

## РАЗВИТИЕ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСПЫТАНИЙ В НИК «УСКОРИТЕЛЬ» ННЦ ХФТИ

*В.Н. Борискин, С.А. Ванжа, В.Н. Верещака, А.Н. Довбня, Э.С. Злуницын, А.И. Зыков,  
В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, О.А. Репихов, А.Э. Тенишев, В.Л. Уваров,  
В.А. Шевченко, И.Н. Шляхов*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: uvarov@kipt.kharkov.ua*

В ННЦ ХФТИ была разработана и сдана в эксплуатацию (1987 г.) промышленная радиационная установка на базе линейного ускорителя электронов ЛУ-10 (10 МэВ, 10 кВт). В настоящее время ускоритель ЛУ-10 обеспечивает основной объем работ по радиационной стерилизации в Украине. Наряду с непрерывной модернизацией установки, создана система метрологического обеспечения, включающая набор технологических измерительных каналов, а также комплекс рабочих эталонов. Это позволяет проводить, помимо промышленной обработки продукции, также ее квалификационные испытания с применением электронного и тормозного излучения. Описаны основные параметры полей излучения установки, используемые средства измерительной техники и компьютерных технологий, а также приведены данные по динамике объема услуг в области радиационной обработки за последние годы.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Украине рынок технологий и испытаний, основанных на применении радиации, развивается весьма динамично с ежегодным увеличением на 15...20%. Основной объем таких услуг составляет радиационная стерилизация изделий медицинского назначения. Она относится к производственным процессам высокого уровня ответственности, как в части процедур реализации, так и в отношении метрологического обеспечения, и регламентируется международными стандартами (см., например, [1]).

Значительные объемы обрабатываемой в НИК «Ускоритель» продукции (до ~100 м<sup>3</sup> в сутки), а также существенные ее различия у разных производителей по габаритам, весовым характеристикам и рекомендованным значениям поглощенных доз, сделали необходимой соответствующую разработку методов и средств оперативного управления и контроля условий облучения.

Помимо стерилизации изделий медицинского назначения, продукции фармацевтической и пищевой промышленности, радиационная обработка проводится также в других областях, в частности, при производстве термоусаживающихся электротехнических муфт, модификации полупроводниковых изделий и материалов, регенерации вторсырья резины и т.д. На начальном этапе разработки подобного рода технологий необходимо проведение испытаний с целью определения необходимого для их реализации диапазона доз излучения. Особое значение такие испытания имеют при установлении ресурса оборудования и материалов атомных станций.

В сообщении изложены результаты проведенной в НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ на протяжении последних лет разработки методов и средств реализации радиационных технологий и испытаний с применением электронного и тормозного излучения.

### 2. УСКОРИТЕЛЬ ЛУ-10

#### 2.1. Базовой установкой НИК «Ускоритель»

ННЦ ХФТИ для осуществления технологических программ и испытаний является линейный ускоритель электронов ЛУ-10 [2]. Его основные характеристики приведены в Табл.1. Излучатель ускорителя размещен в бункере, имеющем необходимую радиационную защиту (см. Рис.1). Установка снабжена конвейером для дистанционной подачи обрабатываемых изделий из зала загрузки (Рис.2) в зону облучения и обратно, осуществляя тем самым непрерывный цикл.

*Таблица 1. Параметры излучения радиационной установки с ускорителем ЛУ-10*

Электронное излучение	
Энергия электронов, МэВ	8...18
Номинальное значение энергии электронов, МэВ	10
Длительность импульса, мкс	3.5
Частота следования импульсов пучка, Гц	12.5...300
Ток пучка (среднее значение), мкА	до 1000
Частота сканирования пучка, Гц	3
Геометрические размеры пучка (на выпускном окне), см	2×30
Неравномерность линейной плотности потока электронов вдоль рабочей зоны развертки пучка, %	не более ±3
Мощность поглощенной дозы электронного излучения в дакриле, Гр/с	до 1·10 <sup>3</sup>
Тормозное излучение	
Поток энергии (мощность) тормозного излучения (ТИ), кВт	до 1.6
Геометрические размеры потока ТИ (на конвертере), см	3×35
Мощность поглощенной дозы ТИ в дакриле, Гр/с	до 1.0

2.2. Для обеспечения необходимого режима радиационной обработки применительно к каждому виду продукции создана система on-line контроля и

протоколирования условий обработки, которая включает:

- управляемый РС-комплекс формирования поля излучения (сканер) - [3];
- технологические измерительные каналы (ТИК) основных параметров поля излучения;
- систему мониторинга и протоколирования (СМП) режима обработки;
- систему блокировок.

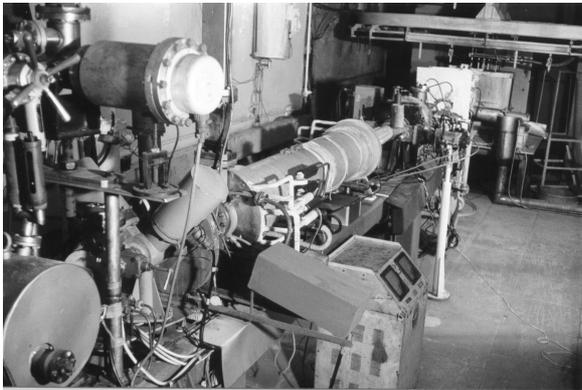


Рис. 1. Излучатель ускорителя ЛУ-10



Рис.2. Зал загрузки с конвейером

СМП состоит из следующих элементов (Рис.3):

- автоматизированное рабочее место оператора процесса обработки (АРМ);
- сервер базы данных процесса обработки;
- сервер параметров ускорителя ЛУ-10;
- локальная сеть.

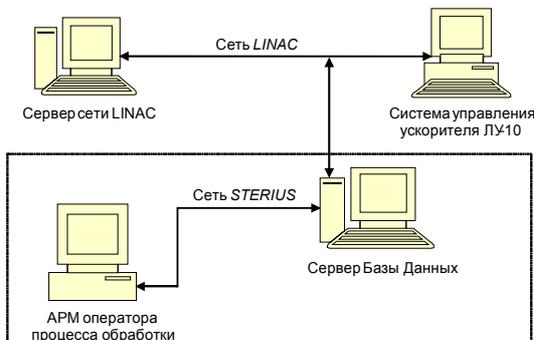


Рис.3. Основные элементы системы мониторинга и протоколирования условий радиационной обработки продукции

Основными задачами системы являются:

- контроль и мониторинг параметров режима обработки;
- контроль работы модулей (оборудования) системы;
- передача заданных и контролируемых параметров на сервер базы данных;
- локальное сохранение (запись) заданных и контролируемых параметров в случае сбоев в работе сервера БД.

2.3. АРМ оператора построено на базе персонального компьютера под управлением ОС Windows 98 и крейта КАМАК с измерительными каналами электроники (Рис.4).

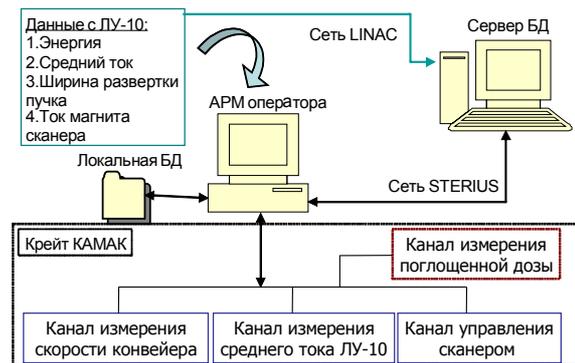


Рис.4. Структурная схема АРМ оператора процесса радиационной обработки продукции

Использование стандарта КАМАК позволило создать открытую систему, которая обеспечивает возможность добавлять измерительные каналы и проводить их модернизацию.

Отображение измеряемых и заданных параметров производится на экране оператора АРМ в текстовом и графическом виде (Рис.5).

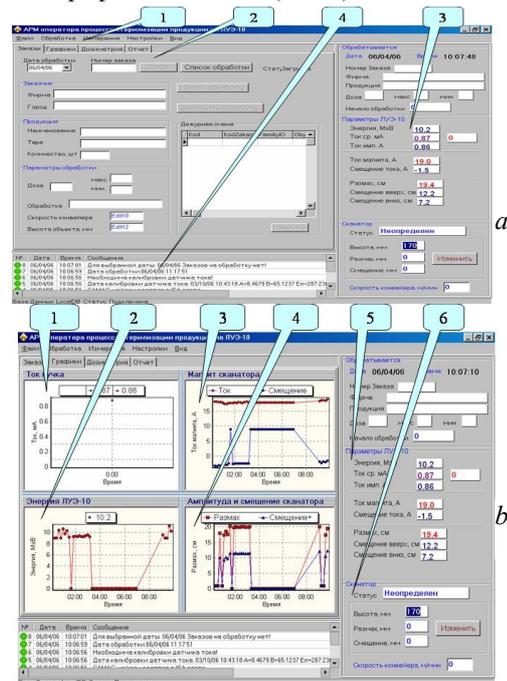


Рис.5. Окна АРМ оператора: а – БД-параметров обработки; б – текущие параметры

2.4. Мониторинг режима радиационной обработки осуществляется при помощи ТИК, передающих информацию непосредственно на рабочее место оператора, а также на основе информации, получаемой от систем контроля ускорителя ЛУ-10 (Рис.4).

Измерительные каналы выполняют следующие задачи:

- измерение энергии электронов;
- измерение тока пучка (импульсное и среднее значения);
- измерение скорости конвейера;
- управление цифровым сканером;
- измерение параметров развертки пучка;
- мониторинг дозного распределения.

### 3. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Указанные в Разд.2 технологические измерительные каналы являются рабочими средствами измерений параметров поля излучения. Для их калибровки был создан комплекс рабочих эталонов [4]. Комплекс разработан НИК «Ускоритель» совместно с ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева» (С.-Петербург, Россия) на основе госэталона ГЭТ 72-2001.

Рис.6-8 демонстрируют примеры использования рабочих эталонов. Так, на Рис.6,а представлен первичный измерительный преобразователь проточного калориметра УДФТ-1 в режиме измерения мощности пучка ускорителя ЛУ-10, а на Рис.6,б – его измерительный блок. На Рис.7 и 8 представлены зарядо-калориметрический преобразователь ЗКП-2 и ионизационная камера ИКВ-6 в режиме измерения параметров электронного и тормозного излучения, соответственно.

Для обеспечения прослеживаемости измерений поглощенной дозы (основного метрологического параметра радиационных технологий и испытаний) приобретены калориметрические дозиметры электронного излучения (лаборатория RISO, Дания) и детекторы Red 4034 Perspex (Harwell, Великобритания). Эти дозиметрические системы характеризуются повышенной прецизионностью с прослеживанием к национальному эталону поглощенной дозы Великобритании.

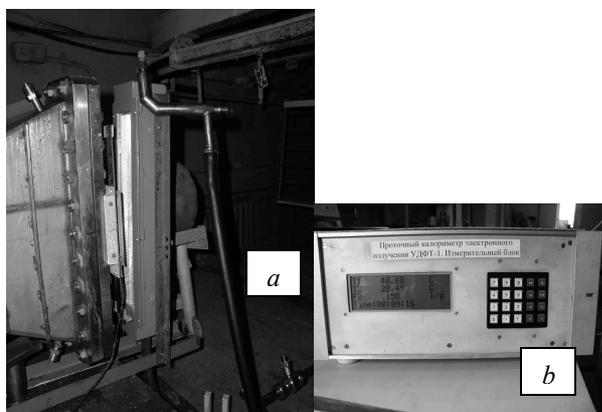


Рис.6. Рабочий эталон мощности сканируемого пучка электронов УДФТ-1: а – измерительный преобразователь; б – измерительный блок

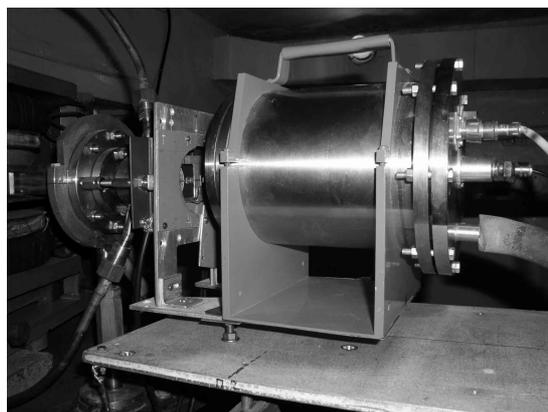


Рис.7. Зарядо-калориметрический преобразователь ЗКП-2

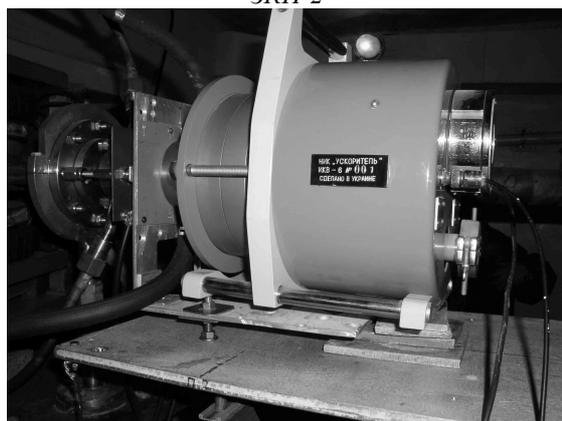


Рис.8. Толстостенная ионизационная камера ИКВ-6

### 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4.1. Современные стандартизованные программные системы (MCNP, GEANT, PENELOPE и др.) обеспечивают возможность моделирования с высокой точностью радиационных процессов на ускорителях электронов (см., например, [5]). В НИК «Ускоритель» на базе системы PENELOPE [6] разработаны 3 базовых программных комплекса:

- комплекс «**Beam**» предназначен для моделирования случайных значений различных величин с заданной плотностью распределения вероятности и регистрации плотности распределения физических величин в различных точках моделируемых установок и сред по мере прохождения через них ионизирующего излучения;
- программные модули комплекса «**TRANSPORT**» обеспечивают моделирование прохождения частиц (электронов, фотонов, позитронов) в различных средах, а также регистрацию размеров пучка частиц, плотности распределения частиц по энергии, углу в различных точках моделируемых установок и объектов;
- программные модули комплекса «**DOSE**» вместе с модулями программных комплексов «**BEAM**» и «**TRANSPORT**» предназначены для моделирования и оптимизации режимов радиационной обработки продукции на ускорителе ЛУ-10 со сканируемым пучком электронов.

4.2. Все три комплекса прошли испытания и были аттестованы в ННЦ «Харьковский государственный институт метрологии». На их основе создан пакет программ для моделирования полей излучения, анализа метрологических характеристик средств их измерения, оптимизации технологических программ и обеспечения радиационных испытаний [7].

4.3. В рамках последнего направления разработан метод анализа смешанных полей  $e, X$ -излучения на основе концепции «тормозной длины» (stopping length) ускоренных электронов в веществе [8]. Метод позволяет определять соотношение потоков энергии тормозного и электронного излучения в любом сечении вдоль оси выходных устройств ускорителя и находить оптимальные условия формирования «чистого» потока тормозных фотонов. Эти данные использованы при разработке выходных устройств ускорителя для проведения радиационных испытаний в поле тормозного излучения.

### 5. РАДИАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ

С 1997 г. на установке ЛУ-10 начинается регулярное выполнение радиационно-технологических программ с их ежегодным ростом (см. Табл.2).

В настоящее время на ЛУ-10 обеспечивается основной объем работ по радиационной стерилизации в Украине. География заказчиков НИК «Ускоритель» представлена на Рис.9. Всего за 2006 г. обработано свыше 10 тыс.куб.м различной продукции. За этот же период проведены радиационные испытания образцов кабельной продукции, строительных материалов, в частности, бетона 4-го блока Чернобыльской АЭС [9], горных пород (с целью оценки возможности их применения для долговременного

захоронения радиоактивных отходов) [10], полупроводниковых материалов [11] и др.

Таблица 2. Динамика объема услуг НИК «Ускоритель» по радиационной обработке продукции

Год	Число заказов	Пучковый ресурс, часов
2000	67	280
2001	73	410
2002	96	567
2003	148	1006
2004	339	1482
2005	464	2298
2006	497	2462

Выполнен также цикл долговременных высокотемпературных испытаний материалов солевого реактора [12].

### 6. АККРЕДИТАЦИЯ

В 2006 г. действующая в составе НИК «Ускоритель» Лаборатория радиационных технологий и метрологии излучений внедрила систему качества ISO 9000 и прошла аккредитацию как испытательная лаборатория по международному стандарту ДСТУ ISO/IEC-17025:2001. Область аккредитации включает испытания радиационных установок на базе ускорителей электронов и радионуклидных источников, а также материалов и оборудования атомных станций, продукции медицинского назначения, фармацевтической продукции и сырья, пищевой продукции и др.

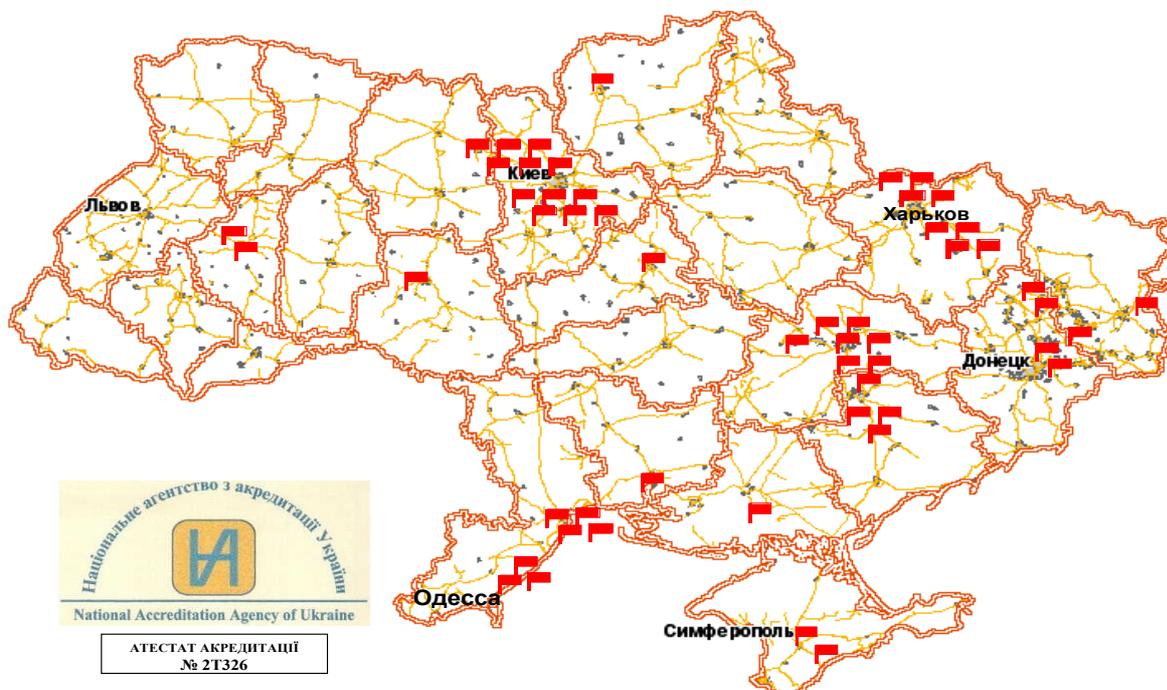


Рис.9. География заказчиков НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ

## ЛИТЕРАТУРА

1. EN ISO 11137-2006. Sterilization of health care products – radiation. ISO International Standard.
2. K.I. Antipov, M.I. Ayzatskiy, Yu.I. Akchurin, et al. Electron Linacs in NSC KIPT: R&D and Application // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2001, №1, p.40-47.
3. S.P. Karasyov, R.I. Pomatsalyuk, A.Eh. Tenishev, et. al. PC-Controlled Beam Scanned System at the Technological Electron Linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, №3, p.191-193.
4. S.P. Karasyov, V.L. Uvarov, I.I. Tsvetkov. System for Metrological Maintenance of Radiation Technologies Using Electron and Bremsstrahlung Radiation. // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 1997, №4.5, p.54-56.
5. Asghar Mesbahi, et al. Monte Carlo Calculation of Varian 2300 C/D Linac Photon Beam Characteristics: a Comparison between MCNP4C, GEANT 3 and Measurements // *Appl.Rad.&Isot.* 2005, v.62, p.469-477.
6. F. Salvat, J.M. Fernandez-Varea and J. Sempau. "PENELOPE-2006 A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport" (*OECD Nuclear Energy Agency, Issyles-Moulineaux, France, 2006*).
7. S.P. Karasyov, V.I. Nikiforov, A.Eh. Tenishev, V.L. Uvarov. Application of PENELOPE System to Support the Radiation Technologies Based on LU-10 Linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2004, №1, p.200-202.
8. A.N. Dovbnaya, N.A. Dovbnaya, V.I. Nikiforov, V.L. Uvarov. Electron Linac Based e,X-Facility // *Proc. of the X-th Europ. Part. Accel. Conf. (Edinburgh, Scotland, 26-30 June, 2006)*, p.2225-2259.
9. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnaya, I.M. Karnaukhov, et al. Investigation of Chernobyl 4-th Unit Materials by Gamma Activation Method // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2002, №2, p.56-60.
10. N.P. Dikiy, A.N. Dovbnaya, Yu.V. Lyashko, et al. Investigation of Granite Rocks Radiation-Chemical Durability // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2002, №2, p.61-63.
11. N.A. Dovbnaya, S.P. Karasyov, V.E. Kutniy, et al. Application of CdTe(CdZnTe) Detectors for Radioactive Waste Characterization // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2002, №2, p.55-57.
12. A.N. Dovbnaya, A.I. Zykov, Eh.S. Zlunitsyn, et al. Radiation Field Creation at the Electron Linac LUE-10 for Long-Term Tests of Structural Materials under Molten-Salt Reactor Conditions // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, №2, p.187-189.

Статья поступила в редакцию 23.08.2007 г.

## DEVELOPMENT OF RADIATION TECHNOLOGIES AND TESTS IN "ACCELERATOR" Sc&R Est., NSC KIPT

*V.N. Boriskin, S.A. Vanzha, V.N. Vereshchaka, A.N. Dovbnaya, Eh.S. Zlunitsyn, A.I. Zykov, V.I. Nikiforov, R.I. Pomatsalyuk, O.A. Repikhov, A.Eh. Tenishev, V.L. Uvarov, V.A. Shevchenko, I.N. Shlyakhov*

The industrial radiation plant on the base of electron Linac LU-10 (10 MeV, 10 kW) was developed and put into operation in 1987. At present Linac LU-10 provides a principal bulk of activity on radiation sterilization in Ukraine. The system of metrological maintenance including a set of technological measuring channels as well as a complex of working standards was created side by side with continuous modernization of the plant. These facilities allow conducting both industrial treatment of the product and its qualification tests using electron and bremsstrahlung radiation. Principal plant radiation parameters as well as used measurement instrumentation and computer technologies are described in the report. The data on dynamics of service volume in the field of radiation processing at the plant for last years are represented.

## РОЗВИТОК РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ВИПРОБУВАНЬ У НДК «ПРИСКОРЮВАЧ» ННЦ ХФТІ

*В.М. Борискін, С.О. Ванжа, В.М. Верещака, А.М. Довбня, Е.С. Злуцін, А.І. Зиков, В.І. Нікіфоров, Р.І. Помацалюк, О.А. Репіхов, А.Е. Тенішев, В.Л. Уваров, В.А. Шевченко, І.М. Шляхов*

В ННЦ ХФТІ було розроблено і здано в експлуатацію (1987 р.) промислову радіаційну установку на базі лінійного прискорювача електронів ЛУ-10 (10 МеВ, 10 кВт). На цей час прискорювач ЛУ-10 забезпечує основний обсяг робіт з радіаційної стерилізації в Україні. Поряд з модернізацією установки, створено систему метрологічного забезпечення, що включає набір технологічних вимірювальних каналів, а також комплекс робочих еталонів. Це дозволяє проводити крім промислової обробки продукції також її кваліфікаційні випробування з застосуванням електронного і гальмівного випромінювання. Описані основні параметри полів випромінювання установки, використовувані засоби вимірювальної техніки і комп'ютерних технологій, а також наведені дані щодо динаміки обсягу послуг в області радіаційної обробки за останні роки.