

УДК 621.384

**ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУЭ-75
ЕРЕВАНСКОГО ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
В РЕЖИМЕ ЭНЕРГИЙ 10–75 МэВ**

А.М. СИРУНЯН, А.С. АКОПЯН, А.З. БАБАЯН, Г.О. МАРУКЯН*,
Г.Г. МКРТЧЯН, К.Д. ДАВТЯН, Г.Л. АРУТЮНОВ, Г.М. АЙВАЗЯН,
С.К. АВАКЯН, В.А. МАРТИРОСЯН, А.А. МАРКАРЯН,
Г.Г. ХАЧАТРЯН, Л.Р. ВАГРАДЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

*e-mail: maruk@mail.yerphi.am

(Поступила в редакцию 29 марта 2019 г.)

Приведены результаты работ по повышению номинальной энергии линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 с 50 до 75 МэВ. Исследованы характеристики пучка, представлены измеренные энергетические спектры полученных пучков в диапазоне 50–75 МэВ со средней интенсивностью до 10 мкА. Проведена модернизация элементов магнитной оптики тракта параллельного переноса и осуществлена проводка пучка до конца канала транспортировки.

1. Работы по повышению энергии линейного ускорителя

Со времени запуска (1967 год) и до практической консервации (2005 год) электронного синхротрона АРУС (с максимальной энергией 6 ГэВ) Ереванского физического института (ЕрФИ, переименованного в 2011 году в Национальную научную лабораторию им. А. Алиханяна – ННЛА) линейный ускоритель ЛУЭ-75 служил в основном в качестве инжектора. В конце 80-ых он был реконструирован с целью увеличения энергии ускоренных электронов [1]. Была разработана и создана дополнительная 3-я ускорительная станция, после запуска которой был получен пучок электронов с энергией 70 МэВ (рис.1). Однако, в дальнейшем по ряду причин линейный ускоритель продолжал функционировать в качестве инжектора синхротрона в первоначальном режиме до 50 МэВ, и необходимость в 3-й ускорительной станции отпала. 3-ий клистронный пост со своим высоковольтным импульсным модулятором и волноводный тракт питания последней ускоряющей секции были частично разобраны, а цепи электро- и радиотехнического обеспечения, системы управления, контроля и измерений – демонтированы. После приостановки синхротрона ЛУЭ функционировал как самостоятельная физическая установка.

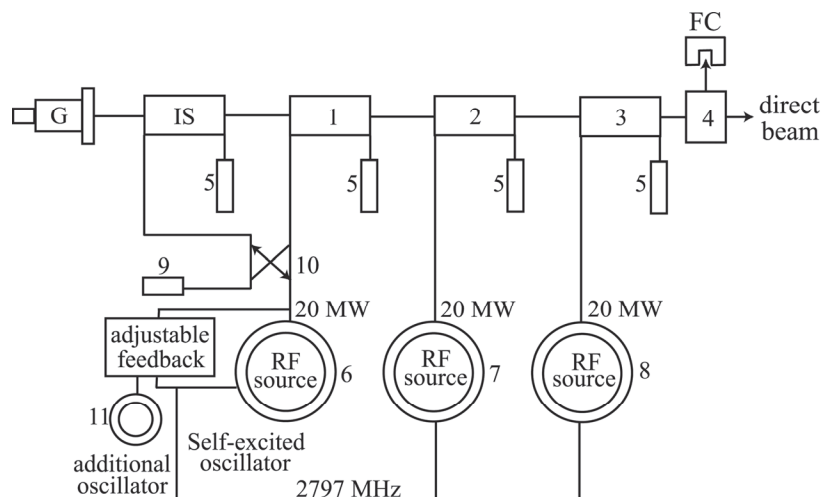


Рис.1. Упрощенная структурная схема СВЧ-питания ускорителя ЛУЭ-75: G – термоэлектронная пушка; IS – инжекторная секция (волноводный группирователь); FC – цилиндр Фарадея; 1,2,3 – основные ускоряющие секции; 4 – дипольный анализирующий магнит 90°; 5 – охлаждаемые поглощающие нагрузки; 6,7,8 – мощные пролётные клистроны; 9 – согласованная нагрузка; 10 – направленный ответвитель; 11 – дополнительный маломощный автогенератор.

В последние годы в связи с возросшим интересом к задачам ядерной физики в области низких энергий [2] была поставлена задача восстановить 70 МэВ-ный режим ускорителя и довести его до энергии 75 МэВ.

Необходимо было также отработать режимы получения как номинальных токов, так и управляемых первичных электронных пучков экстремально низкой интенсивности в диапазоне 50–75 МэВ для использования в совместных ННЛА (Ереван) – ОИЯИ (Дубна) работах по калибровке кристаллов для эксперимента Mu2e (FNAL, USA). В 2015–2018 гг. такие работы были выполнены с тестовыми пучками (10–20 e^-/c) ускорителя ЛУЭ-75 в области энергий 15–50 МэВ [3], частично дополнившие результаты для диапазона 80–120 МэВ, полученные коллаборацией Mu2e во Фраскати (Италия). На рис. 2 приведены результаты обработки набора данных, полученных на ЛУЭ-75 для диапазона 15–40 МэВ в Ереване и во Фраскати [4]. Характеристики кристаллов в диапазоне энергий 50–75 МэВ оставались неисследованными. Таким образом, повышение энергии электронов стало актуальным.

Работы по повышению энергии линейного ускорителя выполнялись в 2018 г. Для 3-й ускоряющей секции были изготовлены и установлены протяженные корректирующие катушки, с помощью которых можно компенсировать влияние магнитного поля Земли и расположенных вблизи ферромагнитных масс.

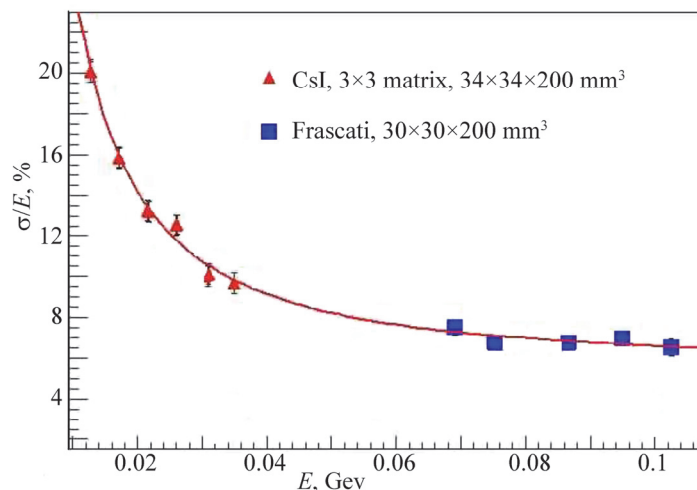


Рис.2. Энергетическое разрешение матрицы из 9-ти кристаллов CsI (pire); кривая показывает результаты обработки набора данных, полученных в Ереване (треугольники) и во Фраскати (квадратики) [4].

Некоторые физически устаревшие узлы были заменены новыми. Использование современных цифровых стабилизированных источников питания вместо устаревших громоздких систем улучшило качество пучка, упростило его настройку и повысило надежность системы в целом. Таким образом, восстановительные работы сочетались с частичной модернизацией. Однако это не коснулось силовой электроники и СВЧ техники, что будет рассмотрено в будущем. Рассматривается также вопрос оптимального выбора эквивалентной замены мощных клистронов S-диапазона, а также водородных модуляторных тиратронов, снятых с производства, на современные.

В результате выполненных работ была полностью восстановлена 3-я ускорительная станция, включающая, помимо ускоряющей секции, клистронный пост (рис.3) и питающий клистрон высоковольтный импульсный модулятор, а также системы их обеспечения. Были отлажены режимы отдельных узлов и системы в целом.

Первый клистрон (6, на рис.1), работающий в настоящее время в режиме автогенератора, питает СВЧ-мощностью группирующую и первую основную секции. Кроме того, он является задающим генератором для двух остальных клистронов, работающих в усилительном режиме и питающих 2-ю и 3-ю основные секции. Потребовалось доработать линии возбуждения включением ферритовых вентилей и дополнительного волноводного фазовращателя. После этого система фазирования (на рис.1 не показана) позволила в необходимых пределах изменять фазу возбуждения клистрона с целью выбора нужного относительного фазового сдвига СВЧ колебаний на входе последней ускоряющей секции. Режимы



Рис.3. Третий клистронный пост после восстановления.

ферритовых вентилей устанавливались экспериментально, исходя из минимума мощности отраженной волны в тракте, опасной не только для ускоряющих секций, но и дефицитных вакуумных керамических переходов, разделяющих вакуумный объем секций от заполненной под давлением 6 атм. сухим азотом полости мощного волноводного тракта. Вопросы стабильности фазовых соотношений, к оптимальному выбору которых практически сводится настройка ускорителя, для ЛУЭ-75, как и для любого ускорителя, являются весьма существенными. Для эксперимента одним из важных параметров пучка является энергетический разброс, оцениваемый шириной энергетического спектра. В литературе подробно исследовано воздействие различных факторов на энергетический спектр [5,6].

Одним из основных факторов является смещение частоты ускоряющего поля, влияющего на энергию ускоряемой частицы из-за сильной дисперсии диафрагмированного волновода, каковой является ускоряющая секция. Зная экспериментально измеренную частотную чувствительность и паспортные данные секции, можно рассчитать зависимость относительной ширины спектра от смещения частоты генератора ускоряющего поля относительно резонансной частоты секции. На рис.4 приведена кривая этой зависимости, рассчитанная для основной ускоряющей секции линейного ускорителя ЛУЭ-75, откуда видно, что при стабильности клистронного генератора ± 0.1 МГц можно обеспечить относительную стабильность энергии электронов $\pm 1.1\%$.

Стабильность частоты клистрона зависит в основном от стабильности питающих напряжений (ЛУЭ-75 питается от стабильной синхронной сети $\pm 0.1\%$) и температурных колебаний резонаторной структуры клистрона. Для отвода

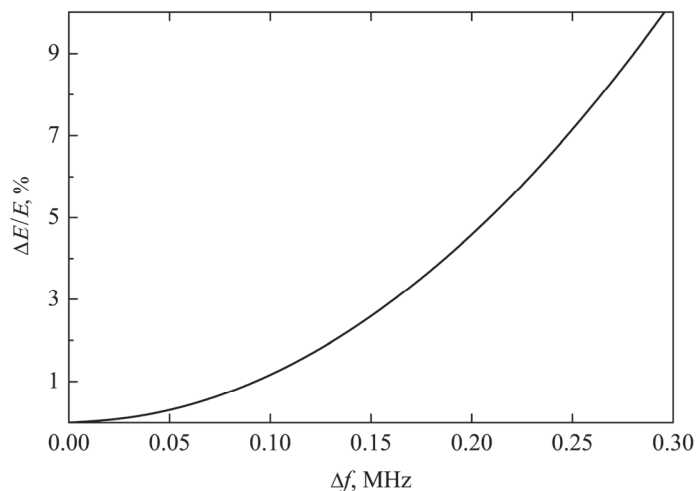


Рис.4. Зависимость относительного изменения выходной энергии электронов от отклонения частоты ускоряющей волны от собственной частоты основной секции.

тепла, выделяемого еще одной ускорительной станцией, потребовалось упрочнение системы водяного охлаждения и термостатирования для стабилизации температуры не только дополнительной секции, но и ускорителя в целом. Отметим, что на энергетический разброс влияют и иные факторы: разброс начальных скоростей частиц, фазовая протяженность сгустков, переходные процессы и др.

После наладки и испытания систем 3-й ускорительной станции осенью 2018 г. был осуществлен запуск ускорителя. На рис. 5 приведены осциллограммы выходного импульса 3-го модулятора (с длительностью 2.2 мкс на уровне 0.9) и

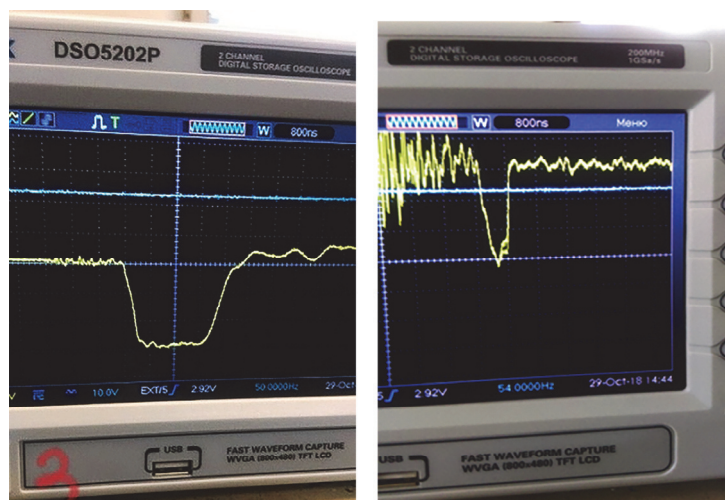


Рис.5. Осциллограммы импульсов восстановленного 3-го модулятора (слева) и пучкового тока (справа) при $E = 75$ МэВ.

импульса тока пучка при энергии 75 МэВ и среднем значении интенсивности $I = 0.5$ мкА (частота следования импульсов 50 Гц) с коллимацией Ø14 мм после анализирующего магнита (4, рис.1). Отметим, что без коллимации среднее значение прямого тока на выходе ускорителя составляет 9–10 мкА. Энергетические спектры, измеренные с помощью анализирующего магнита 90°, цилиндра Фарадея и интегратора тока для электронных пучков с энергиями 60, 70 и 75 МэВ, представлены на рис.6. Энергетический разброс пучка – полная ширина на полувысоте (FWHM) – составляет менее 2%.

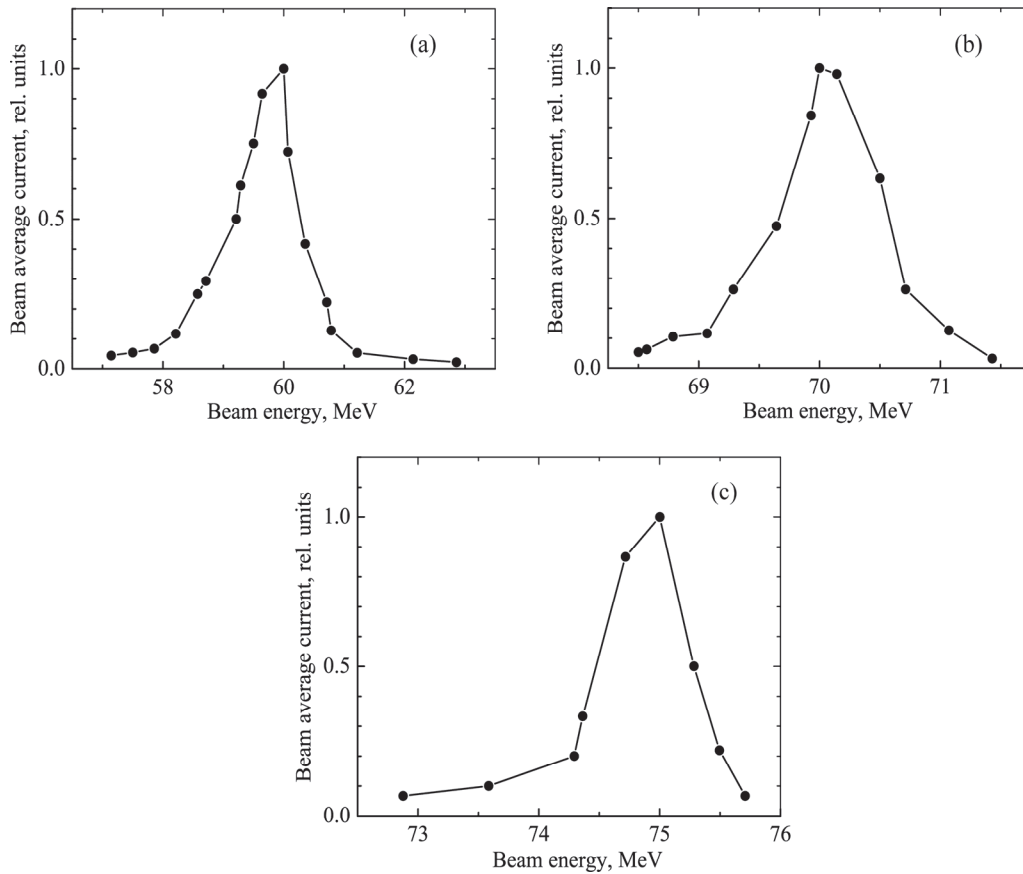


Рис.6. Характерные энергетические спектры пучков при энергиях (a) – 60, (b) – 70 и (c) – 75 MeV.

В таблице приведены некоторые параметры пучка со средним током 1 мкА при частоте следования 50 Гц. Без коллимации может быть получено максимальное значение среднего тока прямого пучка до 10 мкА (рис.1). Более подробные сведения об ускорителе ЛУЭ-75 приведены в [3].

Продолжаются работы по усовершенствованию системы температурной стабилизации ускорителя, замене контрольно-измерительной аппаратуры и

Параметры пучка

Максим. энергия электронов, МэВ	75
Диапазон изменения энергии, МэВ	10 – 75
Длительность импульса, мкс	0.7 – 1
Число сгустков в импульсе	2000 – 2800
Длина сгустка, см	1
Кол-во e^- /сгусток	5×10^7
Кол-во e^- /с	7×10^{12}

источников питания на современную с выходом на компьютер. Начаты работы по созданию системы сбора данных (DAQ System) на основе электроники SAMAC, что даст возможность в дальнейшем перейти к вопросам автоматизации.

2. Тракт параллельного переноса пучка

Посредством параллельного переноса пучок перемещается в конечную зону измерений, который удален от линейного ускорителя на расстояние порядка 20 м. Благодаря этому значительно уменьшается влияние электромагнитных помех и наводок на измерительную аппаратуру, а также создаются благоприятные низкофоновые условия для проведения прецизионных экспериментов.

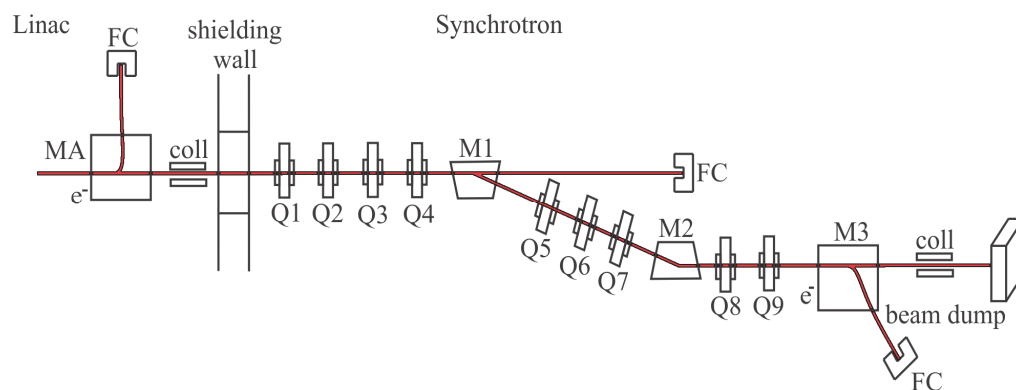


Рис.7. Структурная схема тракта параллельного переноса: МА – анализирующий магнит на выходе ЛУЭ-75; M1, M2 – поворотные магниты параллельного переноса; M3 – магнит beam dump; Q1...Q9 – квадрупольные линзы; FC – цилиндр Фарадея; coll – коллиматор.

Отклоняющий электромагнит в самом конце тракта (М3 на рис.7) может быть использован для получения фотонных пучков. Проводились работы по уموощению поворотных магнитов параллельного переноса, тестированию элементов магнитной оптики в интервале энергий 50–75 МэВ. С целью обеспечения теплового режима магнитов были рассчитаны и изготовлены дополнительные обмотки для поворотных магнитов М1 и М2, установка которых обеспечила возможность проведения длительных сеансов. Была осуществлена проводка пучка электронов от выхода ЛУЭ-75 до конца тракта параллельного переноса в интервале энергией 50–75 МэВ. На рис.8 приведено изображение 75 МэВ-го пучка на люминофорном экране в конце тракта параллельного переноса.

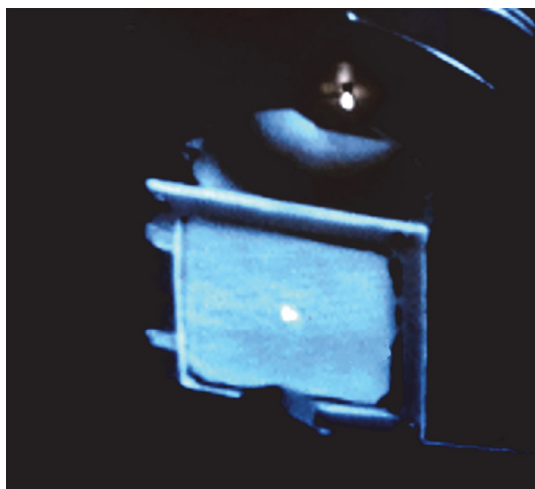


Рис.8. 75 МэВ-ный пучок на люминофорном экране в конце тракта параллельного переноса.

3. Заключение

Вводом в эксплуатацию 3-ей ускоряющей станции предельная энергия линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 в ННЛА (ЕрФИ) повышена с 50 до 75 МэВ. Исследованы характеристики пучка, представлены измеренные энергетические спектры полученных пучков в диапазоне 50–75 МэВ со средней интенсивностью до 10 мкА. Проведена модернизация элементов магнитной оптики тракта параллельного переноса и осуществлена проводка пучка до конца канала транспортировки.

Увеличение энергии электронов до 75 МэВ расширяет перспективы для исследований в области низкоэнергетической ядерной физики, открывает возможность изучения фотоядерных процессов при реакциях, имеющих более высокий энергетический порог, заявленных в темах исследовательских групп

Отдела Экспериментальной Физики ННЛА (ЕрФИ) и Ереванского Государственного Университета. Получение электронных пучков экстремально низкой интенсивности по отработанной в ЕрФИ методике [3] позволяет продолжить работы по исследованию прототипа электромагнитного калориметра [4] для эксперимента Mu2e (Fermilab, USA), предусмотренные в рамках сотрудничества ОИЯИ (Дубна) – ННЛА (Ереван). Наличие таких пучков открывает как возможности для калибровки ряда детекторов элементарных частиц, используемых в области низких энергий, так и для использования их в прикладных исследованиях [7,8,9].

Авторы выражают благодарность А. Папяну за оказанную помощь при проведении работ на ускорителе ЛУЭ-75.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Э. Лазиев.** Состояние и программа развития Ереванского синхротрона, Материалы научного семинара, посвященного 10-летию Ереванского ускорителя, Ереван, ЕрФИ, 1978, с.4-42.
2. **А.М. Сирунян.** О создании в ЕрФИ экспериментальной базы для исследований по ядерной физике низких энергий на основе ЛУЭ-75 и ЭКУ. <http://book.lib-i.ru/25fizika/393013-1-o-sozdanii-erfi-eksperimentalnoy-bazi-dlya-issledovaniy-yadernoy-fizike-nizkih-energiy-osnove-lue-75-eku.php>
3. **A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, A. Papyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53**, 271, (2018).
4. **A. Artikov, A. Babayan, V. Baranov, J. Budagov, Yu. I. Davydov, V. Glagolev, A. Hakobyan, H. Hakobyan, D.G. Hitlin, S. Miscetti, T. Mkrtchian, A. Simonenko, A. Sirunyan, A. Shalyugin, V. Tereschenko, H. Torosyan, Z. Usubov, H. Zohrabyan.** ‘Tests of undoped CsI matrix with an extremely low intensity electron beam’. Conference New Trends in High Energy Physics, Budva Montenegro, 24-30 September 2018, <http://indico.jinr.ru/contributionDisplay.py?contribId=111&confId=410>
5. **О.А. Вальднер, А.Д. Власов, А.В. Шальнов.** Линейные ускорители. М., Атомиздат, 1969.
6. **А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов,** Основы физики и техники ускорителей. М., Энергоатомиздат, 1991.
7. **R.H. Avagyan, A.E. Avetisyan, I.A. Kerobyan, S.P. Taroyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **44**, 250 (2009).
8. **A.Z. Babayan, V.Ts. Nikogosyan, S.P. Taroyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **49**, 95 (2014).
9. **N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, Yu.V. Lyashko, V.L. Uvarov,** Research of Transmutation of Products of Nuclear Cycle at the Electron Accelerator //Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования», **42**(1), 203 (2004).

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏԻ ԼՈՒԷ-75 ԳԾԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉԸ
10–75 ՄԷՎ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ

Ա.Մ. ՍԻՐՈՒՆՅԱՆ, Ա.Ս. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ա.Զ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Հ.Հ. ՄԱՐՈՒԹՅԱՆ,
Հ.Գ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Կ.Դ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Հ.Լ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՈՎ, Գ.Մ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ,
Ս.Բ. ԱՎԱԳՅԱՆ, Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ,
Գ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Ռ. ՎԱՀՐԱԴՅԱՆ

Ներկայացված են ԼՈՒԷ-75 գծային արագացուցիչի էլեկտրոնային փնջի էներգիայի 50-ից մինչև 75 ՄԷՎ բարձրացման համար կատարված աշխատանքների արդյունքները: Ուսումնասիրվել են 50–75 ՄԷՎ միջակայքում մինչև 10 μA միջին ինտենսիվությամբ փնջի բնութագրերը և ներկայացված են չափված էներգետիկ սպեկտրները: Բարելավվել են զուգահեռ տեղափոխման ուղու մագնիսական օպտիկայի տարրերը, և կատարված է փնջի տեղափոխումը մինչև փնջատարի վերջը:

LINEAR ELECTRON ACCELERATOR LUE-75 OF
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE AT ENERGIES OF 10–75 MeV

A.M. SIRUNYAN, A.S. HAKOBYAN, A.Z. BABAYAN, H.H. MARUKYAN,
H.G. MKRTCHYAN, K.D. DAVTYAN, H.L. ARUTYUNOV, G.M. AYVAZYAN,
S.K. AVAGYAN, V.H. MARTIROSYAN, A.A. MARGARYAN,
G.G. KHACHATRYAN, L.R. VAHRADYAN

The results on upgrade of the linear accelerator LUE-75 for increasing the energy of the electron beam from 50 to 75 MeV are presented. The characteristics of the beam are investigated, and the measured energy spectra of the obtained beams are presented in the range of 50–75 MeV at an average intensity up to 10 μA . The modernization of the elements of magnetic optics for the parallel transfer path was performed, and the beam was transported to the end of the beamline.