

Малогабаритный линейный ускоритель электронов для стерилизации изделий медицинского назначения

**А. В. Тельнов, И. В. Девяткин,
Н. В. Завьялов, В. С. Майорников,
М. А. Овчинников, В. Т. Пунин,
Н. П. Ситников, В. П. Тарантасов,
И. В. Шориков, О. Р. Шангина,
Д. Р. Лапчик**

Описан радиационно-технологический комплекс, созданный на основе линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-7-2. Приведены основные технические характеристики, принципы работы, описание составных систем и назначение радиационно-технологического комплекса ЛУ-7-2, который установлен в специально спроектированном здании ВЦГиПХ.

Введение

В конце 90-х годов на действующем ускорителе электронов ЛУ-10-20 [1] совместно с сотрудниками Всероссийского центра глазной и пластической хирургии (ВЦГиПХ, г. Уфа) был проведен ряд научно-экспериментальных исследований по отработке условий стерилизации биоматериалов серии "Аллоплант". Цель исследований заключалась в определении необходимого уровня, темпа набора поглощенных доз и типа ионизирующего излучения (электроны или тормозное излучение) для различного вида образцов. Основным критерием выбора оптимальных условий облучения являлось сохранение внутренней структуры и свойств стерилизуемых биоматериалов.

По результатам работ было определено, что использование ускорителя для стерилизации биоматериалов серии "Аллоплант" имеет значительные преимущества в сравнении с другими методами стерилизации (химический, источники гамма-излучения и др.). Итоги исследований явились основанием для ВЦГиПХ и РФЯЦ-ВНИИЭФ начать разработку и изготовление радиационно-технологического комплекса на основе линейного ускорителя электронов ЛУ-7-2 (РТК ЛУ-7-2). Для размещения комплекса в ГСПИ (г. Москва) спроектировано специализированное здание, располагающееся на территории ВЦГиПХ.

1. Описание РТК ЛУ-7-2

Радиационно-технологический комплекс создан на основе линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-7-2 [2]. Выбор ускорителя был обусловлен прежде всего объемом предпола-

гаемых работ, производительностью и экономической эффективностью эксплуатации установки. Все системы РТК разработаны с условием возможности бесперебойной круглосуточной работы ускорителя при сохранении стабильных выходных параметров ионизирующего излучения. На рис. 1 приведена функциональная схема РТК ЛУ-7-2.

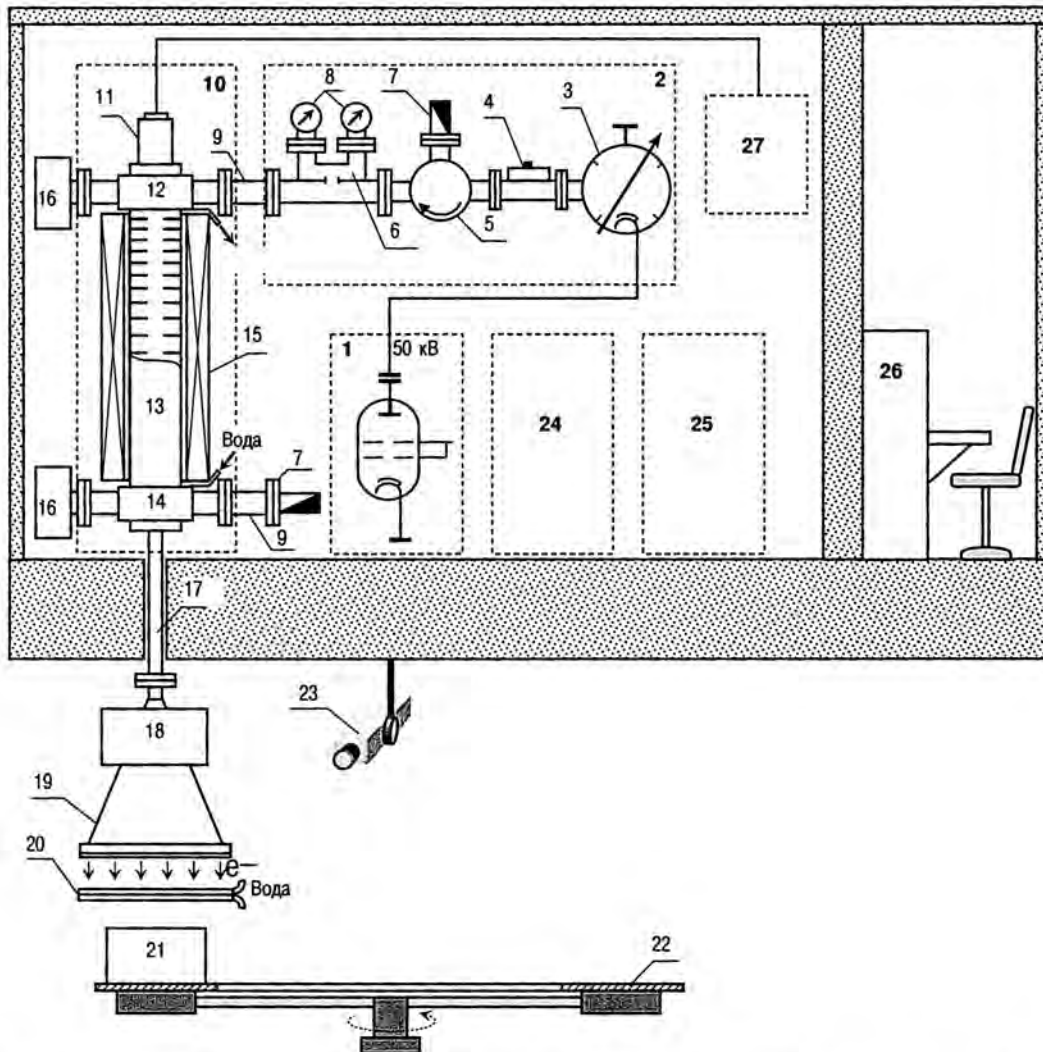


Рис. 1. Функциональная схема РТК ЛУ-7-2: 1 – модулятор магнетрона; 2 – СВЧ-генератор; 3 – магнетрон МИ-456А; 4 – измеритель проходящей мощности; 5 – циркулятор; 6 – ответвитель; 7 – поглощающая нагрузка; 8 – адаптер; 9 – СВЧ-окно; 10 – ускоряющая система; 11 – электронная пушка; 12, 14 – входной и выходной трансформаторы типа волны; 13 – ускоряющая секция; 15 – соленоид; 16 – вакуумный магнетронразрядный насос; 17 – пролетный канал; 18 – магнит развертки; 19 – раструб; 20 – мишень тормозного излучения; 21 – облучаемый объект; 22 – технологическая транспортировочная линия; 23 – видеокамера; 24 – система охлаждения и термостабилизации; 25 – силовой модуль; 26 – система управления; 27 – модулятор электронной пушки

1.1. Линейный ускоритель электронов ЛУ-7-2

Линейный ускоритель электронов ЛУ-7-2 является источником мощного ионизирующего излучения в виде пучка электронов или квантов тормозного излучения. В основе его работы лежит принцип ускорения электронов, инжектируемых электронной пушкой, в ускоряющей фазе электромагнитного поля сверхвысокой частоты. В качестве ускоряющей структуры применен круглый диафрагмированный волновод. Источником СВЧ-энергии является магнетрон МИ-456АМ. Высоковольтное импульсное питание (50 кВ) магнетрона и электронной пушки осуществляется от двух отдельных модуляторов.

Основные технические характеристики ускорителя ЛУ-7-2:

- средняя энергия ускоренных электронов на мишени 6 МэВ;
- средняя мощность пучка электронов 1,5 кВт;
- длительность импульсов тока (1–7) мкс;
- частота следования импульсов тока (50–425) Гц;
- рабочая частота 2797 МГц;
- режим работы ускорителя круглосуточный;
- расположение ускорителя вертикальное.

В состав линейного ускорителя электронов ЛУ-7-2 входят следующие системы.

1. **Силовой модуль** (рис. 2) предназначен для обеспечения стабилизированным питанием технологических систем ускорителя. Силовой модуль конструктивно выполнен в виде двух стоек, укомплектованных источниками вторичного питания и блоками коммутации.



Рис. 2. Силовой модуль РТК ЛУ-7-2

2. **Модулятор магнетрона** обеспечивает высоковольтное импульсное питание магнетрона, а также электронной пушки при их совместном подключении. В блоке импульсного трансформатора модулятора предусмотрены цепи для обеспечения низкочастотного питания накалов магнетрона и ЭП.

Основные параметры высоковольтного модулятора:

- полярность импульса отрицательная;
- максимальная импульсная мощность на нагрузке 5,5 МВт;
- максимальное импульсное напряжение на нагрузке 50 кВ;
- скважность импульсов 550–2000.

Типичные импульсы модулятора при работе на магнетрон представлены на рис. 3.

3. **Модулятор инжектора** обеспечивает питание электронной пушки (50 кВ). Для питания цепи накала ЭП в составе модулятора предусмотрен низкочастотный стабилизированный источник напряжения. Максимальная выходная мощность модулятора до 1,35 кВт.

4. **СВЧ-генератор** разработан на базе магнетрона МИ-456АМ и предназначен для сверхвысокочастотного питания ускоряющей структуры. СВЧ-генератор включает в себя следующие устройства: магнетрон МИ-456АМ, кольцевой постоянный магнит и волноводный тракт.

Кольцевой постоянный магнит обеспечивает магнитное поле 1800 Гс, необходимое для работы магнетрона. Магнетрон с магнитом крепятся на дюралюминиевой плите.

Основные выходные параметры магнетрона МИ-456АМ:

- диапазон рабочих частот 2792–2802 МГц;
- выходная импульсная мощность 3,5 МВт;
- длительность импульсов 3–10 мкс;
- скважность импульсов 500–2000;
- импульсное напряжение катода 47–49 кВ;
- КПД 63 %.

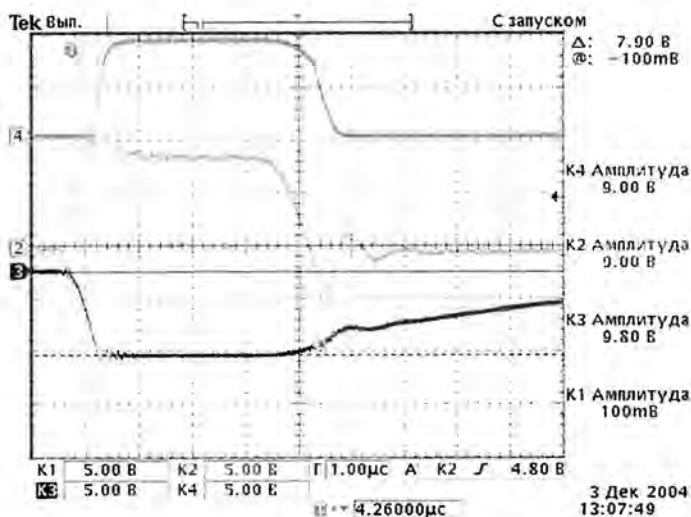


Рис. 3. Осциллограммы огибающей СВЧ-волны (K4), импульсов анодного тока (K2) и напряжения (K3)

5. Ускоряющая система состоит из следующих основных узлов: электронная пушка, входной ТТВ, ускоряющая секция (структура), выходной ТТВ.

Электронная пушка (ЭП) служит для инжекции электронов в ускоряющую секцию с энергией (40–50) кэВ, а также осуществляет начальное формирование пучка электронов. Ускоряющее напряжение на анод ЭП подается с модулятора инжектора.

Ускоряющая секция (УС) создана на основе круглого диафрагмированного волновода (КДВ) с переменной геометрией ускоряющих ячеек, работающего в режиме бегущей волны на виде колебаний $2\pi/3$ и частоте 2797 МГц [3]. Формирование и ускорение сгустков электронов происходит за счет синхронизации фазовых скоростей электронов и ускоряющей СВЧ-волны.

Входной трансформатор типа волны (ТТВ) преобразует тип колебаний H_{10} , распространяющийся в прямоугольном волноводном тракте, в ускоряющую волну E_{01} в УС.

Выходной ТТВ предназначен для согласования выхода УС. Неизрасходованная часть СВЧ-мощности из УС через выходной ТТВ и СВЧ-окно поступает в согласованную поглощающую СВЧ-нагрузку с водяным охлаждением. При этом выходной ТТВ осуществляет обратное преобразование волны с E_{01} в H_{10} тип колебаний.

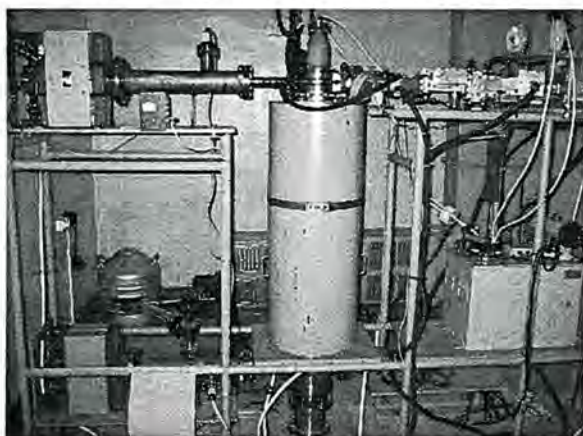
Ускоряющая система во время работы находится в напряженном тепловом режиме, влияющем на стабильность ее параметров. Поэтому предусмотрено охлаждение УС проточной дистиллированной водой, поступающей из системы охлаждения и термостабилизации (± 1 °С).

6. Магнитная фокусирующая система создана на основе соленоида и корректирующих катушек и обеспечивает удержание пучка электронов на оси УС.

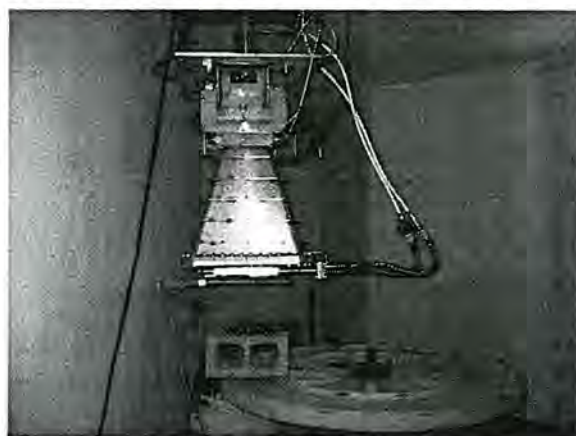
7. **Вакуумная система** создана на основе трех магниторазрядных насосов НМДО-0.1-1 и предназначена для поддержания рабочего вакуума в УС и системе вывода пучка электронов на уровне не хуже 10^{-4} Па. Контроль вакуума осуществляется с помощью двух датчиков, расположенных на входе и выходе УС, показания которых выведены на пульт управления ускорителем.

8. **Система охлаждения и термостабилизации (СОТ)** ускорителя обеспечивает охлаждение и термостатирование систем РТК с точностью ± 1 °С. Расход воды – от 5 до 10 л/мин. Предельная выделяемая тепловая мощность систем РТК не превышает 14 кВт.

9. **Система вывода пучка электронов (СВПЭ)** служит для сканирования пучка по облучаемому объекту и состоит из электроновода, магнита развертки, раструба и съемной мишени тормозного излучения. Вывод пучка из вакуумного раструба в атмосферу происходит через титановую фольгу толщиной 50 мкм. Танталовая мишень тормозного излучения предназначена для преобразования пучка электронов со средней энергией 6 МэВ в тормозное излучение со средней энергией квантов ~ 1 МэВ. Избытки тепла в мишени отводятся проточной дистиллированной водой. На рис. 4 показано расположение систем ускорителя в ускорительном и облучательном залах.



а



б

Рис. 4. Расположение систем ускорителя в ускорительном (а) и облучательном (б) залах РТК ЛУ-7-2

1.2. Технологическая транспортировочная линия (ТТЛ)

ТТЛ разработана в виде круглого поворотного стола для равномерного и многократного перемещения облучаемых объектов под пучком ионизирующего излучения с заданной скоростью. Скорость вращения стола подбирается в зависимости от требуемой дозы облучения. Диапазон регулировки скорости подачи объектов в поле облучения составляет 0,5–4 см/с. Максимальные габариты облучаемого объекта $15 \times 15 \times 25$ см³. Масса одновременно установленных на ТТЛ объектов не более 30 кг. Стабильность скорости перемещения ТТЛ позволяет обеспечить однородность облучения не хуже 25 %, что соответствует условиям, принятым для стерилизации объектов медицинского назначения.

1.3. Автоматизированная система управления (АСУ) РТК ЛУ-7-2

АСУ РТК ЛУ-7-2 служит для дистанционного управления всеми системами РТК и контроля их состояния. Система управления обеспечивает дистанционное управление узлами ускорителя (задание требуемых режимов работы, включение, отключение), выполняет измерение и визуализацию необходимых технологических параметров, а также измерение выходных параметров ускорителя. При возникновении нештатных или аварийных ситуаций система управления автоматически отключает ускоритель.

Система управления представляет собой комплекс аппаратно-программных средств (пульт управления) на основе промышленного компьютера и распределенной системы сбора данных, позволяющих оператору получать необходимую информацию о состоянии РТК и управлять его работой. На рис. 5 представлен пульт управления РТК ЛУ-7-2.



Рис. 5. Пульт управления РТК ЛУ-7-2

1.4. Система визуального контроля

Система визуального контроля предназначена для повышения безопасности работ, проводимых на РТК ЛУ-7-2. Наблюдение производится с помощью монитора и видеокамеры, направленной на зону облучения и прилегающую к ней территорию.

2. Отработка режимов ускорителя ЛУ-7-2

Вывод ускорителя ЛУ-7-2 на рабочие параметры осуществлялся в режиме постепенного увеличения средней СВЧ мощности посредством изменения частоты посылок СВЧ-генератора от 100 до 360 Гц. Такой режим работы позволил провести обезгаживание вакуумных частей УС и оттренировать узлы ускорителя, наиболее критичные к электрическому пробую. Инжекцию электронов на этом этапе не проводили.

На начальном этапе работы с пучком электронов провели серию измерений выходных характеристик ускоренных электронов с целью уточнения оптимальных рабочих параметров питания соленоида, корректирующих катушек, накала катода ЭП, накала катода магнетрона, частоты генерации магнетрона, скважности импульсов магнетрона, амплитуды высокого напряжения модуляторов магнетрона и ЭП.

Измерение среднего тока ускоренных электронов проводили посредством регистрации тока с мишени тормозного излучения. Измерение выходной энергии ускоренных электронов определяли по поглощению пучка при прохождении его через набор алюминиевых пластин [4, 5]. Для этого использовали сборку из десяти пластин, изолированных между собой шайбами из прессованной слюды. Толщина каждой пластины была 2 мм, расстояние между соседними пластинами – 0,5 мм. Сборка предварительно была просчитана по программе ЭЛИЗА методом Монте-Карло [6]. В качестве исходных данных задавался моноэнергетический пучок электронов, по нормали падающий на пластины. Был просчитан диапазон энергий от 1 до 10 МэВ с шагом 0,5 МэВ. Полу-

ченные распределения зарядов по пластинам использовали для анализа экспериментальных данных. Точность метода составляет 5%. На рис. 6 представлены расчетные и экспериментальные данные по распределению заряда на пластинах.

По завершении этапа настройки и измерений параметров пучка провели серию многочасовых прогонов ускорителя. Условия и длительность работы определялись руководством ВЦГиПХ.

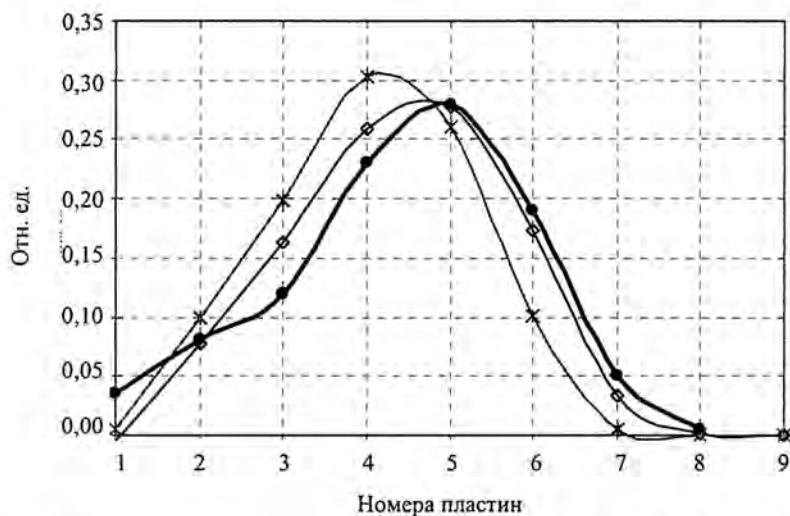


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные распределения зарядов на пластинах:
 * — 5,5 МэВ (расчет); ◊ — 6 МэВ (расчет); ● — эксперимент

3. Использование РТК ЛУ-7-2

Возможность ускорителя ЛУ-7-2 генерировать два вида излучения (тормозное и электронное) имеет важное технологическое значение при радиационной стерилизации биоматериалов. Биологические ткани разнообразны по клеточному составу и по структуре внеклеточного матрикса, вследствие чего по-разному реагируют на радиационное воздействие. Поэтому необходимо учитывать особенности строения тканей для того, чтобы сохранить их свойства и пластичность после радиационной стерилизации. При выборе вида и доз излучения принципиальны также методы физической и химической обработки и консервации биоматериалов (сухие они или в растворе) и их параметры (размеры от 0,5 до 20 см). Проведенные нами совместные исследования позволяют подбирать оптимальную дозу и вид радиационного воздействия для каждого определенного вида биологической ткани, а также прогнозировать возможные структурные изменения в них.

Заключение

Во Всероссийском центре глазной и пластической хирургии (ВЦГиПХ, г. Уфа) осуществлен монтаж и вывод в режим эксплуатации радиационно-технологического комплекса, созданного на основе линейного ускорителя электронов ЛУ-7-2. РТК ЛУ-7-2 был разработан и изготовлен в РФЯЦ-ВНИИЭФ в рамках совместного научного проекта с ВЦГиПХ. Основное назначение РТК

ЛУ-7-2 состоит в стерилизации биоматериалов серии "Аллоплант" и изделий медицинского назначения. Монтаж и ввод РТК ЛУ-7-2 в режим эксплуатации осуществлен в специально спроектированном здании при ВЦГиПХ.

По завершении монтажа был осуществлен физический пуск и вывод ускорителя на расчетные рабочие параметры. Измерение выходной энергии и тока пучка ускоренных электронов ЛУ-7-2 показало, что средняя энергия ускоренных электронов составляет 6 МэВ при средней мощности пучка электронов до 1,5 кВт.

Было проведено тестирование работы ускорителя в номинальном режиме с целью испытания всех систем РТК на отказ. Ускоритель показал надежную работу всех систем и стабильность параметров электронного пучка.

Список литературы

1. Zavyalov N. V., Khokhlov Yu. A., Telnov A. V. et al. Electron Linear Accelerator LU-10-20 // XVIII International Linac Conference, Compendium of Scientific Linacs. Geneva. 26–30 aug. 1996. P. 159.
2. Шориков И. В., Тельнов А. В., Девяткин И. В. и др. Проект транспортабельного линейного ускорителя электронов для гаммаграфии крупногабаритных объектов // Вопросы атомной науки и техники: Материалы XV Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 2, 3 (29, 30). С. 42–44.
3. Вальднер О. А., Собенин Н. П., Зверев Б. В., Щедрин И. С. Диафрагмированные волноводы: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Москалёв В. А., Сергеев Г. И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Милованов О. С., Смирнов И. А. Экспресс-метод измерения энергии пучка ускоренных электронов // Ускорители. – М.: Атомиздат, 1969. Вып. XI. С. 57–60.
6. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.

Small-Size Linear Electron Accelerator for Sterilization of Medical Production

A. V. Tel'nov, I. V. Devyatkin, N. V. Zavyalov, V. S. Majornikov,
M. A. Ovchinnikov, V. T. Punin, N. P. Sitnikov, V. P. Tarantasov, I. V. Shorikov,
O. R. Shangina, D. R. Lapchik.

The radiation technological complex (RTC) based on linear resonance electron accelerator LU-7-2 is described. The basic product specification, principles of operation, the description of system components and the end use of RTC LU-7-2 that is placed in specially designed facility of ACEPS are given.