

ческих операций. В то же время температура в наблюдательной скважине, удаленной на 50 м от нагнетательной, не зависит от технологических операций на нагнетательной скважине и может при любых условиях служить объективным критерием теплового состояния пласта. При многоэтапном удалении отходов максимально возможная температура в пласте на текущем этапе удаления определяется мощностью энерговыделения, введенной в пласт на этом этапе. Сопоставление модели со сферически симметричным расположением отходов в пласте с моделью, учитывающей цилиндрическое, более приближенное к реальному расположению, свидетельствует, что обе модели качественно одинаково описывают реакцию температурного поля пласта на различные технологические воздействия. Более того, при расчете температурного поля на активной стадии эксплуатации нагнетательной скважины результаты расчетов с использованием обеих моделей при одинаковых входных параметрах близки количественно. Для проведения прогнозной оценки тепловых загрязнений после окончания удаления отходов упрощенная сферически симметричная модель дает заниженные значения температуры в пласте, тогда как модель, базирующаяся на цилиндрической симметрии, при допущении, что теплоотвод через глинистые водоупоры отсутствует, дает завышенные результаты, которые можно характеризовать как теоретически максимально возможные. Полученные данные однозначно определяют пути совершенствования цилиндрической модели, что обеспечит получение более достоверных данных при прогнозировании температурных полей в зоне локализации отходов.

В заключение необходимо отметить, что даже теоретический верхний предел температуры в пласте для условий, соответствующих моделируемому удалению отходов, в течение расчетных 50 лет будет ниже температуры кипения воды при давлении, соответствующем гидростатическому на глубине пласта-коллектора. Полученный результат позволяет характеризовать состояние отходов в подземном хранилище как надежно прогнозируемое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косарева И.М., Савушкина М.К., Архипова М.М. и др. Температурное поле при глубинном захоронении жидких радиоактивных отходов. — Атомная энергия, 1998, т. 85, № 6, с. 441—448.
2. Спицын В.И., Пименов М.К., Балуква В.Д. и др. Основные предпосылки и практика использования глубоких водоносных горизонтов для захоронения жидких радиоактивных отходов. — Там же, 1978, т. 4, вып. 2, с. 161—168.
3. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. И.К. Кикоина. М.: Энергоатомиздат, 1976, с. 199.

Поступила в Редакцию 28.06.2000

УДК 621.384.64

СВЕРХМОЩНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ПРОТОНОВ ДЛЯ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК (ОБЗОР ПРОЕКТОВ)

Лазарев Н.В., Козодаев А.М. (ГНЦ РФ—ИТЭФ)

В проектных предложениях сверхмощных линейных ускорителей для высокоинтенсивных нейтронных генераторов и электроядерных установок, предложенных в последние годы, средняя мощность выходного пучка достигает 100 МВт, т.е. более чем в 100 раз превышает полученную (0,8—1 МВт) на наиболее мощном действующем линейном ускорителе LAMPF в Лос-Аламосской лаборатории (США). Проектные предложения сверхмощных линейных ускорителей на 100—300 МВт периодически появлялись и раньше [1, 2], однако, несмотря на потребность в таких машинах, все они оставались на бумаге. В настоящее время возможность осуществления столь резкого скачка выходной мощности ускоренного пучка ставится на реальную основу. Это об-

условлено следующими факторами. Во-первых, открытием И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым исключительно важных свойств структур с пространственно-одно-родной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, ВЧК или, как теперь широко принято называть эти структуры, RFQ — Radio Frequency Quadrupole). Их применение позволяет обойти принципиальные физические ограничения на значение тока пучка при инжекции [3], что уже активно используется почти во всех ускорительных центрах мира. Во-вторых, в результате расчетно-теоретических исследований и прямых экспериментов существенно возросло понимание механизма роста эмиттанта и образования гало пучка, приводящих к его потерям, и способов ослабления воздействия этих эффектов. Наконец, благодаря общему прогрессу ускорительной, в том числе сверхпроводящей техники, измерительной и управляющей аппаратуры, улучшению параметров мощных высокочастотных генераторов и ионных источников, источников силового питания и различных исполнительных устройств. Заметим, что теоретические аспекты создания сверхмощных линейных ускорителей с исчерпывающей полнотой были рассмотрены еще 20 лет назад [4], равно как справедливыми оказались сделанные тогда оценки предельно допустимых потерь пучка в высокоэнергетичной части машины 0,5 нА/м.

Нейтронные генераторы и электроядерные установки. Можно отметить, что последние, в сущности, являются нейтронными генераторами, мишень которых входит в состав подкритической ядерной сборки, так что требования к пучку линейного ускорителя-драйвера в обоих случаях совпадают и определяются, в основном, мощностью установки, а не ее типом. Работающих электроядерных установок пока нет, однако для научного, медицинского и промышленного применения в настоящее время в мире уже работают мощные нейтронные генераторы IPNS, KENS, MLNSCE (LANSCE), ISIS и SINQ, основные параметры которых представлены в табл. 1 [5]. Интенсивность пучков этих нейтронных генераторов может быть существенно повышена. Так, в Лос-Аламосской лаборатории, где из полного тока ускоренного пучка протонов мезонной фабрики LAMPF 1,2 мА для нейтронного генератора MLNSCE используется лишь 70 мкА, предложен проект реконструкции, позволяющий за счет изменения системы подачи пучка на мишень и увеличения длительности импульсов тока повысить среднюю мощность пучка от 56 кВт до 1 МВт. В Лаборатории им. Резерфорда (Великобритания) разработана программа реконструкции импульсного нейтронного генератора ISIS в целях повысить надежность его работы и увеличить среднюю мощность протонного пучка от 160 кВт до ~1 МВт. Для этого высоковольтный генератор Кокрофта—Уолтона будет заменен секцией RFQ и к имеющемуся ускорительному комплексу будут добавлены один или два быстроциклических синхротрона RCS выходной энергией 3,5 ГэВ. Однако для многих актуальных задач — трансмутации ядерных отходов, создания предельно безопасной ядерной энергетики, переработки оружейного плутония, экологически чистой наработки трития, разработки технической базы для освоения ториевого топливного цикла, материаловедческих исследований, а также физических исследований в области нейтронной физики и генерации мощных пучков ионов требуются нейтронные источники в десятки—сотни раз большей мощности [6—9]. В последнее время в ЦЕРНе, Лаборатории им. Э. Ферми (США), КЕК (Япония) и других научных центрах возник интерес к созданию нейтронных фабрик, где мощный линейный ускоритель ионов H^- используется в качестве драйвера [10].

Реальные перспективы создания многоцелевого высокопоточного нейтронного генератора ($\geq 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) на основе сильноточного ускорителя протонов (или дейтронов) появились после освоения структур RFQ. Первые проекты нейтронных генераторов ЛУНГ и FMIT с сильноточными линейными ускорителями, использующими на начальной стадии ускорения эти структуры, были предложены в ИТЭФе и Лос-Аламосской лаборатории еще в 1977—1978 гг. [11, 12]. Результаты запуска структур RFQ в непрерывном режиме в Лос-Аламосской лаборатории (FMIT, 1983 г.) и Чок-

Т а б л и ц а 1. Основные параметры некоторых нейтронных генераторов

Характеристики	IPNS (Аргоннская лаборатория, США)	KENS (КЕК, Япония)	MLNSCE (Лос-Аламос-ская лаборатория, США)	ISIS (Лаборатория им. Резерфорда, Великобритания)	SINQ (Ин-т им. П. Шеррера, Швейцария)
	Состав ускорительного комплекса				
	Линейный ускоритель на 50 МэВ и синхротрон на 450 МэВ	Линейный ускоритель на 40 МэВ и синхротрон на 500 МэВ	Линейный ускоритель на 800 МэВ и компрессор на 800 МэВ	Линейный ускоритель на 70 МэВ и синхротрон на 800 МэВ	Два циклотрона на 72 МэВ и циклотрон на 590 МэВ
Ток пучка, мкА	15	4,6	70	200	1500
Частота повторения, Гц	30	20	20	50	Непрерывный режим
Мощность пучка, кВт	6,8	2,3	56	160	885
Наработка в 1997 г. нейтронов, усл. МА·ч	63	4,5	144	672	~500

Риверской лаборатории (RFQ1, 1992 г., Канада) показали, что принципиальные трудности начального ускорения больших непрерывных токов пучка благодаря уникальным свойствам этих структур успешно преодолеваются. Однако большая стоимость полномасштабного линейного ускорителя на непрерывный ток пучка ~100 мА и некоторые технические проблемы задержали начало сооружения таких машин более чем на 20 лет. Эти проблемы связаны, в первую очередь, с необходимостью снижения потерь пучка по длине высокоэнергетичной части ускорителя менее 0,5—1 нА/м, достижения достаточно высокого (40—50%) к.п.д. и надежности работы всего ускорительного комплекса, по крайней мере, не ниже 95% запланированного времени.

В настоящее время для всех этих взаимосвязанных проблем предложены более или менее удовлетворительные решения. В США утверждено финансирование инженерных разработок по наиболее амбициозному проекту АРТ [13—18]. В Лос-Аламосской лаборатории широким фронтом развернулись работы по изготовлению и наладке начальной части ускорителя LEDA [17], изготовлению и испытаниям образцов сверхпроводящих резонаторов высокоэнергетичной части [18], а также всех остальных ключевых узлов ускорителя АРТ.

Благодаря финансовому обеспечению наибольшие шансы на реализацию в ближайшие годы имеет проект SNS [19—24], разработанный пятью крупнейшими научными центрами США, запуск этого нейтронного генератора намечен на 2005 г. Принятый в последнее время объединенный проект JAERI/КЕК [25—27] в Японии будет максимально использовать уже проведенные в этих научных центрах разработки различных частей сильноточных линейных и кольцевых ускорителей.

В различных стадиях изучения и разработки находятся представленные в табл. 2 предложения и других проектов сверхмощных нейтронных генераторов, основой которых служат сильноточные линейные ускорители-драйверы.

Сверхмощные линейные ускорители протонов. Согласно экспериментальным данным, полученным разными авторами, эффективность генерации нейтронов по отношению к затраченной энергии с ее увеличением вначале резко возрастает, но вблизи 1 ГэВ выходит на пологое плато, достигая в зависимости от материала мишени (2—5) 10^{11} Дж⁻¹ [7]. Таким образом, оптимальной энергией для ускорителя-драйвера является ~1 МэВ, при меньшей энергии теряется эффективность, при большей неоправданно растут затраты.

Т а б л и ц а 2. Проекты нейтронных генераторов с линейными ускорителями-драйверами

Проект	Выходная энергия ионов, МэВ	Тип накопителя, энергия, МэВ	Средний ток пучка, мА	Частота повторения, Гц	Мощность пучка, МВт	Пиковый ток, мА	Длительность импульса, мкс	Статус проекта	Публикации
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
APT (США)	p , 1030 (1700)	Кольцо-накопитель, 1250 Синхротрон RCS, 3000, синхротрон 50 000	100	Непрерывный режим	100	100	Непрерывный режим	Получен пучок 100 мА; 6,7 МэВ	[13—18]
SNS (США)	H^- , 1250		2 (4,4)	60	2,65 (4,4)	52	1000	Запуск по плану 2005 г.	[19—24]
JAERI/KEK (Япония)	p , 400—600		0,33 (5)	25 (50)	1 (5)	50 (60)	500 (3000)	Ведутся испытания резонаторов с пучком	[25—27]
TRISPAL (Франция)	p , 600		40	Непрерывный режим	24	40	Непрерывный режим	Изготовление резонаторов	[6, 8, 9, 28]
TRASCO (Италия)	p , 1000		10—100	То же	~35	100	То же	То же	[29, 30]
КОМАС (Южная Корея)	p/H^- , 1000		20		20	20	CW	»	[31, 32]
ESS (Европа)	p , 1330		3,7	50	5	107	1200	Проект разработан	[33, 34]
Austron II (Австрия)	p , 130		0,13	25	0,2	33	187	То же	[6, 35, 36]
Energy Amplifier (ЦЕРН)	p , 1000		25—30	Непрерывный режим	25—30	25—30	Непрерывный режим	Проектное предложение	[37]
IFMIF (международный)	d^+ , 40		125×2	То же	10		То же	То же	[38]

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linac [†] , HFBR (Бруксгейвен- ская лабора- тория, США)	p, 1000		10	*	10	10	*	*	[39]
CNGS, (ЦЕРН)	H ⁺ , 2200	Два рециркулятора, 50 000	2	75	4	11	2200	*	[10]
МРТИ	p, 1000		3; 30; 100—300	Непрерывный режим То же	3; 30; 100—300	3; 30; 100—300	Непрерывный режим То же	*	[40, 41]
ИТЭФ, МРТИ, ИФВЭ, ИЯИ	p, 1000		30	То же	30	30	То же	*	[42—44]
ИЯИ	p, 1000		3	100	3	50	600	*	[45, 46]

Согласно общему мнению ведущих разработчиков (см., например, выводы дискуссии, проведенной на конференции ADTTA в Кальмаре [47]) ускорители с мощностью пучка до 3 МВт могут быть выполнены как в виде линейных, так и кольцевых машин при относительно небольших доработках имеющихся конструкций. Принципиальный верхний предел для изохронных циклотронов, связанный, в первую очередь, с продольной фокусировкой, располагается между 3 и 10 МВт. В то же время для линейных ускорителей, в которых ввод большой ВЧ-мощности, снятие тепловыделения, а также потери пучка равномерно распределены по длине машины и ускоренный пучок выводится значительно легче, чем с орбиты кольца, теоретические ограничения по предельному току наступают только после 300 мА. Видимо, поэтому бывший директор ЦЕРНа К. Руббиа, большой энтузиаст кольцевых машин, после нескольких вариантов предложений с изохронными циклотронами для установки мощностью 30 МВт как основной принял вариант с линейным ускорителем на ток 30 мА [37].

Заметим, что повышение выходных параметров какой-либо крупной установки всего на 20—30% всегда является серьезным успехом, поэтому переход от достигнутой мощности пучка 1—1,5 МВт к диапазону 10—100 МВт представляет собой скачок, требующий новых прогрессивных решений большого числа инженерных проблем. К уже указанным проблемам снижения наведенной активности до 2—3 мрад/ч, что примерно соответствует потерям 0,5 нА/м или 0,5 Вт/м, достижения высокого к.п.д. и надежности следует добавить необходимость минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Все эти требования распадаются на многие, часто противоречивые составляющие, так что хорошо решая одну из проблем, другую, не менее важную, можно загнать в тупик.

Отметим наиболее важные черты линейных ускорителей-драйверов, представленных в табл. 2. Во всех проектах для начального ускорения до энергии 5–7 МэВ используются структуры RFQ, для средней части до 50–100 МэВ — та или иная модификация структуры с трубками дрейфа. Благодаря развитию технологии сверхпроводящих резонаторов и опыту, приобретенному при эксплуатации электронных и тяжелоионных сверхпроводящих ускорителей (CEBAF, KEKB и др.), во всех проектах мощных линейных ускорителей на энергию ~1 ГэВ основное ускорение предполагается вести в сверхпроводящих резонаторах, хотя в проектах APT, SNS, ESS, TRISPAL поначалу разрабатывались и «теплые» варианты. Сверхпроводящий вариант имеет неоспоримые преимущества в легкости получения большого запаса по аксептансу (апертурный фактор — отношение поперечных размеров апертуры канала и пучка — в конце ускорителя APT достигает 80, рис. 1), что обеспечивает малые потери частиц, а также устраняет большие (30–50%) потери ВЧ-мощности в стенках резонаторов и позволяет сократить длину машины.

Переход к сверхпроводящим резонаторам в разрабатываемых проектах выбирается при энергии 50–210 МэВ. При меньшей энергии, начиная от секции RFQ, такие резонаторы используются только в тяжелоионных ускорителях, служащих бустерами после тандемов, при среднем токе пучка менее 1 мкА. Однако применение криогенной техники, кроме своих плюсов, имеет и минусы. Значительно осложняется эксплуатация машины, ее запуск и смена режимов, возникают дополнительные трудности в районе петель и окон ввода ВЧ-мощности и т.д. Кроме того, применение ниобия увеличивает активацию и γ -излучение примерно в 4 раза по сравнению с медью. Конкретные инженерные решения и тенденции развития криогенной ВЧ-техники можно найти в материалах последних конференций [18, 24, 48–51].

В ИТЭФ изучаются два нетрадиционных решения, которые изложены в работах [52, 53]. Первое из них — широкое использование слабоактивируемых материалов, что позволяет почти в 10 раз повысить норму допустимых потерь, второе — использование в основной части ускорителя одно- или малозазорных резонаторов («теплых» или сверхпроводящих [43]) с индивидуальным ВЧ-питанием, что обеспечит безостановочную работу машины при выходе из строя одного или даже нескольких ВЧ-генераторов или резонаторов. Различные аспекты решения этой проблемы рассмотрены в работах [54–56].

Надежность работы линейного ускорителя-драйвера электроядерной установки, т.е. гарантия безостановочного получения пучка в течение всего запланированного времени (которое в сумме может составлять 0,75 полного времени года) чрезвычайно важна. Так, в работах [6, 8, 9] отмечается, что при работе ускорителя на высокотемпературную мишень в активной зоне PWR и установках для трансмутации допустимо иметь по разным оценкам не более 3–100 неподготовленных заранее остановок (длительностью более 0,15 с) в год. При более холодных мишенях эти жесткие требования ослабляются до 10 тыс. остановок в год. Однако известно, что реакторы «не любят» самопроизвольных скачков нейтронных потоков и теплового режима. Исследуемая в ИТЭФ идея с малозазорными резонаторами, способными обеспечить безостановочное ускорение в основной части машины [52, 53], фактически повторена в предложении INFN [30]. В проекте APT с линейным ускорителем на 100 мА непрерывного тока для повышения надежности предусматриваются в количестве 5% «избыточные» комплекты генератор—резонатор [57].

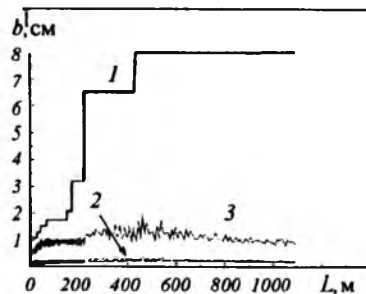
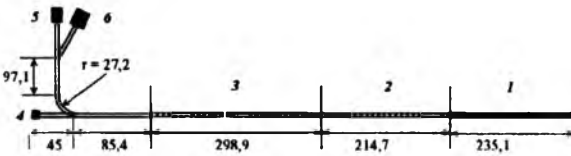


Рис. 1. Расчетное отношение апертуры канала к среднеквадратичному размеру пучка вдоль ускорителя APT: 1 — апертура; 2 — среднеквадратичный размер пучка; 3 — экстремальные частицы (L — расстояние вдоль оси пучка; b — поперечный размер пучка)



Р и с. 2. Схема ускорителя АРТ: 1 — резонаторы, работающие при комнатной температуре, на энергию 212,1 МэВ, темп ускорения 0,9 МэВ/м; 2, 3 — сверхпроводящие резонаторы на 471,4 и на 1030 МэВ соответственно, средний темп ускорения 1,6 МэВ/м; 4, 5 — ловушка 0,1 и 2% пучка соответственно; 6 — мишень и бланкет (размеры указаны в м)

инженерных разработок ускорителя. В Лос-Аламосской лаборатории широким фронтом развернуто изготовление и испытание всех ключевых узлов этой машины, построенных по самой совершенной на сегодня технологии. Схема и основные параметры ускорителя АРТ представлены на рис. 2 и в табл. 3 [14].

Проект АРТ для наработки испытующегося в боеголовках трития в количестве от 1,5 до 3 кг/год при энергии пучка соответственно 1 или 1,7 ГэВ был предложен еще в 1989 г. [16]. Хотя к постройке завода АРТ решено пока не приступать (третий будет производиться по-прежнему в энергетических реакторах), все же в настоящее время в США утверждено финансирование всех необходимых

Т а б л и ц а 3. Основные параметры ускорителя АРТ

Параметры	«Теплые» резонаторы			Сверхпроводящие резонаторы		
	RFQ	CCDTL	CCL	$\beta = 0,64$	$\beta = 0,64$	$\beta = 0,82$
Выходная энергия, МэВ	6,7	96,6	211,4	242	471,4	1030
Градиент структуры $E_0 T$, МВ/м	1,38	2,04—1,68	1,68—1,82	4,3—4,5	4,3—5,0	5,25
Средний градиент, МВ/м	1,38	0,77—1,12	1,12—1,22	1,21—1,54	1,21—1,54	2,05
Пиковое поле на поверхности, МВ/м				14,1—17,7	1,21—1,54	2,05
Длина секции, м	8	112,8	110,4	29,3	185,4	298,9
Число квадруполов		243	114	12	60	70
Синхронная фаза, град	От -90 до -33	От -90 до -30	-30	От -30 до -35	От -30 до -42	-30
Шунт-импеданс, МОм/м		16—49	24—35			
Потери ВЧ-мощности в меди, МВт	1,26	5,0	6,8			
Мощность пучка, МВт	0,67	8,99	11,48	3,06	26,0	55,86
Число клистронов	3	17+6	24+5	6	30	70
Поперечный эмиттанс*, мм·мрад	0,16	0,17	0,17	0,16—0,19	0,16—0,19	0,19—0,17
Продольный эмиттанс*, МэВ·град	0,32	0,33	0,33	0,33—0,32	0,33—0,32	0,32—0,41
Радиус апертуры, мм	2,3—3,4	10—17,4	17,4—31,9	65	65	80
Отношение апертуры к среднеквадратичному размеру пучка		6,5—10	10—27	28—31	28—31	32—76

*Среднеквадратичные значения.

Начальная часть ускорителя LEDA включает налаженный ранее протонный инжектор на 75 кэВ, 100 мА, ускоряющую структуру RFQ на 6,7 МэВ и структуру CCDTL с ВЧ-питанием на 10 МэВ. В начаты в 2000 г. испытаниях RFQ ускорителя LEDA сначала в импульсном (30—200 мкс, 1—10 Гц), затем и непрерывном режиме были получены [7, 17] параметры пучка, заложенные при проектировании начальной части машины. Эти испытания подтвердили правильность принципов построения систем мощного ВЧ-питания [57, 58], авторегулирования и управления режимами [59]. В ближайшее время будут всесторонне испытаны два типа сверхпроводящих резонаторов для $\beta = 0,64$ и $\beta = 0,82$, на которых строится вся высокоэнергетическая часть

машины, статическая система расширения (или динамическая система развертки) выходного пучка диаметром всего 1 мм в равномерно засвечиваемый растр размером 19×190 см [60] и многие другие технические решения для нового диапазона мощности пучка, а также необходимое инженерное обеспечение. В частности, большой интерес представляют блоки питания на биполярных транзисторах IGBT, обеспечивающие питание ВЧ-системы как в импульсном, так и в непрерывном режиме [61]. На этих перспективных транзисторах в ИЯФ (Новосибирск) также разработаны прецизионные источники питания различного назначения [62]. При разработке АРТ фактически решена сложнейшая проблема ввода в сверхпроводящие резонаторы расчетной мощности 210 кВт при частоте 700 МГц (на стенде через петли связи и окна с керамическими дисками вводили мощность 500—1000 кВт, что позволило вдвое сократить число дорогостоящих вводов). Окна ввода и «теплые» петли на 350 МГц уже испытаны при запуске ускорителя LEDA на мощности до 1 МВт [63, 64]. Результаты деятельности разработчиков проекта АРТ и привлеченных промышленных фирм приводятся в многочисленных докладах на ускорительных конференциях последних лет.

Стоимость проекта АРТ оценена в 3,5 млрд дол. плюс вспомогательные инженерные сооружения 1 млрд дол., расходы по эксплуатации оцениваются 150 млн дол. в год [13]. При меньшем токе пучка 10—30 мА полная стоимость линейного ускорителя уменьшается на порядок — до 300—400 млн дол. [21, 39]. Отметим, что в некоторых смелых проектных предложениях указываются темпы ускорения до 15 МэВ/м (что численно совпадает с обычно выбираемым градиентом ускоряющего напряжения в заоре) и заметно меньшая стоимость.

Нейтронный генератор SNS сооружается на площадке Ок-Риджской лаборатории, он предназначен, в первую очередь, для материаловедческих исследований. Работы (а затем и ассигнования) еще в 1995 г. были разделены между ведущими научными центрами США соответственно накопленному в этих центрах опыту. Начальная часть ускорителя, состоящая из источника ионов H^- и секции RFQ на энергию 2,5 МэВ, проектируется и изготавливается в Лоуренсовской лаборатории в Беркли. Весь ускоритель на энергию 1030 МэВ разрабатывается в Лос-Аламосской лаборатории. Брукхейвенской лаборатории поручена разработка кольцевого аккумулятора-компрессора, поставляющего на мишень мощные короткие импульсы протонного тока. Ок-Риджская лаборатория ответственна за мишень и все инженерное обеспечение комплекса, а также вместе с Аргоннской лабораторией — за подготовку 10 экспериментальных установок для работы на нейтронных пучках. Мощность выходного пучка ускорителя SNS по последней публикации [24] составит 2,65 МВт. Вначале предполагалось использование хорошо освоенной технологии «теплых» резонаторов, однако успехи в разработке сверхпроводящих резонаторов вызвали коррекцию проекта [22]. В высокоэнергетичной части будет использована криогенная технология, обеспечивающая средний темп ускорения по всему ускорителю 3,7 МэВ/м. Основное финансирование проекта началось с 2000 г., многие ключевые узлы ускорителя уже моделируются и испытываются. Основные параметры комплекса SNS следующие [22]:

Мощность пучка на мишени, МВт . . .	~2
Средний ток пучка на мишени, мА . . .	~2
Частота повторения импульсов, Гц . . .	60
Длина, м . . .	335
Выходная энергия DTL, МэВ . . .	87
Частота ВЧ-поля DTL, МГц . . .	402,5
Выходная энергия CCL, МэВ . . .	185
Число резонаторов . . .	92
Выходная энергия ускорителя, ГэВ . . .	~1
Частота ВЧ-поля CCL и SCL, МГц . . .	805
Коэффициент заполнения, % . . .	6

Проверен в работе прототип уникальной мишени с 20 т ртути и протоком 30 л/с [23]. Плановый срок запуска SNS — 2005 г. Это будет наиболее мощный в мире нейт-

ронный генератор, в котором после накопителя-компрессора на мишень будет поступать пучок интенсивностью $2 \cdot 10^{14}$ протонов в импульсе длительностью 695 нс с частотой 60 Гц. Относительное распределение стоимости ускорителя SNS 330 млн дол. по системам таково [6], %:

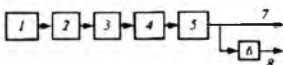
ВЧ . . .	35
DTL+CCCL . . .	15
Криомодули . . .	14
Управление . . .	10
Криогеника . . .	8
Начальная часть . . .	7
Диагностика . . .	6
СВЧ-лаборатория . . .	3
Фокусировка . . .	2

Некоторые практические сведения, использованные при оценке стоимости импульсного ускорителя, следующие [39]:

«Теплый» резонатор, тыс. дол./м . . .	150
Сверхпроводящий резонатор, тыс. дол./м . . .	500
Клистронный генератор, дол./Вт ВЧ-мощности . . .	2,5
К.п.д. импульсной ВЧ-системы . . .	0,45
Криосистема при 2 К, тыс. дол./Вт . . .	2
К.п.д. криосистемы при 2 К . . .	0,004
Туннель, тыс. дол./м . . .	100
Силовые кабели, дол./Вт . . .	0,14
Электроэнергия, дол./ (кВт·ч) . . .	0,05

Отметим, что полная стоимость проекта SNS, включая линии транспортировки пучка, мишень и все инженерное обеспечение, составляет около 1300 млн дол. [21]. Многоцелевое [9] использование таких установок будет обеспечивать значительно большую экономическую эффективность.

В Японии после нескольких лет работы над проектами отдельных установок для научных исследований (КЕК [65]) и прикладного применения (JAERI [66]) подготовлен к реализации объединенный проект JAERI/КЕК [25—27], представляющий собой комплекс из линейного ускорителя-драйвера, быстроциклического синхротрона RCS на энергию 3 ГэВ со средней мощностью пучка 1 МВт и синхротрона на 50 ГэВ. Протонные пучки разной энергией и интенсивностью будут направляться к площадкам с экспериментальными установками для исследований в области физики высоких энергий и ядерной физики, биологии, медицины, материаловедения и трансмутации ядерных отходов. Предусмотрено создание высокоинтенсивных пучков ионов, мюонов и нейтрино. Для линейного ускорителя-драйвера (рис. 3) уже изготовлены (в рамках прежде раз-



Р и с. 3. Блок-схема линейного ускорителя-драйвера установки JAERI/КЕК: 1 — ионный источник, энергия 50 кэВ; 2 — RFQ, энергия 3 МэВ, длина 3 м; 3 — DTL, энергия 50 МэВ, длина 27 м; 4 — SDDL, энергия 200 МэВ, длина 99 м; 5 — ACS, энергия 400 МэВ, длина 104 м; 6 — SCC (сверхпроводящие резонаторы), энергия 600 МэВ, длина 67 м; 7 — выход к быстроциклическому синхротрону RCS на энергию 3 ГэВ; 8 — вывод пучка для экспериментов по трансмутации; рабочая частота секций 2—5 равна 324 МГц, секции 6 — 972 МГц

дельных проектов NSP и JHF) инжектор и структура RFQ, частично изготовлены резонаторы DTL, ведутся ВЧ-испытания, исследуются параметры пучка в начальной части ускорителя, экспериментально изучаются конструкции и характеристики сверхпроводящих резонаторов оконечной части машины. Полная длина линейного ускорителя-драйвера 360 м.

Усилия, предпринимаемые по другим проектам мощных линейных ускорителей-драйверов из табл. 2, значительно скромнее: кроме расчетно-теоретических работ только в нескольких лабораториях (проекты ESS, TRASCO, KOMAC, KURRI) начато изготовление прототипов структур RFQ, DTL и моделей сверхпроводящих секций на разные значения β . Многие ценные технические решения по APT и SNS будут использованы в этих проектах. В первую очередь это касается французского проекта TRISPAL [9, 28], также предназначенного для наработки трития и экспериментальных работ на

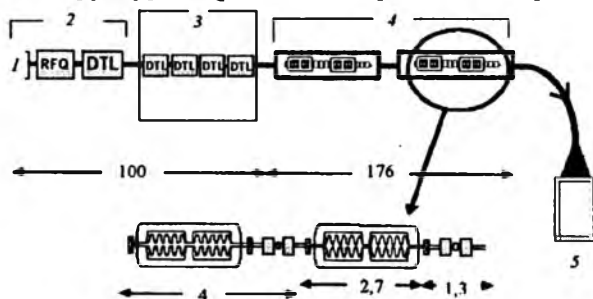
нейтронных пучках. Начаты работы по сооружению начальной части ускорителя с сильноточным источником ионов SILHI, структур RFQ и SDTL (короткие DTL-резонаторы с квадрупольями между ними) на энергию до 10 МэВ. Исследуются варианты сверхпроводящих структур для высоких значений β с темпом ускорения 2,1 МэВ/м. Разрабатывается демонстрационная установка, схема которой приведена на рис. 4.

Международный проект IFMIF (рис. 5) с двумя расположенными параллельно дейтронными линейными ускорителями на 40 МэВ с рабочей частотой 175 МГц и непрерывным током пучка 2×125 мА предназначен, в первую очередь, для материаловедческих исследований воздействия быстрых (энергией 14 МэВ) нейтронов на конструкционные материалы [38]. Проектная плотность нейтронного потока в испытательном объеме 0,5 л составляет $2 \text{ МВт/м}^2 (9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2})$. Этот нейтронный генератор разрабатывается ведущими специалистами США, Японии, Италии, Германии, Франции, от России участвует В.А. Тепляков.

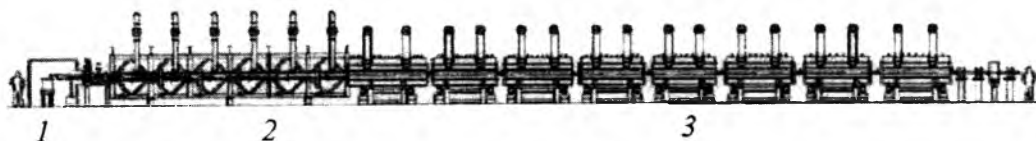
В различных проектных предложениях МРТИ на ток пучка от 3 до 300 мА [40, 41] предусматривается использование 9-ячеечных сверхпроводящих резонаторов. При относительно малом токе пучка фокусировка может осуществляться с использованием редкоземельных квадруполей, устанавливаемых между резонаторами. В работе [42] представлено совместное проектное предложение линейного ускорителя-драйвера ведущих институтов России (см. табл. 2), где сформулированы подходы к выбору структуры ускорителя, рассмотрены вопросы обеспечения радиационной чистоты, надежности и экономической эффективности.

В Брукхейвенской лаборатории предложено создать мощную многоцелевую электроядерную установку на базе имеющегося высокопоточного быстрого реактора HFBR и разработанного проекта сверхпроводящего протонного линейного ускорителя на 1 ГэВ, 10 мА стоимостью 300 млн дол. [39].

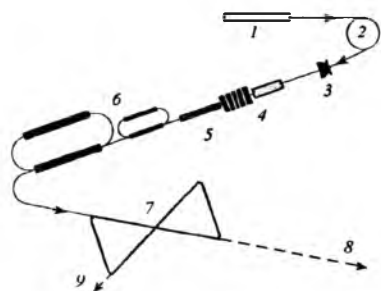
В проекте нейтринной фабрики CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) линейный ускоритель-драйвер имеет энергию 2 ГэВ и среднюю мощность импульсного пучка 4 МВт [10]. Наибольшую трудность в этом проекте представляет получение на мишени мюонных пучков с малым фазовым объемом для их дальнейшего ускорения до 50 ГэВ в двух линейных ускорителях-рециркуляторах, а не создание линейного ускорителя-драйвера, мощность которого не является рекордной. Мощные нейтринные пучки будут образовываться при распаде мюонов в накопителе. Все составляющие этой сложной установки показаны на рис. 6. В Лаборатории им. Э. Ферми также рассматривается предложение создать мощный нейтринный генератор с детекторами, удаленными на расстояние ~ 3 тыс. км [67].



Р и с. 4. Схема демонстрационной установки (проект TRISPAL): 1 — ионный источник, энергия 95 кэВ; 2 — инжектор (частота 352 МГц): RFQ — энергия 5 МэВ, DTL — энергия 10 МэВ; 3 — промежуточная часть ускорителя, энергия 85 МэВ; 4 — SCL оконечная часть (704 МГц), энергия 450 МэВ; 5 — мишень (размеры указаны в м)



Р и с. 5. Схема одного из двух одинаковых ускорителей установки IFMIF: 1 — инжектор; 2 — RFQ (175 МГц); 3 — восемь резонаторов DTL (175 МГц) (полная длина ускорителя 50 м)



Р и с. 6. Схема нейтринной фабрики по проекту CNGS: 1 — линейный ускоритель ионов H^- , энергия 2 ГэВ, мощность пучка 4 МВт; 2 — кольцевой аккумулятор-компрессор; 3 — мишень; 4 — ионизационное охлаждение мюонного пучка; 5 — линейный ускоритель, энергия 2 ГэВ; 6 — линейные ускорители-рециркуляторы, энергия 50 ГэВ; 7 — циркулятор-накопитель длиной 2 км, в котором при распаде мюонов генерируются интенсивные потоки нейтрино; 8 — пучок нейтрино на ближний детектор; 9 — пучок нейтрино на дальний (732 км) детектор, установленный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия)

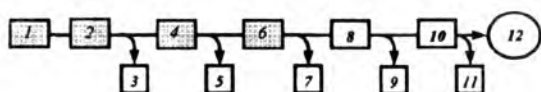
Электроядерные установки малой мощности. Существенную экономию средств при сооружении полномасштабных установок можно получить, если предварительно изучить особенности работы гибридной системы ускоритель—реактор относительно малой мощности, которые сами по себе не имеют энергетического значения. Такие установки создаются в Кадараше (Франция), Соснах (Белоруссия), Университете Киото (Япония) и ИТЭФе.

Простейшим способом дополнительной подпитки субкритической ядерной сборки нейтронами является погружение в активную зону радиоизотопного нейтронного источника. В Кадараше на критической сборке MAZURCA для этой цели используется источник с ^{252}Cf с выходом нейтронов $7,6 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. В настоящее время в этом центре значительное повышение интенсивности дополнительного потока будет достигнуто благодаря вводу в строй D—T-генератора GENEPI [68] с импульсным (0—3 кГц, 1 мкс) ускорителем прямого действия на 240 кэВ с выходом нейтронов $(5—10) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Такую же схему имеет субкритическая установка в Соснах (Белоруссия), где D—T-генератор ЯЛИНА с вращающейся мишенью и током дейтронного пучка

10 мА, ускоренного до 250 кэВ, рассчитан на выход нейтронов 10^{12} с^{-1} [69].

Установки относительно небольшой мощности, полностью повторяющие схемы полномасштабных электроядерных установок, создаются в Университете Киото (проект KURRI) и ИТЭФе [70—72]. В этих научных центрах развиты работы по объединению субкритических сборок и импульсных резонансных линейных ускорителей в гибридные комплексы, которые могут оказаться первыми действующими электроядерными системами. На них как на прототипах впервые смогут быть экспериментально исследованы многие вопросы динамики сложения нейтронных потоков, зависящих от взаимодействия режимов работы ускорителя и критической сборки. Обе установки спроектированы для многоцелевого использования, в каждой из них уже имеется большой задел.

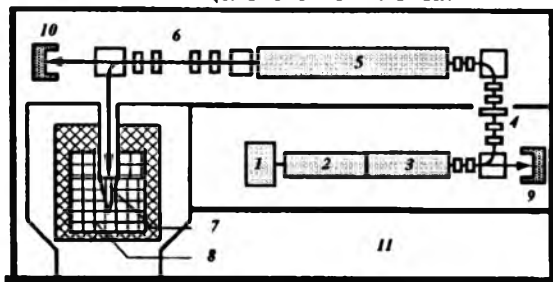
В проекте KURRI предлагается субкритическую сборку KUCA и реактор KUR объединить с разрабатываемым многосекционным ускорителем с указанными на рис. 7 параметрами [70]. Проект разбит на два больших этапа: до



Р и с. 7. Схема электроядерной установки по проекту KURRI: 1 — инжектор D^- и H_2^+ , энергия 50 кэВ, ток пучка 100 мА; 2 — секция RFQ-1 на энергию 400 кэВ, ток пучка 100 мА, рабочая частота 108 МГц; 3 — вывод дейтронов на тритиевую мишень, получение нейтронов энергией 14 МэВ и выходом $2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ для испытания реакторных материалов; 4 — секция RFQ-2 на энергию 2 МэВ, средний ток пучка 10 мА, рабочая частота 108 МГц; 5 — вывод дейтронов на бериллиевую мишень, получение $1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ холодных нейтронов для медицинских целей; 6 — секция DTL-1 на энергию 20 МэВ, средний ток пучка 1 мА, частота 216 МГц, на выходе секции — перезарядка $H_2^+ \rightarrow p$; 7 — вывод дейтронов и протонов на бериллиевую или урановую мишень для получения быстрых и холодных нейтронов ($1 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$) для исследований в области реакторной физики; 8 — секция DTL-2 на энергию 100 МэВ, средний ток пучка 0,3 мА, рабочая частота 432 МГц; 9 — вывод протонов на бериллиевую или урановую мишень для получения быстрых и холодных нейтронов ($5,6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$) для исследований в области высокоэнергетичной нейтронной физики; 10 — секция DAW (с дисками и диафрагмами) на энергию 300 МэВ, средний ток пучка 0,3 мА, рабочая частота 1296 МГц; 11 — вывод протонов на бериллиевую или урановую мишень для получения потока нейтронов $3,7 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; 12 — подкритическая сборка, куда выводится протонный пучок энергией 300 МэВ и средним током 0,3 мА

энергии ускорителя 20 МэВ с имеющимися ядерными установками и в дальнейшем — до 300 МэВ для работы на реконструированный реактор KUR-M. На рис. 7 подробно показано также последовательное развитие этого многоцелевого комплекса.

Протонный линейный ускоритель-драйвер электроядерной установки, сооружаемой в ИТЭФе [71, 72], размещается на двух этажах рядом с остановленным тяжеловодным реактором, в корпусе которого будет собрана подкритическая мишенно-бланкетная система (рис. 8). Энергия протонов, выводимых по дополнительным и основному каналам, равна 3, 10 и 36 МэВ. В дальнейшем имеется принципиальная возможность увеличения среднего тока пучка от проектного 0,5 до 4—5 мА (при соответствующем повышении мощности системы ВЧ-питания), энергии — до 100—150 МэВ (при установке дополнительных сверхпроводящих резонаторов).



Р и с. 8. Схема электроядерной установки ИТЭФа: 1 — инжектор, энергия 81 кэВ; 2 — секция RFQ, энергия 3 МэВ; 3 — секция DTL-1, энергия 10 МэВ; 4 — межэтажный ионопровод; 5 — секция DTL-2, энергия 36 МэВ; 6 — выходной ионопровод; 7 — бериллиевая мишень; 8 — подкритический бланкет; 9 — станция наработки эмиттеров для позитрон-эмиссионной томографии; 10 — станция производства радионуклидов медицинского и промышленного назначения; радиационное назначение; 11 — технологические помещения

Основные параметры установки следующие:

Энергия протонов на выходе, МэВ . . .	36
Средний ток пучка, мкА . . .	500
Средняя интенсивность потока протонов, c^{-1} . . .	$3,1 \cdot 10^{15}$
Средняя мощность пучка, кВт . . .	18
Длительность импульсов тока пучка, мкс . . .	200
Ток пучка в импульсе, мА . . .	100
Частота повторения импульсов, Гц . . .	25
Частота ВЧ-поля, МГц . . .	148,5; 297
Средний темп ускорения, МэВ/м . . .	1,8

Кратко рассмотренные здесь проекты показывают наличие в мире большого интереса к установкам с высокоинтенсивными пучками заряженных частиц и реальность их осуществления на основе новых идей, прогресса теории и технологии. Работы за рубежом по этой актуальной тематике ведутся многими институтами совместно. В частности, для координации работ 6—8 декабря 1999 г. в ЦЕРНе состоялась встреча специалистов европейских научных центров из Италии, Франции, Германии и других стран с обсуждением полученных результатов, программ дальнейших работ и объединения усилий. Несколько европейских институтов в рамках программы CONCERT (Combined Neutron Center for European Research and Technology) начали двухгодичную работу по оптимизации архитектуры построения мощного линейного ускорителя для гибридной (т.е. с размножающим бланкетом) демонстрационной установки.

Российские специалисты-ускорительщики благодаря высокому научному уровню и многим плодотворным идеям в настоящее время широко привлекаются к участию в разработках сильноточных машин в лабораториях США, Японии и Европы. Хочется надеяться, что проектные предложения по сверхмощным ускорителям ведущих российских институтов [40—46, 67, 73, 74] найдут пути к реализации в стране и российская ускорительная наука и техника внесет весомый вклад в освоение электроядерной технологии будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tunnicliffe P., Chidley B., Fraser J. High current proton linear accelerators and nuclear power. — In: LINAC-76, p. 36—44.
2. Schriber S. Future of high intensity accelerators in nuclear energy. — In: X Intern. Conf. on High Energy Accelerators, 1977, v. 2, p. 408—420.

3. Капчинский И.М., Тепляков В.А. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой. — Приборы и техника экспер., 1970, № 2, с. 19—21. Капчинский И.М., Тепляков В.А. О возможности снижения энергии инъекции и повышения предельного тока в ионном линейном ускорителе. — Там же, № 4, с. 17—19.
4. Капчинский И.М. Сильноточные линейные ускорители ионов. — Успехи физ. наук, 1980, т. 132, вып. 4, с. 639—661.
5. Gardner I. A review of spallation neutron source accelerators. — In: EPAC-98, p. 98—102.
6. Lagniel J. Linac architecture for high power proton sources. — In: LINAC-2000, Report FR-103.
7. Schneider J. Overview of high-power CW proton accelerators. — In: EPAC-2000, p. 118—122.
8. Lagniel J. A review of linacs and beam transport systems for transmutation. — In: EPAC-98, p. 93—97.
9. Lagniel J. High-power proton linac for multi-user facility. — In: LINAC-2000, Report FR-103.
10. Haseroth H. Status of studies for a neutrino factory at CERN. — In: EPAC-2000, p. 253—255.
11. Иоффе Б.Л., Капчинский И.М., Лазарев Н.В. и др. Схема высокопоточного генератора нейтронов с линейным ускорителем. — В сб.: VI Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978, т. 1, с. 236—240.
12. Pottmeyer E. Construction of a high intensity deuteron linac with an energy of 35 MeV and an intensity of 100 mA CW. — Ibid., p. 264—269.
13. Lisovski P. The APT Project. — In: PAC-97, p. 3780—3784.
14. Lawrence G. High-power proton linac for APT; status of design and development. — In: LINAC-98, p. 26—30.
15. Funk L., Crandal K., Gilpatrick J. e.a. Development of a commissioning plan for the APT linac. — Ibid., p. 412—414.
16. Anderson J., Lisowsky P., Bishop W. e.a. Status of the APT project. — In: ADTTA-99, p. 643—652.
17. Smith H., Figueroa T., Gilpatrick J. e.a. Commissioning results from the LEDA RFQ. — In: EPAC-2000, p. 969—971.
18. Chan K., Kusminski J., Gautier R. e.a. Status of SC RF linac development for APT. — In: LINAC-2000, Report THD 17.
19. Alonso J. Status report on the spallation neutron source project. — In: EPAC-98, p. 493—495.
20. Jason A. A linac for SNS. — In: LINAC-98, p. 415—417.
21. Hardekopf R. Project status of the 1 GeV SNS linac. — In: PAC-99, p. 3597—3599.
22. Kustom R. An overview of the SNS project. — In: LINAC-2000, Report TU-101.
23. Mason T., Gabriel T., Crawford R. e.a. The SNS: a powerful tool for material research. — Ibid., Report FR-203.
24. Stovall J., Nath S., Takeda H. e.a. SC linac for the SNS. — Ibid., Report TUD 22.
25. Yamazaki Y., Mizumoto M. Acceleration complex for the joint project of KEK/JHF and JAERI/NSP. — In: PAC-99, p. 513—517.
26. Yamazaki Y., Mori Y., Mizumoto M., Yokomizo H. High intensity proton accelerator for the JAERI/KEK joint project. — In: EPAC-2000, p. 286—288.
27. Hasegawa K., Kato T. KEK/JAERI joint project; status of design and development. — In: LINAC-2000, Report TU102.
28. Lagniel J. High intensity linac studies in France. — In: LINAC-98, p. 706—710.
29. Pagani C., Barni D., Bellomo G. e.a. Status of the INFN high current SC proton linac for waste transmutation. — Ibid., p. 1013—1015.
30. Comunian M., Facco A., Pisent A. 100 MeV SC proton linac: beam dynamic issues. — Ibid., p. 64—66.
31. Park C., Ahn H., Choi B. e.a. The KOMAC project: accelerator and transmutation project in Korea. — In: APAC-98, p. 319—321; Status of the KOMAC project. — In: ADTTA-99, p. 200—209.
32. Choi B., Han J., Cho Y. e.a. Development of the low energy accelerator for KOMAC project. — In: LINAC-2000, Report TUD 21.
33. Bauer G. The European spallation source study ESS. — In: ADTTA-96, p. 159—168.
34. Gardner I., Lengeler H., Bongardt K. e.a. Status of the ESS design study. — In: PAC-97, p. 988—990.
35. Schindl K. A pulsed spallation source in Central Europe. — In: EPAC-92, p. 432—435.
36. Weber G. The AUSTRON: Austria's invitation to Europe. — CERN-Courier, 1998, v. 38, № 9, p. 24—26.
37. Rubbia C., Rubio J. A Tentative Programme Towards a Full Scale Energy Amplifier. CERN/LHC/96-11/(EET), 15 July 1996.
38. Shannon T., Katsuta H., Teplyakov V.A. e.a. IFMIF: a high intensity deuteron beam application. — In: EPAC-98, p. 231—235.
39. Alessi J., Raparia D., Ruggiero A. A SC linac driver for the BNL-HFBR reactor. — In: LINAC-2000, Report TUD-19.
40. Murin B.P., Batskikh G.I., Belugin V.M. e.a. SC CW proton linac for the energy of 1 GeV and current 2—3 mA. — In: EPAC-2000, p. 954—956. Murin B.P., Batskikh G.I., Belugin V.M. e.a. A Design of 1 GeV, 30 mA proton linac with SC cavities. — In: LINAC-98, p. 303—305.
41. Batskikh G.I., Belugin V.M., Bondarev B.I. e.a. High power proton linacs for different applications. — In: LINAC-2000, Report TUD 11. Batskikh G.I., Belugin V.M., Bondarev B.I. e.a. SC devices in high current linear proton accelerators for energy purposes. — In: ADTTA-96, p. 1047—1053.

42. Шведов О.В., Мурин Б.П., Тепляков В.А., Кравчук Л.В. и др. Высокомощный линейный ускоритель протонов — драйвер электроядерных систем: Препринт ИТЭФ 35-99, 1999.
43. Венгров Р.М., Кашинский Д.А., Коломиец А.А. и др. Ускоряюще-фокусирующий канал ускорителя протонов высокой мощности на основе сверхпроводящих однозазорных резонаторов. Тезисы докл. XVII сов. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 17—20 октября 2000 г., с. 54.
44. Атачкин А.Ж., Беляев О.К., Бородин В.Е. и др. Предложения по созданию начальной части ускорителя с непрерывным режимом. — Там же, с. 4.
45. Kravchuk L. Proton linac of the Moscow meson factory for the ADTT experiments. — In: ADTTA-96, p. 1104—1106.
46. Kravchuk L.V., Ostroumov P.N. Upgrade study of INR proton linac for production of 3 MW beam. — In: PAC-99, p. 3282—3284.
47. Schriber S., Mandrillon P. Accelerator break-out group summary. — In: ADTT-96, v. 2, p. 1163—1165.
48. Pichoff N., Safa H. Reliability of SC cavities in a high power proton linac. — In: EPAC-2000, p. 2049—2051.
49. Safa H. Progress and trends in SCRF cavities for future accelerators. — Ibid., p. 197—199.
50. Palmieri V., Lombardi A. Eds. 8th Workshop on SC RF-1997. LNL-INFN (Rep) 133/98.
51. Chan K., Rusnak B., Gentzlinger R. e.a. Engineering development of superconducting RF linac for high-power applications. — In: EPAC-98, p. 1843—1845.
52. Андреев В.А., Балабин А.И., Венгров Р.М. и др. Новая концепция радиационно-чистого высоконадежного сильноточного линейного ускорителя протонов. — В сб.: XV сов. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1996, т. 2, с. 279—282.
53. Kolomiets A.A., Andreev V.A., Chuvilo I.V. e.a. Some new ITEP approaches to design of high intensity proton linac for transmutation. — In: LINAC-96, p. 420—422.
54. Козодаев А.М., Лазарев Н.В., Лякин Д.А. и др. Проблема надежности сверхмощных ускорителей-драйверов ЭЛЯУ. — Труды III Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, ОИЯИ, 2000, с. 35—41.
55. Kozodaev A.M., Lazarev N.V., Lyakin D.A. e.a. Simulation of proton beam behavior in high energy linac with few-gaps resonators at failure of one or some of them. — In: EPAC-2000, p. 830—832.
56. Лякин Д.А., Козодаев А.М., Лазарев Н.В. и др. Задача повышения надежности мощных линаков-драйверов ЭЛЯУ. Тезисы докл. XVII сов. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 17—20 октября 2000 г., с. 54.
57. Rees D. Design of 250 MW CW RF system for APT. — In: PAC-97, p. 2889—2893.
58. Rees D., Bradley Jr., Cummings K. Design operation and test results of 350 MHz LEDA RF system. — In: LINAC-98, p. 564—566.
59. Regan A., Balleyguier P., Ziomec C. LEDA LLRF control system characterization. — In: LINAC-98, p. 944—946.
60. Shafer R., Blind B., Gray E. e.a. Overview of the APT high energy beam transport and beam expanders. — In: PAC-97, p. 83—85.
61. Bradley J., Rees D., Przeklasa P. APT HV modulator with IGBT. — In: LINAC-98, p. 561—563.
62. Антонов В.В., Веремеенко В.Ф., Ермолов Э.Ю. и др. Разработка прецизионного источника питания электромагнитов с применением IGBT-модулей. — Там же, с. 63.
63. Schmierer E., Chan K., Gautier D. e.a. High-power testing of APT coupler. — In: LINAC-2000, Report THD 16.
64. Cummings K., Borrego M., Debaca J. e.a. Lifetime testing 700 MHz RF windows for the APT program. — Ibid., Report THE 04.
65. Akaoka N., Chishiro E., Hasegawa K. e.a. High intensity proton accelerator for neutron science project at JAERI. — In: EPAC-98, p. 746—748.
66. Kato T., Yamazaki Y. Design of 200 MeV proton linac for the Japan hadron facility. — In: LINAC-98, p. 409—411.
67. Lebrun P. Feasibility neutrino source based on intense muon beams. Тезисы докл. XVII сов. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 17—20 октября 2000 г., с. 45.
68. De Conto J. GENEPI: a high intensity deuteron accelerator for pulsed neutron production. — In: EPAC-98, p. 685—687.
69. Chigrinov S.T., Serafimovich I.G., Rutkovskaya C.K. e.a. A small-scale set-up for research of some aspects of accelerator driven transmutation technologies. — In: ADTTA-99, p. 1023—1030.
70. Kawase Y., Shiroya S., Inoue M. An accelerator-assisted nuclear fuel assembly for a future project at KURRI. — In: LINAC-98, p. 300—302. Kawase Y., Shiroya S., Inoue M. Neutron factory project at KURRI. — In: APAC-98, p. 104—106.
71. Chuvilo I., Katz M., Kozodaev A. e.a. Proton 36 MeV, 0,5 mA linac ISTRA-36 as a driver of multipurpose irradiation test facility. — In: EPAC-96, p. 2674—2676.
72. Козодаев А.М., Венгров Р.М., Дроздовский А.А. и др. Перспективы развития линака-драйвера нейтронного генератора ИТЭФ. — In: Intern. Conf. on Sub-Critical Accelerator Driven Systems, ITEP, 1999, p. 258—261.

73. Михайлов В.Н. Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей. — Краткие сообщения ОИЯИ 1996, № 6 [80], с. 17—22.
74. Михайлов В.Н., Богданов П.В., Шведов О.В. и др. Сильноточный линейный ускоритель протонов для электроядерных систем. — Труды III Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, ОИЯИ, 2000, с. 130—138.

Поступила в Редакцию 27.09.2000

УДК 621.039.76+614.876

ВЛИЯНИЕ УТИЛИЗАЦИИ АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК НА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ РЕГИОНЕ

*Данилян В.А. (ИБРАЭ), Высоцкий В.Л., Максимов А.А. (ВМФ),
Сивинцев Ю.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Первоначальная стратегия утилизации атомных подводных лодок после их вывода из боевого состава флота предусматривала последовательное выполнение трех этапов: выгрузку отработавшего ядерного топлива, вырезку и транспортировку реакторного отсека на удаленную от населенных пунктов береговую площадку длительного хранения. Этим предполагалось обеспечивать безопасность персонала, населения и окружающей среды.

К сожалению, вывод из эксплуатации в короткий срок большого числа лодок значительно превысил возможности обеспечивающих предприятий страны. В результате их вместе с отработавшим топливом на борту стали переводить в фазу промежуточного хранения с ожиданием выгрузки, после разделки временно содержать на плаву в пунктах базирования в виде трехотсечных модулей. Причина такого нетрадиционного подхода состоит в отсутствии промышленной инфраструктуры необходимой мощности, в результате чего и была принята временная схема. Подобная вынужденная мера не решает проблему на длительную перспективу, но с этим предстоит считаться как с объективной реальностью еще не менее 20 лет.

Отход от зарубежной схемы утилизации породил у многих международных организаций опасения, которые связаны с возможностью возникновения ядерных аварий, сопровождающихся трансграничным переносом радиоактивных веществ, что побудило проведение соответствующих исследований [1]. Комитет НАТО по проблемам современного общества, анализируя положение дел с атомными подводными лодками, выводимыми из боевого состава ВМФ, позитивно оценил принятую Россией практику утилизации, но отметил незавершенность технологического цикла. Признано, что отклонения от традиционного подхода не критичны для утилизации, риск трансграничного переноса радиоактивных веществ относительно невелик. Наряду с этим отмечено, что в отдельных случаях не исключена возможность атмосферного переноса радионуклидов и образования локальных зон радиоактивного загрязнения окружающей среды [2]. Сложность проблемы определяется как большими масштабами, так и необходимостью комплексного учета множества факторов политического, экологического, социального и технологического характера.

Технологическая сторона проблемы, от которой зависит эффективность радиоэкологической безопасности, включает следующие основные направления деятельности:

безопасность длительного хранения на плаву выведенных из эксплуатации лодок (до 20 лет);

выгрузка и транспортировка отработавшего ядерного топлива для последующей переработки (в течение 15—20 лет);