

5285

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАДА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 5285



Р.Г. Васильков , В.И. Гольданский ,
В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ
НЕЙТРОНОВ И ПРОИЗВОДСТВО
РАСЩЕПЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

1970

Р9 - 5285

Р.Г. Васильков*, В.И. Гольданский**,
В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский

ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ
НЕЙТРОНОВ И ПРОИЗВОДСТВО
РАСЩЕПЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Направлено в АЭ

* Радиотехнический институт АН СССР

** Институт химической физики АН СССР

С самых общих позиций рассматривается возможность использования в ядерной энергетике нейтронов, испускаемых ядрами тяжелых элементов под действием протонов (дейтронов) высоких энергий. Дается краткий обзор соответствующих экспериментальных сведений об эмиссии нейтронов сильно возбужденными ядрами, их размножении в мишенях и обсуждаются некоторые известные варианты электроядерных установок, базирующихся на ускорителях с мощностями пучков порядка 100 Мвт. Кратко анализируются основные трудности, которые возникают при разработке высокопоточных ускорительных систем, способных обеспечить необходимые для электроядерного метода токи ускоренных частиц ($\approx 0,1$ а при энергиях ≈ 1 Гэв). Высказывается ряд соображений относительно характерных свойств подобных электроядерных установок, их возможной роли в науке и технике, а также их использования в комбинации с обычными ядерными реакторами, в частности, с быстрыми бридерами.

Summary

A possibility to apply the electronuclear method of free neutron production to nuclear power technology is considered from the most general standpoint. The method is based on the fact, that heavy atomic nuclei emit many neutrons when absorbing protons (deuterons) accelerated up to high energies. A brief review of the relevant experimental evidence, concerning neutron emission by highly excited nuclei and electron multiplication in targets, is given and some known designs of electronuclear facilities based on proton and or deuteron accelerators with beam powers up to 100 MW are discussed. There are briefly analyzed the main difficulties in developing high current accelerating systems, capable of providing currents sufficiently large (~ 0.1 A at energies of the order of 1 GeV) for the electronuclear method. A number of speculations about inherent features of such electronuclear reactors and or neutron generators is presented, their possible role for applied and scientific purposes as well as their use in conjunction with ordinary nuclear reactors (in particular fast breeders) are discussed.

Как известно, современная ядерная техника и различные ее приложения (производство ядерной электроэнергии, делящихся материалов, трития, основной массы коммерческих изотопов и т.д.) обязаны своим существованием наличию в природе сравнительно небольшого количества урана-235 ($\approx 0,7\%$ в естественной смеси изотопов урана). Ясно, что в условиях ограниченности ресурсов урана-235 создание реакторов-размножителей на быстрых нейтронах (для цикла $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$) и на тепловых нейтронах (для цикла $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$) в принципе позволило бы на многие годы решить проблему воспроизводства ядерного горючего, благодаря чему вклад ядерной электроэнергетики в общий баланс мировых энергоресурсов стал бы решающим. Однако экономичность подобных бридерных систем еще не доказана, а их разработка наталкивается на значительные трудности. В частности, не ясно, как обеспечить достаточно короткое время удвоения плутония (порядка 5-7 лет), необходимое для того, чтобы темпы развития ядерной энергетики смогли превзойти темпы развития энергетики обычной.

Воспроизводство в системе уран-торий оказывается еще более медленным (время удвоения порядка 20 лет). По этой причине, а также и потому, что бридеры как реакторы не универсальны, способность бридерных систем удовлетворить потребности в ядерном горючем по мере убывания сравнительно дешевого урана-235 в настоящее время не пред-

ставляется очевидной^{/1/}. Все это заставляет исследовать резервные возможности промышленного производства нейтронов.

Правомерно поставить вопрос: можно ли указать уже сейчас иные пути, на основе которых могла бы развиваться технология производства расщепляющихся материалов (ядерного горючего) в условиях быстрого иссякания запасов дешевого урана-235, если бридеры с временами удвоения в 5-7 лет создать не удастся?

В настоящее время известны две такие возможности. Одна из них - управляемый термоядерный синтез легких элементов - позволяет рассчитывать на использование освобождающихся в этом процессе нейтронов для целей воспроизводства ядерного горючего. Однако осуществление управляемого термоядерного синтеза связано с преодолением неразрешенных пока трудностей и поэтому невозможно предсказать определенно, когда будет достигнут решающий успех. С другой стороны, так как в этой области уже очень многое изучено и выяснено и интенсивно продолжаются работы, то здесь можно ожидать внезапного качественного скачка.

Вторая возможность промышленного производства нейтронов - ее обычно называют электроядерным (ЭЯ) методом или электрическим бридингом (когда речь идет о получении ядерного горючего) - представляет собой крупномасштабную реализацию реакций расщепления типа (p, xn) или (d, xn) , происходящих в среде при энергиях первичных ускоренных частиц 800-1000 Мэв, и последующего размножения нейтронов. В данной статье дается короткий обзор современного положения в исследовании этой второй возможности.

Вся совокупность имеющихся ныне сведений об испускании нейтронов сильно возбужденными ядрами и их каскадном размножении в тяжелых средах свидетельствует о том, что теоретические методы, развитые в работах^{/2-8/}, удовлетворительно согласуются с эксперимен-

тальными данными и, таким образом, адекватно описывают этот процесс. В рамках современных представлений реакции расщепления под действием нуклонов высоких энергий рассматриваются как двухстадийный процесс^{/2/}: на первой стадии влетающая в ядро частица взаимодействует с отдельными нуклонами ядра и вызывает развитие внутриядерного каскада. Сечения парных взаимодействий частиц каскада и их кинематика принимаются такими же, как и для свободных нуклонов, но с учётом движения нуклонов в ядре-мишени и принципа Паули. Результатом внутриядерного каскада является выбивание из ядра быстрых нуклонов и рождение мезонов, а также сильное возбуждение остаточного ядра. Второй этап процесса состоит в снятии этого возбуждения за счёт эмиссии (испарения) нуклонов, дейтронов и более сложных частиц, а также излучения гамма-квантов. Гольдбергер^{/3/} предложил проводить расчёт каскадного этапа взаимодействия методом Монте-Карло, который позволяет получить сечения поглощения исходных частиц ядром-мишенью, число и состав каскадных частиц (компонента выбивания), покинувших ядро, их угловые распределения и спектры, а кроме того, и распределение остаточных ядер по энергии возбуждения.

Выбитые из ядра каскадные частицы повторяют аналогичный процесс при более низких энергиях; при этом заряженные продукты быстро теряют свою энергию на ионизацию, а основной размножающейся компонентой оказываются нейтроны. В делящихся средах такая цепь ядерных реакций (размножение) включает также и деление ядер вещества мишени как нуклонами высоких энергий, так и под действием нейтронов спектра испарения (их средняя энергия составляет 2,2-2,5 Мэв) и деления. Размножение затухает по мере деградации энергии нейтронов и, в конечном счёте, сводится к рассеянию, замедлению и поглощению нейтронов (или их уходу из мишени). Определенный вклад в размножение нейтронов вносят также рождающиеся и поглощающиеся в мишени пи-мезоны.

Стадия испарения ядерных частиц описывается статистической моделью и также рассчитывается методом Монте-Карло. Первые детальные расчёты процессов внутриядерного каскада и последующего испарения были выполнены в работах ^{/4/} и ^{/5/} соответственно. В последние годы теоретические исследования испускания нейтронов возбужденными ядрами проводились в Лаборатории теоретической физики ОИЯИ ^{/8-9/}.

Таким образом, идея ЭЯ метода подразумевает использование мощного пучка ускоренных до высокой энергии заряженных частиц для бомбардировки достаточно протяженных массивных мишеней (Pb , Bi , Th , U), в результате которой вследствие размножения возникают мощные источники нейтронов - порядка 10^{19} /сек при токах протонов порядка 100 ма. Дальнейшая судьба нейтронов зависит от свойств вещества мишени. В уране (^{238}U) и тории (^{232}Th), например, нейтроны с энергиями ниже порога деления будут по мере замедления захватываться ядрами, давая в итоге соответственно ^{239}Pu и ^{233}U ; свинцовая же (или висмутовая) мишень практически не будет поглощать медленные нейтроны. Поэтому в зависимости от назначения ЭЯ установка (комбинация сильноточного ускорителя с мишенью-реактором) могла бы работать как а) конвертор обедненного изотопом 235 урана (отвал диффузионных заводов) в ^{239}Pu и природного тория в ^{233}U ; б) производитель радиоактивных изотопов, в частности, трития; в) генератор тепловых нейтронов с плотностями потока примерно на порядок больше, чем в самых современных высокопоточных реакторах (типа CM , $HFIR$, A^2R^2), т.е. более 10^{16} н/сек.см². Такие потоки, как известно, позволяют рассчитывать также на получение макроскопических количеств ряда трансурановых элементов.

Привлекательность ЭЯ метода получения ядерного горючего объясняется, главным образом, большим количеством свободных нейтронов,

которые не нужны для поддержания реактора в критическом состоянии и могут поэтому использоваться для переработки уранового и ториевого сырья в делящиеся материалы.

О том, что при взаимодействии частиц высокой энергии с тяжелыми ядрами наряду с делением этих ядер происходит предшествующее ему испускание большого числа нейтронов, можно было судить уже по виду массовых спектров осколков подобного "эмиссионного деления" (см. обзор^{/10/}). Такого рода процессы были открыты в 1948 г. практически сразу же после запуска ускорителей, позволявших осуществлять реакции расщепления. Их важность для прикладных целей была независимо отмечена Н.Н. Семеновым^{/11/} в СССР, Э. Лоуренсом^{/12/} в США и В.Б. Льюисом^{/13/} в Канаде. Первые опыты по генерации вторичных нейтронов под действием ускоренных частиц были выполнены в 1948-1949 г. Э. Лоуренсом на его циклотроне в Беркли, а затем его сотрудниками на чикагском синхроциклотроне. В СССР независимо от американских исследований впервые прямые наблюдения по испусканию вторичных нейтронов при бомбардировке разных ядер нейтронами высоких энергий были сделаны в 1950-1951 г.г. на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем в Дубне^{/14,15/} (нейтроны со средними энергиями 120 и 380 Мэв)^{x/}. Изучению в подобных опытах подлежало как образование нейтронов в первичных актах взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами от бериллия до урана, так и последующее дополнительное размножение за счёт различных вторичных взаимодействий в толстых мишенях. В частности, в опытах^{/14/} было показано, что при бомбардировке блока естественного урана (куб с ребром 25 см)

x/ Результаты советских и американских экспериментов впервые докладывались и обсуждались во время Гордоновской конференции по ядерной химии^{/16/} (США, июнь 1957).

нейтронами с энергией 120 и 380 Мэв испускается, соответственно, $18 \pm 1,8$ и $29,7 \pm 3,1$ нейтронов в расчёте на один первичный нейтрон высокой энергии. Для свинца соответствующие цифры оказались равными $8 \pm 0,8$ и $16,2 \pm 2,5$. В работе ^{/17/} приведена кривая выхода плутония-239 в квазибесконечной мишени (из обедненного урана), бомбардируемой ускоренными дейтронами от 100 до 1000 Мэв, причем выход при энергии 700 Мэв составляет 65 ядер на дейтрон. Результаты всех упомянутых опытов дали впоследствии необходимые исходные цифры для оценок возможностей и перспективности электроядерного метода.

На основе полученных экспериментальных данных в США была разработана программа МТА (Material Testing Accelerator) – проект ЭЯ реактора на базе сильноточного ускорителя дейтронов (ток 320 ма, энергия 500 Мэв). Годовая производительность (300 суток) такого реактора должна была составлять 576 кг плутония-239 (из обедненного урана) при себестоимости 124 доллара за грамм ^{/17,18/}.

Практически все американские работы по программе МТА были сосредоточены в Калифорнии: в Радиационной лаборатории, получившей позднее имя Лоуренса, в Беркли и Ливерморе, а также в лабораториях корпорации CRDC (Californian Research Development Corporation). В 1952 г. в Ливерморе был пущен экспериментальный линейный ускоритель дейтронов Марк-1 (энергия 30 Мэв, ток в импульсе 250 ма ^{/19/}). Затем в рамках этой же программы были построены ускоритель Марк-II и циклотрон с азимутальной вариацией поля Марк-III ^{/20/}. Большой объем работ был выполнен также по нейтронным характеристикам реальных мишеней, теплоносителям, изотопному составу продуктов и т.д. К 1954 г. проектная и научно-исследовательская часть программы МТА была закончена созданием проекта плутониевого завода ^{/17/}.

Этот проект (рассекреченный в 1957 году) предусматривал также возможность производства урана-233 из тория, и, вероятно, производство трития. О дальнейшей судьбе программы электрического бридинга в США известно очень мало.

В 1964 г. большая группа канадских физиков представила принципиальные соображения^{/21/} относительно интенсивного нейтронного генератора (ИНГ) на базе протонного ускорителя (энергия протонов 1 Гэв, ток 65 ма), а в 1966 г. - эскизный проект такой установки^{/22/}. Согласно их расчётам комбинация такого ускорителя (в работе^{/22/} рассматривался циклотрон с разделенными орбитами "SOC", а в более поздней версии^{/23/} был предложен линейный ускоритель с жидкометаллической свинцово-висмутовой мишенью и подкритической сборкой) позволит получать около 1,1 кг урана-233 в сутки; при замене подкритической сборки тяжеловодным замедлителем (около $15 \text{ м}^3 \text{ D}_2\text{O}$) ИНГ сможет создавать потоки тепловых нейтронов не менее $10^{16} / \text{сек.см}^2$.

Как уже говорилось выше, ЭЯ метод использует для генерации нейтронов реакции расщепления, при которых нейтроны "испаряются" сильно возбужденными ядрами. Упомянувшиеся советские и американские опыты по изучению эмиссии вторичных нейтронов из ядер (в элементарном акте взаимодействия), бомбардируемых различными частицами (p, d, n, ^3He), проводились, в основном, при энергиях не выше 350-400 Мэв^{/15,24/}. Начиная с 1960-1961 г.г. советскими, американскими и канадскими физиками аналогичные опыты выполнялись и при более высоких энергиях протонов^{/25-29/}. В работе^{/25/} измерялись выходы вторичных нейтронов под действием протонов космических лучей. В экспериментах^{/27/}, выполненных на синхроциклотроне на 680 Мэв Лаборатории ядерных проблем в Дубне, методом замедления были определены выходы вторичных нейтронов для ядер десяти элементов - от Be до U - при энергиях бомбардирующих протонов 400, 500

и 660 Мэв. Эти опыты показали, что при поглощении протона с энергией $E_p = 660$ Мэв ядром урана, например, испускается $16,9 \pm 1,5$ нейтронов с энергиями не выше 15 Мэв. Для свинца (висмута) соответствующая величина составляет $11,9 \pm 1,0$ нейтрон.

В работах ^{/25,26,28-30/} измерялись выходы нейтронов также и для толстых мишеней (несколько ядерных пробегов); кроме того, в опытах ^{/29,30/} определялись потоки тепловых нейтронов (в расчёте на один первичный протон), возникающие в воде, которой окружались бомбардируемые протонами мишени. Результаты опытов ^{/30/} показывают, что свинцовая мишень длиной 55 см и диаметром 15 см испускает $12,8 \pm 1,3$ нейтрона при поглощении протона с энергией 660 Мэв. Совпадающие с этими данными величины получены в совместной работе физиков Чок-Ривера и Окриджа ^{/29/}, но в более широкой области энергий протонов (опыты выполнялись на брукгейвенском синхротроне).

Вычисления нейтронных выходов из протяженных мишеней проводились уже в рамках программы МТА ^{/17/}, для которой методом Монте-Карло были рассчитаны выходы плутония-239 в квазибесконечных мишенях из обедненного урана, бомбардируемых дейтронами с энергией 100-1000 Мэв. При этом учитывалось влияние теплоносителя и конструктивных материалов. В работе ^{/7/} были вычислены нейтронные выходы для 60-сантиметровых мишеней (диаметр 10 см) из Рь, Вi, Th и U; результаты этих расчётов согласуются с экспериментальными данными ^{/29,30/} и расчётами Бертини ^{/6/}. Авторы работы ^{/7/} отмечают, что их программа позволяет рассчитывать размножение нейтронов в мишенях любой конфигурации.

При надлежащем выборе материала и конфигурации мишени, а также энергии и типа первичной частицы приведенные выше цифры позволяют рассчитывать на получение мощных источников нейтронов, ибо уже число испускаемых тяжелыми ядрами нейтронов одного только первого поко-

ления в 10–20 раз (в зависимости от элемента) превосходит ток бомбардирующих частиц, причем этот множитель определяет нижний предел. Таким образом, даже без учёта нейтронов следующих поколений при энергии протонов 660 Мэв и их токе 100 ма на тяжелой мишени можно создать нейтронный источник мощностью $\approx 10^{19}$ /сек, т.е. как в реакторе тепловой мощностью в несколько сотен Мвт, но в гораздо меньшем объеме.

Генерация нейтронов в реакциях расщепления сопровождается существенно меньшим энерговыделением (в расчёте на один свободный нейтрон) по сравнению с другими процессами, в которых образуются свободные нейтроны (исключая реакции синтеза ядер водорода). По данным работы ^{31/} образование одного свободного нейтрона при расщеплении ядра Рb протоном с энергией 1 Гэв сопровождается выделением в мишени энергии 23 Мэв, тогда как в реакторах на быстрых нейтронах, например, соответствующая величина составляет ≈ 140 Мэв. Вопросы энерговыделения очень существенны при создании нейтронных потоков высокой плотности, максимальная величина которых ограничивается, как известно, возможностями теплоотвода, т.е. удельным энерговыделением в активной зоне. Оценки показывают, что при одинаковом уровне теплонапряженности потоки тепловых нейтронов в случае ЭЯ установки могут быть в 6–7 раз выше, чем в обычных ядерных реакторах.

Ясно, что затраты энергии на получение одного свободного нейтрона ЭЯ методом следует минимизировать. Для этого нужна такая кинетическая энергия первичной частицы, при которой ее ионизационный пробег λ_u в веществе мишени был бы существенно меньше ее пробега λ относительно ядерного поглощения в той же среде. При выполнении этого условия большая часть начальной энергии пойдет на возбуждение ядра и, следовательно, на образование нейтронов. Для

таких веществ, как Рь (Bi) , Th , U , условие $\lambda_u > \lambda$ начина-
ет выполняться лишь при энергиях протонов выше 400-450 Мэв. По-
скольку же с ростом энергии ионизационные потери убывают в этой
области энергий достаточно быстро, естественно увеличивать началь-
ную энергию до некоторой оптимальной величины (примерно равной энер-
гии массы покоя налетающей частицы, т.е. ≈ 1 Гэв для протонов).
Из-за того, что выход нейтронов монотонно возрастает с энерги-
ей /25,27,29,30/ , а удельные тормозные потери убывают /32/ вплоть
до области 1 - 1,5 Гэв энергетическая стоимость свободного нейтро-
на также убывает.

На величину нейтронного выхода влияет, конечно, и выбор бом-
бардирующих частиц, однако до сих пор окончательно не выяснено,
насколько этот выход увеличится при переходе от протонов к дейтронам.
В работах по программе МТА /17,24/ этот эффект измерялся экспери-
ментально и его величина составляла 20-25%; такое же значение было
получено и в расчётах. Однако согласно более поздним оценкам /22/ ,
увеличение выхода составляет всего 9% при энергии 1 Гэв. Как видно,
различие указанных оценок довольно велико, и понадобятся специальные
опыты для того, чтобы можно было с уверенностью судить о величине
этого эффекта. Возможно, что переход к еще более тяжелым ускорен-
ным частицам (ядрам с энергией порядка 1 Гэв/нуклон) приведет
к некоторому дополнительному к увеличению размножения. Однако зна-
чение этого фактора не следует преувеличивать, так как увеличение
стоимости ускорителя по мере перехода к более тяжелым частицам
может существенно превзойти эффект от возрастания выхода нейтронов.

Достигнутый за последние годы прогресс в разработке ускорителей
с большими токами вновь вызвал интерес к идее электрического бри-
динга. Здесь уместно сослаться на мнение таких авторитетов в обла-
сти ядерной энергетики как А. Вайнберг /33/ и В.Б. Льюис /34/ . В об-

зорном докладе А.П. Александрова ^{/1/} на седьмом конгрессе мировой энергетической конференции 20-24 августа 1968 г. электроядерный метод также отмечается как одна из наиболее вероятных резервных возможностей, которая может использоваться, если возникнут очень большие сложности в получении достаточно коротких времен удвоения плутония в реакторах на быстрых нейтронах.

В работах ^{/22,34/} рассматривается еще одна интересная возможность ЭЯ метода. Авторы этих работ считают, что комбинация ЭЯ установок с мощными быстрыми реакторами может оказаться достаточно экономичной системой, производящей электроэнергию и ядерное горючее. При этом ЭЯ часть такой системы становится в какой-то мере аналогом очень дорогостоящих диффузионных заводов, на которых делящийся материал отделяется от сырья (уран-238), не используемого, однако, в существующей схеме производства ядерного горючего. Использование же ускорителя дает возможность переработать это сырье в ядерное горючее.

Созданный на базе сильноточного ускорителя тяжелых заряженных частиц ЭЯ реактор мог бы, по-видимому, конкурировать с бридерами благодаря целому ряду достоинств. Действительно, для такого реактора не нужна стартовая загрузка и не существует никакого периода удвоения. Он может генерировать нейтроны в любом тяжелом веществе вне зависимости от способности последнего к делению. Понятие критичности утрачивает смысл для подобного рода установки, она не может "разогнаться". В силу свойств реакций расщепления при высоких энергиях тепловыделение в мишени ЭЯ реактора значительно меньше, чем в обычном ядерном реакторе (при равном количестве свободных нейтронов в системе). ЭЯ реактор отличается высоким темпом наработки: порядка 1 кг (плутония-239, урана-233 на тонну отвала, природного тория) в сутки при токе протонов 100 ма и энергии 1 Гэв при максимально допустимой примеси плутония-240 или урана-232 (4% и $0,5 \cdot 10^{-4}\%$ соответственно ^{/17/}).

Кроме того, устраняются характерные для быстрых реакторов сложные проблемы регулирования (натриевый коэффициент, доплер-эффект, ксеноновые волны и т.д.), ибо ЭЯ реактор является системой с внешним возбуждением, т.е. динамически более устойчивой.

Сооружение ЭЯ реактора позволит не только обеспечить переработку ядерного сырья в ядерное горючее, но также и крупномасштабное производство различных изотопов, получение которых на обычных реакторах обходится очень дорого. Дело в том, что при облучении больших количеств материалов с большим сечением поглощения нейтронов в мультиплирующей среде существенно уменьшается нейтронная производительность и, как следствие этого, меняется режим работы ядерного реактора. В этом аспекте ЭЯ установка также обладает преимуществом, особенно если в ней используются мишени с малыми коэффициентами размножения, что существенно, например, при производстве трития или трансплутониевых элементов. Кроме того, возможна эффективная регенерация энергии, затрачиваемой на ускорение первичных частиц.

Прогресс в физике и технике ускорителей будет перманентно приводить к улучшению экономических показателей ЭЯ метода, ибо КПД ускорителя и его технические показатели практически полностью определяют экономику и надежность ЭЯ реактора. Оценки показывают ^{/22/}, что при эффективности преобразования электрической энергии в кинетическую энергию бомбардирующих частиц, равной 50%, ускоритель обеспечивает себестоимость вырабатываемых из тория и отвалного урана делящихся материалов, сравнимую с себестоимостью этих же материалов, получаемых в лучших, отработанных до совершенства тепловых ядерных реакторах ^{/34/}. Увеличение эффективности (КПД) до 90% ^{/35/} позволит понизить существующую себестоимость делящихся материалов примерно вдвое (с полным учетом сырьевого, металлургического, металлообрабатывающего и химического циклов). Однако инженерная разработка

мишеней ЭЯ установок потребует проведения широкого круга теоретических и экспериментальных исследований по определению и уточнению целого ряда ядерных констант, по выяснению оптимальных условий работы таких мишеней при необходимом высоком КПД ЭЯ установки.

Все обсуждавшиеся результаты исследований по размножению нейтронов в различных средах были получены на ускорителях, интенсивности пучков заряженных частиц от которых не превышали нескольких микроампер при мощности в пучках 1-2 квт. Для практического использования ЭЯ метода, как указывалось, необходимы токи, близкие к 100 миллиамперам. Мощности пучков в этом случае будут достигать сотен мегаватт. Большие токи и мощности пучков существенно ограничивают класс ускорительных установок, которые могут быть использованы для этих целей. В этой связи среди известных в настоящее время ускорителей можно рассматривать только два типа - релятивистские кольцевые циклотроны и линейные ускорители.

Первые обеспечивают непрерывный пучок со средними интенсивностями до 1 миллиампера, но для получения ускоряемых пучков с плотностью заряда, соответствующей интенсивности, близкой к 100 ма, требуются дополнительные исследования по увеличению жесткости фокусировки магнитных систем. Вторые пропускают импульсные токи указанной величины, однако "полезная доля" времени работы этих ускорителей (duty cycle) не превышает пока нескольких процентов, что связано с ограничениями, которые накладывают максимальные мощности генераторных ламп, возбуждающих резонаторы линейного ускорителя. Подобная проблема существует и для генераторов высокочастотных систем циклотронов, но в другой области частотного диапазона.

В настоящее время эти сложные проблемы ускорительной техники успешно решаются. В Советском Союзе в ОИЯИ в 1968 г. запущена кольцевая электронная модель изохронного протонного циклотрона на

энергию 1 Гэв, на которой показана возможность совмещения изохронизма движения частиц с необходимой жесткой фокусировкой для токов частиц порядка 100 ма ^{/36/}. В США ведутся работы по циклотрону с разделенными орбитами ^{/37/} (Ок-Ридж) и сооружается сильноточный линейный ускоритель на средний ток 1 миллиампер (Лос-Аламос) ^{/38/}, ряд основных технических решений которого используется в проекте канадского линейного ускорителя на 65 ма ^{/23/}, предназначенного для генерации мощных нейтронных потоков ЭЯ методом.

Рассматривая принципиальную возможность создания ускорителя для ЭЯ метода, следует упомянуть также индукционный метод ускорения и метод, базирующийся на коллективных эффектах. Однако как теоретические, так и инженерные проблемы, возникающие при разработке таких ускорителей, находятся еще в начальной стадии. Это не позволяет в настоящее время сделать сколько-нибудь определенные выводы о возможности практического их использования для создания ЭЯ ускорителя и лишь дальнейшие исследования и разработки дадут ответ на этот вопрос.

Следует подчеркнуть, что несмотря на безусловные успехи ускорительной техники задача создания ускорителя для осуществления ЭЯ метода получения ядерного горючего является очень сложной. Отметим здесь главные проблемы.

Одним из важных требований, предъявляемых к ускорителю для ЭЯ метода, является получение высокого коэффициента полезного действия преобразования электрической энергии в энергию ускоренного пучка заряженных частиц. Решение этой проблемы в условиях использования линейных и циклических ускорителей имеет свои особенности. Так, большие импульсные потери мощности (38 Мвт), получавшиеся в резонаторах линейного ускорителя Лос-Аламоса, привели канадских ученых к необходимости рассматривать удлиненный вариант линейного ускорителя со значительно сниженным (в два раза) набором энергии на погонном метре длины.

Так как мощность потерь пропорциональна квадрату амплитуды ускоряющего напряжения, то указанным путем в канадском проекте /23/ удастся снизить эту мощность до 26 Мвт при работе ускорителя в непрерывном режиме.

Однако и такая величина потерь не является очень обнадеживающей. В этой связи уже высказано несколько предложений. Так, например, в работах /35,34/ для снижения мощности потерь предлагается объединить высокочастотный генератор с ускоряющими полостями ускорителя и непосредственно возбуждать резонирующие полости электронным пучком. По оценке авторов, это приведет к существенному увеличению коэффициента полезного действия.

Имеющиеся в настоящее время данные указывают на то, что при использовании циклического ускорителя для ЭЯ метода можно получить высокую эффективность преобразования высокочастотной мощности в мощность пучка. Это связано, в основном, с тем, что амплитуда ускоряющего напряжения в таком случае может быть существенно снижена за счет многократного прохождения пучком ускоряющего промежутка. Уменьшение амплитуды приводит к снижению потерь и увеличению КПД по высокой частоте. Оценки показывают, что эти потери могут быть снижены до уровня меньше одного мегаватта. При этом следует отметить, однако, что в настоящее время еще недостаточно изучены системы, у которых нагрузка пучком в сотни раз превышает мощности омических потерь. Не решена еще также очень важная для случая циклического ускорителя задача обеспечения условий высокоэффективного (практически стопроцентного) вывода пучка из камеры ускорителя.

При проектировании ускорителя для ЭЯ метода возникает еще одна фундаментальная проблема, которая связана с величиной и распределением по энергии потерь пучка в процессе ускорения. Уровень

интенсивности действующих в настоящее время установок "разрешает" терять заметный процент тока пучка в процессе ускорения без существенных трудностей для эксплуатации ускорителя, обусловленных навешенной радиоактивностью на отдельных его узлах. Однако положение резко меняется для ЭЯ ускорителя, ибо в этом случае величина потерь пучка даже в один процент создает чрезмерно высокий для эксплуатации уровень активации, а если эти потери (мощность порядка мегаватта) будут локализованы на малом участке, они могут привести к его разрушению и выходу ускорителя из строя. По этой же причине использование сверхпроводящих резонаторных систем, которые практически полностью снимают проблему омических потерь, окажется возможным только после отыскания путей для создания ускорителя с очень малыми потерями пучка в процессе ускорения. Эта трудность в одинаковой степени актуальна как для линейных, так и для циклических ускорителей.

При создании рассматриваемых в этой статье по своей сути уже промышленных ускорительных установок с мощностями пучков в сотни мегаватт потребуется решить много и других очень сложных инженерных проблем: к ним относятся, например, создание высокоинтенсивных инжекторов, радиационной защиты, манипуляционных устройств для эксплуатации ЭЯ ускорителя и др.

Здесь следует заметить, что ускорители с высоким КПД и большими мощностями в пучках представляют также вполне самостоятельный интерес в качестве инструмента исследований как чисто ядерно-физических (эксперименты на интенсивных пучках различных адронов, лептонов и распадных фотонов), так и широкого круга прикладных (материаловедение, радиобиология, радиотерапия, производство радиоизотопов, которые не могут быть получены на обычных ядерных реакторах, и т.д.).

Однако достигнутые в последние годы успехи в сооружении мощных ускорителей, а также обозначившиеся пути дальнейшего прогресса в этой области позволяют считать, что все отмеченные выше проблемы могут быть успешно решены, если будет признана необходимость реализации электроядерного метода генерации нейтронов и производства расщепляющихся материалов, и исследовательским и инженерным работам в этой области будет придан соответствующий размах.

Л и т е р а т у р а

1. А.П. Александров, АЭ, 25, №5, 356 (1968).
2. R. Serber. Phys. Rev., 72, 1114 (1947).
3. M.R. Goldberger. Phys. Rev., 74, 1268 (1948).
4. N. Metropolis, R. Bivins, M. Storm, A. Turkevich, J.M. Miller, F. Friedlander. Phys. Rev., 110, 185, 204 (1958).
5. I. Dostrovsky, P. Rabinovitz, R. Bivins. Phys. Rev., 111, 1659 (1958).
6. H.W. Bertini. ORNL-3383 (1963).
7. J.C.D. Milton, J.S. Frasser. AECL-2259 (1965).
8. В. Барашенков, В. Мальцев, В. Тонеев. Изв. АН СССР, сер-физ. т. XXX, 2, 232 (1966).
9. В. Барашенков, К. Гудима, В. Тонеев. Препринт ОИЯИ P2-4346 (1969). P2-4402 (1969).
10. В.И. Гольданский, УФН, 40, 233 (1950).
11. Н.Н. Семенов, И.Л. Зельманов, А.С. Компанец, Б.М. Степанов, Б.К. Шембель. Proc. of CERN Symposium on High Energy Particle Accelerators and Pion Physics, Geneva, 1956, v.1, p. 207.
12. См., например , UCRL-2063 (1953), UCRL-4931 (1957).

13. W. B. Lewis, AECL-2177 (Introduction), 1966, DR-23 (1952).
14. В.И. Гольданский и др. Phys. Rev., 109, 1762 (1958).
15. V. I. Goldansky, A.F. Ignatenko, A.I. Mukhin, V.S. Pen'kina, V.A. Shkoda-Ulyanov. Phys. Rev., 109, 1762 (1958).
16. В.И. Гольданский, УФН, XIII, 847 (1957).
17. LRL-102 (1954).
18. Patent of USA, No 2, 933, 442 (1960).
19. LRL-96 (1953).
20. E.O. Lawrence, Science 122, 1227-32 (1955).
21. AECL-2059 (1964).
22. AECL-2600 (1966).
23. AECL-2750 (1967).
24. W. Crandall and G. Mullburn, J. Appl. Phys., 29, 698 (1958).
см. также UCRL-1648, UCRL-2705, UCRL-2706.
25. M. Berkovitz, H. Carmichael, G.C. Hanna, E.P. Hinks, Phys. Rev., 117, 412 (1960).
26. J.W. Meadows, J.F. Whalen, A.B. Smith, 11, vol. 9, No 4, p. 460, Gc1 (1964).
27. Р.Г. Васильков, Б.Б. Говорков, В.И. Гольданский, В.А. Коньшин, О.С. Лупандин, Е.С. Матусевич, Б.А. Пименов, С.С. Прохоров, С.Г. Цыпин, ЯФ, т. 7, № 1, 88 (1968).
28. J.W. Meadows, G.R. Ringo, A.B. Smith, Nucl. Instr. Meth., 25, 349 (1964).
29. J.S. Fraser, G.R. Green, J.W. Hilborn, J.C.D. Milton and W.A. Ginson, E.E. Cross, A. Zucker (ORNL), Phys. in Canada, 21(2) 17 (1965).
30. Р.Г. Васильков, В.И. Гольданский, Я.С. Гришкевич, О.С. Лупандин, Б.А. Пименов. АЭ, т. 25, № 6, 479 (1968).
31. AECL-2229 (1965).

32. R.M. Sternheimer, Phys. Rev., 115, 137 (1957).
33. A.M. Weinberg, Proc. of Int. Conf. on Isochronous Cyclotrons, Opening Remarks, Gatlinburg, Tennessee, USA, 1966.
34. W.B. Lewis. AECL-3190. (1968).
35. F.M. Russel. Supersoc. British Patent Applied for 1967.
36. В.Н. Аносов, А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.И. Замолотчиков. АЭ, т. 25, № 6, 539 (1968).
37. F.M. Rusel, ORNL-3431 (1964).
38. L. Rosen. Proc. of the Sixth Int. Conf. on High Energy Accel. 2337, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел

23 июля 1970 года.

Васильков Р.Г., Гольданский В.И., Дзепелов В.П.,
Дмитриевский В.П.

P9-5285

Электроядерный метод генерации нейтронов и производство
расщепляющихся материалов

См. аннотацию на обороте титула.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1970**

Vasilkov R.G., Goldanskii V.I., Dzelepov V.P.,
Dmitrievskii V.P.

P9-5285

Electronuclear Method of Neutron Generation and
Fissile Material Production

See the Summary on the reverse side of the title-page.

**Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1970**