это было сделано на синхроциклотроне 600 МэВ в Вирджинии (США) [23] при выводе протонного пучка с энергией 280–300 МэВ с радиуса 1,8–1,9 м. Это позволит достаточно быстро переходить от режима работы с внешней инжекцией на существующий режим работы фазотрона ОИЯИ.

Рассмотренные новые варианты внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ вместе с системой однооборотного вывода позволят увеличить интенсивность выведенного пучка протонов до 20 раз или более. Такой протонный пучок в виде очень коротких (около 10 нс) временных импульсов можно будет прежде всего использовать в медико-биологических и клинических исследованиях по адронной терапии онкологических больных, где помимо значительного увеличения интенсивности или улучшения качества протонных пучков станет возможным использование в клинической практике пучков отрицательных пионов и нейтронов высоких энергий, для которых мощность дозы в области облучаемого объекта превысит рекомендованное комиссией МАГАТЭ значение $2 \text{ Гр} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Применение такого пучка в ядерной спектроскопии на пучке протонов позволит реализовать поиски радиоактивных ядер с периодом полураспада в недоступном ранее интервале 10 нс–10 мкс. Кроме того, интенсивность пучка поверхностных мюонов на выходе каналов № 1 и № 2 возрастает до 10^6 с^{-1} при полной отсечке по времени пролета позитронов, всегда присутствующих в пучке, число которых обычно в несколько десятков раз превышает число поверхностных мюонов. При этом интенсивность сепарированного пучка поверхностных мюонов, получаемого на канале № 9 с помощью широкоугольной магнитной линзы, превысит 10^7 с^{-1} . Такой (а не растянутый во времени) пучок поверхностных мюонов можно будет эффективно использовать в модифицированных μSR -экспериментах, где регистрируется не каждый остающийся в мишени мюон и позитрон от его распада, а только позитроны

распада в течение примерно 10 мкс после остановки за время ~ 30 нс группы из $4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$ поверхностных мюонов в каждом из 250 циклов ускорения протонов на фазотроне.

Наконец, на основе такого пучка можно будет создать импульсный источник нейтронов сверхвысокого разрешения, значительно превосходящий по интенсивности (примерно на порядок) аналогичный импульсный источник нейтронов ГНЕЙС, задействованный на внутренней мишени синхротронного фазотрона с энергией 1 ГэВ в Гатчине [24]. Полная интенсивность нейтронов на внешней мишени фазотрона составит $3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ из расчета, что один протон с энергией 540 МэВ образует на неразмножающей мишени из свинца около 10 нейтронов. Причем 95 % этих нейтронов [24] будут составлять испарительные нейтроны с энергией до 20 МэВ с почти изотропным распределением. Такая интенсивность сопоставима с полной интенсивностью нейтронов на установке ИРЕН с размножающей мишенью из Рн [25]. Однако длительность импульса нейтронов на установке ИРЕН будет примерно в 40 раз больше, чем на фазотроне ОИЯИ. Поэтому источник нейтронов на фазотроне ОИЯИ, даже при использовании неразмножающей мишени, может представлять определенный интерес для Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, которая, возможно, окажет поддержку в реализации внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ с однократным выводом пучка из ускорителя.

Нейтроны от внешней мишени фазотрона, размещенной на входе углеродного замедлителя, могут быть, как это показано на рис. 7, после очищения в магнитном поле от примеси заряженных частиц выведены через коллиматоры в четырехметровой бетонной стене в зал лаборатории № 4, окруженный двухметровой бетонной защитой, усиленной в местах попадания нейтронных пучков дополнительными бетонными блоками. В свободном пространстве этого зала на пролетной базе ~ 15 м можно будет разместить всю необходимую аппаратуру для экспериментов на нейтронных пучках. Пролетная база может быть увеличена до 30 м, если нейтронный пучок вывести в простенок между зданиями ЯСНАПП и зданием фазотрона ОИЯИ.

Стоимость реализации предложенного и рассмотренного нового, третьего варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ в основном будет определяться дорогостоящими комплектующими изделиями (мощными генераторными лампами, полупроводниковыми устройствами, высоковольтными тиратронами, вакуумным оборудованием, электротехническими материалами и др.) и по грубой оценке полная стоимость проекта не превысит 1 млн долларов США.

Возможный вариант размещения нейтронной мишени на пересечении с осью тоннеля, расположенного между корпусом № 2 и зданием фазотрона и защищенного песчаной обваловкой, где можно разместить нейтронный пучок длиной до 400 м, обеспечивающий гораздо лучшее энергетическое разрешение при регистрации нейтронов, потребует создания дополнительного тракта

транспортировки протонного пучка, показанного на рис. 7, и существенно больших затрат на его реализацию.

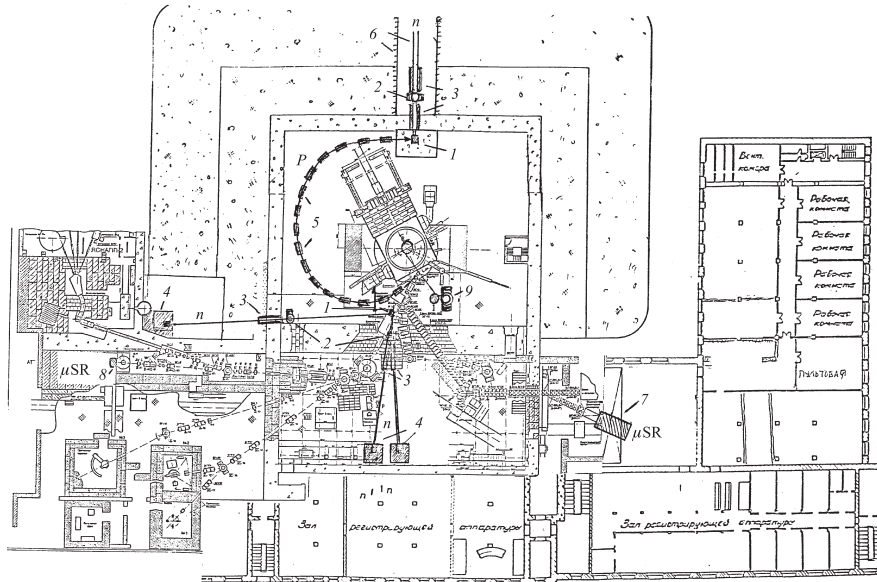


Рис. 7. Общая схема нейтронных пучков и пучков поверхностных мюонов от внешних мишеней фазотрона при однооборотном выводе протонного пучка из фазотрона ОИЯИ: 1 — нейтронные неразмножающиеся, охлаждаемые мишени; 2 — магниты для очистки нейтронного пучка от примеси заряженных частиц; 3 — коллиматоры в защитных бетонных стенах для вывода нейтронных пучков в лабораторию № 4, в простенок между зданием ЯСНАПП и зданием фазотрона ОИЯИ и в тоннель; 4 — дополнительные блоки защиты от прямых потоков нейтронов; 5 — канал транспортировки выведенного протонного пучка до второй охлаждаемой мишени, расположенной на пересечении протонного пучка с осью нейтроновода в тоннеле, соединяющем корпус № 2 со зданием фазотрона ОИЯИ; 6 — тоннель с нейтроноводом; 7 — μ SR-установка в низкофоновой лаборатории на выходе мюонного канала № 2; 8 — μ SR-установка на выходе широкоугольной магнитной линзы канала № 9; 9 — система внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и рассмотрены новые варианты внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ. Основная особенность третьего варианта состоит в использо-

вании для ускорения пучка H^- -ионов до энергии 16 МэВ разработанного и созданного в ОНУ изохронного циклотрона У-115Т с током пучка до 500 мкА и малогабаритного (диаметром около 1 м) кольцевого накопителя H^- -ионов, рассчитанного на такую же энергию и жесткость магнитной фокусировки, обеспечивающей удержание до $4 \cdot 10^{12}$ H^- -ионов в течение 3,5 мс.

Электростатические дефлекторы вместе с полукольцевым дуантом и высоковольтным генератором с переменной частотой позволяют осуществлять медленный (3,5 мс) ввод и быстрый (в течение 20 мкс) вывод H^- -ионов из накопителя. Использование готового магнита СП-57 и, возможно, оставшихся других деталей от изохронного циклотрона У-115Т наряду с исключением банчера пучка и предварительного ускорителя на энергию 500 кэВ, значительно сокращает затраты на реализацию этого нового варианта внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ по сравнению с первым двумя вариантами.

В четвертом варианте в качестве накопителя предлагается использовать кольцевую зону внутри камеры фазотрона.

Рассмотрен быстрый, однооборотный вывод протонного пучка с увеличенной на порядок интенсивностью из камеры фазотрона ОИЯИ на основе импульсного магнитного дефлектора и дополнительного ферромагнитного канала.

Обозначены возможные области применения выведенного протонного пучка с длительностью импульса ~ 10 нс и частотой следования 250 Гц, и в частности создание в ОИЯИ импульсного нейтронного источника сверхвысокого разрешения, который вместе с модифицированной μ SR-методикой на интенсивных пучках поверхностных мюонов может явиться важным дополнительным инструментарием для Центра коллективного пользования оборудованием в сфере нанотехнологий, создаваемого в Дубне.

Все это позволит вернуть фазотрон ОИЯИ в число конкурентоспособных базовых установок ОИЯИ и занять значимую нишу в новых, перспективных направлениях исследований по физике твердого тела и конденсированных сред, составляющих научную основу Центра коллективного пользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А. А. и др. Препринт ОИЯИ 9-3951. Дубна, 1968.
2. Фазотрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и его пучки. ОИЯИ 9-92-232. Дубна, 1992.
3. Роганов В. С. ОИЯИ, Б1-9-4707. Дубна, 1969.
4. Ворожцов С. Б. и др. // Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1985. Т. I. С. 324.

5. *Савченко О. В.* // Совещание по программе экспериментов на фазотрона ОИЯИ. ОИЯИ, Д-1-90-480. Дубна, 1990. С. 17.
6. *Савченко О. В.* Депонированная публикация ОИЯИ Б1-9-90-72. Дубна, 1990.
7. *Борисов О. Н., Онищенко Л. М.* Сообщение ОИЯИ Р9-97-282. Дубна, 1997.
8. *Савченко О. В.* Предложение по новому варианту внешней инжекции фазотрона ОИЯИ и возможностям его реализации. Внутренний отчет ЛЯП ОИЯИ. Дубна, 1999.
9. *Самсонов Е. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-99-126. Дубна, 1999.
10. *Ворожцов А. С. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2000-116. Дубна, 2000.
11. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2004-170. Дубна, 2004.
12. *Онищенко Л. М.* Частное сообщение.
13. *Аленицкий Ю. Г. и др.* // Труды XIII совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 13–15 октября 1992. ОИЯИ, Д9-92-455. Дубна, 1993. Т. 2. С. 313. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Там же. Т. 1. С. 348.
14. *Онищенко Л. М. et al.* // Proc. of XIX RUPAC, Dubna, October 4–8. P. 138.
15. *Глазов А. А. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-87-171. Дубна, 1987.
16. *Василенко А. Т. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-8921. Дубна, 1975.
17. *Dmitrievsky V. P. et al.* // Proc. of EPAC-90, Nice, V. 1. P. 1266.
18. *Кольга В. В. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-88-637. Дубна, 1988.
19. *Беляев А. Л. и др.* Сообщение ОИЯИ 13-88-575. Дубна, 1988.
20. *Вахрушин Ю. П., Анацкий А. И.* Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978. С. 85, 91 и 94.
21. *Харьзов Р. В., Швец В. А.* Сообщение ОИЯИ 13-8709. Дубна, 1975.
22. *Дмитриевский В. П. и др.* Сообщение ОИЯИ 19-6880. Дубна, 1973.
23. *Григорьев Ю. Г.* Радиационная безопасность космических полетов. М.: Атомиздат, 1975. С. 48.
24. *Abrosimov N. K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1985. V. 242. P. 121–133.
25. JINR Scientific Programme for Years 1999–2001. Dubna, 1999. P. 28.

Получено 13 февраля 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.05.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,58. Тираж 270 экз. Заказ № 56180.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/