

10534

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



Д-405

7/7-7

9 - 10534

2522/2-77

В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский

СУПЕРЦИКЛОТРОН-  
МНОГОЦЕЛЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

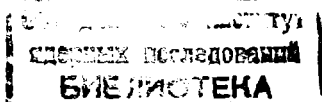
**1977**

9 - 10534

В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский

**СУПЕРЦИКЛОТРОН-  
МНОГОЦЕЛЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**

*Направлено на совещание экспертов по программе  
развития ускорительной техники в НРБ*



Джелепов В.П., Дмитриевский В.П.

9 - 10534

Суперциклотрон - многоцелевой ускорительный комплекс

В работе обсуждаются вопросы использования сильноточных протонных ускорителей на энергию 800-1000 МэВ.

Приводятся параметры разработанного в ОИЯИ сильноточного ускорителя на энергию 800 МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Разрабатываемый в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ комплекс, именуемый "суперциклотрон", предназначен для ускорения протонных пучков до энергии 800 МэВ с током в диапазоне от 1 до 100 мА.

Протонные пучки в таком диапазоне интенсивности найдут применение для решения большого числа очень важных задач прикладного и научного значения.

К основным прикладным задачам, актуальность которых ясно видна уже в настоящее время, следует отнести:

- а/ энергетическую проблему, связанную с наработкой ядерного горючего;
- б/ наработку больших количеств радиоактивных изотопов для различных отраслей народного хозяйства и медицины;
- в/ создание высокоинтенсивных портативных источников фотонейтронов;
- г/ изготовление на основе радиоактивных препаратов /плутоний-238, кюрий-241 и -234, нептуний-237/ портативных источников электроэнергии с высокой удельной активностью;
- д/ получение материалов с улучшенными характеристиками или новыми физико-химическими свойствами, использование которых будет способствовать общему научно-техническому прогрессу;
- е/ использование пи-мезонных пучков для терапии рака и мю-мезонных - в целях ранней диагностики различных заболеваний;
- ж/ применение интенсивных мю-мезонных пучков для неструктурного анализа материалов;
- з/ мезохимические исследования.

## 1. Суперциклотрон - мощный нейтронный генератор

Энергетическое использование комплекса основывается на реакциях возбуждения ядер первичным протонным пучком и вторичными каскадами частиц /нейтронов и пимезонов/, в результате которого из ядра вылетают нейтроны в широком энергетическом интервале.

Последующее замедление и захват нейтронов по реакции  $(n, \gamma)$  позволяет получать новые радиоактивные изотопы исходного элемента, массовое число которых увеличено на единицу. Среди многочисленных реакций этого типа - наибольший практический интерес в настоящее время представляют реакции  $(n, \gamma)$  на ядра  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , которые в результате двух последовательных  $\beta$ -распадов превращаются в ядра  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$ .

При взаимодействии протонного пучка с ядрами тяжелых мишеней /Pb, Bi, U / в общем случае возникают нейтроны трех спектров: испарительные, эмиссионные и делительные.

В простейшем случае для неделящихся материалов спектр нейтронов деления отсутствует, а соотношение между спектрами испарительных и эмиссионных нейтронов приблизительно находится в соотношении 5 к 1/1/.

Таким образом, более 80% нейтронов будет принадлежать спектру испарительных нейтронов, распределение которых по энергии описывается, как известно, функцией

$$n_u = \frac{E}{T^2} e^{-E/T}, \quad /1/$$

где  $T$  - эффективная температура ядра для процесса испарения. Так, например, для висмута и свинца  $T = 3,2 \text{ МэВ}$  и практически все нейтроны охватываются энергетическим интервалом  $0 \div 10 \text{ МэВ}$ .

Энерговыведение на один нейтрон в веществе мишени составляет  $20-25 \text{ МэВ}$ , что в  $8 \div 10$  раз меньше соответствующего энерговыведения в ядерно-реакторных системах / $200 \text{ МэВ/н}$  /, которое лимитирует величину потока нейтронов в современных бриддерных системах / $1 \div 2 \text{ МВт/л}$  /.

В настоящее время отсутствуют точные данные о полном количестве нейтронов ( $\nu$ ), возникающих в объеме вещества на один падающий протон высокой энергии, что связано с различной геометрией мишени и эмиттантами падающего пучка протонов в различных экспериментах /2,3/. Однако при энергии протонного пучка  $800 \text{ МэВ}$  эта величина близка к 50 при точности измерения  $20 \div 30\%$ . Основываясь на вышесказанных экспериментальных и теоретических результатах, можно утверждать, что полное число нейтронов в указанном энергетическом интервале будет составлять:

$$N_\nu = 6 \cdot 10^{15} \nu i, \quad /2/$$

где  $i$  - ток протонного пучка в миллиамперах. То есть на каждый миллиампер протонного тока можно получить

$$\frac{\Delta N}{\Delta i} = 3 \cdot 10^{17} \text{ н/с.} \quad /3/$$

Так как пробег в веществе ускоренных протонов /с энергией  $800 \text{ МэВ}$ / не будет превышать  $30-50 \text{ см}$  /ионизационный пробег/, а размеры мишени по радиусу -  $5-10 \text{ см}$ , плотности нейтронных потоков будут составлять

$$\frac{dN_\nu}{ds} \approx 10^{14} \frac{n}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \quad /4/$$

на каждый миллиампер протонного тока.

Дальнейшая судьба таких нейтронных потоков будет связана с объемом и материалом замедлителя /модератор/, в котором нейтроны могут замедляться с последующим захватом  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$ . Весовое количество наработки Pu или  $^{233}\text{U}$  будет равно:

$$Q \left( \frac{g}{\text{сутки}} \right) \approx 10i, \quad /5/$$

где  $i$  - в миллиамперах.

Таким образом, уже при интенсивности протонного пучка в  $10 \text{ мА}$  возможна наработка ядерного горючего до  $100 \text{ г/сутки}$ . Такая наработка открывает перспективу

для "подзарядки" плутонием твелов тепловых реакторов, а также для "изготовления" ториевых твелов с нарабатываемым  $^{233}\text{U}$ , так как выгорание в реакторе составляет 170 г/сутки на 100 МВт мощности при работе на  $\text{Pu}^{241}$  и 50 г/сутки при работе на  $^{233}\text{U}$ .

Такая технология может исключить трудоемкий химический процесс, с которым неизбежно связано получение плутония в бридерных системах.

Не исключается также замкнутый энергетический комплекс, объединяющий ускоритель и реактор, как это предложено в работе <sup>5/</sup>. Однако первоначальные затраты на сооружение такого комплекса, по нашему мнению, на данном этапе неоправданно велики, если учесть недостаточную точность основных данных по размножению и спектру нейтронов в таких системах.

Сооружение ускорительного комплекса с интенсивностью протонных пучков до 10 мА /на первом этапе/ позволит полностью решить научно-исследовательскую часть проблемы, а также уже на этом этапе начать работы по подзарядке твелов из плутония, урана и изготовлению твелов из тория. Этот ускоритель явится самым мощным в мире: мощность его протонного пучка превысит в 10-20 раз мощность таких пучков от недавно введенных в действие в США, Швейцарии и Канаде мезонных фабрик.

## 2. Суперциклотрон - фабрика изотопов

Основные радиоактивные изотопы, представляющие в настоящее время большой интерес для медицины, такие, как  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{72}\text{As}$ ,  $^{82}\text{Rb}$ ,  $^{83}\text{Kr}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{172}\text{Lu}$ ,  $^{44}\text{Se}$ ,  $^{42}\text{K}$  и другие, являются нейтронодефицитными <sup>6/</sup>. Они происходят от распада соответствующих радиоактивных ядер /см. табл. 1, заимствованную из работы <sup>7/</sup> /, образующихся в реакциях глубокого расщепления типа (P, mP, xn), где  $x = 3 \div 10$ ,  $m = 2$ , идущих с заметными сечениями только при взаимодействии с ядрами частиц высоких энергий.

Таблица 1

Основной продукт	Дочерний продукт	Мишень	Выход
$^{67}\text{Ga}$ (78 ч)	-	As	68 Ки/сут
$^{68}\text{Ga}$ (280 сут)	$^{68}\text{Ga}$ (68 мин)	As	320 Ки/нед
$^{72}\text{Se}$ (8,4 сут)	$^{72}\text{As}$ (26 ч)	Nb	8,7 Ки/нед
$^{82}\text{Sr}$ (25 сут.)	$^{82}\text{Rb}$ (75 с)	Nb	26 Ки/нед.
$^{83}\text{Rb}$ (83 сут)	$^{83}\text{Kr}$ (1,9 ч)	Nb	15 Ки/нед
$^{123}\text{Xe}$ (2 ч)	$^{123}\text{I}$ (13 ч)	La	27 Ки/нед
$^{172}\text{Hf}$ (5 лет)	$^{172}\text{Lu}$ (6,7 дн)	Ta	3 Ки/мес
$^{44}\text{Ti}$ (47 лет)	$^{44}\text{Se}$ (4 ч)	V	25 мКи/мес
$^{42}\text{Ar}$ (33 г)	$^{42}\text{K}$ (12 ч)	V	6 мКи/мес

Большая часть из перечисленных изотопов не может быть получена с помощью атомных реакторов, а если некоторые и получаются, то в ничтожно малых количествах.

В табл. 1 в качестве иллюстрации мощности прогрессивной ускорительной техники приведены также ожидаемые количества наработки указанных изотопов в случае использования протонного пучка с энергией 750 МэВ и интенсивностью 0,5 мА мезонной фабрики в Лос-Аламосе при толщине мишени 2,54 см /для токов выше 0,5 мА соответствующие выходы должны быть пропорционально увеличены/.

В простейшем случае, если пренебречь промежуточными распадами, накопление требуемого радиоактивного продукта в мишени следует формуле

$$Q = i\sigma N(1 - e^{-\lambda t}), \quad /6/$$

где  $N$  - число ядер в  $\text{см}^3$  мишени,  $\sigma$  - полное сечение процесса с учетом промежуточных состояний,

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}, \text{ где } T - \text{период полураспада.}$$

Если время облучения мало по сравнению с периодом полураспада,  $t_0 < T$ , то

$$\frac{Q}{t_0} = i \sigma N \lambda. \quad /7/$$

Так как полные сечения указанных процессов обычно невелики,  $\sigma \approx 1 \div 100$  мбарн, то для получения необходимых количеств изотопов за относительно небольшое время облучения требуются большие токи.

Недавние эксперименты на ускорителе SIN /Швейцарская мезонная фабрика/ показывают, что при толщине мишени 5 см и токе протонного пучка 50 мкА выход изотопа  $^{123}\text{J}$  составляет 300 мКи/ч<sup>/8/</sup>.

Для того, чтобы определенным образом ориентироваться в вопросе о годовых потребностях стран в тех или иных изотопах, достаточно обратиться к табл. 2 /также заимствованной из работы<sup>/7/</sup> /, где указаны эти потребности для наиболее развитой капиталистической страны - США. Сравнивая данные табл. 1 и результаты опытов в SIN с цифрами, приведенными в табл. 2, можно видеть, что при токе протонов  $1 \div 10$  мА

Таблица 2

Предполагаемая годовая потребность США в некоторых радионуклидах, запланированных для производства на LAMPF (мезонная фабрика в Лос-Аламосе)

Нуклид	$T_{1/2}$	Активность	Нуклид	$T_{1/2}$	Активность
$^{67}\text{Ga}$	78 ч	1200 Ки	$^{123}\text{J}$	13,1 ч	4000 Ки
$^{32}\text{Si}$	500 лет	10 мКи	$^{88}\text{Y}$	107 дн	900 Ки

проблема производства необходимого количества радиоактивных изотопов для использования в медицине и для других целей полностью решается с помощью одного мощного ускорителя типа "суперциклотрон" для целой группы стран.

Ясно, что с помощью сильноточного ускорителя на энергию 800 МэВ можно будет получать очень большое количество различных радиоактивных изотопов. Здесь мы ограничились лишь небольшой их группой. Нет необходимости в этом докладе описывать также свойства и возможные применения всех отмеченных нами изотопов. Для иллюстрации сделаем это лишь для некоторых из них.

$^{67}\text{Ga}$  /распад К-захватом/ обладает свойством селективно концентрироваться в опухолях мягких тканей. Это делает его весьма эффективным агентом для диагностики, помогающим с высокой точностью сканировать глубоколежащие новообразования, определять их форму и проводить облучение больных, не нанося повреждений здоровым тканям.

$^{123}\text{J}$  /распад К-захватом/ - это наиболее важный изотоп медицинского назначения. Использование его вместо  $^{131}\text{J}$  позволит не только существенно повысить точность диагностики заболевания щитовидной железы, почек или печени, но снизит в сто раз радиационную нагрузку на пациента по сравнению с таковой от  $^{131}\text{J}$ , что очень важно вообще и особенно важно для детей и беременных женщин.

$^{82}\text{Rb}$ , обладающий малым периодом полураспада /75 с/, является весьма удобным препаратом для медицинского сканирования сердца. Распадаясь испусканием позитронов, переходит в стабильный  $^{82}\text{K}$ .

Важный для прикладных целей класс радиоактивных изотопов представляют такие из них, которые испускают относительно жесткие гамма-кванты /с энергией  $1,7 \div 2,5$  МэВ/. Они могут использоваться для приготовления портативных источников фотонейтронов /реакция  $(\gamma, n)$  /. Наиболее перспективным /среди десятка других/ в этом классе является  $^{88}\text{Y}$  /  $T_{1/2} = 107$  дн /, испускающий практически монохроматические гамма-кванты с энергией 1,836 МэВ /99,5%/. При облучении

в течение 100 дней циркониевой мишени толщиной 2,5 см протонами с энергией 700 МэВ при токе 0,5 мА можно получить активность  $^{88}\text{Y}$  в 210 Ки. Это позволяет приготовить  $\text{Y}-\text{Be}$  портативный источник монохроматических нейтронов /  $E = 151 \text{ кэВ}$  / с потоком  $6 \cdot 10^8 \text{ н/с}$ , а при токе 10 мА -  $1,2 \cdot 10^{10} \text{ н/с}$ . Такие потоки уже превзойдут потоки от мощных источников из  $^{252}\text{Cf}$  /поток  $\sim 10^{10} \text{ н/с}$ /, испускающих к тому же нейтроны спектра деления. Портативные источники фото-нейтронов найдут широкое применение в нефтеразведке, активационном анализе и других областях.

Для агро- и биохимических исследований весьма интересен  $^{42}\text{K}$  /  $T_{1/2} = 14,6 \text{ час}$  /. Также хорошо установлено его медицинское использование /диагностика мускульной дистрофии, исследование миокарда, кровообращения и др./.

Весьма интересен  $^{26}\text{Al}$  /  $T_{1/2} = 7 \cdot 10^5 \text{ лет}$ , 85%-ный позитронный распад/ для исследований в области металлургии, геохимии, химии алюмосиликатов, физики твердого тела, океанографии и т.д. Он очень дорог: 43 тыс. долл. за 1 мКи. Мезонная фабрика Лос-Аламоса может дать в месяц 26 мКи  $^{26}\text{Al}$ . Ускоритель же с током 10 мА даст  $\sim 0,5 \text{ мКи}$ . Такого большого количества будет достаточно для того, чтобы обеспечить различные нужды в этом изотопе.

Так как после реконструкции синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в сильноточный фазотрон ток ускоренных до энергии 700 МэВ протонов возрастет до 30  $\div$  50 мА, то на этом ускорителе уже можно будет получать существенные количества некоторых из упомянутых выше радиоактивных изотопов /например,  $^{123}\text{J}$  /. В связи с этим в целях отработки методик облучения толстых мишеней и радиохимического выделения /или отбора из них газообразных продуктов/ в Лаборатории проводятся соответствующие исследования /9/.

### 3. Суперциклотрон - фабрика мезонов и нейтрино

Протонный пучок интенсивностью 1  $\div$  10 мА при взаимодействии с мишенью будет являться источником

мощных пучков  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  - и при их последующем распаде -  $\mu^+$ ,  $\mu^-$  - мезонов, а также монохроматических  $\gamma$ -квантов и нейтрино.

Интенсивности  $\pi$ - и  $\mu$ -мезонных пучков при токе протонного пучка 10 мА будут составлять соответственно /3-5/  $\cdot 10^{11} \text{ н/с}$  и /3-5/  $\cdot 10^9 \text{ н/с}$ . При таких интенсивностях открывается принципиальная возможность создания встречных пучков мюонов, что особенно важно для исследований взаимодействия между этими нестабильными частицами.

Качественно новые возможности возникают для исследований на пучках нейтрино от распада  $\mu$ -мезонов, количество которых, включая электронные, будет достигать  $5 \cdot 10^{14} \text{ н/с}$ .

Ускоритель позволит развернуть новые исследования с монохроматическими  $\gamma$ -квантами. В качестве "источников" монохроматических  $\gamma$ -квантов можно будет использовать процесс распада нейтральных  $\pi^0$ -мезонов, реакции  $n-\gamma$  и мезорентгеновское излучение. Для  $\gamma$ -квантов с энергиями в несколько мегаэлектрон-вольт это новый подход к исследованию фотоядерных реакций, включая процесс фотоделения.

Пучки суперциклотронного комплекса позволят поднять на новую ступень фундаментальные исследования в области средних энергий, такие, как:

а/ исследование нарушения принципов симметрии: T-, C-, P-инвариантности в сильных взаимодействиях;

б/ выяснение возможного нарушения закона сохранения лептонного заряда с помощью изучения редких распадов пионов и мюонов;

в/ прецизионное измерение констант слабого взаимодействия;

г/ исследование структуры элементарных частиц, прецизионное определение формфакторов;

д/ нейтронные эксперименты в широкой области энергий;

е/ нейтринные эксперименты при энергиях в десятки МэВ.

Наряду с обширной программой по фундаментальным исследованиям возможно одновременное выполнение

большого объема прикладных работ на вторичных пучках. К числу таких работ в первую очередь необходимо отнести упоминавшуюся ранее пи-мезонную терапию раковых опухолей и мю-мезонную диагностику заболеваний, мю-мезонный анализ материалов, мезохимические исследования строения веществ и др. Эти области прикладных исследований представляются сейчас очень многообещающими. Так, например, мезохимические исследования строения веществ /их химической активности, химических связей и т.п./, возможность проведения которых открывается при наличии интенсивных  $\mu$ -мезонных пучков, ставят на новую ступень всю современную химию. Мю-мезонная диагностика заболеваний и пионная терапия приведут к прогрессу в борьбе медиков за здоровье людей. На более высокий уровень поднимется прикладная радиохимия в результате работ, связанных с получением препаратов огромных удельных активностей из сильно облученных больших мишеней и т.д.

#### 4. Ускорительный комплекс - суперциклотрон

Ускорительный комплекс-суперциклотрон разрабатывается совместно Лабораторией ядерных проблем ОИЯИ и Институтом физики высоких энергий /Серпухов/. Комплекс состоит из линейного ускорителя-инжектора на энергию 50 МэВ и релятивистского изохронного циклотрона с жесткой фокусировкой на энергию 800 МэВ.

В качестве ускорителя-инжектора рассматривается линейный ускоритель с квадрупольной высокочастотной фокусировкой <sup>10/</sup>. Выбор этого типа линейного ускорителя определяется требованием согласования длин волн ускоряющего высокочастотного напряжения линейного и кольцевого ускорителей.

При длине волны 6 м, которая определяется размером ускоряющих резонаторов кольцевого магнита циклотрона, диаметр бака резонатора линейного ускорителя

с ВЧ фокусировкой не будет превышать 1,6 м. Вторым достоинством такого линейного ускорителя является низкая энергия инжекции /75 кэВ/ по сравнению с ускорительными структурами типа структур Альвареса /750 кэВ/.

Основные параметры линейного ускорителя-инжектора приведены в табл. 3 <sup>11/</sup>.

Успешный запуск секции 15 МэВ ускорителя, разработанного для инжекции в бустерный ускоритель протонного синхротрона на 70 ГэВ ИФВЭ ГКИАЭ, на которой получены импульсные токи протонов интенсивностью 80 мА, указывает на возможность использования его в комплексе "суперциклотрон".

В настоящее время рассматриваются технические вопросы, связанные с увеличением мощности высокочастотного питания при переводе ускорителя в непрерывный режим работы.

Альтернативным решением проблемы инжекции в основное кольцо суперциклотрона может быть сильноточный циклотрон типа мощного нейтронного генератора <sup>12</sup> на энергию протонов 60-70 МэВ. В этом случае существенно упрощается инжекционная линейная часть комплекса /энергия 3 МэВ/ и возникает возможность независимого использования инжектирующего циклотрона, работающего в дейтронном режиме в качестве мощного нейтронного генератора на энергию 14 МэВ. Однако стоимость комплекса в целом в таком варианте будет несколько выше.

На стадии разработки и проектирования релятивистского изохронного циклотрона в Лаборатории ядерных проблем были решены основные проблемы, стоящие на пути создания кольцевого циклотрона на энергию до 1 ГэВ. К числу основных проблем относятся:

а/ необходимая жесткость магнитной структуры ускорителя, позволяющая ускорять пучки протонов с интенсивностью, превышающей 100 мА;

б/ снижение потерь пучка в процессе ускорения до  $10^{-3} \div 10^{-4}$ ;

в/ изохронное ускорение в течение нескольких тысяч оборотов частицы;



Таблица 3  
Параметры инжектора

Параметр	Величина	
	1-я ступень	2-я ступень
Энергия инжекции (МэВ)	0,075	2,62
Выходная энергия (МэВ)	2,62	49,6
Длина волны (м)	6	6
Проектный ускоренный ток (мА)	100	100
Ширина спектра импульсов (по основанию)	$\pm 2,8\%$	$\pm 0,3\%$
Нормализованный эмиттанс (в единицах мрад.см)	0,5-1	0,5-1
Фазовая длина сгустка	$61^\circ$	$29^\circ$
Нормализованный аксептанс (мрад.см)	1,2	2,3
Коэффициент захвата	70%	
Средняя напряженность поля в зазорах (кВ/см)	85	145
Эффективность ускорения	0,06-0,484	0,879-0,96
Синхронная фаза	$74^\circ-29^\circ$	$30^\circ$
Диаметр апертуры (мм)	39	45
Диаметр электродов (мм)		
а) минимальный	9,4	-
б) максимальный	64	-
Диаметр рога (мм)	-	15,7
Эквивалентная длина рога (мм)	-	39,2-132,7
Среднеквадратичная величина допуска на поперечные размеры и поперечную установку электродов (мкм)	40	40
Среднеквадратичная величина допуска на продольные размеры и установку электродов в долях	0,06%	0,06%
Диаметр контейнера (м)	1,63	1,3
Длина контейнера (м)	3,86	58
Установленная мощность генераторов (мВт)	0,5-1	7-9

г/ практически стопроцентный вывод пучка из камеры ускорителя /с точностью, близкой к  $10^{-3} \div 10^{-4}$ , по отношению к циркулирующему пучку/.

Требуемая жесткость магнитной системы была определена из условия измерения поперечной частоты собственных колебаний при учете кулоновского расталкивания заряженных частиц. Последующие эксперименты на электронном аналоге релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой подтвердили правильность расчетов /13/.

Запуск изохронного циклотрона SIN /14/ и исследование процесса ускорения на нем показали, что потери в процессе ускорения не превышают величины  $10^{-3}$ .

В 1959 году на первом изохронном циклотроне со спиральной структурой магнитного поля было получено изохронное ускорение в течение 2500 оборотов. Этот результат открыл возможность ускорения ионов в циклотронном режиме на высокой кратности /15/. Реализация на опыте управления фазой пролета пучка /16/ позволит окончательно решить проблему многооборотного ускорения в изохронном режиме.

Найденная теоретически возможность искусственного расширения замкнутых орбит в конце ускорения в секционированных структурах магнитных полей была подтверждена экспериментально /17/ на электронном аналоге релятивистского циклотрона. Этот эффект позволяет обеспечить 100%-ный вывод частиц из кольцевого циклотрона.

Перечисленные теоретические и экспериментальные результаты открыли путь к разработке проекта релятивистского кольцевого протонного циклотрона на энергию 800 МэВ с предельной интенсивностью пучка до 100 мА.

Ниже приведены параметры такого ускорителя, у которого допуски на основные параметры /структуру магнитного поля, амплитуду высокочастотного напряжения, частоту ВЧ генератора и др./ не превышают уже достигнутых в настоящее время как на циклотронах ЛЯП ОИЯИ, так и на зарубежных циклотронных установках /табл. 4/.

Таблица 4  
Основные параметры суперциклотрона

Наименование параметра	Величина
Энергия ускоренных протонов (МэВ)	800
Ток ускоренных протонов (мА)	1+100
Энергия инжектируемых протонов (МэВ)	50
Частота аксиальных колебаний ( $Q_z$ )	1,45+1,35
Частота радиальных колебаний ( $Q_r$ )	1,12+1,95
Радиус инжекции (см)	244
Среднее магнитное поле на радиусе инжекции (Т)	0,402
Конечный радиус ускорения (см)	651
Среднее магнитное поле на конечном радиусе (Т)	0,723
Набор энергии за оборот (МэВ)	2,0
Частота обращения ионов (МГц)	6,13
Частота ускоряющего напряжения (МГц)	49,04
Число основных ускоряющих промежутков	4
Напряжение на основных резонаторах (кВ)	500
Мощность ВЧ потерь в резонаторах (МВт)	1,0
Мощность ускоренного пучка (МВт)	0,8+80
Общая высокочастотная мощность (МВт)	0,9+81
Число секторов электромагнита	8
Глубина вариации магнитного поля	1,68+1,55
Угол спиральности на конечном радиусе	41°
Высота магнита (м)	7
Диаметр магнита по ядру (м)	20
Вес магнитной системы (Т)	5000
Мощность питания магнитной системы (МВт)	2,0
Коэффициент вывода пучка из камеры (%)	100
Потери интенсивности пучка в процессе ускорения	$10^{-3} - 10^{-4}$

### Заключение

Для составления эскизного проекта ускорительного комплекса в Лаборатории ядерных проблем проводятся исследования по моделированию структурных элементов магнитной системы и высокочастотных резонаторов с большой передачей средней мощности пучку протонов. Так как в окончательном варианте при токе, близком к 100 мА, мощность протонного пучка будет очень велика и составит около 80 МВт, целесообразно сооружение такого комплекса вести в два этапа. На первом этапе, учитывая отсутствие опыта работы с ускорителями больших мощностей, а также то, что существующие генераторные лампы смогут обеспечить мощности, не превышающие 10 МВт, следует ограничиться током 10 мА. Такая величина тока обеспечит как возможность выполнения указанной выше обширной программы фундаментальных исследований, так и решение многих прикладных задач, включая наработку ядерного горючего в замедленном темпе.

По реалистическим оценкам, на разработку и сооружение такого комплекса при достаточно высоком темпе работ потребуется не менее 7-10 лет. Представляется рациональным при этом проектирование комплекса осуществить с таким расчетом, чтобы последующий перевод его в режим работы с токами в несколько десятков миллиампер потребовал бы в основном только увеличения мощности высокочастотных генераторов.

По грубо предварительным оценкам, стоимость комплекса при интенсивности пучка до 10 мА составит около 50 млн.руб. /без экспериментальных физических установок/. Использование его как фабрики по наработке радиоактивных изотопов в большой мере обеспечит самокупаемость эксплуатации комплекса.

### Литература

1. Bartholomew C.A., Milton V.C.D. *Ervogt AECL-2059 /1964/.*
2. Milton V.C.D., Fraser J.S. *EACL-2259 /1965/.*
3. Critoph E. *EACL-5501 /1976/.*

4. Орлов В.В. АЭ, 1974, 36, с.341.
5. Fraser J.S., Tunnicliffe PR, Hoffmann CRL.  
The Role of Electronically Produced Neutrons in  
Nuclear Power Generation, Chalk River, Canada, 1974.
6. O'Brien H.A., Schillaci M.E. Isotopes on  
Production Techn., 1971, v. 9, No. 115.
7. O'Brien H.A. LA-4587-MS, 23, 1972.
8. Hegedus F., Peck N.F. Sin Physics Report. No. 1,  
71/1976/.
9. Дзелепов В.П., Халкин В.А. ОИЯИ, 12-9283,  
Дубна, 1975.
10. Капчинский И.М., Тепляков В.А. ПТЭ, 1970, №2,  
с.19.
11. Мальцев А.П. и др. Программа V Всесоюзного со-  
вещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна,  
1976.
12. Адо Ю.М. и др. Программа V Всесоюзного сове-  
щания по ускорителям заряженных частиц. Дубна,  
1976.
13. Аносов В.Н. и др. АЭ, 1968, вып. 6, с.539.
14. Willax H.A. Программа V Всесоюзного сове-  
щания по ускорителям заряженных частиц, Дубна,  
1976.
15. Василевская Д.П. и др. АЭ, 1959, 6, с.657.
16. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, P9-6241, Дубна, 1971.
17. Vasilenko A.T., e.a. JINR, E9-9443, Dubna, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 марта 1977 года.