

УДК 621.3.038.625

УСКОРИТЕЛЬ И РЕАКТОР

И.А.Шелаев, А.М.Балдин, А.И.Малахов, Э.-Й.Лангрок

Рассмотрена энергетическая система, включающая подкритический ядерный реактор с тепловой мощностью 3 ГВт и протонный ускоритель (1 ГэВ, 120 мА), создающий мощный поток первичных нейтронов, поддерживающих управляемую реакцию деления.

Показано, что наиболее подходящим для этой цели является циклотрон с разделенными орбитами и магнитной системой, составленной из миниатюрных сверхпроводящих магнитов с железным ярмом. С помощью этой системы удастся экономно разместить в одной установке одновременно несколько (до 10) пучковых каналов. Такая многоканальная система устраняет ограничение интенсивности ускорителя, связанное с пространственным зарядом пучка, и позволяет получить достаточно однородное поле нейтронов в реакторе.

Приведены основные проектные параметры такой ускорительной установки и показано, что в ней общий КПД сети–пучка быстрых протонов составляет 60–65 %.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Accelerator and Reactor

I.A.Shelaev et al.

A power system including a subcritical nuclear reactor with a heat power 3 GW and a proton accelerator (1 GeV, 120 mA), producing a dense stream of primary neutrons, stimulates control reaction of fission, is considered.

It is shown that the most suitable accelerator for this purpose is the separated orbit cyclotron with the magnet system composed out of miniature superconducting magnets with iron yokes. It is possible with its help to place economically in one facility simultaneously several (up to 10) beam channels. Such multichannel system eliminates the restrictions of the beam intensity in the accelerator due to the space charge of the beam and permits to get more uniform neutron field in the reactor.

The main project parameters of the considered accelerating facility are given and it is shown that overall efficiency of the network–beam of the rapid proton is 60–65 %.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования, нацеленные на использование искусственно генерируемых нейтронных пучков для ядерных энергетических реакторов, имеют долгую историю [1,2]. В

последнее время предложение об использовании тория вместо урана [3] оживило научный интерес к этой задаче. В частности, в последние годы прошла серия научных конференций по этой проблематике [4]. Двумя группами ученых были опубликованы первые экспериментальные результаты [5–8]. В дополнение стоит отметить работу [9], содержащую прогноз по развитию этого направления.

Концепция подкритичного реактора, управляемого ускорителем (ADR), с электронной управляющей системой представляется наиболее надежным и гибким устройством для генерации электроэнергии при использовании урана и тория при подавленном шлейфе радиоактивных отходов [10]. Такое устройство превращает часть энергии электросети в мощность ускоренного протонного пучка, трансформируемого в поток нейтронов на мишени. Этот поток дает множество актов деления в топливе и освобождает дополнительную тепловую энергию. Коэффициент усиления k зависит от степени подкритичности реактора, и различные оценки показывают, что его значение находится в пределах 25–30 при энергии протонов 0,3–1 ГэВ [11,12].

Главная трудность при практическом создании такого энергетического усилителя состоит в отсутствии ускорителя, способного эффективно создавать пучки желаемой мощности (100–120 МВт) при приемлемой стоимости. Существует достаточно много предложений, которые предусматривают для этой цели линейный ускоритель — теплый или сверхпроводящий (СП). Ускоритель такого типа может обеспечить пучки требуемой интенсивности, однако только в импульсной моде. Более того, линейный ускоритель функционирует в диапазоне очень высоких частот (300–500 МГц), для которых соответствующее оборудование слишком дорого, а его размеры очень велики (около 1 км).

Циклотрон с разделенными орбитами [13] с магнитом на основе сверхпроводимости и теплыми высокочастотными резонаторами представляется наиболее привлекательным. В таком ускорителе может быть осуществлено десять пучков. Это обстоятельство существенно уменьшает проблемы ограничения интенсивности пучка из-за объемного заряда в ускорителе. Дополнительное расщепление каждого из десяти ускоренных пучков позволяет решить проблему охлаждения мишени при полной мощности в 100 МВт и в то же время получить достаточно однородное поле нейтронов в реакторе. Включение ускорителя в промышленный ядерный реактор рассматривается на примере российского реактора РМБК-100. Одновременно существует возможность отдельного использования быстрых нейтронов, сформированных в мишени, и тепловых, рожденных после охлаждения в активной зоне реактора. Итак, обсуждается новая концепция «два в одном» для реактора на быстрых и медленных нейтронах на единой установке.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС

Упрощенная схема ADR представлена на рис. 1 с указанием основных потоков энергии в нем. Предположим, что пучки протонов, имеющие мощность P_b , дают тепловую мощность P_h благодаря энергии деления ядерного топлива в активной зоне реактора после попадания на мишень:

$$P_h = kP_b, \quad (1)$$

где k — определенный выше коэффициент усиления энергии. Тепловая мощность трансформируется в электрическую P_e энергетической установкой реактора с эффективностью

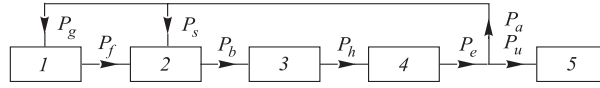


Рис. 1. Схема ADR: 1 — высокочастотный генератор, 2 — ускоритель, 3 — реактор, 4 — электростанция, 5 — потребитель

η_e . Следовательно,

$$P_e = k\eta_e P_b. \quad (2)$$

Часть электрической энергии возвращается в ускоритель, другая направляется потребителю:

$$P_e = P_a + P_u. \quad (3)$$

Энергия, потребляемая ускорителем, может быть разделена на две части: мощность P_s для ускорителя без пучка (вакуумная система, охлаждаемые магниты и резонаторы, управляющая система и т.п.) и мощность P_g , требуемая для питания высокочастотного генератора. Здесь мощность промышленной сети должна быть преобразована в высокочастотную мощность P_f . Получаем

$$P_a = P_b + P_s = \frac{P_f}{\eta_g} + P_s \quad (4)$$

при эффективности преобразования η_g .

Высокочастотная мощность направляется в резонаторы для возбуждения ускоряющего электрического поля и ускорения пучка, и тогда справедливо следующее выражение:

$$P_f = P_b \eta_b, \quad (5)$$

где η_b — эффективность передачи энергии от высокочастотного генератора пучку.

Объединяя выражения (1)–(5), получаем

$$P_u + P_s = (k\eta_e - 1/\eta_g \eta_b) P_b. \quad (6)$$

Очевидно, что последнее выражение имеет смысл, если выражение в скобках положительно, т.е. при условии, что

$$k\eta_e \eta_g \eta_b > 1. \quad (7)$$

Неравенство (7) определяет условие работы реактора, управляемого ускорителем, без какого-либо энергопотребления из внешних источников.

В неравенстве (7) экспериментально определены значения двух эффективностей η_e и η_g , а именно: $\eta_e = 0,3$ и значение η_g находится в пределах 0,65–0,7, если высокочастотный генератор, работающий на частоте 30–40 МГц, построен на современных мощных тетрадах. Значит, можно варьировать только два параметра в уравнении (7) — k и η_b .

Значение k зависит от подкритичности реактора. Следовательно, тип ускорителя определяет только η_b в неравенстве (7). Эффективность η_b может быть представлена как

$$\eta_b = \frac{P_b}{P_f} = \frac{P_b}{P_b + P_c}, \quad (8)$$

где P_c — мощность, рассеиваемая в резонаторах при отсутствующем пучке и при возбуждении на нем ускоряющего напряжения.

На рис. 2 показаны эффективности η_b для двух ускорителей: кривая 1 — для циклотрона, имеющего 5 МВт мощности для возбуждения 56 высокочастотных резонаторов до 0,5 МВ каждый, как принято в настоящем проекте, и кривая 2 — для линейного ускорителя мощностью 100 МВт. Как видно, в циклотроне η_b больше 0,95 при 100-МВт пучке, в то время как в линейном ускорителе значения η_b достигают 0,75 при мощности пучка 400 МВт. Эта разница объясняется многократным пересечением пучком ускоряющих промежутков или высокочастотных резонаторов.

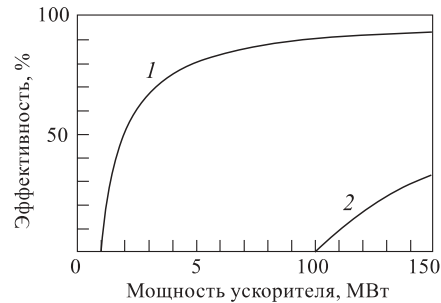


Рис. 2.

3. УСКОРИТЕЛЬ

3.1. Выбор схемы и связанные с ним проблемы. Принимая во внимание все вышеотмеченные условия, можем сформулировать главные требования к ускорителю для управления реактором:

- а) он должен обеспечивать протонные пучки с током 100 мА или выше при энергии 1 ГэВ в режиме непрерывного или квазинепрерывного тока;
- б) он должен иметь наивысшую эффективность η_b передачи высокочастотной мощности к пучку;
- в) он должен иметь наивысшую эффективность преобразования мощности сети в высокочастотную;
- г) он должен иметь наименьшую стоимость высокочастотного оборудования и его работы;
- д) он должен быть компактным, надежным, гибким в управлении и эксплуатации.

Всем этим требованиям удовлетворяет циклотрон с разделенными орбитами (ЦРО) на основе сверхпроводящей магнитной системы. Система, оборудованная миниатюрными сверхпроводящими магнитами с ярмом из железа, была разработана в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ [14].

Полная схема ADR показана на рис. 3. Ускоритель имеет три ступени. На первой протоны ускоряются до 30 МэВ на теплом многодуантном инжекторе ЦРО. Используется 10 машин такого типа, каждая обеспечивает ток 10 мА. Затем эти 10 пучков, инжестрированных в бустерный ЦРО со сверхпроводящей магнитной системой, ускоряются 12 теплыми высокочастотными резонаторами до 300 МэВ. Траектория пучка заворачивается

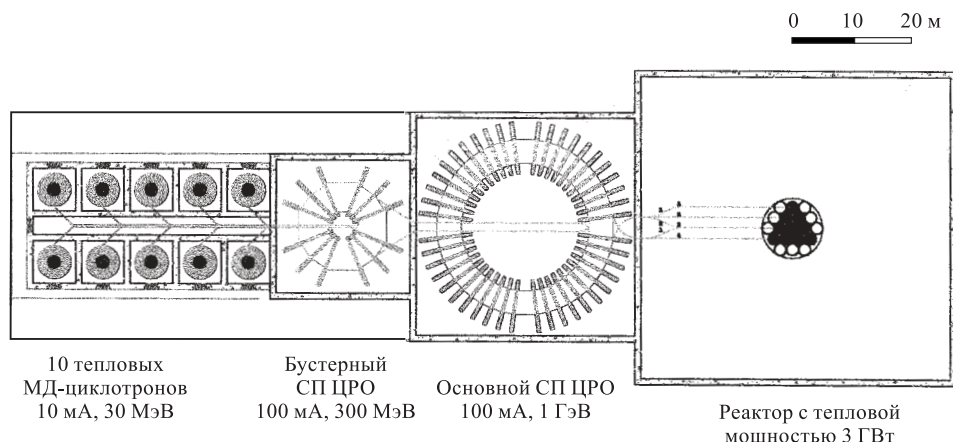


Рис. 3.

сверхпроводящими дипольными магнитами и фокусируется сверхпроводящими квадрупольными линзами. Вместе они формируют незамкнутую плоскую спиральную синхротронную магнитную дорожку, а радиальные шаги на дорожке определяются ускоряющим напряжением. Пучок встречает это ускоряющее напряжение, пересекая ускоряющие промежутки в резонаторах. Миниатюрные магниты позволяют поместить несколько дорожек друг над другом, и, таким образом, магнитная структура бустерного ЦРО имеет 10 этажей.

Та же десятиэтажная магнитная структура используется в главном ЦРО, в котором 44 теплых резонатора дают прирост радиуса в 5 см на оборот на последнем радиусе. Высокочастотные структуры всех трех ускорителей работают на одинаковой частоте 3,766 МГц, что решает проблему временного согласования пучков.

После вывода из главного ЦРО 10 пучков расщепляются на 20 отдельных пучков и направляются к активной зоне реактора по сверхпроводящим транспортным линиям. Гигантская мощность ускоренного пучка приносит с собой немало проблем и среди них две взаимосвязанные: как получить необходимую мощность пучка и как использовать его на мишени.

Число частиц в интенсивном пучке ограничено эффектом объемного заряда. На практике стабильное и надежное ускорение на циклотронах осуществляется при токе, равном 3–5 мА [15]. Поэтому решение проблемы состоит в разбиении пучка требуемой интенсивности на несколько пучков меньшей интенсивности, как и делается в нашем случае. Однако такое решение слишком дорого, так как означает, что требуется построить несколько схожих ускорителей. Для уменьшения стоимости ADR некоторые системы должны быть объединены. Две из них в обсуждаемой схеме одинаковые: ускоряющие резонаторы и криостаты с жидким гелием. Потребление энергии обеими системами является наивысшим.

Вторая проблема использования пучка имеет то же решение: мощность пучка, попадающего на мишень, должна быть меньше величины, ведущей к разрушению мишени. Поэтому каждый пучок после ускорения дополнительно расщепляется на два отдельных пучка, направляемых на разные мишени. В то же время такая работа позволяет получить более однородное поле нейтронов внутри реактора и улучшить его функционирование.

Эффективность ADR определяется в первую очередь высокочастотным преобразователем и его эффективностью. Многоступенчатый высокочастотный усилитель на жестких лампах с внешним возбуждением при мощности 2–2,5 МВт последнего каскада усиления выглядит наиболее приемлемо для работы в непрерывном или квазинепрерывном режиме. Тетроды фирмы «Thompson Tube Electronique» типа TH 518 (1,2 МВт) и TH 525 (1,7 МВт) подходят для этой цели.

Наивысшая эффективность означает следующее: последняя ступень высокочастотного усилителя помещается вблизи возбуждаемого им резонатора, что практически избавляет схему от потерь энергии. Все это приводит к тому, что полное число резонаторов и высокочастотных усилителей может быть не менее 50 для ускорения пучка мощностью 100 МВт. В нашем случае мы выбрали 56 в бустерном и основном ЦРО.

Размеры сечения сверхпроводящих магнитов обоих ЦРО одинаковы. Они отличаются только по длине. Это позволяет организовать массовое производство магнитов и снизить их стоимость.

3.2. Инжекторный ЦРО. Инжекторный ЦРО является теплым изохронным циклотроном, так как трудно избежать потерь пучка на нескольких первых оборотах, на которых формируется фазовая структура пучка. Схема этой машины приведена на рис. 4, а ее главные параметры — в табл. 1. Циклотрон работает на шестой гармонике частоты протонов и имеет шесть дуантов, удерживаемых одним вертикальным штоком, который является внутренней линией четвертьволнового коаксиального резонатора. Диаметр резонатора достаточно велик (внутренний — 2,4, внешний — 4,6 м). Как следствие, он обладает очень высокой добротностью — около 20000, как показали предварительные расчеты и измерения на модели. Благодаря своей добротности он требует 15 кВт мощности, чтобы возбудить напряжение с амплитудой 125 кВ на всех шести дуантах. При таком ускоряющем напряжении синхронные протоны получают приращение энергии 1,5 МэВ за оборот и достигают конечной энергии в 30 МэВ за 20 оборотов.

Магнитная система такого многодуантного циклотрона включает шесть секторных магнитов с радиальной вариацией расстояния между полюсами, обеспечивающими поле 0,78 Тл на траектории частиц и в шесть раз меньшее значение вне траектории. Такая радиальная вариация снижает обратный поток магнитной индукции приблизительно в четыре раза. Это позволяет существенно уменьшить железное ярмо магнитов и разместить их внутри вакуумной камеры циклотрона.

Пучок инжектируется в магниты с энергией 0,92 МэВ после 7-зазорного «линейного ускорителя», использующего высокочастотное напряжение дуантной системы. Энергия инъекции дает достаточно места в центре циклотрона, чтобы разместить магниты и дуанты и сохранить зазор между электродами 2,5 см и более и, таким образом, минимизировать искрение дуантов.

Ионный источник типа дуаплазмотрон размещен внутри штока высокочастотного резонатора при постоянном потенциале +45 кВ. Атомарные ионы H_1^{+1} (как правило, источник дает 30 % молекулярных ионов водорода) отбираются магнитным масс-сепаратором и направляются в высокочастотный банчер. Ионные импульсы с фазовой длительностью в 5–6° формируются банчером, и фокусировка пучка в дрейфовом промежутке банчера обеспечивается с помощью квадрупольных электростатических линз.

Сбанчерованный пучок, вертикально инжектированный в ЦРО в момент, когда шток находится при максимальном высокочастотном напряжении, встречает первый заземленный электрод, получая энергию, равную амплитуде напряжения на дуантах. Длина этого

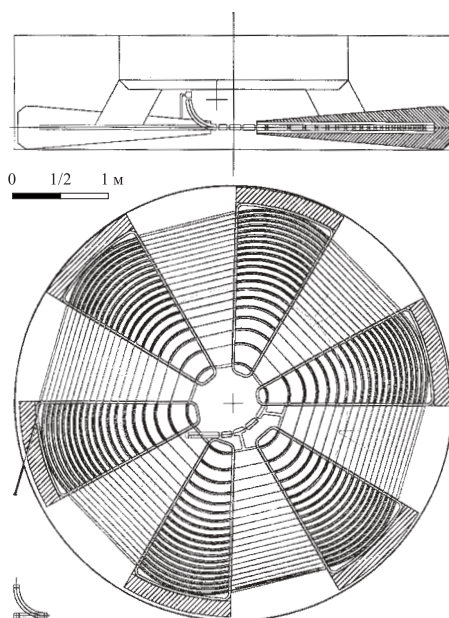


Рис. 4.

Поля в инжекторном циклотроне линейны на большей части траектории. Поэтому движение частиц сохраняет свой нормированный эмиттанс, равный 7π мкм.

3.3. Инжекторный ЦРО и несколько мишеней. Большой радиальный шаг пучка в многодуантном ЦРО позволяет разместить дополнительные импульсные электростатические дефлекторы в каждый из пяти дуантов. Это позволит использовать машину в качестве нового и весьма эффективного устройства для прикладных целей, например производства радиоактивных изотопов для медицины.

В нашем случае имеется возможность вывести из ЦРО одновременно шесть пучков изменяемой интенсивности на шесть различных направлений, с тем чтобы использовать пучки на различных мишенях (рис. 5). Мишени функционируют совершенно независимо. Предположим, что ионный источник и высокочастотная система ускорителя работают в квазинепрерывном режиме, т.е. в пульсирующем, с частотой следования 500 Гц, при которой пучок ускоряется периодически в течение 1,5 мс при паузах в 0,5 мс. Это обычный режим работы циклотронов, при котором резко улучшается их стабильность.

В этом режиме имеется достаточно времени (0,5 мс) включить и выключить напряжение на дефлекторах без возмущения соседних орбит. Детальные вычисления показывают, что пара отклоняющих электродов под напряжением ± 18 кВ отклоняет пучок на 13 мм. Это выше, чем полуширина магнитной дорожки, и пучок выходит из циклотрона. Затем, изменяя время возбуждения каждого из дефлекторов, можно изменять и время облучения каждой из мишеней. Если мишень содержит разные стабильные изотопы, быстрые протоны рождают одновременно разные радиоактивные изотопы.

Режим работы на нескольких мишенях уменьшает «мертвое» время использования циклотрона при смене мишеней и снижает в шесть раз расход электроэнергии, потребляемой при работе на одну мишень.

Таким образом, инжекторный ЦРО для работы на нескольких мишенях представляется наиболее эффективным решением для получения пучков протонов низких энергий.

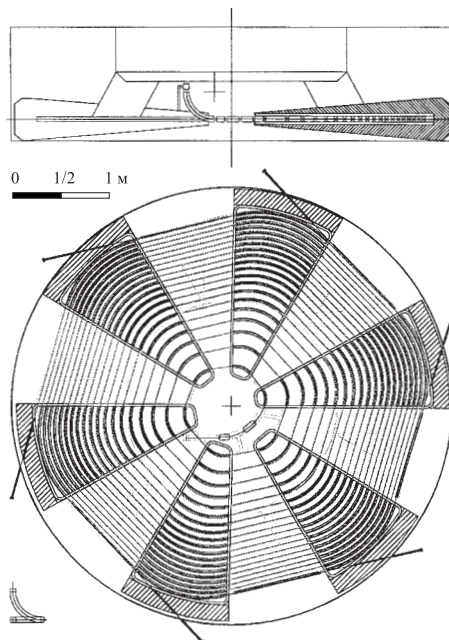


Рис. 5.

3.4. Бустерный сверхпроводящий ЦРО. После инжекторного циклотрона пучки транспортируются в бустерный ЦРО (рис. 6) по каналам транспортировки. Здесь они ускоряются на 8-протонной частотной гармонике до 300 МэВ.

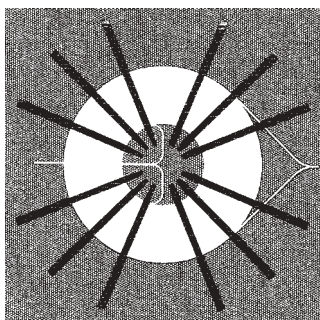


Рис. 6.

Основные параметры бустерного ЦРО приведены в табл. 2. Каждый многодуантный циклотрон находится на разном расстоянии от первого высокочастотного резонатора-бустера. Поэтому пучок согласуется путем установки фазового сдвига между резонатором и высокочастотной системой соответствующей машины.

Бустерный ЦРО имеет 12 высокочастотных резонаторов. Резонаторы выбраны теплыми по двум обстоятельствам: во-первых, создание сверхпроводящей петли связи на 2 МВт представляется проблематичным. Во-вторых, высокочастотный усилитель, нагруженный сверхпроводящим резонатором, должен иметь исключительно широкий динамический диапазон выходной мощности для возбуждения резонатора с пучком и без него. Чтобы уменьшить мгновенную загрузку резонаторов в бустерном ЦРО короткими

Магнитная система бустера состоит из 16 ФODO-периодов на оборот пучка. В каждом периоде имеются два сверхпроводящих магнита и две квадрупольные фокусирующие линзы. Два отклоняющих магнита на ФODO-период выбраны для того, чтобы уменьшить влияние сагитты на горизонтальную апертуру магнита. Магнит имеет простейшую форму. Все магниты имеют одинаковое значение магнитного поля, равное 1,45 Тл. Поле формируется однослойной сверхпроводящей обмоткой с малой радиальной шириной, равной 2,5 мм, и высоким значением критического тока. В случае массового производства стоимость магнита и линз будет весьма низкой.

Угол отклонения в магните и высокочастотная синхронность пучка задаются длиной дорожки в каждом периоде. Эта длина может быть легко и аккуратно найдена путем компьютерного моделирования процесса ускорения. Для этого необходимо знать распределение поля в резонаторах.

Типичным является размещение двух магнитов и двух линз в одной половине периода, формирующей ее холодную часть. Другая, или теплая, часть периода занята ускоряющим промежутком резонатора. Резонаторы отсутствуют в каждой четвертой ячейке, и это место используется для размещения оборудования инъекции пучка, отклонения, управления орбитой и диагностики.

Все сверхпроводящие элементы размещаются в одном криостате (рис. 7), охлаждаемом жидким гелием. Каждый четвертый и пятый криостат связываются в единый узел. Оборудование 10-этажной магнитной системы для бустерного ЦРО размещается в общем криостате, и снаружи бустер выглядит как 12 жидкогелиевых криостатов, разделенных 12 высокочастотными резонаторами, формирующими замкнутое кольцо.

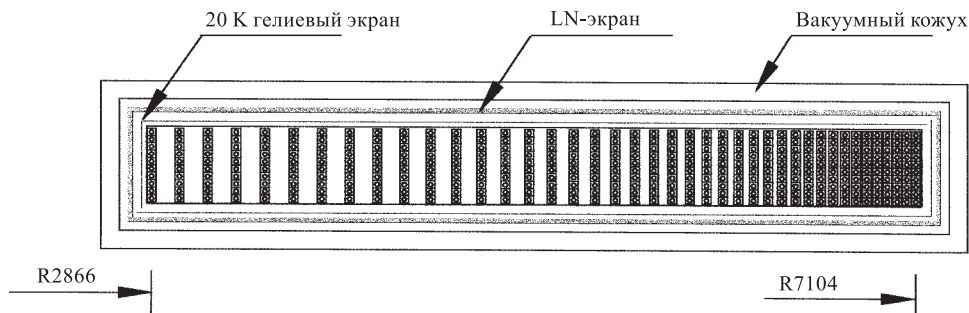


Рис. 7.

Оценки тепловых потерь криостата показывают, что большинство их приходится на краевые части, в которых холодная вакуумная камера ускорителя смотрит на теплые стенки ускоряющих резонаторов. Тем не менее детальные вычисления показывают, что потери тепла на криостат равны 26 Вт. Это означает примерно 310 Вт на сверхпроводящую систему бустерного ЦРО при температуре жидкого гелия. Значит, нагрузка сети равна 240 кВт, что допустимо по сравнению с полным потреблением энергии в 45 МВт.

Анализ бетатронного движения показал, что горизонтальные и вертикальные бетатронные частоты равны примерно 3,5, а поперечные размеры пучка не превышают 7 мм при любой энергии, кроме сагитты, которая добавляет еще 8 мм.

Проблемы, связанные с высокочастотной системой бустерного ЦРО, такие же, как и для основного ЦРО, и они будут обсуждаться ниже.

3.5. Основной сверхпроводящий ЦРО. В основном сверхпроводящем ЦРО (рис. 8) пучок получает дальнейшее ускорение до 1 ГэВ на 12-протонной гармонике, при этом частота высокочастотного генератора остается той же. Основные параметры этого каскада ускорения приведены в табл. 3.

Как отмечалось выше, высокочастотный резонатор основного ЦРО такой же, как в бустере. Он имеет форму параллелепипеда, как объемный резонатор (рис. 9) с простейшей возбуждаемой модой колебаний ТМ-110. Для этой моды необходимо соблюдать следующее условие в так называемом гладком приближении:

$$\frac{4}{\lambda^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}, \quad (9)$$

где λ — длина волны колебания, a и b — наибольшие стороны параллелепипеда.

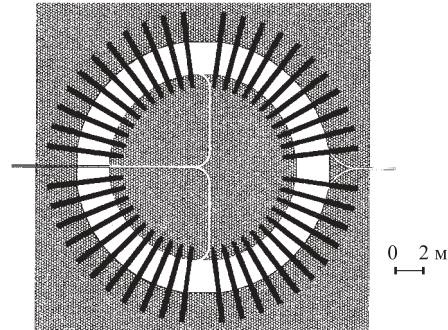


Рис. 8.

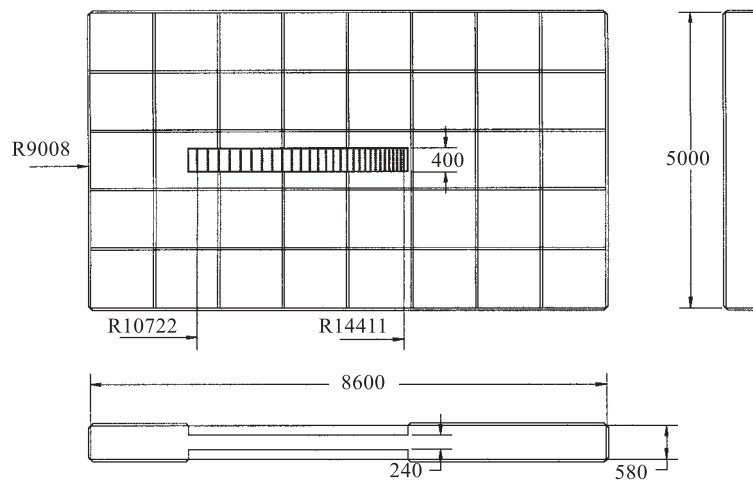


Рис. 9.

Электрическое поле в резонаторе имеет следующие компоненты:

$$E_x = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, \quad E_y = E_z = 0. \quad (10)$$

Параметры резонатора приведены в табл. 3, и из уравнения (10) можно установить, что компонента E_x остается постоянной с точностью $\pm 3 \cdot 10^{-3}$, в то время как координата y изменяется от 0 до ± 20 см при 10-этажной геометрии.

Чтобы получить в основном ЦРО радиальный шаг в 5 см на оборот на конечном радиусе, по окружности машины почти равномерно размещается 44 резонатора. Для

Таблица 3. Основные параметры бустерного сверхпроводящего ЦРО

Пучок	
Энергия инъекции, МэВ	298,22
Конечная энергия протонов, МэВ	1000,12
Число оборотов	30
Полное число пучков	10
Число пучков, вращающихся по часовой стрелке	5
Бетатронная частота, радиальная	5,3342
вертикальная	5,3277
Полная интенсивность пучка, мА	100
Магнитная система	
Число ФОДО-периодов на оборот	24
Магнитное поле при инъекции, Тл	0,2512
на выходе, Тл	0,3933
Средний радиус при инъекции, м	10,726
на выходе, м	14,411
Число дипольных магнитов на период	2
Поле в дипольном магните, Тл	1,450
Длина дипольного магнита при инъекции, см	24,23
на выходе, см	51,04
Апертура дипольного магнита, мм	25×25
Размеры диполя в поперечном сечении, мм	40×48
Средний вес дипольного магнита, кг	3,360
Ампер-витки сверхпроводящей обмотки, кА	28,847
Число витков сверхпроводящей обмотки	28
Ток обмотки, А	1030
Градиент в квадрупольных линзах, Тл/м	65,50
Длина квадрупольной линзы при инъекции, см	3,80
на выходе, см	5,94
Апертура линз, мм	25×25
Размеры линзы в поперечном сечении, мм	40×40
Средний вес квадрупольной линзы, кг	0,370
Полный вес магнитной системы, т	55,33
Высокочастотная система	
Протонная частота, МГц	2,8972
Номер гармоники	12
Число ВЧ-резонаторов	44
Начальный радиус полости резонатора, м	9,008
Максимальное напряжение на резонаторе, кВ	584
Набор энергии за оборот при инъекции, МэВ	15,103
на выходе, МэВ	23,838
Радиальный шаг за оборот при инъекции, см	17,32
на выходе, см	5,54
Размеры продольного сечения резонатора, мм	8,6×5,0
Ширина резонатора, м	0,58
Мощность возбуждения одного резонатора, кВт	140
Вес резонатора, т	5,23

выполнения этого условия магнитная структура главного ЦРО составлена из 24 периодов ФОДО на оборот.

Каждая половина периода включает фокусирующие (или дефокусирующие) линзы, два поворотных диполя того же типа, что и в бустерном ЦРО, а также большой теплый прямой участок, содержащий резонатор. Поэтому можно разместить 48 резонаторов, при этом четыре из них должны быть пропущены для того, чтобы оставить место для установки в кольцо инжекционного и другого дополнительного оборудования.

Протоны движутся от одного резонатора к соседнему в течение четверти высокочастотного цикла. Таким образом, выбирается 90-градусный фазовый сдвиг между соседними резонаторами. Сдвиг выдерживается соответствующим возбуждением высокочастотных усилителей, управляемых развитой системой фазовой и амплитудной настройки.

Из-за недостатка места мы пропустим детальное описание вакуумной системы ускорителя, однако из нашего опыта следует, что давление в вакуумной камере сверхпроводящего ЦРО будет 10^{-8} мм рт.ст. или ниже. Это означает, что потери пучка вследствие рассеяния протонов на атомах остаточного газа будут пренебрежимо малы. То же утверждение справедливо и для потерь другого типа. Более того, потери имеют место в синхротронах при многооборотной инжекции, где пучки ускоряются в течение нескольких секунд и затем исчезают. В обсуждаемом варианте ЦРО для частицы требуется 25 мкс, чтобы пройти от ионного источника до выхода. Этот процесс должен быть назван скорее транспортировкой. Итак, пессимистические оценки потерь пучка дают значение 10^{-9} – 10^{-8} . Эти потери могут быть локализованы так называемым методом «бритья пучка», когда гало пучка перехватывается специальным скребком.

После ускорения десять пучков автоматически достигают транспортных линий, связывающих ускоритель и реактор, где каждая линия завершается сверхпроводящим магнитом, заворачивающим пучок на 90° в вертикальной плоскости. Линии дополнены 10 бамп-магнитами, которые расщепляют каждый из пучков на два. Выключение бамп-магнитов происходит тогда, когда пучок полностью отсутствует в канале и, соответственно, не вызывает потери, когда машина работает в квазинепрерывном режиме (см. выше). Расщепление снижает вдвое тепловую нагрузку на мишень.

4. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР

Ниже, как пример, рассмотрен реактор РМБК-1000 [16]. Конечно, можно рассмотреть и реактор типа ПВР. Предположим, что топливо имеет подкритический массовый состав и само по себе не сгорает. Активная зона реактора показана на рис. 10. Она включает в себя примерно 1 693 сборки или стержня, вставленных в графитовую колонну размером 250×250 мм. Сборка — это трубка размером 88×4 мм в диаметре. Трубка из нержавеющей стали содержит 13 топливных стержней размером $13,6 \times 0,4$ мм в диаметре и длиной 3,5 м. Они заполнены оксидом урана. Две кассеты стержней помещены одна над другой в сборке. Охлаждающая вода идет по свободному пространству сборки под давлением 74 атм и температуре 284°C . Начальная загрузка реактора топливом составляет 204 т урана с обогащением 1,8.

Вся активная зона (11,6 м в диаметре и 7 м в высоту) окружена системой биологической защиты. Кроме того, имеется 169 графитовых стержней для управления работой реактора. Начальное обогащение топлива уменьшается при работе реактора. При достижении обогащения, близкого к естественному значению (0,7%), топливо должно быть заменено из-за затухания цепной реакции. Выгруженное топливо содержит 1,1% транс-

урановых элементов и около 4,4% продуктов деления в смеси с 95% оксида урана в топливных стержнях. Трансурановая компонента радиоактивных отходов, рожденная в ядерном топливном цикле, сохраняет долговременную радиотоксичность, в то время как продукты деления, которых в четыре раза больше по массе, представляют короткоживущую компоненту радиотоксичности [17].

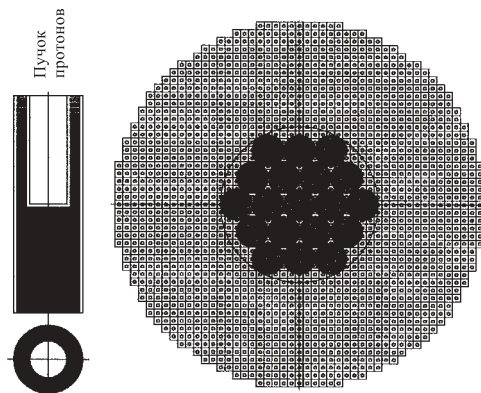


Рис. 10.

Общую проблему безопасной энергетики составляет разрушение обеих компонент отходов при сохранении специфики обращения с каждой.

4.1. Охлаждение мишени. Предположим, что представленный выше реактор подвергся модернизации, а именно 19 технологических сборок удалены и вместо них 19 трубок с жидким свинцом или эвтектикой Pb–Bi помещены в активную зону реактора. Каждая трубка, имеющая вакуум в верхней части и жидкий металл в нижней, служит мишенью для пучков протонов. Давление паров металла пренебрежимо мало, если температура не превышает 500 °С (при такой температуре давление паров Bi или Pb менее $1 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст.) и поверхность металла открыта для пучка. Вариант решения так называемой проблемы «первой стенки» поднимает новую проблему управления уровнем поверхности металла в вакууме и в то же время получения соответствующей скорости перемещения металла в трубке для удаления тепла, производимого в мишени пучком протонов. Если такая гидравлическая проблема решена, то, как показывают приближенные оценки, скорость жидкого свинца будет 2,5 м/с в трубке диаметром 88 мм (такой же, как и в предыдущем случае) или 0,6 м/с при вдвое большем диаметре. При этой скорости масса переносимого металла равна 100 кг/с, что позволяет вывести 5 ГВт мощности тепла, созданного ионизационными потерями протонов.

4.2. Поля и спектры нейтронов. Каждая мишень может рассматриваться как точечный источник нейтронов, при этом поток нейтронов снижается как r^{-2} , где r — расстояние от мишени [18]. Если описанные выше мишени равномерно распределены по горизонтальному сечению реактора, значит, плотность нейтронов формируется 19 точечными источниками, имеющими малые отличия.

Первичные нейтроны, сформированные на мишенях, имеют широкий энергетический спектр, достигающий 20 МэВ, однако они достаточно быстро замедляются из-за рассеяния на легких ядрах реактора (углерод, вода). Реакции деления трансурановых

элементов на тепловых нейтронах имеют сильный эффект по четности-нечетности ядер вероятности деления. Такие изотопы, как ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , имеют высокую вероятность деления ($\geq 60\%$). Напротив, изотопы ^{236}U , ^{238}U , ^{240}Pu и т.п. имеют низкую вероятность деления ($\leq 10\%$), а некоторые из них не делятся вовсе. Конечно, модернизированный реактор будет работать как очиститель, но весьма неэффективный для главной части радиоактивных отходов. Заметно более привлекательной выглядит схема, в которой первичные нейтроны используются перед замедлением. Схема, обозначенная как концепция «два в одном», обсуждается ниже.

4.3. Концепция «два в одном». Предположим, что 19 нейтронных мишеней размещены в центральной части реактора диаметром 5 м и высотой 2 м, а графит заменен тяжелой металлической конструкцией. При этом охлаждающая вода в технологических сборках заменена жидким свинцом или эвтектикой Pb–Bi, а плотность топливных сборок увеличена в 3–4 раза, что означает 64 сборки на квадратный метр вместо 16. Тогда первичные нейтроны делят все изотопы отходов во внутренней части реактора с достаточно высокой эффективностью, мгновенные нейтроны деления сохраняют свою энергию. Средняя энергия 2 МэВ и выше, а среднее число нейтронов деления ν увеличивается с энергией нейтронов E_n , включая последующее деление:

$$\nu(E_n) = \nu_0 + aE_n, \quad (11)$$

где ν_0 — среднее число нейтронов деления и a — константа, слабо меняющаяся с E_n [19]. Например, значение ν_0 для ^{238}U равно 2,65 для 1,5 МэВ, или для энергии нейтронов деления, и достигает 4,55 для 14,2 МэВ, или для энергии значительной части первичных нейтронов. В то же время сечение деления ^{238}U при энергии нейтронов 2 МэВ равно 1 б. Это означает, что свободный пробег нейтронов в изотопах урана около 30 см [20]. Тем не менее часть быстрых нейтронов покидает центральную зону реактора и замедляется во внешней области. Она может рассматриваться как бланкет, формирующий тепловые нейтроны. Поэтому схема названа «два в одном».

Коэффициент размножения нейтронов в чистом ^{238}U не превышает $k \leq 0,0435$ [20]. Ядерные отходы включают в себя множество других изотопов. Тогда подкритичность смеси может измениться. Ситуация может быть улучшена при квазинепрерывном режиме работы ускорителя, при котором появляется возможность стабилизировать мощность реактора на заданном уровне. Очевидно, это предложение [20] требует дополнительных исследований и компьютерного моделирования, однако выглядит обещающим.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан ускоритель, пригодный для управления энергетическим ядерным реактором. Хотя такого ускорителя пока не существует, его проект базируется на узлах и технологии, которая хорошо известна практически и широко используется в работающих машинах. Таким образом, проект обсуждаемого ускорителя готов к реализации.

Удобное разделение интенсивного пучка на 20 с меньшей мощностью снимает множество проблем ускорения и дальнейшего использования пучка в реакторе. В то же время он позволяет интегрировать ускоритель в существующий промышленный реактор после недорогой модернизации и без строительства нового. Более глубокая модернизация обещает появление новой технологии производства энергии с ^{238}U , накопленного сейчас.

Литература

1. Bartolomeev G.A. — Intense Neutron Source. Santa Fe CONF., CONF-660, 1963, p.925.
2. Толстов К.Д. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1993, №5[62]-93, с.5.
3. Carminati F., Klapish R., Revol J.P., Roche C.H., Rubio J.A., Rubbia C. — CERN/AT/93-74 (ET), 1993.
4. See E.G. — In: Proc. of the 3rd Int. Conf. «Accel. Driven Transmutation Tech. and Applic.», 7–11 June, 1999, Prague.
5. The TARC Collaboration. Neutron-Driven Nuclear Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing. Final Rep. to European Com. CERN 99–11, 15 December, 1999.
6. Arnold H. et al. — Phys. Lett., 1999, v.B458, p.167.
7. Wan J.-S. et al. — Kerntechnik, 1998, v.63, p.167.
8. Krivopustov M.I. et al. — Journal of Radioanalytic and Nuclear Chemistry, 1997, v.222, p.267.
9. Armbruster P. — Phys., 1999, v.B155, No. 2, p.33.
10. Субботин В.И. — ЭЧАЯ, 1998, т.29(136), с.33.
11. Fietier N., Mandrillon P. — CERN/AT/95-03 (ET), 1995.
12. Varashenkov V.S., Shelaev I.A. — JINR Preprint E2-98-137, Dubna, 1998.
13. Шелаев И.А. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1993, №5[62]-93, с.16.
14. Шелаев И.А. — В сб.: Тр. Междунар. конф. по ускорителям высоких энергий. Новосибирск, 7–11 августа, 1986, т.2, с.24.
15. Jongen Y. — In: Proc. EPAC, 2–6 May, 1994.
16. Казновский С.П. — Проектирование ядерных реакторов. М.: Энергоиздат, 1974, с.23.
17. Revol J.-P. — CERN-PPE/97-142, 31 October, 1997.
18. Andramonje S. et al. — CERN/AT/94-45 (ET), 1994.
19. Кикоин И.К. — Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976, с.931.
20. Дмитриевский В.П., Сергеева Н.В. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1999, №5,6 [97]-99, с.85.

Рукопись поступила 24 января 2001 года.