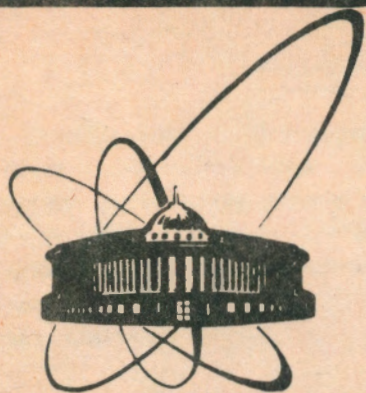


92-468



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P9-92-468

А.А.Васильев¹, С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский,
Э.А.Мяз², В.А.Тепляков²

УСКОРЕНИЕ ДЕЙТРОНОВ В КОМПЛЕКСЕ УНК
(ПРЕДЛОЖЕНИЕ)

¹Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Москва

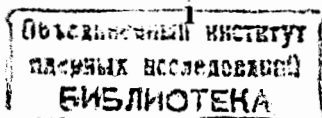
²Институт физики высоких энергий, Протвино

1992

Введение

Сооружаемый в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) ускорительно-накопительный комплекс (УНК) предназначен для ускорения интенсивных пучков протонов (до 5×10^{14} част./импульс) в синхротронном режиме ^[1] и проведения физических исследований на вторичных пучках от фиксированной мишени, а также на встречных протон-протонных пучках вплоть до энергии 3 ТэВ. В полном виде в состав комплекса входят линейный ускоритель с высокочастотной квадрупольной фокусировкой на энергию 30 МэВ ^[2], быстросциклирующий бустерный синхротрон (25 Гц) на энергию 1,5 ГэВ ^[3], синхротрон с жесткой фокусировкой на энергию 70 ГэВ и три синхротрона собственно УНК с периметром орбиты 20777,8 м и энергией 400 ГэВ (600 ГэВ-в ускорительном режиме) и 2x3 ТэВ. В двух последних используется магнитная структура со сверхпроводящими элементами. Первые этапы предполагают сооружение ускорителя на энергию 600 ГэВ и позднее - одного из колец на 3 ТэВ.

В настоящей работе рассмотрены перспективы возможного использования УНК для ускорения многозарядных ионов с минимальными дополнениями и изменениями в системах комплекса. Проблема ускорения многозарядных ионов ставилась и решалась на многих ускорителях высоких энергий в связи с исследованиями в области релятивистской ядерной физики. В частности, на синхрофазотроне ОИЯИ в 1970 году впервые были ускорены ядра дейтерия с импульсом 9 ГэВ/с ^[4]. Позднее там же были ускорены ядра гелия. В ЦЕРН с 70-х годов на установке ISR, созданной для получения встречных протон-протонных пучков, также ускорялись дейтроны и α -частицы. Там же на SPS с 1986 - 87 гг. были получены ^{16}O и ^{32}S с энергией 200 ГэВ/нукл. Аналогичные работы проводились в Брукхейвене (США) на протонном синхротроне AGS (^{16}O с энергией 15 ГэВ/нукл. и ^{28}Si с энергией 14,6 ГэВ/нукл.) В настоящее время в связи с возрастающим интересом к изучению нового состояния ядерного вещества - кварк-глюонной плазмы - сооружаются установки для ускорения тяжелых ионов до ультрарелятивистских энергий. Здесь имеется в виду коллайдер RHIC в Брукхейвене, где будет доступен для экспериментаторов набор частиц от протонов с энергией 250 ГэВ и светимостью $\approx 10^{31}$ см⁻²с⁻¹ до Au с энергией 100 ГэВ/нукл. и светимостью $\approx 2 \times 10^{26}$ см⁻²с⁻¹. Кроме того, известно, что в большом адронном коллайдере ЦЕРН (LHC) помимо протон-протонных и



протон-электронных пучков предусматриваются также $^{208}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}$ встречные пучки с энергией 1312 ТэВ в системе центра масс и светимостью $\approx 1 \times 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

В связи с вышесказанным понятен интерес к расширению возможностей и приданию нового качества УНК, в сооружение которого вкладываются большие материальные ресурсы. В качестве минимального варианта в этом плане здесь рассматривается дейтронный режим, в котором предполагается достигнуть энергии вплоть до 1,5 ТэВ/нуклон в одном пучке. Большой интерес представляет также изучение возможностей ускорения пучка поляризованных дейтронов. В работе [5] уже затрагивалась тема сохранения поляризации протонного пучка в бустерном синхротроне У-1,5 и в протонном синхротроне У-70. Здесь представляется, что ожидаемые эффекты деполяризации для дейтронного пучка менее существенны, чем для протонов.

1. Общие физические предпосылки для перехода к дейтронному диапазону

Поскольку все ускорители комплекса (за исключением линейного ускорителя-инжектора) являются синхротронами с жесткой фокусировкой, переход к дейтронному диапазону определяется физическими особенностями работы этого типа ускорителя.

Основными параметрами синхротронов с жесткой фокусировкой являются:

- энергетический интервал ускорения,
- частотный диапазон ускорения,
- динамические характеристики и критическая энергия,
- предельная плотность заряда в банче,
- предельный вакуум в камере,
- светимость.

При этом подразумевается сохранение магнитной структуры колец, а также предельной индукции магнитного поля.

а. Энергетический интервал ускорения

Полная энергия частицы равна

$$E = \sqrt{[P^2 c^2 + E_0^2]}, \quad (1)$$

где E_0 - энергия покоя, P - импульс заряженной частицы,

$$P = \frac{eBk_f L_{e0}}{2\pi}, \quad (2)$$

L_{e0} - длина замкнутой орбиты, $k_f = \frac{R}{\rho}$ - фактор заполнения орбиты диполями, $R = \frac{L_{e0}}{2\pi}$, ρ - радиус кривизны орбиты в диполях, B - индукция магнитного поля в диполях.

В релятивистском случае ($E \gg E_0$) имеем

$$E \approx Pc. \quad (3)$$

Из (2),(3) непосредственно следует, что предельная полная энергия ускоренной частицы в заданной структуре магнитного поля ($B_{\text{max}} k_f L_{e0} = \text{const}$) пропорциональна заряду ускоряемой частицы (e), т.е. протонное кольцо, соответствующее энергии 3 ТэВ, будет удерживать также и дейтроны с энергией 3 ТэВ.

б. Частотный диапазон ускорения

Так как частота обращения на замкнутой орбите равна

$$f = \frac{\beta c}{L_{e0}}, \quad (4)$$

то частотный диапазон определяется только скоростью иона (βc) на инжекции и на конечной энергии.

В нерелятивистском случае ($\gamma = \frac{E}{E_0} \approx 1$)

$$f \sim \sqrt{\frac{W}{m}}, \quad (5)$$

где W - кинетическая энергия и m - масса частицы. Здесь и в дальнейшем применение символа \sim предполагает, что при сформулированных условиях константы пропорциональности для протонов и дейтронов равны.

При релятивистской энергии ($\gamma \gg 1$)

$$f \sim 1 - \frac{1}{2\gamma^2}. \quad (6)$$

Ширина частотной полосы в этом случае

$$\delta f = \frac{\gamma_k^2 - \gamma_1^2}{2\gamma_k^2 \gamma_1^2} \frac{c}{L_{e0}}, \quad (7)$$

где γ_k, γ_1 соответствуют конечной и инжекционной энергиям.

в. Динамические характеристики и критическая энергия

В рамках одночастичной теории (без учета пространственного заряда) бетатронные частоты зависят только от структуры магнитного поля и не зависят от заряда и массы ускоряемой частицы в синхротронном режиме.

Различие возникает в величине критической энергии, которая при заданном коэффициенте расширения замкнутых орбит $\alpha = \frac{P}{L_{e0}} \frac{\delta L_{e0}}{\delta P}$ определяется из

$$E_{кр} = \frac{E_0}{\sqrt{\alpha}}, \quad (8)$$

т.е. для заданной магнитной структуры величина критической энергии возрастает по сравнению с протонами в A раз, где A - число нуклонов данного иона. Имеется несколько способов перехода [6, 7, 8] или устранения критической энергии, оптимальность применения которых должна рассматриваться в каждом конкретном случае.

г. Предельная плотность заряда в банче

Предельная плотность заряда по поперечному эффекту при фиксированной длине замкнутой орбиты (L_{e0}) и частоте свободных колебаний (Q_z):

$$\kappa \sim \frac{E_0 \gamma^3 \beta^2}{e^2} \sim \frac{EP^2}{E_0^2}, \quad (9)$$

где значения γ, β, P соответствуют энергии инжекции в кольцо.

При энергии инжекции в нерелятивистской области ($\gamma \approx 1$) и сохранении частоты обращения частиц ($\beta_d = \beta_p$) выражение (9) упрощается

$$\kappa \sim E_0, \quad (10)$$

т.е. предельная плотность дейтронного пучка в банче будет в два раза больше.

Для релятивистских энергий инжекции ($E \approx Pc$) и одинаковой магнитной жесткости ($P_d = P_p$) получим

$$\kappa \sim \frac{1}{E_0^2}, \quad (11)$$

что приводит к четырехкратному уменьшению предельной плотности дейтронного пучка.

Однако не всегда возможно выполнение условий $\beta_d = \beta_p$ или $P_d = P_p$. В этом случае (9) преобразуется к виду

$$\kappa \sim \frac{EB_1^2}{E_0^2}, \quad (12)$$

где B_1 - индукция в диполях при инжекции. Из (12) следует возможность реализации промежуточного варианта между (10) и (11).

д. Предельный вакуум в камере

Эффекты многократного кулоновского рассеяния в кольцевых ускорителях для протонов и дейтронов можно сравнить по среднеквадратичному росту амплитуды бетатронных колебаний. При фиксированной длине замкнутой орбиты, одинаковых динамических характеристиках (Q_r, Q_z) и вакууме это отношение можно представить [9] в виде

$$\langle a^2 \rangle \sim \frac{\ell}{P\beta^2}, \quad (13)$$

где $\ell = L_{e0} \nu$, ν - число оборотов, необходимых для удвоения энергии инжекции (кинетической), P и β взяты при энергии инжекции.

Если на инжекции соблюдено равенство $P_d = P_p$, то для нерелятивистской энергии из (13) следует $\langle a_d^2 \rangle = 2 \langle a_p^2 \rangle$, что связано с уменьшением скорости дейтронов при инжекции и уменьшением числа оборотов при удвоении энергии для одинаковых наборов энергии за оборот.

В релятивистском случае при $P_d = P_p$ или для нерелятивистской энергии при $\beta_d = \beta_p$ на инжекции из (13) непосредственно следует $\langle a_d^2 \rangle = \langle a_p^2 \rangle$.

Распределение по амплитудам бетатронных колебаний в рамках этой модели рассеяния на остаточном газе подчиняется закону Релея:

$$F(a) = \frac{a}{\langle a^2 \rangle} e^{-\frac{a}{2\langle a^2 \rangle}} \quad (14)$$

Таким образом, проверка при переходе от протонного к дейтронному пучку по эффекту многократного рассеяния подлежит только нерелятивистская часть комплекса для случая $P_d = P_p$ при инъекции.

е. Светимость

Оценку светимости (L) для дейтронов можно сделать, полагая одинаковыми среднеквадратичные размеры пучка в месте встреч, частоту обращения частиц и число банчей в циркулирующем пучке для обоих вариантов. В этом случае имеем:

$$L \sim N^2, \quad (15)$$

где N - число частиц в циркулирующем пучке.

2. Оценка параметров дейтронного режима

На основании рассуждений раздела 1 сделаем оценку параметров работы УНК в дейтронном режиме. Соответствующие результаты приведены в таблице I в сравнении с протонным вариантом, причем для дейтронов приведены значения только тех параметров, которые отличаются от протонного варианта.

Энергия инъекции в бустер вычислялась, исходя из заданной минимальной частоты обращения протонов $f_p = 0,7467$ МГц. Таким образом, в соответствии с (1) и (2) стала известна величина индукции поля при инъекции.

Предельное число частиц в циркулирующем пучке, определяемое сдвигом частоты аксиальных свободных колебаний вследствие кулоновского расталкивания, может быть вычислено в соответствии с (9) по следующей формуле^[10]:

$$N_d = \frac{r_p}{r_d} \frac{\gamma_d(\gamma_d^2 - 1) f_d}{\gamma_p(\gamma_p^2 - 1) f_p} N_p, \quad (16)$$

где r_p и r_d - классические радиусы протона и дейтрона. При этом

Таблица I

Л И Н А К	протоны	дейтроны
Энергия на выходе (МэВ)	30	60
Амплитуда импульса тока (мА).....	67	76
БУСТЕР	протоны	дейтроны
Конечная энергия (кинетическая) (ГэВ)	1,5	1,05
Интенсивность в импульсе (част./цикл)	$9 \times 10^{+11}$	$1,0 \times 10^{+12}$
Циркулирующий ток (мА).....	425	483
Критическая энергия (кинетическая) (ГэВ)	2,55	5,096
Индукция магнитного поля на инъекции(Тл).....	0,139	0,278
Диапазон изменения частоты (МГц).....	0,747+2,79	0,747+2,32
У-70	протоны	дейтроны
Конечная энергия (кинетическая) (ГэВ)	70	69
интенсивность в цикле (част./цикл)	$1,1 \times 10^{+13}$	$1,2 \times 10^{+13}$
Циркулирующий ток (мА).....	357	405
Критическая энергия (полная) (ГэВ)	8,876	17,738
Диапазон изменения частоты (МГц).....	5,56+6,1	4,66+6,06
УНК-I и УНК-II (режим встречных пучков)	протоны	дейтроны
Энергия с.ц.м.(ТэВ)	2,2	2,19
Полная требуемая интенсивность (част./цикл)....	$2,4 \times 10^{+14}$	$6 \times 10^{+13}$
Циркулирующий ток (мА).....	554	139
Светимость ($\text{см}^{-2} \times \text{сек}^{-1}$)..	$1 \times 10^{+32}$	$6 \times 10^{+30}$
Критическая энергия (ГэВ)	42	84
УНК-I	протоны	дейтроны
Максимальная энергия (ГэВ)	600	599
режим встречных пучков	400	399
Планируемая интенсивность (част./цикл)	$6 \times 10^{+14}$	$1,5 \times 10^{+14}$
Циркулирующий ток (мА).....	1385	347
УНК-II	протоны	дейтроны
Максимальная энергия (ТэВ)	3	3
Планируемая интенсивность (част./цикл)	$6 \times 10^{+14}$	$1,5 \times 10^{+14}$
Циркулирующий ток (мА).....	1385	347
УНК-II и УНК-III (режим встречных пучков)	протоны	дейтроны
Энергия с.ц.м.(ТэВ)	6	6
Полная требуемая интенсивность (част./цикл)....	$2,4 \times 10^{+14}$	$6 \times 10^{+13}$
Светимость ($\text{см}^{-2} \times \text{сек}^{-1}$)..	$2,8 \times 10^{+32}$	$1,7 \times 10^{+31}$

считается, что допустимый сдвиг частоты, эмиттанс пучка и фактор банчировки одинаковы в обоих случаях. Оценка выполняется при энергии инжекции в установку. Определяющим фактором для интенсивности пучка во всей цепочке ускорителей, входящих в комплекс (лиак, бустер, У-70, УНК-I, УНК-II), является значение предельного числа частиц, получаемое в настоящее время в У-70. Однако в процессе реконструкции У-70 ожидается почти пятикратное увеличение числа частиц выведенного пучка. Исходя из этого обстоятельства и рассчитывались величины интенсивности дейтронов, приведенные в таблице I. При этом предполагается, что эффективности захвата в режим ускорения, проводки через установку, перебанчировки (У-70) и вывода пучка для протонов и дейтронов одинаковы и имеют значения, достигнутые в настоящее время.

Интенсивность циркулирующего пучка:

$$I_c = \frac{eNf_{rf}}{q}, \quad (17)$$

где q - кратность частоты ускоряющего поля f_{rf} по отношению к частоте обращения частиц.

При заданной магнитной жесткости колец ($B\rho$) в соответствии с (1) определяется конечная энергия ускорителей и по (4) и (8) - частота обращения и критическая энергия установок. Новым моментом по сравнению с протонным вариантом здесь является появление при ускорении дейтронов критической энергии в диапазоне энергий УНК-I. О методах перехода критической энергии уже упоминалось в разделе 1.

Оценка энергии встречных пучков в системе центра масс (с.ц.м.) производилась по известной формуле^[11]:

$$E_{с.ц.м.} = c^2 \sqrt{[m_{o1}^2 + m_{o2}^2 + 2m_{o1}m_{o2}\gamma_1\gamma_2(1 - \beta_1\beta_2)]}, \quad (18)$$

где m_{o1}, m_{o2} - массы покоя частиц и β_1, β_2 учитываются алгебраически, т.е. со своими знаками.

Динамические характеристики поперечного движения дейтронов (собственные частоты, огибающие и т.д.) в цепочке ускорителей от бустера до УНК-I полностью эквивалентны характеристикам для протонного режима. Таким образом, для одинаковых эмиттансов инжектируемых из линейного ускорителя пучков протонов и дейтронов и интенсивности дейтронов, при которой кулоновский сдвиг бетатронных частот равен или меньше сдвига для протонов, согласование поперечного эмиттанса пучка дейтронов с аксептансом ускорителей комплекса можно считать обеспеченным.

3. Техническая реализация

Как это видно из предыдущего, организация дейтронного режима работы УНК может быть выполнена в рамках планируемого и существующего оборудования без какой-либо существенной переделки.

Единственной установкой, которую необходимо вновь соорудить, является линейный ускоритель дейтронов - инжектор в бустер. Однако, как известно, в процессе подготовки У-70 в качестве инжектора УНК предполагается увеличить энергию инжекции в бустер от 30 МэВ до 60 МэВ^[12]. С этой целью предполагается построить новый линейный ускоритель, на этапе разработки которого можно было бы учесть требования, накладываемые дейтронным режимом, а также накопленный в ИФВЭ опыт при проектировании сильноточного линейного дейтронного ускорителя^[13].

Кроме того, необходимо предусмотреть систему перехода через критическую энергию в УНК-I, окончательные соображения по выбору параметров которой будут сформулированы позднее, по мере проработки данного предложения.

Заключение

Осуществление дейтронного режима ускорения можно рассматривать в качестве начального этапа программы ускорения на УНК ионов более тяжелых, чем водород.

Для реализации этой программы потребуется разработка и создание необходимых источников ионов и доработка некоторых систем ускорительного комплекса, в основном инжекционной части, системы индикации пучка и некоторых других. Целесообразность выполнения этой программы и темп её осуществления будут зависеть от предложенных экспериментов, учитывающих также ситуацию с ускорением ионов на больших ускорительных комплексах в европейских центрах и в США. Нам представляется, что заблаговременная разработка соответствующих методик и технологий является безусловно полезной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. Ускорительно-накопительный комплекс ИФВЭ (состояние дел и развитие). В кн.: Труды 10 Всес. сов. по ускорителям, ОИЯИ Д 9-87-105, Дубна, 1987, т.2, с. 430.
2. Капчинский И.М., Тепляков В.А. В кн.: Труды 11 Всес. сов. по ускорителям, ОИЯИ, Д 9-89-52, Дубна, 1989, т.1, с. 37.
3. Алеев Е.А. и др. Труды 9 Всесоюзного совещания по ускорителям, Дубна, 1985, т.1, с.14.
4. Балдин А.М. и др. Ускорение и вывод дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ. ОИЯИ, Р 9-5442, Дубна, 1970.
5. Азо Ю.М. и др. Труды 8 Всес. сов. по ускорителям, Дубна, 1983, т.1, с.212.
6. Владимирский В.В. и др. Протонный синхротрон на энергию 60-70 ГэВ. В кн.: Межд. конф. по ускор. М.: Атомиздат, 1964, с.197.
7. Мяз Э.А., Пашков П.Т. Искажение формы интенсивных сгустков в протонном синхротроне перед критической энергией. В кн.: Труды 8 Всес. сов. по ускор., Дубна, 1983, т.1, с. 231.
8. Trboevic D. Design Method of High Energy Accelerator Without Transition Energy, In: Proc. of 2-nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, Editions Frontieres, 1990, v.II, p.1536.
9. Blachman N., Courant E. Rev. Sci. Inst., 1953, 24, p.836.
10. Коломенский А. А. В кн.: Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М.: Издательство МГУ, 1980, с.249.
11. Bovet C. et al. A Selection of Formulae and Data Useful for the Design of A.G. Synchrotrons. CERN, 1970, p.6.
12. Gurevich A.S. et al. Upgrading 70 GeV IHEP Accelerator as UNK Injector, In: Proc. of 2-nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, Editions Frontieres, 1990, v.I, p.415.
13. Буданов Ю.А. и др. О проекте дейтронного линейного ускорителя на 15 МэВ с ВЧК-фокусировкой - инжектора в сверхпроводящий циклотронный комплекс/Расчетные физические параметры ускоряюще - фокусирующего канала/. ИФВЭ 90-126, Серпухов, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 ноября 1992 года.