

# Развитие резонансных ускорителей ВНИИЭФ: гибкость и мощность

М. Л. СМЕТАНИН, А. В. ТЕЛЬНОВ, И. В. ШОРИКОВ

В составе экспериментальной базы РФЯЦ-ВНИИЭФ (ИЯРФ) среди установок, моделирующих воздействие ионизирующих излучений с широким диапазоном амплитудно-временных и спектрально-энергетических характеристик, важное место занимают линейные резонансные ускорители электронов. В институте постоянно проводятся исследования по совершенствованию установок и расширению их возможностей. Импульсный режим работы высокочастотных (резонансных) линейных ускорителей электронов, использование тормозного излучения для генерации фотонейтронов и возможность применения в нейтронных исследованиях метода времени пролета послужили основанием (мотивацией) для создания во ВНИИЭФ (разработка Московского радиотехнического института, середина 1950 г.) линейного ускорителя МВ-15 (энергия электронов 15 МэВ). На ускорителе был выполнен ряд оригинальных исследований. В частности, впервые были получены данные по сечениям и спектрам образования  $\gamma$ -квантов в диапазоне энергией  $\gamma$ -квантов 1–5 МэВ на широком спектре нейтронов для ядер Cu, Mo и W, впоследствии включенные в мировую систему констант. Результаты этих исследований позволили обосновать необходимость создания нового сильноточного линейного ускорителя электронов для научных и прикладных исследований. Эти предложения были поддержаны научным руководством института (Ю. Б. Харитонов, А. И. Павловским), а затем и руководством министерства. Огромный вклад в окончательное решение вопроса о создании в институте такого ускорителя внес Л. Д. Рябев. Разработка такого ускорителя была выполнена в Московском радиотехническом институте (с участием ряда организаций) в 1972 г. Во ВНИИЭФ физический пуск ускорителя ЛУ-50 (55 МэВ, 10 А, 10 нс) состоялся в 1981 г. Достигнутые параметры пучка ускоренных электронов не уступали аналогичным показателям лучших в мире ускорителей такого класса и обеспечили высокую точность определения ядерно-физических констант.

Под руководством Ю. А. Хохлова для решения этих задач сформировался коллектив ученых, инженеров и высококвалифицированных лаборантов (Ю. Я. Глазунов, Н. П. Ситников,

В. П. Тарантасов, В. И. Иньков, Н. В. Завьялов, В. И. Панин, В. И. Демчишин, В. Н. Шикин, Ю. В. Соколов и др.), который определил возможность последующего развития и применения высокочастотных резонансных ускорителей на десятилетия вперед.

На ЛУ-50 специалистами в области радиационной и нейтронной физики (М. В. Савин, Л. Н. Генералов, А. Н. Ливке, И. А. Иванов, Д. Н. Шадрин и др.) был проведен большой объем фундаментальных и прикладных исследований. Были уточнены спектры нейтронов деления  $^{235}\text{U}$  нейтронами с энергией 14 МэВ под разными углами к направлению разлета осколков в системе координат осколков. Была получена дополнительная информация о механизме образования нейтронов деления, введены в практику исследований диэлектрические трековые детекторы (стекла, полимеры, природные минералы и т. д.), измерены в широком интервале энергий первичных нейтронов зависимости выхода вторичных нейтронов из  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и  $^{245}\text{Cm}$ .

Интересная научно-экспериментальная работа была выполнена (совместно с А. В. Галкиным и А. В. Григоренко) по калибровке кабельных измерительных каналов на прохождение очень коротких импульсов. Особенности временной структуры импульсов электронного пучка были использованы для выделения и регистрации одиночных сгустков электронов длительностью около 30 пс. Это позволило выйти на новый уровень в исследованиях быстропотекающих процессов. Возможность гибкой регулировки режимов работы позволили также провести на ЛУ-50 прецизионные радиографические эксперименты.

В связи с распространением на электроядерные установки принципа каскадных систем и предполагаемой возможностью существенного снижения мощности ускорителя в бланкете каскадного типа во ВНИИЭФ (ИЯРФ, 2000–2004 гг.) впервые в мире были проведены эксперименты с глубоко подкритичными уран-нептуниевыми моделями каскадного бланкета. Эксперименты проводились с использованием в качестве источника нейтронов ускорителя электронов ЛУ-50, а также изотопного источника нейтронов, размещенного в центре моделей. На

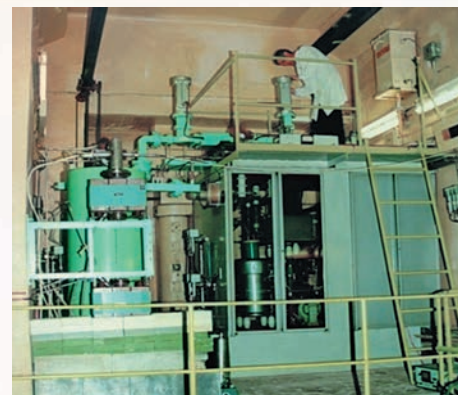
основе измерений определены числа делений в каскадах и числа нейтронов утечки с нормировкой на один нейтрон источника или один электрон ускорителя. Определен главный показатель каскадного blankets – коэффициент каскадного усиления. Эксперименты на моделях подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных blankets и возможность создания электроядерной установки на основе ускорителя частиц и каскадных blankets с использованием нептуния-237.

Опыт, накопленный при создании и эксплуатации ускорителей электронов МВ-15 и ЛУ-50, позволил в 1990-х гг. перейти к разработке линейных резонансных ускорителей промышленного назначения с энергией электронов до 10 МэВ. Сложная экономическая обстановка подтолкнула коллектив лаборатории к созданию в рамках конверсионной тематики высокотехнологичных изделий – надежных резонансных ускорителей электронов для радиационных технологий.

В 1994 г. был разработан и запущен линейный резонансный ускоритель ЛУ-10-20 (энергия электронов до 9 МэВ, средняя мощность пучка до 12 кВт). Работа проводилась в кооперации с МИФИ. В итоге совместных действий специалистов не только появился надежный промышленный образец ускорителя, но и разработаны расчетно-экспериментальные методики, освоены технологии и создана научно-практическая база для проектирования и изготовления резонансных ускорителей электронов с учетом специфики их применения. За счет реализации широких возможностей по регулировке энергии электронов 4–9 МэВ, мощности электронного и тормозного излучений, площади и формы области облучения на ускорителе ЛУ-10-20 проведен впечатляющий объем исследований по радиационной модификации полупроводников и полимеров, моделированию радиационного старения материалов, радиационно-термическому крекингу и радиационной переработке отработанного бутылкаучука. Ускоритель приобрел функции инструмента для радиационной модификации материалов с целью изучения их свойств.



Ускоритель ЛУ-50



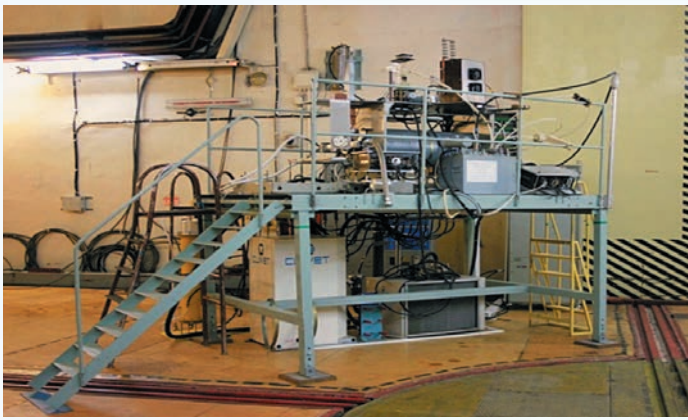
Ускоритель ЛУ-10-20

И вновь опыт, накопленный специалистами, позволил сделать следующий шаг – разработать и изготовить в 2004 г. транспортабельный линейный резонансный ускоритель ЛУ-7-2 (энергия электронов 7 МэВ при средней мощности пучка до 1,5 кВт). Ускоритель отличается компактностью и простотой управления, что существенно для оперативной работы в полевых условиях и обеспечивает различные варианты его использования. Ускорителем ЛУ-7-2 дооснащен облучательный комплекс ПУЛЬСАР в 2007 г.

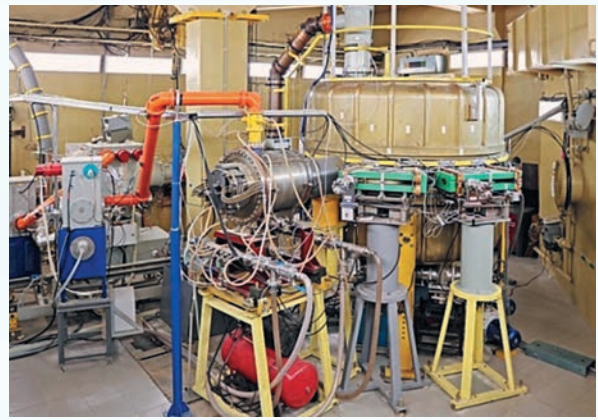
В начале 2000-х гг. совместно со специалистами Всероссийского центра глазной и пластической хирургии (ВЦГиПХ, г. Уфа), под руководством известного офтальмолога Э. Р. Мулдашева на ЛУ-10-20 проведен большой объем исследовательских работ по влиянию электронного и тормозного излучений на биоматериалы в интересах медицинской восстановительной хирургии. По результатам исследований созданы передовые методики стерилизации медицинских биоматериалов без разрушения структуры. Для их внедрения в практику в ИЯРФ разработан вариант конструкции ускорителя ЛУ-7-2, который смонтирован и успешно применяется в ВЦГиПХ с 2005 г. для стерилизации биоматериалов (аллотрансплантатов).

В рамках развития идеи использования активных методов обнаружения делящихся материалов для контроля крупногабаритных морских контейнеров и контроля перевозки высокообогащенного урана (на основе опыта создания ЛУ-7-2) был разработан, изготовлен и успешно испытан в 2008 г. опытный образец линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-8-2 с конвертером для генерации тормозного излучения с максимальной энергией квантов до 8 МэВ.

С 2001 г. ведется разработка перспективной установки БЕТА-8, основанной на последовательной схеме набора ускорения. Установка



*Ускоритель ЛУ-7-2*



*Макет установки БЕТА-8*

представляет собой резонансный ускоритель электронов со средней мощностью пучка до 300 кВт и энергией электронов, изменяемой в широком диапазоне от 1,5 до 7,5 МэВ. БЕТА-8 предназначена для исследования длительного воздействия высокоинтенсивных потоков тормозного и электронного излучений на крупногабаритные объекты. Для этого в кооперации с ИЯФ им. Г. И. Будкера (г. Новосибирск) разработан ВЧ генератор, состоящий из трех независимых по управлению и питанию модулей с сумматором выходной мощности. Впервые для установки такой сложности были применены трехмерные расчеты электродинамических характеристик резонатора и динамики пучка электронов, конструкторское проектирование также вышло на новый уровень – было освоено построение трехмерных моделей для сопряжения узлов установки.

К настоящему времени смонтирован и испытан полномасштабный действующий макет установки БЕТА-8, состоящий из коаксиального ускоряющего резонатора и первого модуля ВЧ генератора с мощностью 180 кВт. Физический пуск макета состоялся в 2020 г. На макете БЕТА-8 проводится отработка режимов на пониженной мощности для исследования динамики прохождения пучка через резонатор и магнитно-оптическую структуру для минимизации потерь ускоренных электронов. При увеличении мощности ВЧ питания до проектного уровня в 540 кВт средняя мощность электронного пучка должна достигать 300 кВт. Успешное проведение этих работ в ИЯРФ стало возможным благодаря активной увлеченной работе молодых специалистов физиков и тесному сотрудничеству с конструкторами.

Установка БЕТА-8 позволит проводить радиационные исследования при воздействии боль-

ших интегральных доз электронного и тормозного излучений на крупногабаритные объекты, изучать механизмы радиационной модификации материалов при длительном воздействии ионизирующего излучения на ранее недостижимом прежде уровне мощности.

История развития резонансных ускорителей электронов в РФЯЦ-ВНИИЭФ – это непростой путь коллектива специалистов, которые должны были в любой обстановке давать ответы на вызовы времени. Эта научно-техническая область имеет широчайшие возможности по адаптации для наиболее оптимального решения поставленных задач, при наличии группы специалистов, энтузиастов и просто увлеченных людей, которые сейчас работают по этому направлению.

Резонансные ускорители заряженных частиц – высокотехнологичные устройства, расширение возможностей которых не исчерпано до сих пор за счет гибкого регулирования воздействия ионизирующих излучений по мощности, по проникающей способности (энергии частиц) и типам частиц. Поэтому целевое применение ускорителей простирается от фундаментальных научных исследований до промышленного производства, и от лечения онкологических больных до модификации свойств самых различных материалов, таких как полупроводники, полимеры и металлы.

**ТЕЛЬНОВ Александр Валентинович –**

кандидат физ.-мат. наук, заместитель директора  
по радиационным комплексам –  
начальник научно-исследовательского отделения

**СМЕТАНИН Максим Леонидович –**

начальник научно-исследовательского отдела

**ШОРИКОВ Игорь Витальевич –**

начальник научно-исследовательской лаборатории