

УДК 621.384.64

УСКОРИТЕЛИ-ДРАЙВЕРЫ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

А. М. Козодаев, Н. В. Лазарев, О. В. Шведов

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Рассматриваются возможные пути решения некоторых проблем создания высокомошных ускорителей-драйверов электроядерных установок. Анализируется состояние дел по сооружению таких ускорителей.

Some possible problems of constructing the high-power accelerators-drivers of electronuclear facilities are considered. The current state of constructing such accelerators is analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестен стремительный рост потребления человечеством энергетических ресурсов планеты. Использование энергоресурсов увеличивается примерно по экспоненциальному закону с ростом 5 % в год. Большая часть потребляемой энергии производится за счет сжигания топлива, образовавшегося в предыдущие эпохи благодаря биологическим процессам (уголь, нефть, газ). Это приближает момент исчерпания естественных запасов топлива, лишает промышленность уникального сырья, приводит к разбалансу кругооборота веществ в биосфере и росту энтропии Земли. Специалисты признают, что энергетика на органическом топливе не имеет долгосрочной перспективы.

Ядерная энергетика почти не ограничена минеральными ресурсами, а теплотворная способность ее топлива, например U-235, в $3 \cdot 10^6$ раз выше теплотворности условного органического топлива [1]. В ряде стран значительная часть электроэнергии производится на атомных электростанциях. Во Франции, например, — 75 %, в России — 15 %.

Однако две грозные проблемы ядерной энергетике на сегодня не могут считаться удовлетворительно решенными. Первая — накопление радиоактивных отходов, период полураспада которых составляет тысячи-миллионы лет, и отсутствие гарантированно надежной их изоляции от биосферы планеты. Капитальным решением проблемы может быть уничтожение таких отходов вообще или переработка их в радионуклиды с относительно небольшим периодом полураспада. Вторая — обеспечение высокой степени безопасности атомных станций, снижение риска ядерной аварии до приемлемой величины 10^{-6} событий в год [1].

Ведется активная работа по поиску и обоснованию решений этих проблем. По мнению специалистов, первая из них может быть решена путем пережигания отходов в быстрых реакторах [2], вторая — путем использования обратных связей реактора, что может сделать возможным создание реактора с внутренне присущей безопасностью [3]. Однако обе эти задачи могут решаться на электроядерных установках (ЭЛЯУ), в английской интерпретации — accelerator driven system (ADS).

1. ЭЛЕКТРОЯДЕРНАЯ СИСТЕМА

Почти 5 десятилетий обсуждаются возможности электроядерного способа решения названных проблем [4], когда подкритическая сборка реактора управляется потоком нейтронов, рождающихся в тяжелой мишени при бомбардировании ее ускоренными заряженными частицами. Наибольшее отношение количества выбиваемых из мишени нейтронов к энергии одного налетающего протона (n/W_p) равно примерно 20, что имеет место при энергии 2–3 ГэВ (рис. 1, [5]). Достаточно высок выход нейтронов и при энергии протонов ~ 1 ГэВ, которая вызывает наибольший интерес из-за меньшей стоимости ускорителя-драйвера.

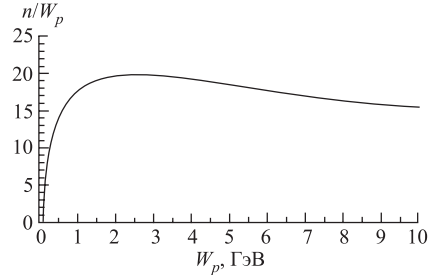


Рис. 1. Зависимость n/W_p от W_p

Гибридная система строится на базе двух разнородных установок — ускорителя заряженных частиц и ядерного реактора. Функционально ее можно разделить на три блока: ускоритель, мишень и бланкет. К сожалению, каждый из этих блоков имеет свой набор весьма непростых физических и технических задач, решение которых, тем не менее, на сегодня представляется возможным [6].

2. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ-ДРАЙВЕРА

Помимо протонов в качестве воздействующих на мишень ускоренных частиц иногда рассматривают H^- , d^+ , H_2^+ . Однако кроме некоторых специфических выгод пучки таких частиц вызывают определенные неудобства. Они или требуют более глубокой вакуумной откачки (H^-), или дают повышенный уровень радиации (d^+). Кроме того, несравненно более освоенными (с позиции получения больших токов и приемлемой надежности) являются источники протонов, чем других заряженных частиц водородной группы. Имеется определенный интерес к использованию более тяжелых ионов, которые мы оставим за рамками настоящего обсуждения. В большинстве проектов сильноточных ускорителей-драйверов ставка делается на ускорение протонного пучка.

Разумное значение энергии протонов лежит в пределах $W_p = 0,6–2$ ГэВ. Ток пучка более 100 мА мог потребоваться для вне реакторной наработки трития, актуальность которой к сегодняшнему дню резко упала. Требования к величине тока пучка ЭЛЯУ промышленного назначения также сильно менялись. Десятилетие тому назад считалось, что для целей трансмутации необходимо иметь 300 мА [7], в настоящее время планка понижена до 30–50 мА. Для демонстрационных ЭЛЯУ, очевидно, достаточен ток 1–5 мА. Тестовые установки, естественно, могут иметь значительно меньшие энергии и токи ускоренного пучка, что определяется решаемыми на них экспериментальными задачами.

1. При обращении к проблемам драйвера первым возникает вопрос: каким должен быть ускоритель, линейным или кольцевым? Ряд специалистов считают вопрос совершенно ясным и не требующим обсуждения. Однако их мнения зачастую продиктованы больше имеющимся лично у них опытом и чувством «патриотизма», чем объективными оценками.

2. Как известно, реакторы «не любят» самопроизвольных скачков потока нейтронов и теплового режима. А в ЭЛЯУ для трансмутации при работе ускорителя на высокотемпературную мишень допустимо иметь всего лишь несколько неподготовленных остановок в год [8]. Поэтому особую остроту приобретает проблема надежности работы драйвера.

3. Ускорение больших токов (50 мА) до энергии 1 ГэВ чревато высокой активацией ускорителя и невозможностью его ручного обслуживания, если не принять эффективных мер к снижению потерь частиц и понижению уровня радиации.

4. Огромная мощность ускоренного пучка (50 МВт!) по соображениям экономичности требует всемерного повышения КПД ускорителя.

5. Наконец, весьма серьезно стоит вопрос стоимости высокомошного ускорителя. Некоторые данные приведены в табл. 1. Как видно, оценки условной стоимости 1 МВт пучка разнятся более, чем на порядок. Причем суммы по проекту SNS, очевидно, недалеки от реальных, поскольку проект находится на высокой стадии продвижения. Столь высокая стоимость, с одной стороны, сдерживает сооружение сильноточных ускорителей (и полномасштабных ЭЛЯУ в целом), а с другой — показывает необходимость предварительных детальных исследований и апробации физико-технических решений на экспериментальных маломощных относительно недорогих ЭЛЯУ.

Таблица 1. **Оценки стоимости некоторых мощных линейных ускорителей**

Проект	Вид затрат на ускоритель-драйвер, параметры пучка. Стоимость 1 МВт пучка без эксплуатационных расходов	Сумма	Источник
АРТ	Капитальные затраты на ускоритель (1,7 ГэВ; 100 мА; 170 МВт)	2235 млн долл. США	[9]
	Стоимость 1 МВт пучка	13 млн долл. США	
Отвлеченная оценка	Стоимость исследований, разработки и сооружения ускорителя на 1 ГэВ; 20 мА; 20 МВт	300 млн евро	[10]
	Стоимость 1 МВт пучка	15 млн евро	
EURISOL	Стоимость одних компонентов ускорителя (1 ГэВ; 5 мА; 5 МВт) без затрат на сооружение ускорителя	120 млн евро	[11]
	Стоимость 1 МВт пучка	24 млн евро	
SNS	Стоимость сооружения ускорителя (1 ГэВ; 2 мА; 2 МВт)	300 млн долл. США	[12]
	Стоимость 1 МВт пучка	150 млн долл. США	

3. КОЛЬЦЕВОЙ ИЛИ ЛИНЕЙНЫЙ ДРАЙВЕР?

Соревнование между кольцевыми и линейными ускорителями в рассматриваемой области приобретает, очевидно, все более острый характер.

Основное привлекательное качество циклических ускорителей — многократное использование ускоряющего поля и, как следствие, их компактность и меньшая стоимость. Однако компактность определяет большую локализацию тепловыделений и радиационного фона, осложненность ремонта. Не является легко решаемым вопрос минимизации потерь частиц при выводе большой величины пучка с круговой орбиты. К. Руббин в своем проекте усилителя энергии [13] сначала предполагал получить от циклотрона предельный ток 10–12,5 мА, а затем решил, что линейный ускоритель проще справится с этой задачей и заменил в проекте драйвер с использованием циклотронов на драйвер-лиаки. Однако изучение положительных эффектов от разделения орбит, многопучковости, использования сверхпроводящих магнитов, многоступенчатости и новых предложений по перезарядке и экстракции пучка [14–18] позволило обосновать принципиальную возможность получения от циклотронных комплексов пучков с мощностью до 10 МВт при энергии 1 ГэВ и токе 10 мА.

Достоинства, как и недостатки линейных ускорителей, определяются прямолинейностью тракта движения пучка. Их верхняя граница по энергии определяется только длиной машины, а по току лежит много выше 100 мА. Еще большему повышению возможных токов может способствовать освоение многопучковости. Эффективность лиака растет с увеличением тока пучка. Прямолинейность тракта ускорения и вывода частиц позволяет сократить потери пучка до минимально возможных. Значительная длина ускорителя (машина на энергию 1 ГэВ в «теплом» варианте имеет длину ~ 1 км) приводит к его высокой стоимости. Однако при получении высокоинтенсивных пучков на большой длине ускорителя проще решается задача подвода ВЧ-мощности, составляющей десятки-сотни мегаватт, легче отводятся тепловыделения, меньше распределенный уровень радиационного поля.

Реально полученные на сегодня предельные значения параметров пучка в интересующей нас области сведены в табл. 2. По энергии и току пучка, как импульсному, так и среднему, лидируют линейные ускорители. И эти преимущества принципиальные. По достигнутой мощности пучка впереди — циклические, но это превосходство временно и не имеет принципиального характера.

Таблица 2. Реально полученные параметры пучка ускорителей

Ускоритель	Средний ток пучка, мА	Энергия пучка, МэВ	Средняя мощность пучка, МВт	Относительные потери частиц
LAMPF	1	800	0,8	$1 \cdot 10^{-4}$
SIN	2	590	1,18	$2 \cdot 10^{-4}$
LEDA	100	6,7	0,67	
FNAL	300 (имп.)	200	60 (имп.)	

По оценкам [10], стоимость исследований, разработок и сооружения ускорителя на энергию 600 МэВ в линейном варианте (при токе пучка 20 мА) составит 200 млн евро, в циклическом (при токе 5 мА) — 70 млн евро. Предполагая сооружение четырех подобных циклотронов для получения указанного в варианте линейного ускорителя тока 20 мА, мы увидим выгодность варианта линейного ускорителя.

По своей физической сущности линаки предназначены для ускорения наибольших токов (более ~ 5 мА), циклические — для умеренных (до ~ 5 мА). У них свои ниши. Они, скорее, дополняют друг друга, чем конкурируют. Такое разделение, наметившееся ряд лет тому назад [14, 19], становится все более очевидным.

Следует признать, что в последние годы активное развитие кольцевых машин, с одной стороны, и некоторое понижение требований к величине тока ускоряемого пучка, с другой, придали большую устойчивость проектным предложениям по мощным циклотронам. Однако линаки в подавляющем количестве реализуемых программ продолжают оставаться на лидирующих позициях. «Какой ускоритель будет принят в ядерной энергетике, покажет будущее, — считает В. Н. Михайлов [20], — но начинать эту работу надо сегодня».

4. НАДЕЖНОСТЬ

Опыт показывает, что наименее надежными узлами ускорителей являются источники ионов и системы высокочастотного питания. Жесткие требования к надежности ускорителей-драйверов заставляют рассматривать все возможные пути ее повышения.

1. Использование пучка протонов (а не H^- , d^+ , H_2^+) облегчает режим работы вакуумной системы и понижает уровень радиации, что способствует увеличению времени работы до отказа всего ускорителя.

2. Той же цели служит использование в узлах и системах ускорителя материалов и приборов повышенной надежности.

3. Построение элементов магнитной оптики на базе магнитотвердых материалов [21], если это допускает уровень радиационных полей, повышает надежность исключением необходимости в электропитании и охлаждении магнитооптических устройств. Магнитотвердые материалы позволяют формировать неизменяемые или регулируемые магнитные поля величиной до 2,5 Тл с точностью до 0,05 %.

4. Облегченный на 20–30 % режим работы приборов и оборудования увеличивает срок их службы, что поднимает надежность всей установки и сокращает эксплуатационные расходы.

5. Основной путь обеспечения необходимой надежности — применение эффективных способов резервирования. Условие неизменности теплового режима мишенно-бланкетной части допускает отсутствие пучка в течение не более нескольких десятков миллисекунд. Поэтому можно планировать только быстрое автоматическое переключение на резерв без каких-либо прогревов и подстроек. Эффективным может быть только работающий резерв.

Так, головной участок мощного линейного ускорителя (до энергии 12–20 МэВ), включающий в себя инжектор, начальную часть и небольшой участок промежуточной части, целесообразно иметь в виде двух независимых параллельно расположенных трактов, причем оба должны работать: один — в составе драйвера, другой — для прикладных целей (наработка эмиттеров для позитрон-эмиссионной томографии, производство радионуклидов, облучение материалов и изделий). В случае срыва ускорения в первом из них (по любой причине) выходной пучок второго тракта автоматически за несколько миллисекунд переключается для дальнейшего ускорения в канале драйвера.

Качественно новое решение по резкому повышению надежности самой длинной основной части линейного ускорителя предложено в [22, 23]. Обычно основная часть включает в себя 2–3 тысячи однозорных ускоряющих ячеек, объединенных в секции по 6–20 ячеек; каждая секция питается от высокочастотного (ВЧ) генератора максимально возможной (с позиции выпускаемых ВЧ-приборов) мощности. Предложено каждую секцию (C_1 – C_N на рис. 2) составлять всего лишь из 1–3 ячеек ($Я_1$ – $Я_3$) и питать от индивидуальных генераторов ($ВЧ_1$ – $ВЧ_N$) относительно небольшой мощности. При этом отказ одного или небольшого количества генераторов не приведет к потере пучка, поскольку смещение частиц по импульсам $\Delta p/p$ составит малую долю размаха сепаратрисы $\Delta p_c/p_c$ (рис. 3). На время ремонта вышедших из строя генераторов система авторегулирования будет поддерживать режим доускорения частиц в оставшихся работоспособными секциях, а после возвращения отремонтированного оборудования в строй быстро восстановит исходный режим. Таким образом, может быть организовано бесперебойное формирование ускоряющего поля, а большое количество ячеек из недостатка линака превращается в его преимущество. Подобное решение уже принято в итальянском проекте TRASCO и американском ААА.

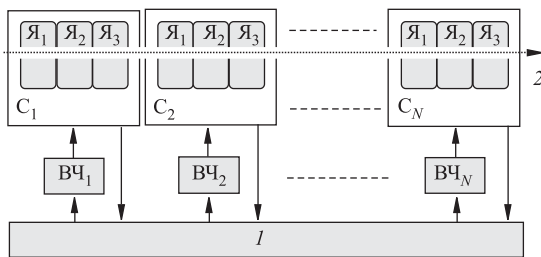


Рис. 2. Схема безотказного ВЧ-питания основной части линака-драйвера: 1 — система авторегулирования ВЧ-поля; 2 — пучок

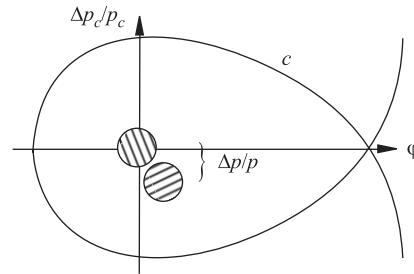


Рис. 3. Кратковременное смещение импульса частиц при прекращении ускорения в одной или небольшом количестве секций (c — сепаратриса)

6. В тандеме ускоритель – подкритический бланкет участвуют две высокомогущные потенциально опасные установки. Внимательное рассмотрение показывает, что все возможные неисправности на ускорителе приводят только к прекращению ускорения и не таят в себе угрозы ядерной аварии для установки в целом.

Однако возможен выброс ускоряемого пучка на стенки канала. Наибольшую опасность пучок представляет на выходе, где его мощность достигает ~ 50 МВт. Выключить пучок можно только на инжекторе. Длительность времени выключения можно оценить в 10 мкс. Время пробега электрического сигнала об отказе какого-либо важного узла с выхода ускорителя (в самом неблагоприятном случае) до инжектора составит ~ 7 мкс, такого же порядка время пролета пучка от инжектора до выхода ускорителя. С учетом времени срабатывания сигнализирующих о неисправности устройств можно принять минимальную длительность нежелательного ускорения равной 50 мкс. За это время с пучком будет перенесена в место его потери энергия, равная $W = 50 \cdot 10^6 \times 50 \cdot 10^{-6} = 2,5$ кДж! Последствия такого события будут зависеть от степени локализации рассеяния пучка. За-

дача предотвращения такого явления очень серьезна, она требует изучения и разработки специальных мер.

5. РАДИАЦИОННАЯ ЧИСТОТА

Ручное обслуживание на LAMPF и SIN осуществляется при потерях пучка $(1-2) \times 10^{-4}$. Увеличение тока в десятки раз потребует эффективных мер по уменьшению радиации. По оценкам [10], при энергии пучка 1 ГэВ допустимы потери 50 пА на метр длины канала. Повышению радиационной чистоты способствует, с одной стороны, оптимизация динамики пучка и увеличение апертуры канала, с другой — использование в трактах движения пучка материалов с малым сечением захвата и низкой активацией [24, 25].

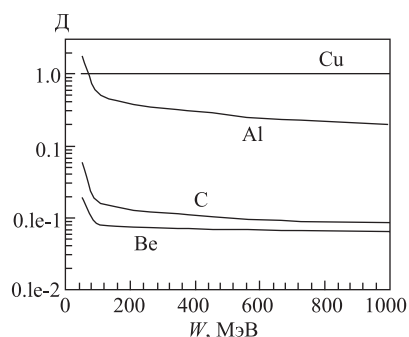


Рис. 4. Относительная мощность дозы D остаточной радиации через сутки после облучения различных материалов протонами с энергией W при одинаковых флюенсах

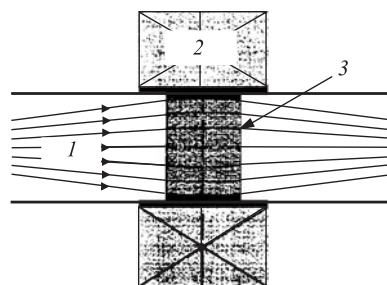


Рис. 5. Возможное размещение графитового поглотителя потеревых частиц: 1 — пучок; 2 — линза; 3 — графитовое кольцо

Из сравнительных характеристик остаточной радиации (рис. 4) для случаев поглощения потерянных частиц в различных материалах видно, что применение углерода позволяет почти на 2 порядка снизить уровень остаточной радиации. При этом выход нейтронов уменьшается в ~ 15 раз. Установка графитовых кольцевых тонкостенных поглотителей выпадающих из ускорения частиц в ускоряющих и транспортирующих каналах (рис. 5) может значительно уменьшить мощность дозы радиоактивного излучения как во время работы ускорителя, так и после его остановки. Предварительные эксперименты показывают, что из углеродных материалов наиболее подходящим для указанных целей (с позиций газовой выделенности и термостойкости) может быть углеститал [26].

6. ЭКОНОМИЧНОСТЬ

Коэффициент полезного действия (КПД) ускорителя в наибольшей степени определяется эффективностью использования ВЧ-энергии в его резонаторах. При комнатной

температуре в непрерывном режиме работы потери ВЧ-мощности в резонаторах линейного ускорителя на энергию 1 ГэВ составят 35–40 МВт. Если ток пучка не более 35–40 мА, то не менее половины ВЧ-мощности идет на нагрев резонаторов. В этом случае для подъема КПД очень эффективно использование сверхпроводящих резонаторов. Однако оценки показывают, что при токах, больших примерно 80 мА, использование сверхпроводимости теряет целесообразность.

Сверхпроводимость (СП) сводит потери в резонаторах практически к нулю, сокращает длину ускорителя до нескольких сотен метров, уменьшает капитальные затраты и поднимает КПД [27]. Однако сверхпроводящие резонаторы вдвое дороже обычных [28], а эффективность, надежность и безопасность сверхпроводящего режима в условиях ускорения интенсивного протонного пучка на сегодня недостаточно ясны и нуждаются в изучении. Вместе с тем это направление бурно и успешно развивается, а сверхпроводящие резонаторы используются во всех реализуемых проектах мощных линаков.

В циклических машинах КПД использования ВЧ-мощности несколько выше, чем в линейных (при одинаковых токах и энергиях пучка). В циклотронах важнее повышать КПД за счет сверхпроводящих обмоток магнита, что одновременно дает другие преимущества [18].

КПД линейного ускорителя с теплыми резонаторами можно поднять за счет применения импульсного режима, техника которого хорошо освоена, а эффективность возрастает с уменьшением среднего тока пучка. Условие выгодности импульсного режима имеет вид [29]:

$$\frac{t_{\text{и}} + 4,3\tau}{t_{\text{и}}} \frac{I}{I_{\text{и}}} < 1,$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса тока пучка; τ — постоянная времени резонатора; I — средний ток пучка; $I_{\text{и}}$ — импульсный ток пучка.

Чем сильнее выполняется неравенство, тем больше энергетическая эффективность импульсного режима. Зависимости полного КПД (от сети, с приближенным учетом потребления электроэнергии всеми технологическими системами ускорителя) от величины среднего тока пучка I для мощного линака на энергию 1 ГэВ с теплыми резонаторами в импульсном и непрерывном режимах приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что импульсный режим линака с теплыми резонаторами в диапазоне средних токов пучка от малых значений до нескольких десятков миллиампер энергетически выгоднее непрерывного. Наличие естественных пауз между импульсами частиц облегчает задачу коммутирования выходного пучка на несколько мишеней. Импульсный режим экономически выигрышен и во время наладочных работ [30]. Однако специального рассмотрения требуют вопросы допустимости и удобства утилизации сильноточных импульсов пучка мишенно-бланкетными сборками, а также возрастания потерь частиц при увеличении тока в импульсе.

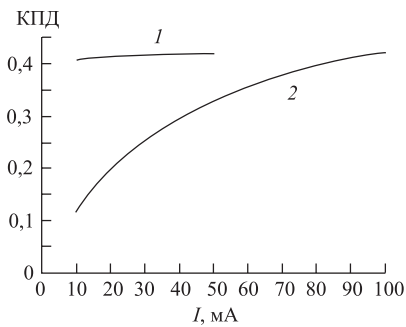


Рис. 6. Зависимости полного КПД линака-драйвера от среднего тока пучка для непрерывного и импульсного режимов при теплых резонаторах: 1 — импульсный режим, $I_{\text{и}} = 100$ мА; $t_{\text{и}} = 1,9$ мс; 2 — непрерывный режим

7. СООРУЖАЕМЫЕ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Разработка сильноточных ускорителей для энергетических целей (часто в варианте многоцелевого использования) ведется во всех крупных ускорительных центрах мира. Основные сведения на текущий момент по линейным и циклическим ускорителям энергетического назначения (или ускорителям, которые могли бы быть использованы в этом направлении), даны в табл. 3 и 4 соответственно. Более полную информацию можно получить из [31, 32].

Анализируя представленные в таблицах сведения, можно сделать следующие выводы.

1. Самый мощный из сооружаемых в настоящее время ускорителей — линейный ускоритель программы TRASCO (Италия). Мощность его пучка 30 МВт, энергия 1 ГэВ, ток 30 мА.

2. Наибольшая на сегодня величина ускоренного в непрерывном режиме тока составляет 100 мА при энергии 6,7 МэВ. Такой ток получен на линейном ускорителе LEDA, начальной части ускорителя программы АРТ.

3. Упал интерес к реализации объявленных ранее программ, нацеленных на ускорительное производство трития (американская программа АРТ с ускорителем на энергию 1,7 ГэВ и ток 100 мА и французская — TRISPAL — 600 МэВ, 40 мА). Программа АРТ, например, после успешного запуска установки LEDA преобразована в AAA (Advanced Accelerator Applications), перед которой стоит задача разработки высоконадежных сильноточных ускорителей более широкого назначения.

4. Особое внимание уделяется практическому освоению надежного ускорения сильноточного пучка в начальной части мощных ускорителей. Кроме установки LEDA, которая должна стать базой для отработки вопросов надежности, к 2007 г. запланирован запуск ускорителя IPHI, рассчитанного также на ускорение 100 мА тока протонов до энергии 10 МэВ.

5. Имеет место совершенно естественное и целесообразное взаимовлияние и взаимопроникновение между отдельными проектами и программами, например, между ESS, CONSERT, HPPI, TRASCO. . .

6. Реальная длина мощных линаков с использованием сверхпроводимости много меньше предполагавшейся ранее длины в 1 км и лежит в диапазоне 300–450 м. Длина самого мощного из них (программа TRASCO) — 310 м. Это ведет к уменьшению капитальных затрат.

7. Есть несколько обоснованных предложений по разработке циклотронных установок с мощностью пучка 10 МВт при энергии 1 ГэВ.

8. Сверхпроводимость перешла в категорию освоенных технологий. В линейных ускорителях используются СП-высокочастотные резонаторы, в циклических — СП-магниты.

9. Прослеживается тенденция использования линейных ускорителей для токов пучка 1–5 мА (SNS, EURISOL, JAERI/KEK, IHEP), где применение циклических ускорителей могло бы быть дешевле. Это, видимо, частично объясняется желанием иметь перспективу перехода к большим токам в будущем. А на экспериментальной ЭЛЯУ в г. Киото (KURRI), наоборот, с целью удешевления установки для ускорения токов 1–2 мА в диапазоне энергий 400 кэВ–500 МэВ, перешли на использование циклотронов.

Таблица 3. Линейные ускорители*

Название проекта или установки, лаборатория, страна	Назначение проекта или ускорителя, сроки сооружен.	Мощность, энергия и средний ток пучка	Тип частиц, непрер. или имп. режим, использ. сверхпрот. (СП), длина ускорителя	Примечание	Состояние, источник информации
TRASCO, INFN, Италия	Трансмутация 1998–2004 гг.	30 МВт 1 ГэВ 30 мА	p Непрерывный СП выше 5 МэВ 310 м	Кандидат в качестве драйвера для ЭЛДУ тепловой мощностью 1500 МВт	Сооружается, [33]
CONCERT, Европейский центр	Многоцелевое	25 МВт 1, 3 ГэВ 19,2 мА	p, H^- 100 мА в импульсе СП от 185 МэВ 350 м	—	Разрабатывается, [34]
КОМАС, NIPER, KTF (КОМАС Test Facility), Корея	Многоцелевое 1997–2007 гг. (260 МэВ)	18 МВт 1 ГэВ 18 мА (p) + 2 мА (H^-)	p, H^- Сначала импульсный, затем непрерывный СП — при высокой энергии	1 этап – создание KTF (20 МэВ, 2 мА) с подкритической 5 МВт	Сооружается, [35]
IPHI, CEA, CNRS, Франция	Многоцелевое 1998–2007 гг.	10 МВт 10 МэВ 100 мА	p Непрерывный	Прототип головной части сильноточных линаков-драйверов	Разрабатывается, [36]
AAA, ADTF (Accelerator-Driven Test Facility), США	Мощные ускорители для перспективы	8 МВт 600 МэВ 13,3 мА	p Повышенная надежность	ADTF для демонстрации возможности трансмутации	Сооружается, [37]
ESS, Общеввропейская коллаборация	Нейтронный источник	5 МВт 13,3 ГэВ 3,8 мА	p Импульсный СП от 185 МэВ 432 м	—	Разрабатывается, [34]
EUROISOL, Общеввропейская коллаборация	Производство экзотических ядер	5 МВт 1 ГэВ 5 мА	p Непрерывный СП от 85 МэВ	Используется опыт разработки линаков энергетического направления	Разрабатывается проект, [11]

Окончание табл. 3

Название проекта или установки, лаборатория, страна	Назначение проекта или ускорителя, сроки сооружен.	Мощность, энергия и средний ток пучка	Тип частиц, непрер. или имп. режим, исполз. сверхпроб. (СП), длина ускорителя	Примечание	Состояние, источник информации
Ускоритель ММФ, ИЯИ, Россия	Многоцелевое	до 3 МВт 0,5 (→ 1) ГэВ 0,1 (→ 3) мА	p Импульсный	Предлагается демонстрационная ЭЛЯУ с модульной подкритической тепловой мощностью 4–6 МВт. Проведен пробный вывод пучка	Предложено [38]
SNS, ORNL (коллабор.), США	Нейтронный источник Линак + кольцо 1999–2006 гг.	1,4 МВт 1 ГэВ 1,4 мА	H^- Импульсный СП от 186 МэВ 335 м	Протоны будут выводиться из накопительного кольца на Hg мишень	Сооружается, [39]
JAERI/КЕК, Япония	Многоцелевое Линак + кольца 2001–2007 гг. (без СП)	0,75 МВт 400 МэВ (тепл.) 600 МэВ (СП) 1,25 мА	H^- 50 мА в импульсе От 400 до 600 МэВ — СП 350 м	К легководному реактору тепловой мощностью ~800 МВт будет выведен пучок 600 МэВ (2-я очередь)	Сооружается, [40]
LEDA, (программа АРТ) LANL, США	АРТ — программа по ускорителю. производству трития	0,67 МВт 6,7 МэВ 100 мА	p Непрерывный	LEDA — прототип головной части сильноточных линakov. Прогр. АРТ преобразована в прогр. ААА (перспективн. применен. ускорителей)	Запушен, [41]
Линак для ЭЛЯУ ИНЕР, Китай	Многоцелевое	0,45 МВт 150 МэВ 3 мА	p Импульсный	Главная цель — создание экспериментальной ЭЛЯУ	Сооружается, [43]
ЭЛЯНГ, Линак ИСТРА, ИТЭФ, Россия	Экспериментальн. ЭЛЯУ Многоцелевое	0,018 (→ 0,2) МВт 36 (→ 100) МэВ 0,5 (→ 2) мА	p Импульсный	Подкритический тяжелоядерный реактор с тепловой мощностью 100 кВт	Сооружается, [43]

* Ряд проектных предложений по разработке мощных линейных ускорителей в табл. 3 не включен.

Таблица 4. Циклические и комбинированные ускорители

Название установки	Научный центр, страна	Мощность пучка, МВт	Энергия и ток пучка	Тип частиц	Состояние	Источник
Фазотрон, экспериментальная подкритическая сборка САД	ОИЯИ	0,001	660 МэВ 1,5 мкА	p	Фазотрон работает, подкритическая проектируется	[44]
Ускорительный комплекс (лин. + кольц.) ISIS	RAL, Великобритания	0,16	800 МэВ 0,2 мА	H^-, p	Работает на мишень	[31]
Циклотрон-драйвер ЭЛЯУ (реактор TRIGA), проект TRADE	ENEA Италия	0,32	320 МэВ 1 мА	H_2^-	Реактор есть, проектируется ЭЛЯУ	[10]
Ускорительный комплекс (лин. + кольц.) ASTRON	CERN, Австрия	0,410	1,6 ГэВ 0,26 мА	p	Разработан проект, сооружение к 2007 г.	[45]
Линак + циклотрон, экспериментальная ЭЛЯУ, KURRI	Университет г. Киото, Япония	до 0,5	0,4→500 МэВ 10→1 мА	p	Работает при малых энергиях и токах	[46]
Циклотронный комплекс SIN	PSI, Швейцария	1,18	590 МэВ 2 мА	p	Работает на мишень	[47]
Циклотрон-драйвер ЭЛЯУ, проект MYRRHA	ИВА, Бельгия	1,75	700 МэВ 2,5 мА	H_2^+	Разрабатывается проект	[15]
Циклотронный комплекс	ОИЯИ	8–24	800 МэВ 10–30 мА	p	Предложение	[48]
Комплекс сверхпроводящих циклотронов	Техасский университет, США	10	1 ГэВ $2 \text{ мА} \times 5 = 10 \text{ мА}$	p	Предложение	[49]
Комплекс сверхпроводящих циклотронов	INFN, Италия	10	1 ГэВ/нуклон 10 мА	H_2^+	Предложение	[18]
Циклотронный комплекс	PSI, Швейцария	10	1 ГэВ 10 мА	p, H_2^-	Предложение	[50]
Циклотронный комплекс с использованием сверхпроводимости	ОИЯИ	120	1 ГэВ 120 мА	p	Предложение	[51]

10. Практическая задача соединения ускорителя-драйвера (с номинальными или близкими к ним параметрами пучка) и подкритического реактора в единую ЭЛЯУ возникнет после полного освоения техники ускорения мощных пучков в ближайшие годы.

11. Востребованными оказываются экспериментальные ЭЛЯУ с невысоким значением энергии или тока пучка ускорителя. Такие установки недороги, дают возможность исследования ряда важных для полномасштабных ЭЛЯУ вопросов и сооружаются в Коре (КОМАС Test Facility), Японии (KURRI, г. Киото) и в России (в ИТЭФ и ОИЯИ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значителен вклад российских ученых и специалистов в развитие электроядерного направления. Предложенная В. В. Владимирским, И. М. Капчинским и В. А. Тепляковым структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой открыла принципиальную возможность ускорения сильных токов при малых β и используется в настоящее время во всех без исключения сильноточных линейных ускорителях. Последующее развитие этой структуры, опыт создания и исследования ряда уникальных ускорителей, разработка физических и технических решений по вопросам ускорения высокоинтенсивных пучков придали в России новый импульс этому направлению.

Оригинальные физические и проектные предложения (ИТЭФ, МРТИ, ИФВЭ, ОИЯИ, НИИЭФА, МИФИ), активная разработка программ изучения электроядерных систем (ИТЭФ, ИАЭ), наличие экспериментальной базы для исследований (ИЯИ, ИТЭФ, ОИЯИ, ФЭИ, ИФВЭ) и уже ведущиеся работы по созданию экспериментальных ЭЛЯУ (ИТЭФ, ОИЯИ) будут способствовать сокращению большого разрыва в освоении электроядерных технологий, образовавшегося между зарубежными и российскими центрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лебедев В. М.* Ядерная энергетика. Радиоактивные отходы и обеспечение безопасности. Обнинск: Изд-во ГЦИПК, 1998. 80 с.
2. *Немировский П. Э.* Может ли ядерная энергетика исчезнуть бесследно? // АЭ. 1995. Т. 79, вып. 2. С. 152–157.
3. *Pijtchev B. I. et al.* HWR-1000US — the Ultimate Safety Heavy Water Gas-Cooled Reactor // Nucl. Engin. Intern. 2003. V. 48, No. 582. P. 23–26.
4. *Васильков Р. Г. и др.* Электроядерный метод генерации нейтронов и производства расщепляющихся материалов // АЭ. 1970. Т. 29, вып. 3. С. 151–156.
5. *Safa H. et al.* A Superconducting Proton Linear Accelerator for Waste Transmutation // Proc. of ADTT-99. Rep. TU-O-D7.
6. *Михайлов В. Н.* Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1996. № 6. С. 17–22.
7. *Капчинский И. М. и др.* Линейный ускоритель для трансмутации отходов атомной энергетики. Препринт ИТЭФ № 100. М., 1992. 18 с.
8. *Lagniel J.-M.* A Review of Linacs and Beam Transport Systems for Transmutation // Proc. of EPAC-98. P. 93–95.
9. *Anderson J. L. et al.* Status of the APT Project // Proc. of ADTT-99. P. 643.

10. *Rubbia C. et al.* A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration. The European Technical Working Group on ADS. Roma: ENEA, 2001. 27 p.
11. *Biarrotte J.-L. et al.* High-Intensity Driver Accelerators for EURISOL // Proc. of EPAC-02. P. 1007–1009.
12. *Hardekopf R. A.* Project Status of the 1 GeV SNS Linac // Proc. of PAC-99. P. 3597–3599.
13. *Rubbia C., Rubio J. A.* A Tentative Programme Towards a Full Scale Energy Amplifier. CERN/LHC/96-11 (EET). 35 p.
14. *Schriber S. O., Madrillon P.* Accelerator Break-Out Group Summary // Proc. of ADTTA-96. P. 1163–1165.
15. *Stammbach Th. et al.* Cyclotron Performance and New Developments // Proc. of EPAC-02. P. 159–161.
16. *Fietier N., Madrillon P.* // Proc. of the 14th Intern. Conf. on Cycl. and Their Appl. 1995. P. 462–465.
17. *Аленицкий Ю. Г. и др.* Возможности циклотрона по управлению электроядерными установками // Тр. IV Науч. семинара памяти В. П. Саранцева. Дубна, 2002. С. 161–166.
18. *Calabretta L. et al.* A Superconducting Ring Cyclotron to Deliver High Intensity Proton Beams // Proc. of EPAC-2000. P. 918–920.
19. *Аленицкий Ю. Г.* Изохронные циклотроны для электроядерных технологий // Тр. II Науч. семинара памяти В. П. Саранцева. Дубна, 1998. С. 89–95.
20. *Михайлов В. Н.* Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1996. № 6. С. 17–21.
21. *Скачков В. С. и др.* Магнитотвердые регулируемые квадрупольные фокусирующие протонного пучка на мишень нейтронного генератора ИТЭФ // Тр. XVI Совещ. по ускорит. заряд. частиц. Протвино, 1998. Т. 2. С. 96–99.
22. *Андреев В. А. и др.* Линейный резонансный ускоритель ионов. Патент России на изобретение № 2152696 от 10.07.2000.
23. *Kozodaev A. M. et al.* Reliability Increase Ways for High Power Linacs – ADS Drivers // Proc. of EPAC-2000. P. 942–944.
24. *Drozdovsky A. A.* Induced Radioactivity Decrease Method in High Intensity Linacs // Proc. of EPAC-96. P. 2621–2623.
25. *Andreev V. A. et al.* Linear Proton Accelerator as Electronuclear Facility Driver // Proc. of ICENES-96. P. 579–586.
26. *Дроздовский А. А. и др.* Испытания углеродных поглотителей теряемых частиц для высокоинтенсивных протонных ускорителей // Тр. XVIII Конф. по ускорит. заряд. частиц (RUPAC-2002), Обнинск, 1–4 окт. 2002 г. Доклад С2-53.
27. *Jameson R. A.* Discussion of Superconducting and Room-Temperature High-Intensity Ion Linacs // Proc. of EPAC-96. P. 210–212.

- 102 *Козодаев А. М., Лазарев Н. В., Шведов О. В.*
28. *McAdams R. et al.* Cost Optimisation Studies of High Power Accelerators // Proc. of ADTTA-94. P. 209–211.
29. *Kozodaev A. M., Lazarev N. V., Raskopin A. M.* Comparison of CW and Pulsing Operation of Linac for ADTT // Proc. of ADTTA. P. 1054–1056.
30. *Mizumoto M. et al.* Development of a High Intensity Proton Accelerator // Proc. of ADTTA-96. P. 1004–1006.
31. *Лазарев Н. В., Козодаев А. М.* Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок (обзор проектов) // АЭ. 2000. Т. 89, вып. 6. С. 440.
32. *Lazarev N. V.* Brief Handbook of Accelerator Facilities, Some Special Terms and Institutions Addresses. IТEP Preprint No. 18-02. М., 2002. 88 p.
33. *Barni D. et al.* Status of the High Current Proton Accelerator for TRASCO Program // Proc. of EPAC-02. P. 251–253.
34. *Maier R.* High Power Proton Linacs, Application and Desing Concepts // Proc. of EPAC-02. P. 174–176.
35. *Choi B. H. et al.* High Power Proton Linac Program in Korea // Ibid. P. 26–28.
36. *Beauvais P.-Y.* Status Report on the Construction of the French High Intensity Proton Injector (IPHI) // Proc. of EPAC-02. P. 539–541.
37. <http://aaa.lanl.gov/aboutaaa.html>
38. *Kravchuk L. V., Ostroumov P. N.* Upgrade Study of INR Proton Linac for Production of 3 MW Beam // Proc. of PAC-99. P. 3282–3284.
39. *Holtkamp N.* The SNS Linac and Storage Ring: Challenger and Progress Towards Meeting Them // Proc. of EPAC-02. P. 164–166.
40. *Yamazaki Y.* The JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators // Ibid. P. 169–171.
41. *Smith H. V., Schneider J. D., Sheffield R.* Low-Energy Demonstration Accelerator (LEDA) Test Results and Plans // Proc. of PAC-01. P. 3296–3298.
42. *Xialing G. et al.* The Activities of HPPA Technology Related to ADS in China // Proc. of APAC-01. P. 138.
43. *Козодаев А. М. и др.* Экспериментальная электроядерная установка ИТЭФ // АЭ. 2003. Т. 94, вып. 1. С. 87–90.
44. *Barashenkov V. S. et al.* An Experimental Accelerator Driven System Based on Plutonium Subcritical Assembly and 660 MeV Proton Accelerator // Proc. of ADTTA-99. P. 882–884.
45. *Briant P. J.* AUSTRON, a Central European Pulsed Spallation Neutron Source // Proc. of EPAC-2000. P. 108–110.
46. *Shiroya S. et al.* Present Status of Neutron Factory Project at KURRI // Proc. of APAC-01. P. 85–87.
47. *Stambach Th. et al.* The PSI 2 mA Beam and Future Applications // Proc. of the Conf. «Cyclotrons and Their Applications». 2001. P. 423–427.

48. *Alenitsky et al.* The High Current Cyclotron Complex for an Electronuclear Way of Production of Energy // *Ibid.* P. 434.
49. *Kim G. et al.* A Superconducting Isochronous Cyclotron Stack as a Driver for a Thorium-Cycle Power Reactor // *Ibid.* P. 437.
50. *Fietier N., Mandrillon P.* // Proc. of the Conf. «Cyclotrons and Their Applications». 1995. P. 462–464.
51. *Шелаев И. А. и др.* Ускоритель и реактор // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 6. С. 70–82.