

## УСКОРИТЕЛИ НИИЭФА ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*М. Ф. Ворогушин<sup>1</sup>, А. П. Строкач, О. Г. Филатов*

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова,  
Санкт-Петербург, Россия

В институте были разработаны и поставлены в Россию и зарубежные страны более трехсот различных ускорителей: циклотронов, линейных ускорителей, нейтронных генераторов. Технические характеристики и качество нашего оборудования обеспечивают его конкурентоспособность на международном уровне. В работе рассматривается назначение, основные параметры, статус и перспективы развития ускорителей прикладного профиля и электрофизических комплексов на их основе.

Since the foundation of the Institute, we have designed and delivered to Russia and abroad more than three hundred different accelerators: cyclotrons, linear accelerators, neutron generators. Technical characteristics of our equipment are of world's level. Here are presented application, main parameters, status of accelerators, manufactured by NIEFA, and perspectives of development of electrophysical systems for applied purposes.

PACS: 29.20.dg; 29.38.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ускорители заряженных частиц не только необходимы для проведения прикладных и фундаментальных исследований, но и находят все более широкое применение в самых различных областях человеческой деятельности. НИИЭФА является одним из ведущих отечественных предприятий по разработке и изготовлению ускорителей прикладного назначения. Деятельность института включает весь цикл создания продукции от разработки новых моделей до их изготовления, внедрения и технического обслуживания. Инновационный характер развития ускорительной техники требует разработки технологически замкнутых электрофизических комплексов, ориентированных на получение практического результата при диагностике заболеваний, лучевой терапии, неразрушающем контроле, выработке продукта радиационных технологий. Рассмотрим основные направления деятельности института по ускорительной тематике.

---

<sup>1</sup>E-mail: vorogushin@luts.niefa.spb.su

## 1. ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА

Применение пучков заряженных частиц в медицине привело к созданию нового направления — ядерной медицины. Особенно наглядно это заметно на примере радиоизотопной диагностики, ставшей самой информативной и востребованной в мире. Высокая чувствительность, быстрота анализа и надежность этого метода позволяют регистрировать начальную стадию патологии, определять подходящие методики и эффективность процесса лечения. Диагностика основывается на регистрации излучения, испускаемого специально введенными внутрь организма радиоизотопами.

Наиболее подходящим ускорителем, позволяющим производить необходимые ультра- и короткоживущие (УКЖ и КЖ) радиоизотопы непосредственно в медицинских учреждениях, является циклотрон. Для этих целей в НИИЭФА была разработана серия малогабаритных циклотронов [1], основные параметры которых приведены в таблице.

Техническая характеристика	Модель циклотрона		
	СС-12	СС-18/9 М	МСС-30/15
Ускоряемые ионы	$H^-$	$H^-/D^-$	$H^-/D^-$
Энергия пучка, МэВ	12	12–18/6–9	18–30/9–15
Ток пучка, мкА	50	100/50	100/50
Масса магнита, т	10	34	46
Энергопотребление в рабочем режиме, кВт	30	70	100
Радионуклиды, период полураспада	УКЖ: от 2 до 110 мин	УКЖ и КЖ: от 13 ч до 2–3 сут	УКЖ, КЖ, долгоживущие

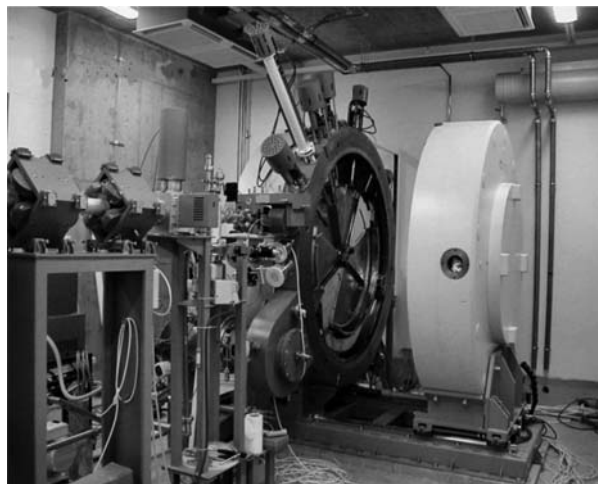


Рис. 1. Циклотрон СС-18/9 в Финляндии

Главное внимание при создании циклотронов было уделено удобству их эксплуатации и снижению радиационного фона в помещениях клиник. Для этого применен электромагнит броневое типа с вертикально расположенной медианной плоскостью, что позволяет подвижную часть электромагнита отодвигать на расстояние до 800 мм; использована система внешней инъекции отрицательных ионов водорода и дейтерия; вывод ускоренных

пучков обеспечивается за счет перезарядки отрицательных ионов в протоны и дейтроны; управление работой всех систем циклотрона полностью автоматизировано и осуществляется одним оператором. К настоящему времени введены в эксплуатацию шесть циклотронов серии СС: СС-18/9 (рис. 1) и МСС-30/15 в Финляндии, остальные — в России. Специально для наработки УКЖ-изотопов разработаны мишенные устройства с автоматизированной системой их замены, дающей возможность устанавливать под пучок одну из трех мишеней по выбору оператора.

## 2. РАДИОТЕРАПИЯ

НИИЭФА является ведущим отечественным предприятием по разработке ускорителей для лучевой терапии. За годы существования института было создано несколько поколений медицинских ускорителей для терапии электронным пучком и тормозным излучением с энергией от 5 до 25 МэВ. В рамках международного сотрудничества с фирмой PHILIPS MEDICAL SYSTEM (Англия) в НИИЭФА было организовано мелкосерийное производство линейных ускорителей электронов СЛ-75-5МТ для лучевой терапии тормозным излучением с энергией 6 МэВ. Всего было изготовлено и поставлено в клиники около 60 таких ускорителей, часть из которых работает и в настоящее время. В рамках модернизации СЛ-75-5МТ был разработан ускоритель нового поколения ЭЛЛУС-6М (рис. 2) и дополнительное медицинское оборудование: многолепестковый коллиматор для формирования потоков тормозного излучения, максимально соответствующий форме опухоли; устройство детектирования потока тормозного излучения, прошедшего сквозь тело и ложе пациента, для контроля конфигурации дозного поля во время облучения; модифицированный терапевтический стол. Ускоритель оснащен компьютерной системой управления, совмещенной со всем дополнительным медицинским оборудованием. Клинические испытания ускорителя проходили в НИИ онкологии им. Н. Н. Петрова (г. Санкт-Петербург), где он был интегрирован в радиотерапевтический комплекс, включающий систему планирования облучения и рентгеновский симулятор — томограф разработки НИИЭФА.

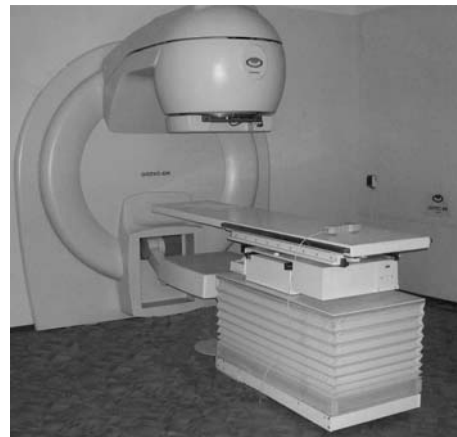


Рис. 2. Ускоритель ЭЛЛУС-6М

Результаты испытаний показали, что ускоритель ЭЛЛУС-6М соответствует требованиям современных технологий, предъявляемым к терапевтическим установкам с энергией тормозного излучения 6 МэВ.

Клинический опыт показал, что до 30% онкологических больных нуждаются в терапии нейтронами. Так, в Уральском центре нейтронной терапии используется наш генератор нейтронов НГ-12-И на энергию 14 МэВ и выход нейтронов до  $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . К настоящему времени было проведено лечение более 2000 пациентов, у большинства из которых (76%) достигнута полная ремиссия опухоли. Полученные результаты можно считать перспективными для внедрения подобных установок в клиники России.

### 3. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Важным направлением деятельности НИИЭФА является создание комплексов неразрушающего контроля крупногабаритных изделий на базе линейных ускорителей с энергией электронов от 3 до 15 МэВ. Были разработаны и поставлены на промышленные предприятия России и ряда зарубежных стран около 30 подобных комплексов. При радиографическом методе контроля прошедший через исследуемый объект пучок тормозного излучения регистрируется с помощью рентгеновской пленки. Возможен контроль изделий толщиной до 600 мм по стали. В этом случае ускорители являются единственным инструментом, обеспечивающим требуемое качество контроля. Для радиографического контроля разработаны две новые модели ускорителей УЭЛ-6Д и УЭЛ-10Д, имеющих параметры: энергию электронов 6 и 10 МэВ, среднюю мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени 10 и 30 Гр/мин. Главная особенность ускорителей — высокая компактность оборудования. В излучателе (рис. 3) с габаритами 2014 × 950 × 950 мм и весом 1160 кг размещены практически все системы ускорителя. При интроскопическом методе контроля объект послойно просвечивается веерообразным пучком тормозного излучения. Вместо рентгеновской пленки используется линейка сцинтилляционных детекторов. Теневое изображение получают на мониторе оператора в режиме реального времени. В этом случае повышается производительность, сокращается время на обработку информации. Интроскопический комплекс на базе ускорителя УЭЛ-15Д дает возможность контролировать изделия толщиной до 350 мм по стали.

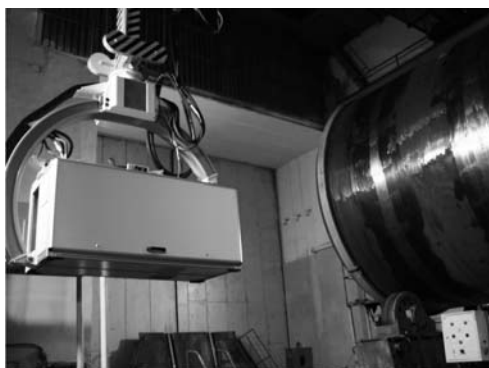


Рис. 3. Дефектоскоп УЭЛ-10Д на Ижорском заводе



Рис. 4. Инспекционно-досмотровый комплекс УЭЛ-6/9-Д

Высокая степень пространственного разрешения (1–2 мм) позволяет использовать интроскопические комплексы для контроля крупногабаритных грузов (контейнеры, автомобили) с целью выявления незадекларированных вложений [2]. Ускорители LINAC-2(4) с энергией от 2 до 4 МэВ, оснащенные локальной радиационной защитой, предназначены для работы в составе мобильных комплексов. Для стационарного таможенного пункта был разработан инспекционно-досмотровый комплекс на базе ускорителя УЭЛ-6/9-Д с дуальной энергией 6 и 9 МэВ (рис. 4).

#### 4. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Для высокоэнергетических радиационных процессов в НИИЭФА создано несколько моделей линейных ускорителей с энергией электронов от 3 до 10 МэВ и средней мощностью пучка до 10 кВт. Ускорители снабжены устройствами для сканирования пучка электронов в полосу шириной до 1 м в зависимости от размеров облучаемых изделий. Элементный анализ на основе фотоядерных реакций реализуется на ускорителях типа УЭЛ-8-5С с энергией электронов 8 МэВ и мощностью пучка 5 кВт. Стерилизация продукции «in line» в обычных промышленных помещениях производится на ускорителях УЭЛВ-3-3С с местной радиационной защитой. Единственным способом стерилизации одноразовых медицинских изделий, упакованных в герметичные пакеты для предотвращения заражения, является радиационная обработка. Специально для коммерческих стерилизационных центров был разработан ускоритель УЭЛР-10-10С с энергией электронов 10 МэВ и средней мощностью до 10 кВт (рис. 5).



Рис. 5. Ускоритель УЭЛР-10-10С



Рис. 6. Ускоритель «Электрон-10»

Для обработки материалов электронным пучком с целью изменения молекулярной структуры была разработана серия высоковольтных ускорителей (до 750 кВ) с мощностью электронного пучка до 50 кВт. Типичный ускоритель этой серии «Электрон-10» (рис. 6) выполнен с местной радиационной защитой для установки в обычных производственных помещениях и обеспечивает годовую наработку до 7500 ч, соответствующую требованиям промышленного оборудования.

С целью увеличения единичной мощности в НИИЭФА разработан стендовый прототип ускорителя «Электрон-23», на котором достигнуты уникальные результаты по выводу в атмосферу пучка электронов с энергией 1 МэВ и мощностью до 420 кВт.

#### 5. НЕЙТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Генераторы нейтронов широко используются для экспериментальных работ в ядерной физике, активационного анализа, контроля делящихся, взрывчатых, наркотических веществ, исследования радиационной стойкости материалов, нейтронной терапии.

В НИИЭФА разработан ряд нейтронных генераторов для получения непрерывных и импульсных потоков нейтронов с интенсивностью  $10^{10}$ – $10^{13}$  с<sup>-1</sup>. Генераторы последнего

поколения могут работать в постоянном, микросекундном и наносекундном режимах. При длительности импульсов от 2 до 100 мкс ток ионов на мишени — до 100 мА, при длительности импульсов от 2 до 30 нс ток ионов на мишени — до 5 мА.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Технические характеристики ускорительной техники, разработанной в НИИЭФА, не уступают зарубежным аналогам. При этом суммарная стоимость импортного оборудования оказывается существенно дороже с учетом затрат на транспортировку, таможенные сборы, дорогое техническое обслуживание и высокую стоимость запасных частей. Кроме того, создание ускорительных комплексов позволяет полнее учесть интересы заказчиков, обеспечить аппаратную и программную совместимость оборудования, его ремонт и модернизацию.

К сожалению, остаются трудности при организации маркетинга и внедрения отечественной техники, своевременной закупки комплектующих, разработки проектов и строительства радиационно-защищенных помещений. Можно надеяться, что с реализацией процесса импортозамещения эти проблемы будут решены.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Ворогушин М. Ф., Строкач А. П., Филатов О. Г.* Состояние и развитие ускорительной техники в НИИЭФА // ВАНТ. Сер. «Электрофизическая аппаратура». 2010. Вып. 5(31). С. 3–11.
2. *Vorogushin M. F.* NIEFA Accelerators for Industry and Medicine // Proc. of Conf. «RuPAC 2012», Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012. P. 167–172.