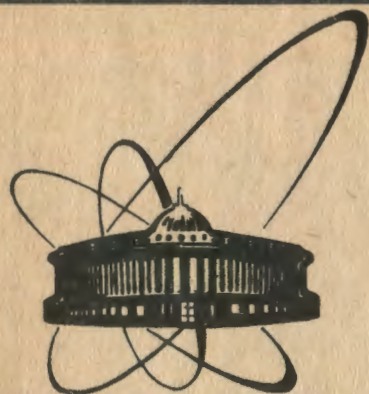


91-2



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1022/91

P1-91-2

И.Б.Иссинский, В.А.Михайлов

БУСТЕР-НАКОПИТЕЛЬ НА ЭНЕРГИЮ
200 МэВ/нуклон УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ЛВЭ ОИЯИ

1991

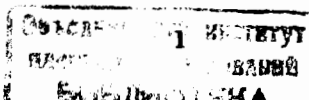
1. Введение

Непрерывное развитие ускорительного комплекса ЛВЭ при одновременной его эксплуатации на физический эксперимент является главной задачей лаборатории. Завершающим этапом реализации проекта нуклотрона^{1/} является его монтаж в 1991 г. Пусконаладочные работы и эксплуатация ускорителя на первом этапе будут выполняться на базе действующего инжектора. Интенсивно используемые в настоящее время пучки синхрофазотрона обладают рядом специфических и рекордных параметров, что позволяет проводить на них многие актуальные исследования в области ядерной физики. С запуском нуклотрона пространственно-временные характеристики пучков существенно улучшатся, будут созданы новые пучки (таблица 1). Дальнейшее значительное развитие сооружаемого ускорительного комплекса, в особенности интенсивности его пучков, может дать бустер^{2,3,4/}.

Сооружение промежуточного кольца - теплого бустера-накопителя на энергии 200 МэВ/нуклон по ядрам и 650 МэВ по протонам с использованием существующего инжектора ЛУ-20 позволит существенно расширить возможности проведения экспериментов на нуклотроне как в области высоких, так и средних энергий, улучшит характеристики пучков и ослабит требования к эксплуатационным параметрам основного кольца. При этом имеется возможность разместить бустер периметром 50 м в цокольном этаже существующего здания, расположенного в непосредственной близости от линейного ускорителя ЛУ-20 и нуклотрона. Настоящее предложение является новым вариантом имевшегося ранее проекта бустера, существенно улучшенного по своим параметрам и оптимизированного по техническим решениям. Последнее позволяет намного сократить сроки и стоимость его сооружения.

За счет накопления частиц в бустере и пяти циклов инъекций в основное кольцо не менее чем на порядок повысится импульсная интенсивность комплекса, и для легких ионов (протонов и дейтронов) она составит $\sim 10^{13}$ частиц в импульсе. Это позволит получать в Дубне, помимо пучков релятивистских ядер и поляризованных дейтронов, конкурентоспособные пучки π -мезонов, антипротонов, K -мезонов.

Один из больших прямолинейных промежутков бустера-накопителя предназначается для установки в нем системы электронного охлаждения, позволяющей уменьшить эмиттанс пучка на один - два порядка и довести импульсный разброс до 10^{-4} - 10^{-5} . При этом, соответственно, умень-



шатся размеры пучка на мишенях и примерно в 2 раза сократятся потери при медленном выводе частиц из нуклотрона в диапазоне энергий от сотен МэВ на нуклон до максимальной.

При переводе пучка из одного ускорителя в другой прохождение перезарядной мишени повысит зарядность, что, в свою очередь, позволит повысить конечную энергию тяжелых ионов на выходе нуклотрона.

Кроме этого, бустер-накопитель может быть использован как отдельный ускоритель для проведения исследований на внутренних и внешних мишенях в широком диапазоне энергий, начиная от десятков МэВ на нуклон. Длительность вывода при максимальной энергии составляет около 300 нс. Имеющаяся система питания позволяет обеспечить частоту повторения циклов 1 Гц. При увеличении мощности системы питания цикличность работы бустера может быть, соответственно, повышена.

Для оценки затрат на сооружение бустера-накопителя следует принять во внимание:

- его периметр в 5 раз меньше периметра основного кольца;
- не требуются гелиево-рефрижераторная система и сверхпроводящие элементы;
- в связи с последовательной во времени работой основного и промежуточного колец будет использована система электропитания сверхпроводящего кольца;
- для размещения бустера может быть приспособлено имеющееся помещение.

Немаловажным является имеющийся опыт и технологическая база производства магнитов в Опытном производстве. Таким образом, объём трудозатрат данного проекта может быть, по крайней мере, в пять раз меньше трудозатрат на сооружение нуклотрона.

2. Схема работы и основные параметры бустера

Частота повторения импульсов бустера в настоящее время определяется возможностями систем питания ЛУ-20 и нуклотрона и принята равной 1 Гц. При увеличении мощности ВЧ-генератора линейного ускорителя и системы электропитания основного кольца эта частота может быть увеличена. Из линейного ускорителя производится накопление пучка путём многооборотной инъекции в бустер, откуда после ускорения пучок переводится в основное кольцо, в котором происходит накопление пяти сгустков. Длина орбиты бустера составляет 1/5 орбиты основного коль-

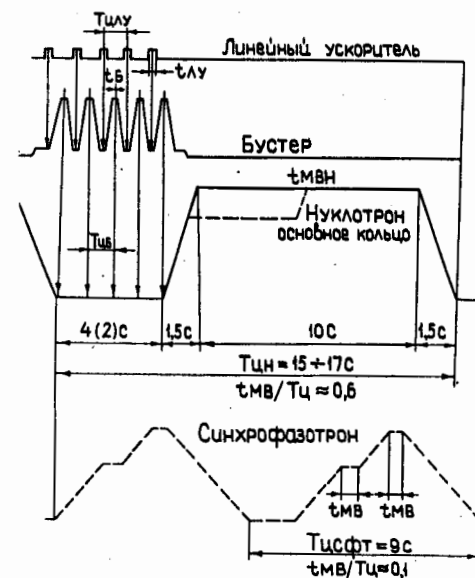


Рис.1. Временная диаграмма работы бустера и основного кольца.

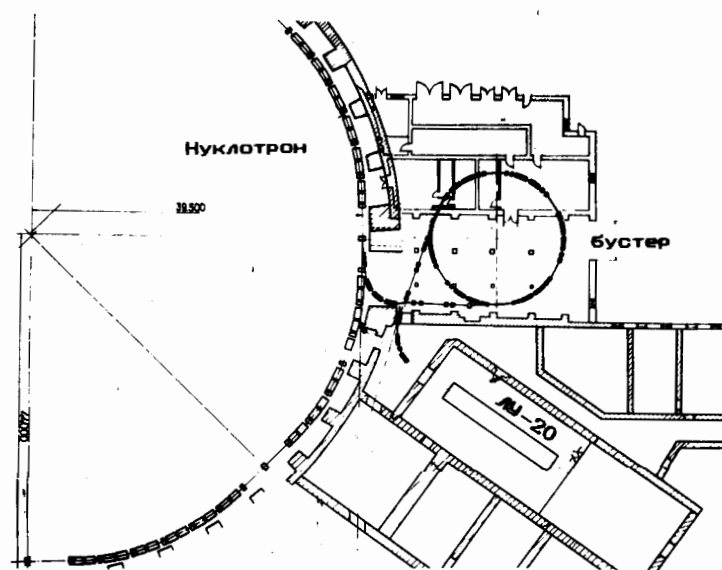


Рис.2. Общая схема ускорительного комплекса.

ца, что соответствует 5 циклам заполнения последнего. Это позволяет вести накопления ионов в нуклотроне в течение 4 секунд, после чего пучок ускоряется и выводится из основного кольца. Временная диаграмма совместной работы бустера и нуклотрона представлена на рис. 1.

Для накопления ионов в бустере возможно применение следующих способов многооборотной инжекции:

- многооборотная инжекция с заполнением горизонтального аксептанса ускорителя за счет смещения локального искажения горизонтальной проекции замкнутой орбиты;
- высокочастотное накопление ионного пучка;
- многооборотная инжекция с заполнением 4-мерного поперечного фазового пространства ускорителя с помощью линейного разностного резонанса связи бетатронных колебаний;
- инжекция ионов с перезарядкой.

Наиболее простым и распространенным способом накопления ионов является заполнение радиального аксептанса ускорителя. Длительность инжекции, ее эффективность и, соответственно, количество инжектируемых частиц может быть существенно увеличено, если для накопления использовать также и вертикальный аксептанс кольца^{5/}. Предварительный анализ показал, что при полностью согласованной однооборотной инжекции ионов в нуклотрон (для равных горизонтального и вертикального аксептансов магнитной структуры основного кольца, $A_x = A_z = 40 \text{ п.м.мрад}$) предпочтительной является многооборотная инжекция ионов в бустер с заполнением поперечного 4-мерного фазового пространства с помощью линейного разностного резонанса связи $Q - Q = 0$. При возбуждении этого резонанса продольным магнитным полем соленоида вертикальные и горизонтальные бетатронные колебания протекают синфазно^{6/}: в момент наибольшего отклонения по горизонтали на азимуте инфлектора их вертикальное отклонение также становится максимальным. Это позволяет частицам в случае применения инфлектора с ограниченным вертикальным размером осуществлять его обход на наиболее опасных оборотах с большей вероятностью.

Оценим время накопления ионов таким способом применительно к бустеру нуклотрона. Эмиттанс линейного ускорителя ЛУ-20 40 п.м.мрад согласован с аксептансом основного кольца. Это означает, что эмиттанс выведенного из бустера пучка также должен быть равен или меньше эмиттанса линейного ускорителя. Учитывая адиабатическое уменьшение эмиттанса при его ускорении в синхротроне в k раз, где

$k = (B\rho)_{\text{max}} / (B\rho)_{\text{inj}}$ - отношение максимальной магнитной жесткости к магнитной жесткости при инжекции, аксептанс бустера, заполняемый при многооборотной инжекции, будет составлять

$$A_x = kE_x \quad ; \quad A_z = kE_z \quad .$$

Для энергии инжекции 5 МэВ/нуклон и максимальной 200 МэВ/нуклон величины магнитной жесткости, соответственно, равны 0,647 Тл.м и 4,3 Тл.м, что дает значение $k = 6,65$. Тогда поперечный аксептанс бустера равен $A_x = A_z = 260 \text{ п.м.мрад}$. Таким образом, при заполнении аксептанса синхротрона появляется возможность накопления частиц в пределе за время $k^2 = 44$ оборота. Для периода обращения ядер в бустере при инжекции $T = 1,6 \text{ мкс}$ ($\beta = 0,103$) время инжекции составит 70 мкс (35 мкс для протонов).

В Лаборатории высоких энергий успешно эксплуатируются четыре типа ионных источников: дуоплазмотрон, электронно-лучевой и лазерный источники, источник поляризованных дейтронов. Их усовершенствованные варианты^{7/} также будут использованы в новом инжекционном комплексе.

Длительность импульса ядер из линейного ускорителя с использованием лазерного и электронно-лучевого источников лежит в пределах 10 - 25 мкс, что позволяет накапливать ионы в бустере практически без потерь. Максимальный выигрыш в интенсивности в случае использования бустера получается при эксплуатации ионных источников типа дуоплазмотрон и "Полярис", длительность импульса токов которых равна 400 - 500 мкс.

В таблице 1 приведены импульсные интенсивности нуклотрона с действующим линейным ускорителем ЛУ-20, бустером и модернизированными ионными источниками.

Схема размещения ускорительного комплекса показана на рис. 2.

Эффективной процедурой, существенно улучшающей параметры ионного пучка, является электронное охлаждение. В принципе системы электронного охлаждения могут быть установлены как в бустере, так и в основном кольце комплекса, что по предварительным оценкам позволит:

- уменьшить примерно на порядок импульсный разброс и эмиттанс циркулирующих и выведенных пучков;
- снизить потери частиц в процессе инжекции и ускорения в бус-

тере и нуклотроне;

- повысить до 98 - 99 % эффективность медленного вывода пучков из нуклотрона в диапазоне энергий от нескольких сотен МэВ на нуклон до 6 ГэВ/нуклон.

Особо следует рассмотреть возможность электронного охлаждения для накопления ионов в бустере и нуклотроне. Однако уже сегодня ясно, что совместная работа двух синхротронов существенно расширит возможности проведения экспериментов и улучшит характеристики пучков за счет следующих процедур: накопления ионов в бустере, последовательного ускорения (а возможно, замедления) частиц в обоих кольцах, охлаждения ионных пучков, повышения зарядностей при переводе ионов из одного кольца в другое.

Сравнительно просто будет решена в бустере проблема ускорения поляризованных дейтронов, так как деполяризационные резонансы до четвертого порядка включительно при частотах бетатронных колебаний $Q_x = Q_z = 2,25$ в данном интервале энергий отсутствуют.

Перспектива ускорения ионов урана определяет требования к давлению остаточного газа в вакуумной камере бустера, которое при потерях ионов урана, составляющих несколько единиц процентов, из-за перезарядки должно быть $\sim 10^{-10}$ Торр.

3. Магнитная структура бустера

Для реализации многократной инжекции пучка из ПКУ в нуклотрон отношение их периметров не должно быть точно равно целому числу. Малое отличие от целого числа обеспечивает скольжение фаз циркулирующего в ПКУ пучка относительно фаз накопленных в нуклотроне сгустков. Это позволяет осуществлять перевод пучка в окрестности максимальной энергии в процессе ускорения в промежуточном кольце. В нашем случае отношение периметров было выбрано равным 4,979, что соответствует периметру ПКУ 50,52 м и накоплению в нуклотроне пяти сгустков, разброс равновесных импульсов которых не превышает $(\Delta p/p) = 3 \cdot 10^{-4}$.

Магнитная структура бустера состоит из 6 периодов, в каждый из которых входят квартет квадрупольных линз ФФДОД и два секторных дипольных магнита. Образующиеся при этом в каждом периоде два прямолинейных промежутка длиной 2,6 м между дипольными магнитами и 0,9 м между линзами Д предназначены для размещения систем ввода, вывода, ускорения, коррекции, индикации и охлаждения ионного пучка.

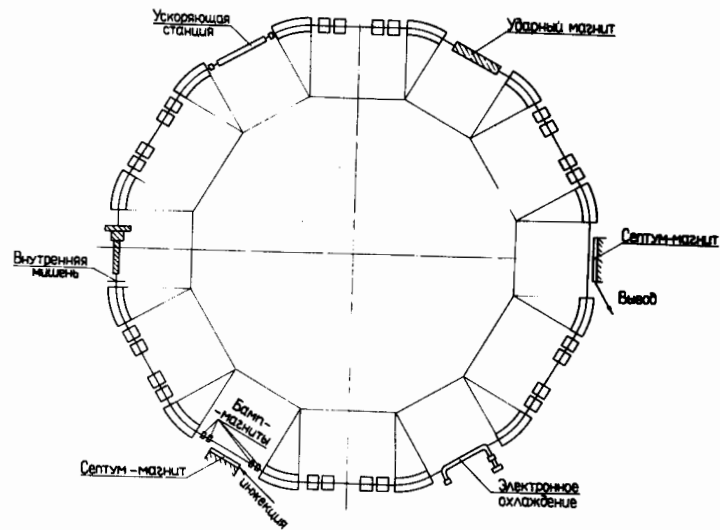


Рис. 3. Размещение основного оборудования в кольце бустера.

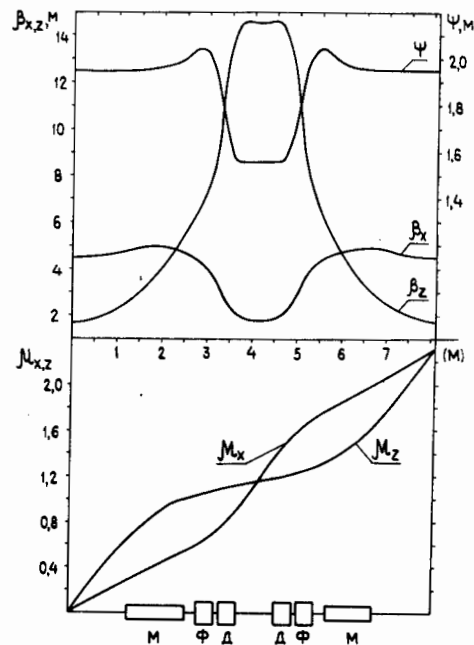


Рис. 4. Динамические характеристики периода бустера.

Система ввода включает в себя инжекционный септум-магнит, четыре бамп-магнита, создающие локальное искажение замкнутой орбиты на участке ввода, и соленоид, продольное поле которого возбуждет линейный разностный резонанс связи. Система однооборотного быстрого вывода состоит из 2-метрового ударного магнита и выводного септум-магнита.

Размещение оборудования в кольце бустера показано на рис. 3. Схема периода и его динамические характеристики для частот бетатронных колебаний $Q_x = Q_z = 2,25$ приведены на рис. 4 и в таблице 2.

При заданных параметрах инжектируемого пучка выбор апертур структурных элементов производится из условия увеличения импульсной интенсивности ионного пучка за счет накопления, примерно, на порядок.

Основные параметры магнитной структуры нуклотрона даны в таблице 3.

4. Апертуры структурных элементов

Апертуры структурных дипольных и квадрупольных магнитов должны включать в себя следующие области.

а) Накопленный, а затем ускоряемый пучок.

Величина аксептанса этой области была определена в предыдущем разделе ($A_x = A_z = 260 \text{ м.м.мрад}$). К этому должно быть добавлено пространство для радиальных синхротронных колебаний, амплитуда которых при адиабатическом захвате в режим ускорения составляет $\Delta r/r \approx 4 \cdot 10^{-3}$.

Искажения и нестабильность во времени равновесной орбиты пучка оценены в 5 - 6 мм. На неучтенные погрешности оставлен зазор между пучком и стенкой вакуумной камеры 5 - 7 мм.

Толщина стенок камеры и ее элементов, расположенных в межполюсном пространстве магнитов, лежит в пределах от 3 до 18 мм.

Поскольку дипольные магниты имеют секторную форму, сагитта в них отсутствует. Схематическое изображение магнита дано на рис. 5.

б) Инфлекторное устройство и инжектируемый пучок.

Инфлекторное устройство располагается на краю огибающей накопленного пучка. Инжектируемый пучок имеет поперечное сечение в

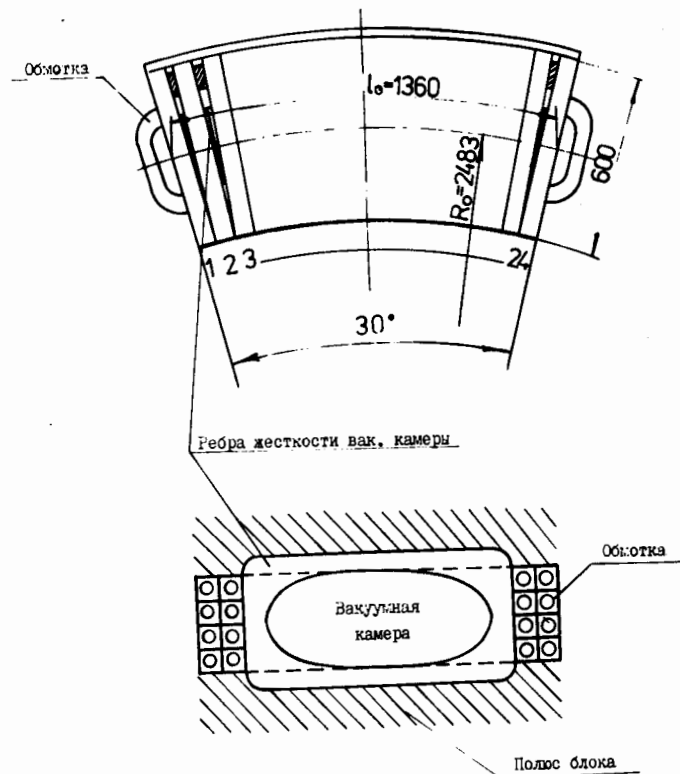


Рис. 5. Схема структурного дипольного магнита бустера.

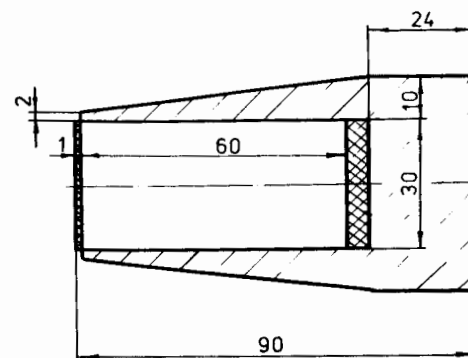


Рис. 6. Поперечное сечение инжекционного септум-магнита.

инфлекторном магните $x \times z = 40 \times 35 \text{ мм}^2$. На колебания частиц, обходящих инфлектор по вертикали отведено такое же пространство, как и для накопленного пучка. Поперечное сечение инфлекторного септум-магнита показано на рис.6.

в) Выведенный пучок и выводные устройства.

Поскольку вывод, как и инжекция, осуществляются на наружном радиусе ускорителя (но занимают разные азимутальные участки), а эмиттансы этих пучков имеют одинаковую величину (40 μ мм.мрад), пространство отведенное для инжекции используется и для транспортировки выводимого пучка от ударного магнита до выводного септум-магнита.

Слагаемые апертур структурных элементов и их конечные значения представлены в таблице 4.

Кроме вышеуказанного апертура магнитных элементов зависит от размеров стандартного проводника, используемого для обмоток, характеристик систем питания и др.

В итоге были приняты следующие значения апертур структурных элементов:

дипольный магнит $x \times z = 192 \times 104 \text{ мм}^2$,

квадрупольная линза - диаметр вписанной окружности $\varnothing = 180 \text{ мм}$,

параметр гиперболических полюсов $x \times z = 4050 \text{ мм}^2$.

Поперечные сечения дипольных магнитов и квадрупольных линз приведены, соответственно, на рис.7 и 8.

5. Система электропитания.

Для питания структурных элементов бустера-накопителя может быть использована система питания нуклотрона. Это возможно благодаря тому, что их работа будет осуществляться во времени последовательно (см. рис.1). С учетом этого фактора, а также других параметров ускорителя (см. табл.3) максимальный ток в диполях при 16 витках в обмотке составляет 9,5 кА и в квадрупольях 8,4 кА при 3 витках на полюс.

Средняя за время инжекции мощность, потребляемая кольцом, составит около 1,2 МВт, среднесуточная - в 2 - 3 раза меньше. Средняя эффективная плотность тока в обмотках дежит в пределах 12 - 13 А, что соответствует плотности тока, рекомендуемой по экономическим

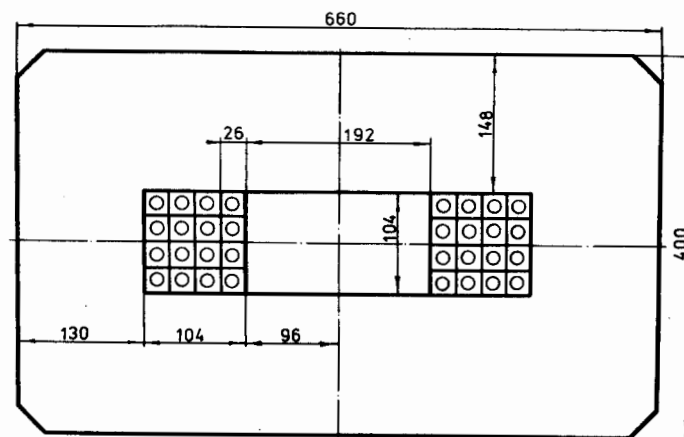


Рис.7. Поперечное сечение структурного дипольного магнита.

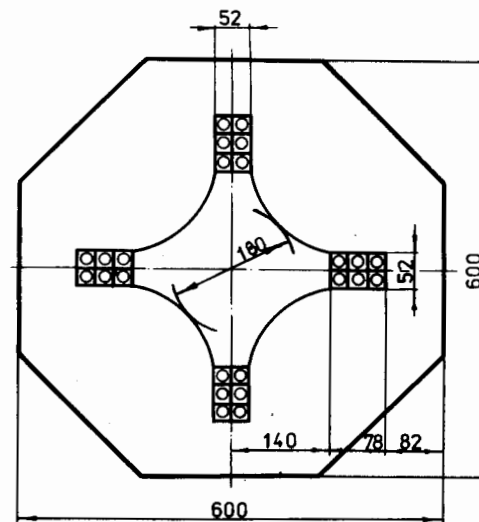


Рис.8. Поперечное сечение структурной квадрупольной линзы.

соображениям.

Время установления максимального тока при существующей системе питания, имеющей напряжение $U = 450$ В, определяется цепью последовательно включенных обмоток дипольных магнитов и составляет

$$T_{ц} / 2 = \frac{L}{R} \ln\left[1 / \left(1 - \frac{RI_{\max}}{U}\right)\right] = 0,433 \text{ с.}$$

Здесь $L = 0,0013$ Гн – общая индуктивность диполей, $R = 0,3$ Ом – их общее омическое сопротивление. Приведенные параметры соответствуют частоте повторения циклов бустера 1,2 Гц.

6. Заключение

Предложен новый вариант бустера-накопителя, намного улучшающего параметры ускорительного комплекса ЛВЭ. Предлагаемые технические решения позволяют в значительной мере использовать имеющееся оборудование, сооружения и здания, что сокращает стоимость проекта и время его сооружения.

Авторы приносят искреннюю благодарность всем сотрудникам лаборатории, с которыми обсуждались затронутые в данной работе проблемы.

Литература

1. Baldin A.M. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 1983, p3247.
2. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, Р9-9702, Дубна, 1976.
3. Балдин А.М. и др. ОИЯИ, 9-11796, Дубна, 1978.
4. Белов В.П. и др. ОИЯИ, 9-11650, Дубна, 1978.
5. Титов В.А., Шукейло И.А. ЖТФ, XXXVIII, 10, 1968, с.1752.
6. Громов А.М., Черенков П.А. Труды III Всесоюзного совещ. по ускорителям заряженных частиц. II, М., 1973, с.110.
7. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р1,2-89-631, Дубна, 1989, с.185.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 января 1991 года.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1.

Импульсные интенсивности нуклотрона с действующим линейным ускорителем ЛУ-20, ЛУ-20 и бустером, ЛУ-20, бустером и модернизированными ионными источниками^{17/}.

Элемент	Тип источника	ЛУ-20	ЛУ-20 + бустер	ЛУ-20 + бустер + модерн.источн.
		частицы/импульс		
P	дуоплазмотрон	11 2.10	13 2.10	13 > 2.10
		11 1.10	13 1.10	13 > 1.10
N ²⁺	дуоплазмотрон	10 1.10	11 7.10	11 > 7.10
		8 5.10	10 1.10	11 (1-2).10
C	лазерный	10 1.10	11 2.10	12 2.10
		8 6.10	10 1.10	11 1.10
Mg ²⁴	лазерный	5 1.10	6 1.10	8 5.10
		4 1.10	5 2.10	8 2.10
Ar ⁴⁰	эл-лучевой	4 1.10	5 1.10	8 1.10
		4 1.10	5 1.10	8 1.10
Kr ⁸⁴	эл-лучевой	4 1.10	5 1.10	8 1.10
		4 1.10	5 1.10	8 1.10
Xe ¹³¹	эл-лучевой	4 1.10	5 1.10	8 1.10
		4 1.10	5 1.10	8 1.10
U ²³⁸		-	-	7 ~ 10

Таблица 2.

Динамические характеристики периода магнитной
структуры бустера-накопителя

N/N ЭЛЕМЕНТ	ДЛИНА		ПОЛЕ		BETAХ	ALPHAХ	BETAZ	ALPHAZ
	М	Тл, Тл/м	М	М				
0	0.00	0.000	4.4939	0.00000	1.6740	0.00000		
1 промежуток	1.30	0.000	4.8700	-0.28928	2.6835	-0.77660		
2 магнит	1.30	1.500	4.6176	0.46535	5.7123	-1.55320		
3 промежуток	0.24	0.000	4.4094	0.40212	6.4922	-1.69657		
4 1/2линзы Ф	0.20	5.072	4.0288	1.46613	7.5802	-3.84181		
5 1/2линзы Ф	0.20	5.072	3.2786	2.21644	9.6785	-6.83947		
6 промежуток	0.12	0.000	2.7727	2.00004	11.3911	-7.43186		
7 1/2линзы Д	0.20	-5.623	2.1845	0.99979	13.7649	-4.19737		
8 1/2линзы Д	0.20	-5.623	1.9402	0.24596	14.6154	0.03082		
9 промежуток	0.45	0.000	1.8296	0.00000	14.6015	0.00000		
10 промежуток	0.45	0.000	1.9402	-0.24596	14.6154	-0.03082		
11 1/2линзы Д	0.20	-5.623	2.1845	-0.99979	13.7649	4.19737		
12 1/2линзы Д	0.20	-5.623	2.7727	-2.00003	11.3911	7.43186		
13 промежуток	0.12	0.000	3.2786	-2.21644	9.6785	6.83947		
14 1/2линзы Ф	0.20	5.072	4.0288	-1.46613	7.5802	3.84181		
15 1/2линзы Ф	0.20	5.072	4.4094	-0.40212	6.4922	1.69657		
16 промежуток	0.24	0.000	4.6176	-0.46535	5.7123	1.55319		
17 магнит	1.30	1.500	4.8700	0.28928	2.6836	0.77659		
18 промежуток	1.30	0.000	4.4939	0.00000	1.6740	-0.00001		

N/N ЭЛЕМЕНТ	PSI	DPSI	MUX	MUZ	HIX	HIZ
М						
0	1.9540	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1 промежуток	1.9540	0.00000	0.2816	0.6603	-0.0774	0.3013
2 магнит	2.0248	0.10652	0.5465	0.9988	-0.1716	0.2808
3 промежуток	2.0504	0.10652	0.5997	1.0382	-0.1847	0.2540
4 1/2линзы Ф	2.0159	-0.44976	0.6467	1.0670	-0.1929	0.2275
5 1/2линзы Ф	1.8721	-0.98166	0.7013	1.0905	-0.1936	0.1958
6 промежуток	1.7543	-0.98166	0.7411	1.1020	-0.1869	0.1741
7 1/2линзы Д	1.6092	-0.47637	0.8233	1.1178	-0.1599	0.1347
8 1/2линзы Д	1.5618	0.00000	0.9215	1.1317	-0.1169	0.0935
9 промежуток	1.5618	0.00000	1.1627	1.1625	0.0000	0.0000
10 промежуток	1.5618	0.00000	1.4039	1.1933	0.1169	-0.0934
11 1/2линзы Д	1.6092	0.47637	1.5022	1.2073	0.1599	-0.1347
12 1/2линзы Д	1.7543	0.98166	1.5844	1.2231	0.1869	-0.1741
13 промежуток	1.8721	0.98166	1.6242	1.2345	0.1936	-0.1958
14 1/2линзы Ф	2.0159	0.44976	1.6787	1.2581	0.1929	-0.2275
15 1/2линзы Ф	2.0504	-0.10652	1.7258	1.2869	0.1847	-0.2540
16 промежуток	2.0248	-0.10652	1.7790	1.3263	0.1716	-0.2808
17 магнит	1.9540	0.00000	2.0438	1.6648	0.0774	-0.3013
18 промежуток	1.9540	0.00000	2.3254	2.3251	0.0000	0.0000

Таблица 3.

Основные параметры магнитной структуры бустера-накопителя.

1. Общие данные.

Энергия инъекции	ядер с $q/A=0,5$ протонов	5 МэВ/нуклон 20 МэВ
Максимальная энергия	ядер с $q/A=0,5$ протонов	200 МэВ/нуклон 650 МэВ
Магнитная жесткость при инъекции	максимальная	0,647 Тл.м 4,3 Тл.м
Периметр		50,52 м
Кулоновский предел по интенсивности		2.10^{12} А/ q^2 част/цикл
Длительность инъекции		70 мкс

Длительность ускорения	0,5 с
Ускоряющее напряжение, максимальное	1,5 кВ
Критическая энергия	5,6 ГэВ

2. Структура и магнитные элементы	
Количество периодов типа ФФДОД	6
дипольных магнитов	12
квадрупольных линз	24
Индукция в дипольных магнитах	
при инжекции	0,261 Тл
максимальная	1,73 Тл
Градиент в линзах Φ	
при инжекции	1,12 Тл/м
максимальный	7,74 Тл/м
Градиент в линзах D	
при инжекции	-1,06 Тл/м
максимальный	-7,06 Тл/м
Радиус кривизны в дипольных магнитах	2,483 м

3. Динамические характеристики структуры и пучка.	
Частоты бетатронных колебаний $Q_{x,z}$	2,25
Коэффициент уплотнения орбит	0,0231
Амплитуда скорректированной орбиты	4 мм
Акцептанс	
горизонтальный	260 μ мм.мрад
вертикальный	260 μ мм.мрад
Эмиттанс пучка при инжекции $E_{x,z}$	
в конце ускорения E_x^*)	40 μ мм.мрад
в конце ускорения E_z^*)	40 μ мм.мрад
Импульсный разброс при инжекции	
максимальный	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$
в конце ускорения *)	$\pm 4 \cdot 10^{-3}$
в конце ускорения *)	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$

*) с учетом электронного охлаждения эти значения уменьшатся примерно на порядок

Таблица 4.

Слагаемые апертуры дипольного магнита.

Заполнение	Горизонт. параметр	Горизонт. размер мм	Верт. параметр	Верт. размер мм
Дисперсия орбит	$\Delta p/p = \pm 4 \cdot 10^{-3}$	16	-	-
Искажение и нестабильность орбиты	$a_x = \pm 6$	12	$a_z = \pm 6$	12
Клиренс	$a_{kx} = \pm 7$	14	$a_{kz} = \pm 6$	12
Ввод и вывод	$E_x = 40\mu$	42	-	-
Вакуумная камера, ребро	18 мм	36	3 мм	6
Итого		190		104

Слагаемые апертуры квадрупольной линзы.

Заполнение	Параметр	Квадруполь Φ		Квадруполь D	
		Горизонт. размер мм	Верт. размер мм	Горизонт. размер мм	Верт. размер мм
		Бетатронные колебания (мм.мрад)	$A_x = 260\mu$	72	96
Дисперсия орбит	$\Delta p/p = \pm 4 \cdot 10^{-3}$	16	-	14	-
Искажение и нестабильность орбиты	$a_x = \pm 5$	10	10	10	10
Клиренс	$a_{kx} = \pm 5$	10	10	10	10
Ввод и вывод	$E_x = 40\mu$	42	-	40	-
Вакуумная камера, стенка 5 мм		10	10	10	10
Итого		160	126	138	170