

УДК 621.039: 621.384.6

МОЩНЫЕ ПУЧКИ НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ

В.Н.Михайлов *

Рассмотрены возможности использования в ядерной энергетике мощных пучков нейтронов, создаваемых ускоренными заряженными частицами, основные требования к пучку таких частиц и к ускорителю.

Powerful Neutron Beams from Accelerators

V.N.Mikhailov

A possibility of using powerful beams from particle accelerator in nuclear engineering and basic requirements to beam parameters as well as the accelerator type have been discussed.

Введение

Возможности использования в ядерной энергетике нейтронных потоков, образуемых пучками заряженных частиц из ускорителя, обсуждаются учеными с конца 40-х годов (подробности можно найти в [1]). Под действием ускоренных протонов или других частиц в мишени из свинца или висмута образуется 20 + 25 быстрых нейтронов, которые затем термализуются и размножаются в окружающей оболочке, представляющей собой подкритический реактор на тепловых нейтронах. Такую схему сейчас называют усилителем энергии [2], и она имеет как своих сторонников, так и противников.

Сторонники электроядерного метода подчеркивают такие его преимущества, как способность сжигать ^{232}Th или обедненный уран, более короткий по сравнению с реакторами на быстрых нейтронах цикл наработки делящихся материалов, наконец, его повышенную безопасность, исключающую вероятность возникновения в реакторе неуправляемой цепной реакции (НЦР), а в случае ториевого цикла — также и возможность неконтролируемого распространения ядерного оружия.

Напротив, оппоненты подчеркивают низкую эффективность ускорителей, приводящую к высоким затратам энергии на один полученный в такой установке нейтрон, недостаточную интенсивность ускоренного пучка и высокие начальные капиталовло-

* Министерство атомной промышленности России, Москва

жения. При этом они исходили из спорного положения, что «то обстоятельство, что в подкритическом реакторе в отличие от критического не может осуществляться НЦР, не является серьезным аргументом в пользу ускорительного метода. Многолетняя практика показала, что регулировать самоподдерживающуюся реакцию и защищать реактор от НЦР нетрудно» [3].

Можно согласиться с тем, что «нетрудно защитить реактор от НЦР», но очень трудно и крайне дорого, как показал опыт Чернобыля, устранять последствия ее возникновения, поэтому полное исключение возможной НЦР представляется делом, оправдывающим увеличение начальной стоимости электроядерного реактора.

Действительно, сегодня нет действующего ускорителя, способного поставлять пучок протонов мощностью порядка 100 МВт и отвечающего всем другим требованиям. Это в первую очередь связано с тем, что ускорители развивались для нужд экспериментальной физики, где такие уровни мощности не нужны. И хотя на импульсных ускорителях мгновенная мощность пучков, например, электронов лежит в диапазоне ГВт, средняя мощность ускоренных пучков остается на уровне десятков киловатт.

Вместе с тем непрерывное развитие технологии ускорителей, особенно в последние 10—15 лет, и техники получения и управления пучками достаточной интенсивности позволяет по-новому взглянуть на задачу создания нейтронного пучка, отвечающего требованиям электроядерного реактора. В этой работе кратко рассмотрим основные требования к пучку быстрых частиц, генерирующему их ускорителю и возможные направления его реализации.

Требования к пучку быстрых частиц

В общем виде электроядерный реактор работает по следующей схеме.

Рабочее вещество реактора таково, что число рождающихся нейтронов меньше числа первичных, и реакция деления быстро затухает, если для ее поддержания в активную зону реактора не поставляются нейтроны от внешнего источника. Таким источником может быть ускоритель протонов или других частиц достаточно высокой энергии, которые при взаимодействии с мишенью из тяжелых элементов дают первичный поток нейтронов высокой энергии. Нейтронный поток из мишени попадает в размножающую оболочку, где термализуется, и реакция деления идет на тепловых нейтронах. В таком подкритическом реакторе его мощность всегда пропорциональна мощности пучка поступающих от ускорителя частиц, т.е. реактор оказывается лишь своеобразным усилителем энергии пучка ускорителя.

Если ускоритель поставляет пучок протонов мощностью пучка P_b , то в реакторе выделяется тепло мощностью $P_h = GP_b$, где G — коэффициент «усиления» мощности пучка. Тогда полезная мощность электроядерного реактора P_u равна

$$P_u = (G\eta_e - 1/\eta_g\eta_b)P_b - P_a. \quad (1)$$

Здесь P_a — мощность собственных нужд ускорителя, расходуемая на его поддержание в рабочем состоянии независимо от мощности пучка, η_e — КПД преобразования элект-

ростанцией тепловой энергии в электрическую, η_g — кпд преобразования мощности промышленной частоты в высокочастотную, η_b — кпд передачи ВЧ-мощности ускоряемому пучку.

В этом выражении ряд параметров имеет проверенную на практике величину. Так, величина η_e на действующих электростанциях равна 0,35. Коэффициент η_g зависит от типа ВЧ-генератора и его рабочей частоты, и в рассматриваемых ниже ускорителях может быть принят равным 0,6. Коэффициент η_b определяется типом ускорителя, и его можно положить равным 0,9.

Величина G определяется многими параметрами: видом и энергией быстрых заряженных частиц (протоны или более тяжелые [4]), материалом мишени, размножающей оболочки и других конструкций реактора. Надо отметить, что точные данные по физике процессов в электроядерном реакторе отсутствуют. Имеющиеся экспериментальные данные получены на различных упрощенных моделях мишеней и подлежат систематизации и дополнительной проверке, т.к. их точность не превосходит 20 + 30%. По оптимистическим предположениям [2] для протонов с энергией 1 ГэВ усиление G может достигать в реакторе величины 30 + 35. Если подставить эти величины в (1), то получим

$$P_u = (10,5 - 1,85)P_b - P_a. \quad (2)$$

Полагая, что мощность собственных нужд ускорителя P_a составляет 1 + 3 МВт и для оценок ею можно пренебречь, из (2) находим, что рассматриваемый реактор способен производить электроэнергию мощностью порядка 1 ГВт, а именно такой мощности реактор имеет промышленное значение, если мощность пучка протонов 100 + 120 МВт. Следовательно, интенсивность пучка протонов должна быть 0,1 А и выше.

Эту мощность следует распределить в мишени по некоторому объему с тем, чтобы исключить ее нагрев выше достижимого удельного теплосъема, а также получить возможно более равномерное поле нейтронов в рабочей зоне. Для этого достаточно, по-видимому, разделить протонный пучок на 10 + 15 пучков меньшей интенсивности и облучать несколько мишеней в центре реактора. Материалом мишени может быть свинцово-висмутовый расплав, одновременно выполняющий роль теплоносителя первичного контура охлаждения. При разделении пучка протонов снижаются также требования к «выпускному окну» ускорителя.

Разумеется, ускорение пучка должно сопровождаться минимальными потерями, а управление им быть практически безынерционным.

Тип ускорителя

Выбор типа ускорителя в первую очередь определяется надежностью и эксплуатационными качествами (эффективность, стоимость, долговечность, ремонтоспособность и др.) ВЧ-преобразователя. Следует также учитывать опыт, полученный в 70-х годах при сооружении мезонных фабрик. Тогда в США был построен линейный ускоритель в Лос-Аламосе [5], в Канаде — циклотрон «Triumph» в Ванкувере [6], в

Европе — циклотрон SIN в Цюрихе [7], а позже у нас — линейный ускоритель в Троицке [8]. Хотя на этих ускорителях энергия пучка в 1,5-2 раза и интенсивность в 100 раз меньше требуемой, тем не менее можно сделать некоторые заключения. Прежде всего, следует заметить, что проектная интенсивность пучков на перечисленных выше ускорителях была получена не сразу после их пуска, а только через несколько лет напряженной работы. Сейчас на циклотроне SIN потери пучка составляют 0,3 μA при выведенном пучке 1 мА и сосредоточены, в основном, в районе вывода.

Линейный ускоритель обладает как преимуществами:

— автоматический вывод пучка;

— в импульсном режиме мгновенная интенсивность превышает 0,1 А,

так и недостатками:

— очень высокая рабочая частота и, как следствие, стоимость ВЧ-генератора;

— протяженный резонатор, для возбуждения которого требуется 40 + 50 МВт ВЧ-мощности в режиме нулевой интенсивности пучка, поэтому эффективность передачи ВЧ-мощности пучку оказывается приемлемой при интенсивности выше 0,3 А.

Основной недостаток циклотрона устраняется, если выбрать предложенный ранее циклотрон с разделенными орбитами [9], в котором сохраняется основное достоинство линейного ускорителя — эффективный вывод пучка. Тогда это предложение было несколько преждевременным, т.к. магнитная система в традиционном теплом варианте была неподходящей.

Сверхпроводимость, освоенная на ускорителях высоких энергий, может с успехом применяться в рассматриваемом диапазоне энергий. Если замена тепловой катушки на сверхпроводящую в традиционном магните циклотрона [10] только снижает расходы на электропитание магнита, оставляя его размеры почти неизменными, то переход к малоапертурным СП-магнитам, в частности, синхротронным, дает целый ряд преимуществ:

— сокращает до минимума расходы энергии на возбуждение магнита;

— во много раз сокращает размеры и вес магнита;

— при разделении функций поворота пучка и фокусировки, частоты бетатронных колебаний частиц не зависят от их энергии, что снимает ограничение на предельную энергию в циклотроне.

Сейчас в ФРГ завершается сооружение циклотрона с разделенными орбитами и сверхпроводящей магнитной системой [11] на энергию 38 МэВ. Запуск этого ускорителя позволит ответить на многие вопросы относительно машин этого типа.

Экстраполяция параметров циклотрона [11] на энергию 1 ГэВ [12] показывает перспективность этого типа машин для электроядерного реактора. Привлекательным выглядит предложение изначально разделить ускоряемый пучок на 10 каналов с отдельной сверхпроводящей магнитной системой синхротронного типа в каждом [13]. Высокий прирост энергии за оборот позволяет каждый магнитный канал выполнить в виде плоской спирали, а небольшая высота СП-магнитов — разместить все 10 каналов один над другим в общих гелиевых криостатах. Размещенные между ними общие для всех каналов теплые ВЧ-резонаторы сравнительно низкой частоты при интенсивности пучка 0,1 А обеспечивают коэффициент передачи ВЧ-энергии пучка 0,9.

Создание ускорителя с пучком протонов 1 ГэВ и током 0,1 А — задача сложная, но разрешимая при современном состоянии ускорительной техники. Какой вариант

ускорителя будет принят в ядерной энергетике, покажет будущее, но начинать эту работу нужно уже сейчас.

Заключение

На различных этапах развития ядерной энергетике ускоренные пучки заряженных частиц рассматривались как возможное альтернативное решение возникающих проблем. В конце 40-х годов стояла задача срочной организации производства делящихся материалов в достаточном объеме. В 70-е годы представлялось, что ресурсы разделительных установок исчерпываются, а в реакторах на быстрых нейтронах время удвоения топлива слишком велико. Тем не менее они были менее дорогостоящими и продолжали развиваться.

Сейчас, когда вопросы безопасности ядерной энергетике являются определяющими, пучки заряженных частиц представляются единственным средством полного исключения НЦР в реакторах и предотвращения неконтролируемого распространения ядерного оружия. Решение этих насущных задач в первую очередь определится тем, как быстро и экономично ускорители из прибора для физических экспериментов трансформируются в надежную и мощную промышленную установку. ОИЯИ и ЦЕРН объединяют ученых востока и запада Европы, и, думается, что объединение их усилий обеспечит решение этой задачи.

Литература

1. Васильков В.Г., Гольданский В.И., Желепов В.П., Дмитриевский В.П. — АЭ, 1970, т.29, вып.3, с.152.
2. Carminati F., Klapisch R., Revol J.P., Roche Ch., Rubio J.A., Rubbia C. — «An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator». CERN/AT/93-47 (ET), 1993.
3. Давиденко В.А. — АЭ, 1970, т.29, вып.3, с.158.
4. Толстов К.Д. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1993, 5[62]-93, с.5.
5. Jameson R.A. — In: «LAMPF Proton Linac Performance». Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т.1, с.131.
6. Craddock M.K. — «Recent Development of the Triumph Meson Factory». Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1977, т.1, с.145.
7. Willax H.A., the SIN Staff. — «Status of the Ring Cyclotron Project of the Swiss Institute for Nuclear Research (SIN)». Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т.1, с.224.
8. Андреев А.Г. и др. — Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987, т.1, с.175.
9. Russel F.M. — Nucl. Instr. & Meth., 1963, v.23, p.229.
10. Blosser H.G. — «Characteristics of 400 Q^2/A MeV Superconducting Cyclotron». Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т.1, с.212.

11. Trinks U. — «Tritron Status». Report on XXIX European Cyclotron Progress Meeting, Dubna, June 20-23, 1994. To be published.
12. Trinks U. — «Exotic Cyclotrons — Future Cyclotron». Lecture Given at CERN Accelerator School at LaHuye. To be published, 1994.
13. Шелаев И.А. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1993, 5[62]-93, с.16.