

СЗУСЛ1

A-239

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

24/IV-78



1825/2-78

9 - 11007

А.И.Агеев, Ю.И.Алексахин, Г.В.Долбилов,
Г.А.Иванов, И.Н.Иванов, А.Б.Кузнецов,
А.Э.Перельштейн, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев,
Ю.И.Смирнов

ВАРИАНТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ КОЛЛЕКТИВНОГО
УСКОРИТЕЛЯ

1978

9 - 11007

**А.И.Агеев, Ю.И.Алексахин, Г.В.Долбилов,
Г.А.Иванов, И.Н.Иванов, А.Б.Кузнецов,
А.Э.Перельштейн, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев,
Ю.И.Смирнов**

**ВАРИАНТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА БАЗЕ КОЛЛЕКТИВНОГО
УСКОРИТЕЛЯ**

Агеев А.И. и др.

9 - 11007

Вариант ускорительного комплекса тяжелых ионов на базе коллективного ускорителя

Предлагается вариант ускорительного комплекса для получения тяжелых ионов высоких энергий на базе коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ).

Приводятся соображения по созданию КУТИ, позволяющего ускорять ионы урана до энергии 250 МэВ/нукл. при интенсивности 10^{12} ион./с и более легкие ионы - вплоть до 1,25 ГэВ/нукл.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Ageev A.I. et al.

9 - 11007

A Version of Accelerating Complex for Heavy Ions on the Collective Accelerator Base

A version of accelerating complex for high energy heavy ions is proposed on the base of a heavy ion collective accelerator. Considerations are presented as to the construction of the complex which is capable of accelerating uranium atoms upto 250 MeV/nucleon at an intensity 10^{12} ion/s and lighter nuclei - upto 1.25 GeV/nucleon.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из вариантов ускорительного комплекса для получения тяжелых ионов высоких энергий может быть система из двух ускорителей:

- 1/ коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/, позволяющего ускорять ионы до энергии ~ 250 МэВ/нукл. /и более легкие ионы - вплоть до ~ 1,25 ГэВ/нукл./;
- 2/ синхротрона с КУТИ в качестве инжектора.

Ниже приводятся соображения по созданию КУТИ с параметрами, позволяющими использовать этот ускоритель как в качестве инжектора для синхротрона, так и непосредственно для физических исследований в области средних энергий.

При выборе основных параметров КУТИ мы исходили из следующих требований:

а/ получения энергии ионов ~ 250 МэВ/нукл. при отношении зарядности иона к его массовому числу $Z/A = 1/10$;

б/ получения интенсивности ионов урана 10^{12} ион/с;

в/ достижения возможно меньшего эммитанса пучка ионов на выходе ускорителя.

Темп ускорения

Важнейшей характеристикой ускорителя является темп ускорения, или набор энергии каждым нуклоном ядра на единице длины ускорителя

$$\frac{d\epsilon_{\text{нукл.}}}{dL} = - \frac{eZ}{A} E_{\text{уск.}} \quad /1/$$

где $\epsilon_{\text{нукл.}}$ - энергия нуклона, e - заряд электрона,
 $E_{\text{уск.}}$ - среднее ускоряющее электрическое поле.
 В коллективном ускорителе /1/

$$E_{\text{уск.}} = k \cdot E_{\text{кул.}} \quad /2/$$

где $E_{\text{кул.}} = \frac{eN_e}{\pi Ra}$ - кулоновское поле на краю электронного кольца с числом электронов N_e , большим радиусом R и радиусом поперечного сечения a ; k - коэффициент запаса, безразмерный параметр, определяющий поляризацию электронно-ионного кольца /при $k=1$ расстояние между центрами масс ионов и электронов равно a , при $k=0$ центры масс совпадают/.

Согласно /2/, ускорение происходит без потерь ионов, если $k < \frac{1}{4}$. Поэтому для дальнейшего положим $k = 0,25$.

Для достигнутых на прототипе УТИ параметров кольца /3/ $N_e = 2 \cdot 10^{13}$, $R = 3,5$ см, $a = 0,2$ см/ имеем

$$E_{\text{уск.}} = 30 \text{ МВ/м.} \quad /3/$$

Эта величина на порядок больше средних ускоряющих полей в линейных ускорителях.

Расчет показывает /4/, что "обдирка" атомов урана электронами кольца позволяет получить за время ~ 1 нс среднюю зарядность ионов $Z=25$ /с разбросом ± 2 /, то есть $Z/A = 1/10$.

Тогда для достижения энергии 250 МэВ/нукл. , согласно /1/ и /3/, необходима длина ускорителя $L=80$ м.

Интенсивность

При условии, что масса ионной компоненты кольца много больше утяжеленной за счет релятивистского вращения массы электронной компоненты и что заряд ионов несущественно компенсирует электронный заряд, напряженность действующего на ионы поля $E_{\text{уск.}}$ связана с внешним ускоряющим полем $E_{\text{вн.}}$ соотношением /5/

$$E_{\text{уск.}} = \frac{N_e}{ZN_i} E_{\text{вн.}}, \quad /4/$$

где N_i - число ионов в кольце ($\frac{ZN_i}{N_e} \ll 1$).

Принимая $E_{\text{вн.}} = 2 \text{ Мв/м}$, при выбранных параметрах ($E_{\text{уск.}} = 30 \text{ МВ/м}$, $Z = 25$, $N_e = 2 \cdot 10^{13}$) получаем $N_i = 5 \cdot 10^{10}$ и при частоте повторения циклов ускорения 20 Гц имеем интенсивность пучка ионов урана 10^{12} ион./с.

Эмиттанс и энергетический разброс

Эмиттанс ионного пучка на выходе КУТИ определяется формулой

$$\epsilon = \pi R \frac{1}{Z^{1/4}} \sqrt{\frac{a}{2kL}} \quad /5/$$

и при выбранных параметрах ускорителя равен $\epsilon = 10 \pi \text{ мрад.см.}$

Относительный разброс ионов по продольным импуль-

сам на выходе КУТИ $\frac{\Delta p}{p} = 3 \cdot 10^{-3}$.

Ускоряющую систему, обеспечивающую приведенные выше параметры КУТИ, предлагается реализовать в следующем виде. Ведущее постоянное магнитное поле величиной 20 кГс создается сверхпроводящим соленоидом диаметром 750 мм . Соленоид помещен в криостат /см. рис. 1/, имеющий в середине цилиндрическую полость диаметром 600 мм . В этой полости помещается система теплых резонаторов / $T = 300 \text{ К}$ /, обеспечивающая ускорение колец средним полем $E_{\text{вн.}} = 2 \text{ МВ/м}$. Для поддержания равномерного ускорения колец в этой же полости располагаются катушки, создающие дополнительное пологообразное магнитное поле ^{8/}. Подобная ускоряющая система экспериментально отработана в ОНМУ ОИЯИ.

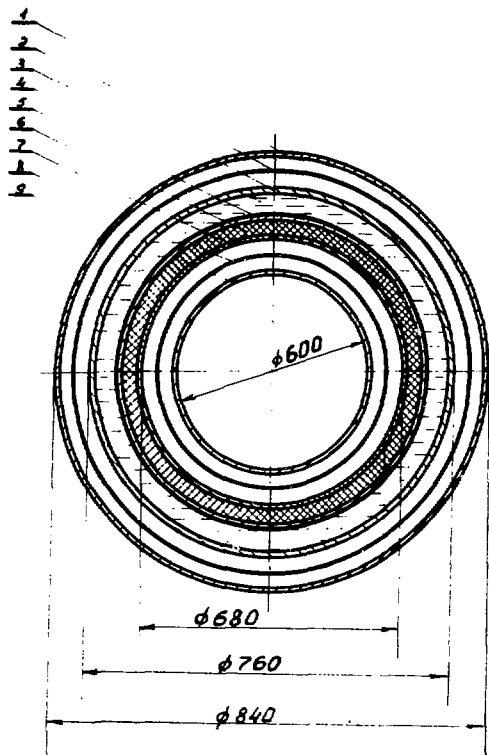


Рис. 1. Схематический разрез сверхпроводящего соленоида КУТИ. 1 - наружный вакуумный кожух, 2,8 - азотные экраны, 3,7 - обечайки гелиевого криостата, 4 - полость жидкого гелия, 5 - бандаж, 6 - сверхпроводящая обмотка, 9 - внутренний вакуумный кожух.

Весь КУТИ предлагается сделать из 10 таких секций. Длина каждой секции - 8 м.

II. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Высокочастотная ускоряющая система представляет собой набор последовательных коаксиальных резонаторов типа $\lambda/4$ /см. рис. 2/. При длине волны $\lambda = 2$ м длина периода системы $L_{\text{пер}} = 0,25$ м.

Величина ускоряющего зазора l_3 изменяется от 3 см в начале ускорения ($\beta=0,06$) до 6 см в конце ускорения ($\beta = 0,6$).

При напряженности поля в зазоре 100 кВ/см средняя напряженность ускоряющего поля $E_{\text{поср}} = 20$ кВ/см.

Величина запасенной энергии в таком резонаторе

$$W_3 = \frac{(C_0 + C_1)(E \cdot l_3)^2}{2},$$

где E - напряженность в зазоре, C_0 - емкость зазора, C_1 - эквивалентная емкость резонатора.

Если $C_0 = 10^{-11}$ Ф и $C_1 = 2 \cdot 10^{-11}$ Ф, то запасенная энергия $W_3 = 3,7$ Дж. При ожидаемой добротности $Q = 10^4$ величина необходимой импульсной мощности

$$P_{\text{имп}} = \frac{\omega W_3}{Q} = 400 \text{ кВт},$$

величина импульсной погонной мощности - 1,6 МВт/м.

Время, необходимое для закачки резонатора при указанной добротности, $t = 50$ мкс. Величина периода T при $f = 20$ Гц составляет 50 мс. Таким образом, средняя суммарная ВЧ-мощность

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}} \frac{t}{T} = 0,13 \text{ МВт}.$$

Один генератор, работающий на длине волны $\lambda = 2$ м, обеспечивает импульсную мощность ~ 4 МВт, то есть необходимо 40 таких генераторов.

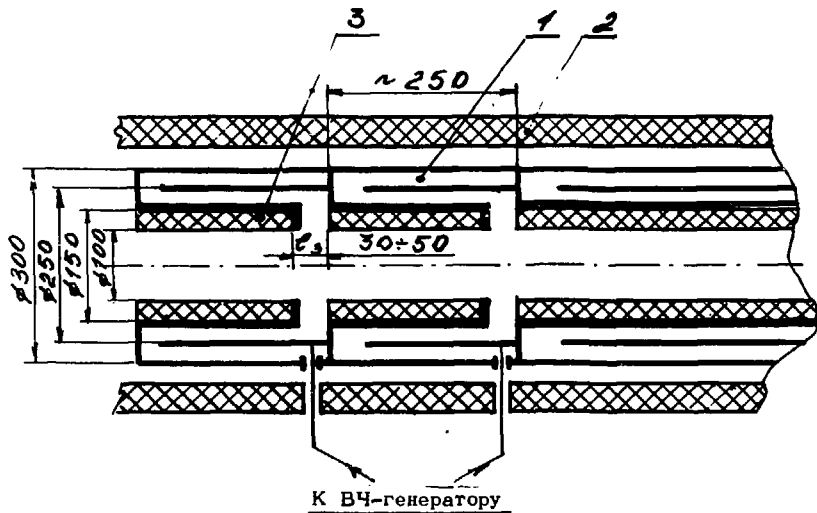


Рис. 2. 1 - ВЧ-резонатор, 2 - внешний соленоид /сверх-проводящий/, 3 - внутренний, градиентный соленоид.

Градиентное магнитное поле создается специальным соленоидом, расположенным внутри коаксиальных резонаторов. Требуемая величина градиента - 40 Гс/см, при этом среднее значение градиентного поля $B_{cp} = 500$ Гс.

Величина запасенной магнитной энергии на метр

$$W_M = \frac{B_{cp}^2}{2\mu_0} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \approx 16 \text{ Дж},$$

где $d = 10$ см - диаметр соленоида. Полная энергия $W_{M\Sigma} \approx 1,3$ кДж.

Соленоид работает в импульсном режиме с частотой повторения $f = 20$ Гц. Мощность, необходимая для питания градиентного соленоида:

$$P_M = W_{M\Sigma} f = 26 \text{ кВт}.$$

III. КРИОГЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУТИ

Для создания ведущего магнитного поля можно применить сверхпроводящий соленоид, который выполняется из шины на основе сплава НТ-50.

В настоящее время промышленностью освоен выпуск частично-стабилизированной шины размерами $3,5 \times 2$ мм², рассчитанной на рабочий ток 1,8 кА в магнитном поле 5 Т. Параметры и характеристики шины находятся на уровне мировых стандартов. На изготовление 1 м соленоида требуется 2,65 км /300 витков в 4 слоя/ сверхпроводящей шины, на весь соленоид потребуются 212 км.

Теплопритоки из окружающей среды к охлаждаемым гелием поверхностям складываются из теплопритоков за счет излучения и теплопроводности /в условиях высоковакуумной изоляции конвекционный теплообмен отсутствует/.

Основные теплопритоки в данной установке будут создаваться в криогенных гелиевых магистралях /КГМ/ и по тоководам. Теплопритоками к соленоиду за счет излучения и по подвескам, как показывают оценочные расчеты, можно пренебречь.

Согласно данным, полученным в ОНМУ для КГМ с азотным экраном, с учетом теплопритоков по стыковочной и регулирующей арматуре, средний удельный теплоприток $q_{\text{КГМ}} \leq 1 \text{ Вт/м}$. При длине КГМ, равной 160 м, общий теплоприток по КГМ составит $Q_{\text{КГМ}} \leq 160 \text{ Вт}$.

Выбираем рабочий ток СПС в поле 2 Т равным 2 кА. Согласно /7/, теплоприток по паре тоководов при таком токе составит 7 Вт при расходе охлаждающего газа 8 м³/ч. Для производства такого количества холодного газа установка типа ХГУ-250/4,5 должна "затратить" примерно 25 Вт при $T=4,5 \text{ К}$ /8/. Отсюда, так называемый приведенный теплоприток по тоководам для 10 секций /80 м длины/:

$$Q_T = 320 \text{ Вт.}$$

Зная составляющие теплопритоков, можно определить необходимую холодопроизводительность гелиевой установки: $Q = 480 \text{ Вт}$. Для обеспечения такой холодопроизводительности достаточно двух серийных установок ХГУ-250/4,5 холодопроизводительностью по 250 Вт каждая. Модернизация таких установок /8/ позволит осуществлять надежные режимы охлаждения и криостатирования.

В заключение отметим основные достоинства коллективного ускорителя тяжелых ионов:

1. На протяжении ускоряющего тракта зарядность иона не меняется, что позволяет исключить потери частиц, неизбежные при "обдирке" ионов в других схемах ускорения.

2. Коллективный ускоритель универсален по отношению к сорту ускоряемых ионов.

3. Линейная схема ускорения сама по себе выгодна с точки зрения получения пучков ионов с различными энергиями и не требует, как в циклическом варианте, специальных устройств для вывода пучка.

Заметим, наконец, что предлагаемая выше ускоряющая система - набор ВЧ-резонаторов, - является наиболее разработанной, однако для коллективного ускорения ионов возможно также использование других систем, например индукционного линейного ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И.Н. и др. ЭЧАЯ, 1971, т. 1, вып. 2, с. 406.
2. Перельштейн Э.А., Шевцов В.Ф., Щинов Б.Г. ОИЯИ, Р9-10060, Дубна, 1977.
3. Саранцев В.П. В сб.: II Симпозиум по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1977, с. 13.
4. Peterson J.M. Nucl. Sci., 1972, NS-19, p.2.
5. Иознович М.Л., Рубин Н.Б., Саранцев В.П. АЭ, 1969, т. 27, с. 301.
6. Бонч-Осмоловский А.Г. и др. ОИЯИ, Р9-4171, Дубна, 1968.
7. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975.
8. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 8-10477, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 января 1978 года.