

Ա.Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ  
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Հակոբյան Աշոտ Սահակի

ԱԱԳԼ–Ի ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԳԾԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑՉԻ 75 ՄԷՎ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ  
ՌԵԺԻՄԻ ԵՎ ՑԱԾԻ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա.04.20 – «Փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի զիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2023

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМЕНИ А.И. АЛИХАНИЯ  
(ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

Акопян Ашот Саакович

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 75-МЭВ И  
НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ РЕЖИМОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
ННЛА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
01. 04. 20 – «Физика пучков и ускорительная техника»

ЕРЕВАН –2023

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան Ազգային Գիտական Լաբորատորիայի (ԵրՖԻ) գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր

Հրաչյա Հովհաննեսի Մարուքյան (ԱԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր

Միքայել Իվանի Իվանյան (ՔԵՆԴԼ)

Տեխ. գիտ. թեկ.

Ալբերտ Հայրապետի Շահինյան (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի պետական համալսարան, Երևան, Հայաստան:

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2023 թ. հունիսի 15-ին ժամը 14:00-ին, ԱԱԳԼ-ում գործող ԲՈԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2023 թ. մայիսի 2-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր

Հրաչյա Հովհաննեսի Մարուքյան

---

Тема диссертации утверждена научным советом Национальной Научной Лаборатории им. А.И. Алиханяна (ЕрФИ).

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Марукян Грачья Оганесович ННЛА (ЕрФИ)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук

Иванян Михаил Иванович (КЕНДЛ)

канд. техн. наук

Шагинян Альберт Айрапетович ННЛА (ЕрФИ)

Ведущая организация:

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения.

Защита диссертации состоится 15-го июня 2023 г. в 14:00 на заседании действующего в ННЛА специализированного совета ВАК 024 по «Физике» (Ереван, 0036, ул. братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ННЛА.

Автореферат разослан 2-го мая 2023 г.

Ученый секретарь специализированного совета:

доктор физ.-мат. наук

Марукян Грачья Оганесович

## **Общая характеристика работы**

### **Цель и актуальность работы**

Современная ускорительная физика и техника характеризуются всё расширяющимся проникновением практически во все области научных исследований, которое примечательно тем, что работы на стыке различных областей науки нередко позволяют добиться прорывных результатов, имеющих ключевое значение не только для фундаментальной науки, но и для создания новых прикладных направлений. В Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна (ЕрФИ) [1] и в других научных центрах Армении в последние десятилетия спектр научных интересов резко возрос. Это связано с расширением коллаборационных связей, вливанием новых идей, стремлением в своей стране реализовать приобретенный в международных научных центрах положительный опыт. Многие проекты по модернизации/модификации синхротрона АРУС Ереванского физического института по ряду причин остались неосуществленными [2, 3]. Работа кольцевой части — собственно синхротрона — была приостановлена, начиная с 2008 года.

Продолжает работать в автономном режиме только линейный ускоритель — инжектор синхротрона АРУС, который стал одной из базовых экспериментальных установок для исследований в области ядерной физики низких энергий. Для страны с ограниченными ресурсами создание и эксплуатация новых ускорительных машин является практически сложной задачей.

В такой ситуации стало актуальным расширение возможностей линейного ускорителя путем увеличения энергии ускоряемых электронов, создания новых режимов установки и, как следствие, повышение востребованности ускорителя для исследований в области фундаментальной и прикладной ядерной физики низких энергий. Выполненным с этой целью работам и решению связанных с ними задач на линейном ускорительном комплексе ЛУЭ-75 и посвящена данная диссертация.

### **Научно–техническая новизна и личный вклад автора**

По инициативе и под руководством, а также при непосредственном участии автора восстановлена и задействована 3–я ускорительная станция линейного ускорителя, которая с начала 90-ых годов после получения пучка 70 МэВ по ряду причин была отключена, и в дальнейшем в значительной степени декомплектována и демонтирована.

Впервые на этом линейном ускорителе после восстановления прежнего режима 70 МэВ энергия электронов была доведена до проектного значения 75 МэВ.

Рассмотрена взаимозаменяемость 2-й и 3-й ускорительных станций в режимах (25 – 50) МэВ.

Исследована работа ускорителя в расширенном диапазоне энергий (50 – 75) МэВ и найдены режимы с приемлемыми величинами пучковых токов для проведения экспериментов потенциальными потребителями.

Изучено влияние температурных и частотных изменений СВЧ тракта и ускорительных секций на энергетическую стабильность пучка. Результаты были учтены при задействовании последней секции и получении режимов до 75 МэВ.

Определены характеристики пучка в разных режимах, параметры занесены в виде файлов в компьютер для операторского пользования, что сокращает времязатратность и облегчает работу сотрудников во время подготовки к эксперименту и оперативного перехода с одной энергии на другую. После изучения режимов ускорителя в диапазоне (10 – 75) МэВ 3-я ускорительная станция была введена в эксплуатацию.

Впервые исследованы темновые токи этого ускорителя, измерены их спектры. Выявлены режимы их минимизации.

Разработана и реализована методика получения уникальных электронных пучков экстремально низкой интенсивности — десятков частиц в секунду. Созданные режимы позволили минимизировать явление наложения сигналов (pile up) при исследовании сцинтилляционных кристаллов бомбардировкой одиночно летящими электронами.

При участии автора на основе сформированных низкоинтенсивных пучков в ННЛА (ЕрФИ) создан и используется стенд для исследования детекторов элементарных частиц. Проведенные совместно с Лабораторией ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ЛЯП ОИЯИ, Дубна, Россия) тестирования прототипа электромагнитного калориметра для запланированного в Фермилаб (США) эксперимента  $Mu2e$  показали работоспособность разработанной методики и надежность работы стенда. Число одноэлектронных событий составляло не менее 70%. Такой стенд, как и 75 МэВ-ый ускоритель ЛУЭ-75 с возможностью варьирования энергии в пределах (10 – 75) МэВ, в настоящее время является единственно действующим в регионе [4, 5].

### **Практическая значимость работы**

Получены и используются электронные пучки в широком диапазоне энергий (10 – 75) МэВ. На основе сформированных пучков экстремально низкой интенсивности проведены эксперименты с регистрацией (10 – 20)  $e^-/с$ . Это позволило расширить спектр проводимых экспериментов.

Благодаря доведению энергетического диапазона до 75 МэВ стало возможным изучение ядерных взаимодействий при более высоких порогах реакций, что используется в настоящее время в экспериментах, осуществляемых исследовательскими группами как Армении, так и научных центров других стран [6].

В результате выполненных работ на ускорителе проводятся эксперименты на пучках со средними токами от сверхнизких значений до 10 мкА в указанном выше энергетическом диапазоне:

- изучение фотоядерных реакций в области фундаментальной ядерной физики низких энергий;
- ставшие традиционными для ЛУЭ-75 опыты по активационному анализу [7, 8], в частности, по поиску новых медицинских изотопов и разработкам методик их получения;

- разрабатываются новые в ННЛА (ЕрФИ) технологии по количественному определению тяжелых металлов в окружающей среде:
  - тестирование промышленных отходов на наличие веществ, представляющих опасность при попадании в почву и водоемы,
  - радиоизотопный анализ образцов горных пород.

Пучки экстремально низкой интенсивности – несколько десятков  $e^-/с$  – использовались в совместных с ОИЯИ испытаниях прототипа электромагнитного калориметра для эксперимента Mu2e, планируемого в Фермилабе [4 – 6].

Пучки низкой и сверхнизкой интенсивностей, кроме тестирования прототипов калориметров строящихся коллайдеров, могут быть использованы также:

- для изучения ядерных реакций прямой бомбардировкой электронами пучков сверхнизкой интенсивности. При этом подавляется мощный рентгеновский всплеск, присущий интенсивным пучкам, что существенно повышает чистоту измерений нейтронного выхода [9];
- для калибровки детекторов элементарных частиц;
- при изучении одиночных событий; для дифракционных задач;
- при исследовании излучения заряженных частиц в монокристаллах;
- в микробиологии: изучение влияния различных доз облучения на рост и мутации популяций микроорганизмов, что важно в эпоху распространения вирусных инфекций.

Электронные пучки с энергиями десятки МэВ могут применяться для исследования влияния излучений на свойства материалов, используемых в воздушных и космических летательных аппаратах; вторичные излучения, полученные конвертерным способом, возможно использовать для испытания элементов электронной базы, а также готовых радиоэлектронных приборов и их компонентов на радиационную стойкость.

## **Работы, выносимые на защиту**

- Восстановлены 3-я ускорительная станция и режим 70 МэВ. Впервые энергия линейного ускорителя электронов ННЛА (ЕрФИ) доведена до проектного значения 75 МэВ. Изучены режимы в диапазоне энергий до 75 МэВ. Исследовано влияние различных факторов на стабильность энергии электронного пучка. Измерены энергетические спектры пучков при различных энергиях.
- Отработаны новые режимы работы ускорителя для диапазона энергий (25 – 50) МэВ при взаимозаменяемости 3-ей и 4-ой основных ускоряющих секций и, соответственно, 2-го и 3-го клистронных постов, что повышает надежность ускорителя для указанного энергетического диапазона.
- Получены и изучены режимы уникальных электронных пучков экстремально низкой интенсивности, регистрируемых измерительной аппаратурой в конце тракта транспортировки в зоне калибровки кристаллов.

- На основе пучков экстремально низкой интенсивности создан и использован стенд для калибровки кристаллов в диапазоне энергий (15 – 75) МэВ для детекторов элементарных частиц с числом одноэлектронных событий 70% и более. Такой стенд, образованный линейным ускорителем вместе с трактом параллельного переноса в качестве источника электронов и измерительной аппаратурой, является испытанным генератором тестовых пучков и может служить для тестирования детекторов калориметров строящихся коллайдеров и других вышеперечисленных исследований.

## Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах в ННЛА, а также в соавторстве нашли отражение на международной конференции в Черногории в 2018 г. [10].

По теме диссертации опубликовано 6 статей в журнале Известия НАН Армении, Физика. В этих работах вклад автора является определяющим. Еще в двух статьях, опубликованных в этом же журнале, автор имеет частичный вклад — по ускорительной части и содействию в проведении экспериментов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 131 страницу, включая 65 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 97 наименований.

## Краткое содержание работы

**Введение** раскрывает цель и актуальность темы исследования, описывает научную новизну, практическую значимость работы, личный вклад автора; в нем приводятся положения, выносимые на защиту, и апробация результатов.

В **главе 1** описывается статус действующего линейного ускорительного комплекса ЛУЭ-75. ЛУЭ-75 представляет собой четырехсекционный ускоритель на бегущей волне S-диапазона. Приводятся основные технические характеристики систем и жизненно важных узлов. Даны параметры структур ускорительной установки: ускоряющих секций и мощных СВЧ-источников, модуляторных устройств, электронной пушки, вакуумной системы, системы термостатирования и охлаждения, синхронного стабильного питания, тракта транспортировки и параллельного переноса. Подробно приведены характеристики пучка.

Временная структура пучка представлена на рис. 1.

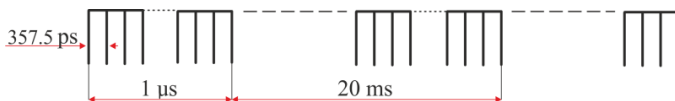


Рис. 1. Временная структура пучка ЛУЭ-75.

Рассмотрены особенности СВЧ-питания ЛУЭ-75, связанные с наличием положительной обратной связи в цепи 1-го клистрона, автоколебательный режим которого приводит к упрощению схмотехники и эксплуатации [11]. Первый клистрон служит драйвером для остальных клистронов.

Обоснованы вопросы, связанные с необходимостью модернизации ускорителя путем внедрения современной техники, включая измерительную, а также создания системы сбора данных как первого этапа автоматизации.

**Глава 2** посвящена работам по восстановлению 3-ей ускорительной станции, значительно демонтированной и декомплектванной за последнюю четверть века. Описываются работы по восстановлению 70 МэВ-го режима (рис. 2). Задача решалась на основе технико-технологических ресурсов ННЛА (ЕрФИ), однако, по мере возможности внедрялась и новая техника.



Рис. 2. Слева – третий клистронный пост после восстановления; справа – 4-я ускоряющая секция (без экранирующих кожухов) с протяженными компенсирующими катушками.

Впервые на линейном ускорителе получен пучок с энергией 75 МэВ и были исследованы режимы ускорителя в интервале энергий (50 – 75) МэВ, экспериментально измерены энергетические спектры пучков (рис. 3) [12].

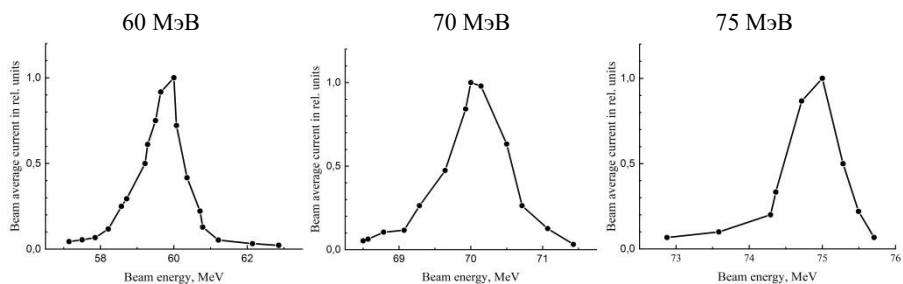


Рис. 3. Энергетические спектры при разных энергиях до 75 МэВ, FWHM < 2%.

На рис. 4 показана осциллограмма высоковольтного импульса модулятора клистрона и огибающая отработанного СВЧ-импульса на выходе ускоряющей секции

восстановленной третьей ускорительной станции. Огибающая имеет меньшую длительность, чем импульс модулятора, питающего клистрон. Уменьшение длительности радиочастотного импульса является следствием автоколебательного режима первого клистрона, который одновременно питает входной мощностью остальные клистроны.



Рис. 4. Нижний луч оциллограммы — импульс восстановленного модулятора; верхний луч — огибающая СВЧ-импульса.

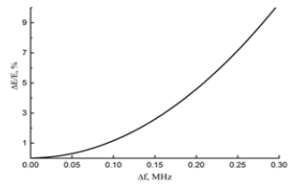


Рис. 5. Зависимость относительного изменения выходной энергии электронов от отклонения частоты ускоряющей волны от собственной частоты основной секции.

Из кривой, приведенной на рис. 5, видно, что при стабильности клистронного генератора  $\pm 0.1$  МГц можно обеспечить относительную стабильность энергии электронов на выходе секции  $\pm 1.1\%$ .

Стабильность частоты клистронных генераторов зависит в основном от стабильности питающих напряжений и температурных колебаний резонаторной структуры клистрона. Для отвода тепла, выделяемого еще одной ускорительной станцией, потребовалось упрочнение систем водяного охлаждения и термостатирования для стабилизации температуры не только дополнительной секции, но и ускорителя в целом.

В связи с задействованием 3-й ускорительной станции ускорителя рассмотрено влияние частотных, фазовых и температурных изменений на стабильность энергии электронного пучка на выходе ускоряющей секции ЛУЭ-75 [13]. Повышаются требования к стабильности частоты генератора и фазовых соотношений, к оптимальному выбору которых практически сводится настройка ускорителя. Повышаются требования к системе синхронного питания ускорителя и термостабилизации.

На разброс выходной энергии влияет также неравномерность распределения ускоряющего поля в электронной пушке во времени — в течение модулирующего импульса. Была рассчитана и экспериментально уточнена оптимальная корректирующая цепь для модулятора электронной пушки.

Рассмотрена взаимосвязь энергии частиц на выходе основной ускоряющей секции ЛУЭ-75 от входной СВЧ-мощности и пучкового тока.

В связи с работами по увеличению энергии пучка возникла необходимость модернизации магнитной оптики тракта транспортировки и параллельного переноса (ТПП), который расположен в синхротронном зале вдали от помещения ЛУЭ-75 за его радиационно-защитной железобетонной стеной толщиной 1.3 м (рис. 6) [14]. Существенное уменьшение радиационного фона при отключенном синхротроне и, практически, отсутствие влияния электромагнитных помех и наводок от электрорадиотехнических устройств линейного ускорителя на измерительную



аппаратуру, создали благоприятные низкофоновые условия для проведения прецизионных экспериментов.

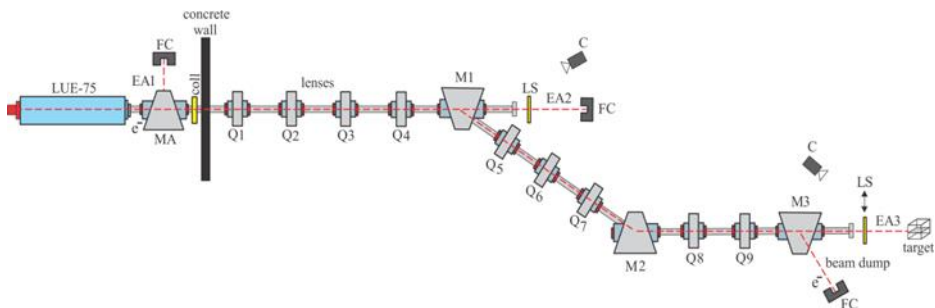


Рис. 6. Структурная схема тракта параллельного переноса: MA – анализирующий магнит  $90^\circ$  на выходе ЛУЭ-75; M1, M2 – поворотные магниты параллельного переноса; M3 – отклоняющий магнит (beam dump), используемый для получения фотонных пучков; Q1...Q9 – квадрупольные линзы; FC – цилиндр Фарадея; coll – коллиматор, EA 1,2,3 – экспериментальные зоны, LS – люминофорные экраны, C – видеокамеры.

На начальном этапе магнитная оптика ТПП была рассчитана и сконструирована для энергии электронов порядка 20 МэВ. С целью исключения перегрева и изменения параметров магнитного поля поворотных магнитов были рассчитаны и изготовлены дополнительные обмотки магнитов M1 и M2, установка которых обеспечила возможность проведения длительных сеансов в энергетическом диапазоне ((20 – 75) МэВ). Юстировка тракта проводится с помощью лазерного луча. На рис. 7 показан один из поворотных магнитов параллельного переноса после умоншнения и монтажа на пучкопроводе ТПП.



Рис. 7. Поворотный магнит параллельного переноса с дополнительными обмотками

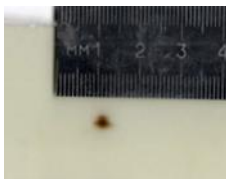


Рис. 8. Отпечаток пучка на стеклянной пластинке:  $E = 50 \text{ МэВ}$ ,  $I_{cp} = 18 \text{ нА}$ .



Рис. 9. Пучок 75 МэВ на люминофорном экране.

Осуществлена проводка пучков электронов от выхода ЛУЭ-75 до конца тракта параллельного переноса в интервале энергией 50 – 75 МэВ. Низкоинтенсивный пучок

после предварительной коллимации на выходе линейного ускорителя был проведен через магнитно–оптическую систему тракта переноса в район мишени и после настройки элементов магнитной оптики ТТП на стеклянной пластинке оставил отпечаток диаметром, не превышающим 4 мм (рис.8).

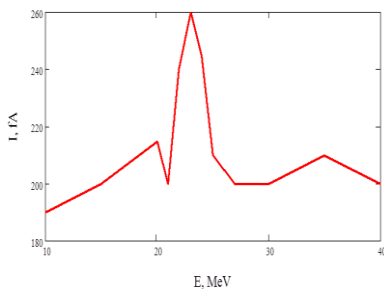
На рис. 9 приведено изображение пучка электронов с энергией 75 МэВ на люминоформном экране в конце тракта параллельного переноса в зоне тестирования кристаллов.

В результате выполненных работ третья ускорительная станция введена в эксплуатацию.

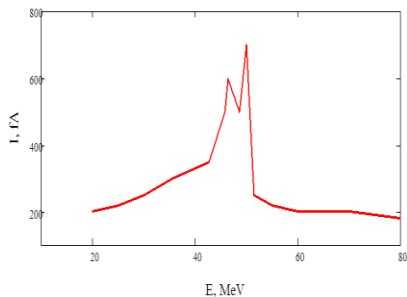
**Глава 3** посвящена работам по выявлению возможностей получения первичных электронных потоков предельно низкой интенсивности на базе ЛУЭ-75. Для создания таких пучков был решен ряд трудоемких задач, проведены тщательные, порою длительные и многократные, измерения.

Исследована помеховая обстановка на различных участках ускорительного тракта, измерен радиоактивный фон. После исследования внешних наводок, радиопомех и шумов при отсутствии пучка были приняты меры по уменьшению их влияния на измерительную аппаратуру.

Измерены темновые токи ускорителя в различных режимах. Темновые токи усложняют получение низкоинтенсивных пучков. Они создают проблемы для экспериментаторов. При получении пучков сверхмалых интенсивностей эти токи ограничивают интенсивность полезного пучка снизу. Поэтому выявление и устранение причин их возникновения является принципиальным.



*Рис. 10. Спектр темнового тока при работе только 1-го клистрона.*



*Рис. 11. Спектр темнового тока при включенных первых двух клистронах.*

Изучение влияния параметров режимов на уровень темновых токов показало, что с увеличением входных СВЧ мощностей ускорительных секций интенсивность темновых токов резко возрастает. Токи достигают 1 пА и выше. Наибольшее влияние на уровень темновых токов оказывала входная мощность инжекторной секции. На уровень темновых токов оказывал влияние и температурный режим секций: с увеличением температуры ток увеличивался. Улучшение вакуума приводило к уменьшению токов.

Получены спектры темновых токов (рис. 10, 11) в различных режимах.

Найдены режимы, при которых темновые токи не обнаруживались имеющейся в наличии измерительной аппаратурой — они были ниже уровня наводок и шумов.

Обсуждены причины появления темновых токов. Приведено объяснение влияния различных факторов на их уровень.

После выполнения этих работ была исследована потенциальная возможность собственно ускорителя, без тракта параллельного переноса: определен тот минимальный ток пучка за магнитным анализатором, который можно надежно измерить и использовать при существующих помехах и наводках. Нижний предел среднего тока за поворотным магнитом составил 300 фА. При измерениях шумы считались аддитивными, и «пьедестал», образованный ими, вычитывался из общего сигнала.

Результатом проведенных работ стало определение режимов клистронных генераторов и ускорителя в целом (температурный режим, вакуум, охлаждение, важен был режим инжекторной секции), при которых темновой ток минимизирован, а в конце тракта транспортировки практически не обнаруживался. Режимы соответствовали пониженным значениям СВЧ-мощностей, но достаточным для получения необходимых малых токов. Достаточными для ускорения являются значения амплитуд полей, удовлетворяющих условию Векслера для линейных ускорителей [15, 16]:

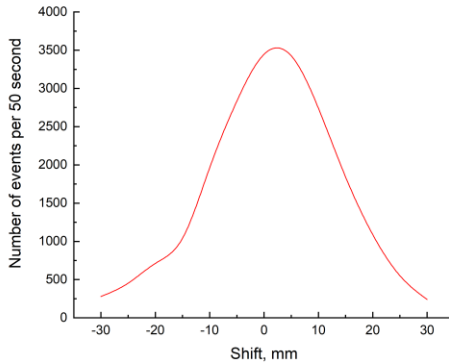
$$\left(\frac{W_c}{m_0 c^2}\right)^2 \left(\frac{p_c}{eE_0}\right) \left(\frac{dv_\phi}{dz}\right) < 1,$$

где  $z$  – продольная координата,  $v_\phi = v_\phi(z)$  – фазовая скорость ускоряющей волны вдоль  $z$ ,  $W_c$  – энергия равновесной (синхронной) частицы,  $E_0$  – амплитуда ускоряющей волны,  $p_c$  – импульс равновесной частицы. Уменьшение амплитуды ускоряющего поля  $E_0$  должно быть таким, чтобы это условие выполнялось, иначе ускорения синхронной и близких к ней по энергии частиц не произойдет [17]. Прежде всего, это касается инжекторной секции, представляющей собой волноводный группирователь, где происходит автофазировка.

Кратко представлены проведенные работы, связанные с защитой испытуемых образцов от вторичных излучений, отражений от железного корпуса синхротрона, магнитотормозного излучения поворотных магнитов параллельного переноса и др.

Отработана методика получения пучков предельно низкой интенсивности в зоне, где располагались тестируемые кристаллы. Приведены основные последовательные действия примененной методики работы с пучками предельно низкой интенсивности.

На рис. 12 показан профиль пучка 40 МэВ, измеренный в конце тракта транспортировки с использованием пальчикового (finger counter) пластикового счетчика; перемещение счетчика поперек пучка осуществлялось дискретно с шагом 5 мм с помощью дистанционно управляемого компьютером сканера; максимум интенсивности соответствует значению (60 – 70) е/с.



*Рис. 12. Горизонтальный профиль пучка экстремально низкой интенсивности со средней энергией 40 МэВ на выходе тракта в зоне тестирования кристаллов.*

Интенсивность потока устанавливалась с пульта управления ЛУЭ-75 по монитору компьютера до заданного среднего значения (10 – 20)  $e^-/с$ , выдаваемого регистрирующей аппаратурой, установленной в зоне тестирования кристаллов. Одним из критериев выбора интенсивности потока частиц является сведение к минимуму явления наложения сигналов (pile up). С увеличением числа частиц в единицу времени увеличивалось число многоэлектронных событий.

При получении и регулировке пучка применялась комбинация следующих способов уменьшения интенсивности: понижение температуры термокатода — при этом пушка оставалась в режиме объёмного заряда; коллимация пучка; регулировка интенсивности пучка изменением высокого напряжения на источнике электронов в небольших, заранее найденных пределах, при которых практически не обнаруживается изменение средней энергии потока из-за изменения начальной энергии влета электрона в инжекторную секцию; регулировка элементов, расположенных на неактивных участках ускорителя, где отсутствует ускоряющее поле и др.

На рис. 13 показана схема эксперимента по тестированию детекторов элементарных частиц. В 2015 – 2019 гг. на ЛУЭ-75 пучки предельно низкой интенсивности успешно применялись в качестве тестовых с числом одноэлектронных событий в импульсе более 70% для калибровки кристаллических сцинтилляционных детекторов элементарных частиц в рамках совместных работ ННЛА (Ереван) – ОИЯИ (Дубна). Тестирование прототипа электромагнитного калориметра в виде матрицы из девяти нелегированных кристаллов CsI для эксперимента Mu2e, готовящегося в Фермилабе (США), показало эффективность методики.

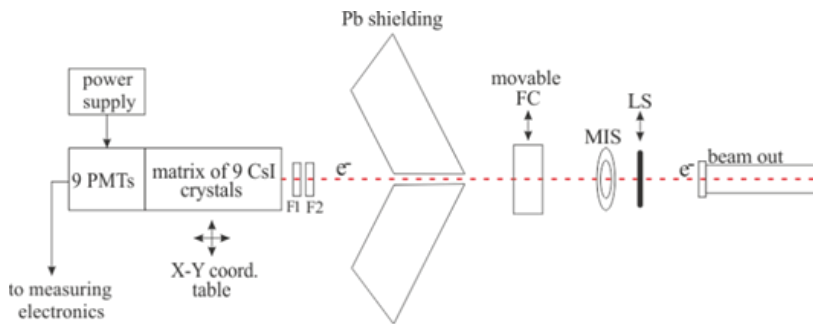


Рис. 13. Схема эксперимента в зоне калибровки кристаллов. MIS – магнитоиндукционный датчик; LS – люминофорный экран; F1, F2 – пластиковые сцинтилляционные счетчики пальчикового типа.

На рис. 14 представлена гистограмма распределения числа событий по каналам АЦП, где главный пик приходится на канал, соответствующий энергии частиц с одноэлектронными событиями, и небольшой горб справа показывает интенсивность двухчастичных событий.

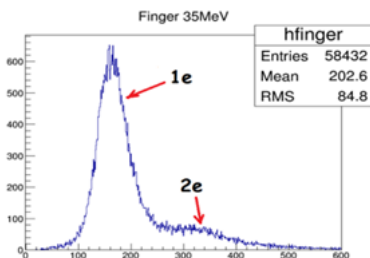


Рис. 14. Гистограмма распределения числа событий по каналам АЦП при энергии электронов 35 МэВ.

Исследовано влияние интенсивности потока частиц на число одноэлектронных событий. С увеличением интенсивности число многоэлектронных событий увеличивается. Для получения числа одноэлектронных данных не менее 70% от общего числа событий эксперименты проводились с регистрацией интенсивности на выходе измерительной аппаратуры со средним значением  $(10 - 20) e^-/c$ .

На рис.15 приведена блок-схема измерительной аппаратуры, применяемой на комплексе ЛУЭ-75. Координатный стол позволяет с высокой точностью сканировать детектор в поперечной плоскости посредством компьютера из комнаты экспериментаторов. Компьютерный контроль осуществляется из пультных комнат с помощью программы удаленного доступа к компьютеру, установленному непосредственно в зале облучения кристаллов.

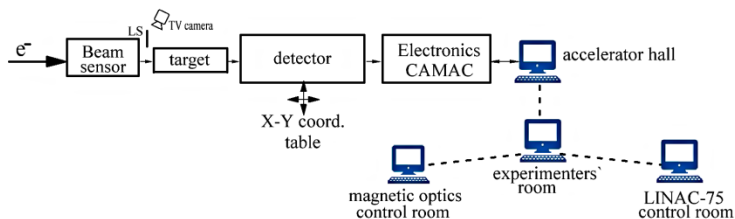


Рис. 15. Типовая блок-схема измерительной аппаратуры, используемой на линейном ускорительном комплексе ЛУЭ-75; LS – дистанционно-перемещаемый люминофорный экран, используемый при настройке магнитной оптики.

В 4-ой главе рассмотрены некоторые вопросы модернизации линейной ускорительной установки с внедрением современной техники: вакуумной, термостабилизирующей, силовой электроники и др.

Обоснована необходимость новой системы термостатирования ускорительных секций и клистронов, внедрения современной вакуумной системы, силовой электроники нового поколения, замены термокатода с кривизной эмиттирующей поверхности на плоский металлокерамический катод.

Предложены варианты модернизации системы автономного стабильного питания ЛУЭ-75.

Изучен опыт автоматизации других ускорителей. Начальным этапом автоматизации ускорителя является создание системы сбора данных — DAQ-системы.

Разработаны технические требования, служащие основанием для детального проектирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные результаты и выводы

1. Изучены статус линейного ускорительного комплекса ЛУЭ-75 ННЛА (ЕрФИ) и режимы его работы и проведен анализ возможностей и ограничений параметров.
2. Полностью восстановлена 3-я ускорительная станция линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75, которая была существенно демонтирована и не функционировала более 25 последних лет. Восстановлен режим 70 МэВ.

Впервые энергия ускорителя доведена до проектного значения 75 МэВ. Проведено испытание третьей ускорительной станции в режиме длительной непрерывной работы, после чего станция введена в эксплуатацию.

Впервые на этом ускорителе для режимов в диапазоне (25 – 50) МэВ была осуществлена дублируемость 2-ой и 3-ой ускорительных станций. Расчетным путем изучено влияние различных факторов на энергетический разброс пучка, результаты были учтены при вышеизложенных работах. Исследованы режимы ускорителя при различных энергиях. Модернизирована и испытана магнитная оптика тракта транспортировки и

параллельного переноса для работы при длительных сеансах в диапазоне энергий (20 – 75) МэВ, и осуществлена проводка пучков разных энергий и интенсивностей до конца тракта, в зону исследования детекторов элементарных частиц.

**3.** Впервые проведено измерение темновых токов линейного ускорителя ЛУЭ-75, получены их спектры. Отработаны режимы, при которых темновые токи наличной измерительной аппаратурой не обнаруживались — они были ниже уровня наводок и шумов. Приведено объяснение влияния различных факторов на уровень темновых токов.

**4.** На линейном ускорителе за поворотным магнитом анализатора впервые получен низкоинтенсивный управляемый пучок электронов в субпикоамперном диапазоне со средним током 300 фА. Выявлена потенциальная возможность ЛУЭ-75: определен тот минимальный ток, который можно получить на фоне имеющихся помех в первой экспериментальной зоне (за магнитным анализатором) с учетом минимизации темновых токов.

**5.** Впервые в ННЛА (ЕрФИ) решена задача формирования управляемых первичных пучков сверхнизкой интенсивности. Разработана методика получения таких пучков. На основе сформированных пучков сверхнизкой интенсивности проведены эксперименты с регистрацией интенсивности со средним значением (10 – 20)  $e^-/с$  на выходе измерительной аппаратуры, установленной в зоне тестирования детекторов.

**6.** На основе пучков предельно низкой интенсивности разработана методика тестирования сцинтилляционных детекторов элементарных частиц. На базе линейного ускорительного комплекса ЛУЭ-75 создан стенд для калибровки детекторов элементарных частиц. Совместные работы ННЛА (ЕрФИ) — ОИЯИ (Дубна, РФ) показали работоспособность стенда.

**7.** Автор считает наиболее целесообразной поэтапную модернизацию жизненно важных систем обеспечения линейного ускорительного комплекса, включающего также тракт транспортировки и параллельного переноса пучка, путем внедрения современной техники, компьютеризации, создания системы сбора данных как необходимого этапа для автоматизации.

Благодаря проведенным работам линейный ускоритель и пучкопровод тракта транспортировки с магнитной оптикой параллельного переноса безотказно служат для экспериментальных работ.

Проведенные работы расширили возможности линейного ускорительного комплекса ЛУЭ-75 и повысили его востребованность.

## ПУБЛИКАЦИИ

- A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan and A. Papyan, *J. Contemp. Phys.*, 2018, vol. 53, p. 271.
- 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. *J. Contemp. Phys.*, 2019, vol. 54, p. 225.
- A.S. Hakobyan. *J. Contemp. Phys.*, 2021, vol. 56, p. 169.
- A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, H.H. Hakobyan, A.Z. Babayan, L.R. Vahradyan, V. Baranov, Yu.I. Davydov, A. Krasnoperov, A. Simonenko, V. Tereshchenko, H.T. Torosyan, H.G. Zohrabyan, G.M. Ayvazyan, H.S. Vardanyan & A.K. Papyan, *J. Contemp. Phys.*, 2022, vol. 57, p. 12.
- A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, I.A. Kerobyan, H.R. Gulkanyan, L.A. Poghosyan, V.S. Pogosov, H.T. Torosyan, A.Z. Babayan, L.R. Vahradyan, A.R. Balabekyan, G.H. Hovhannisyan, R.K. Dallakyan, and K. Katovsky. *J. Contemp. Phys.* 2022, vol. 57, p. 209.
- A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, G.G. Gulbekyan, H.T. Torosyan, A.Z. Babayan, and L.R. Vahradyan, *J. Contemp. Phys.* 2022, vol. 57, p. 317.
- A.S. Hakobyan, A.Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan. *J. Contemp. Phys.* 2020, vol. 55, p. 111.
- A.R. Balabekyan, N.A. Demekhina, E. Melyan, S. Faltajanyan, A. Aleksanyan, S. Amirkhanyan, H. Gulkanyan, T. Kotanjyan, A.S. Hakobyan, *J. Contemp. Phys.*, 2020, vol. 55, p. 1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Alikhanian, G.V. Badalian, A.I. Barishev, E.V. Grigorian, A.A. Egiazarian, S.K. Yesin, I.P. Karabekov, E.M. Laziev, Yu.F. Orlov, et al., Status Report of the Yerevan Electron Synchrotron, Proceedings, 6th International Conference on High-Energy Accelerators, HEACC 1967: Cambridge, Massachusetts, 1967, September 11–15, p. 401.
2. A.Ts. Amatuni, A.S. Alexanyan, R.O. Avakyan, et al., The Prospects of Improvement and Development of Accelerator at Yerevan Physics Institute, EPAC 71, 1988, p. 305.
3. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, G.G. Gulbekyan, H.T. Torosyan, A.Z. Babayan, and L.R. Vahradyan, *J. Contemp. Phys.* 2022, vol. 57, p. 317.
4. A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan and A. Papyan, *J. Contemp. Phys.*, 2018, vol. 53, p. 271.
5. A. S. Hakobyan, H. H. Marukyan, H. H. Hakobyan, A. Z. Babayan, L. R. Vahradyan, V. Baranov, Yu. I. Davydov, A. Krasnoperov, A. Simonenko, V. Tereshchenko, H. T. Torosyan, H. G. Zohrabyan, G. M. Ayvazyan, H. S. Vardanyan & A. K. Papyan, *J. Contemp. Phys.* 2022, vol. 57, p. 12.
6. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, I.A. Kerobyan, H.R. Gulkanyan, L.A. Poghosyan, V.S. Pogosov, H.T. Torosyan, A.Z. Babayan, L.R. Vahradyan, A.R. Balabekyan, G.H.



- Hovhannisyanyan, R.K. Dallakyan, and K. Katovsky. *J. Contemp. Phys.* 2022, vol. 57, p. 209.
7. A.S. Hakobyan, A.Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan. *J. Contemp. Phys.* 2020, vol. 55, p. 111.
  8. A.R. Balabekyan, N.A. Demekhina, E. Melyan, S. Faltajanyan, A. Aleksanyan, S. Amirkhanyan, H. Gulkanyan, T. Kotanjyan, A.S. Hakobyan, *J. Contemp. Phys.*, 2020, vol. 55, p. 1.
  9. Ryoichi Taniguchi, et al., Nuclear reaction analysis by using quasi-elastic scattering of ultra low intensity electron beams. *Proceedings of LINAC08*, Victoria, BC, Canada.TUP064.
  10. A. Artikov, ..., A. Hakobyan, et al, «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>.
  11. Г.Г. Оксюзян, Э.М. Лазиев, В.Л. Серов и др., *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра, ХФТИ АН УССР*, 1973, 4(6), стр. 67.
  12. А.М. Sirunyan, A.S. Hakobyan, A.Z. Babayan, Н.Н. 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. *J. Contemp. Phys.*, 2019, vol. 54, p. 225.
  13. A.S. Hakobyan. *J. Contemp. Phys.*, 2021, vol. 56, p. 169.
  14. R.O. Avakian, et al., *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 2010, vol. 45, p. 47.
  15. В.И. Векслер, Новый метод ускорения релятивистских частиц, *Докл. Академии наук СССР*, т. XLIII, 1944, № 8, стр. 346–348.
  16. E.M. McMillan, *The Synchrotron – A Proposed High Energy Particle Accelerator*, *Phys. Rev.* 1945, 68, 143. Reprinted in *The Physical Review – the First Hundred Years*, AIP Press CD-ROM1995.
  17. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов, *Основы физики и техники ускорителей*, 1991, стр. 528.

## Հակոբյան Աշոտ Սահակի

### **ԱԱԳԱ-ի էլեկտրոնային գծային արագացուցչի 75 ՄԷՎ էներգետիկ ռեժիմի և ցածր ինտենսիվության ռեժիմների ստացման ուսումնասիրությունները**

#### **Ամփոփագիր**

1. Ուսումնասիրվել է ԱԱԳԱ-ի ԼՈՒԷ-75 գծային արագացուցչային համալիրի կարգավիճակը և նրա աշխատանքային ռեժիմները, կատարվել է պարամետրերի հնարավորությունների և սահմանափակումների վերլուծությունը:

2. Ամբողջությամբ վերականգնվել է 3-րդ արագացուցչային կայանքը, որը էապես ապամոնտաժվել և չէր գործել ավելի քան 25 տարի: Վերականգնվել է 70 ՄԷՎ ռեժիմը:

Առաջին անգամ այդ գծային արագացուցչի էներգիան հասցվել է 75 ՄԷՎ նախագծային արժեքի: Երրորդ արագացուցչային կայանքը փորձարկվել է երկարաժամկետ անընդհատ աշխատանքային ռեժիմում, որից հետո շահագործման է հանձնվել:

Առաջին անգամ (25 – 50) ՄԷՎ էներգիաների տիրույթի ռեժիմների համար իրականացվել է 2-րդ և 3-րդ արագացուցչային կայանքների միմյանց փոխարինումը: Ուսումնասիրվել է տարբեր գործոնների ազդեցությունը փնջի էներգիայի ցրվածության վրա, արդյունքները հաշվի են առնվել վերը նշված աշխատանքներում: Հետազոտվել են արագացուցչի շահագործման ռեժիմները տարբեր էներգիաների համար:

Արդիականացվել է զուգահեռ փոխադրման համակարգի մագնիսական օպտիկան երկարատև սեանսների համար (20 – 75) ՄԷՎ էներգիայի տիրույթում: Իրականացվել է տարբեր էներգիաներով և ինտենսիվություններով օժտված փնջերի տեղափոխումը մինչև փոխադրման գոտու վերջ՝ տարրական մասնիկների դետեկտորների տրամաչափման գոտի:

3. Առաջին անգամ իրականացվել է ԼՈՒԷ-75 էլեկտրոնային գծային արագացուցչային համալիրի մութ հոսանքների ուսումնասիրությունը: Ստացվել են մութ հոսանքների սպեկտրները: Հետազոտության արդյունքում հայտնաբերվել են գծային արագացուցչի այնպիսի ռեժիմներ, որոնց դեպքում մութ հոսանքները չեն դիտվել չափիչ սարքավորումներով՝ դետեկտորների տրամաչափման հատվածում: Նշվել են մութ հոսանքների առաջացման պատճառները, բացատրվել է տարբեր գործոնների ազդեցությունը մութ հոսանքների մակարդակի վրա:

4. ԱԱԳԱ-ի արագացուցչիում մագնիսական վերլուծիչից հետո առաջին անգամ ստացվել են ցածր ինտենսիվությամբ կառավարվող էլեկտրոնային փնջեր ենթապիկոնամպերային միջակայքում՝ 300 ֆԱ միջին հոսանքով: Գտնվել է ԼՈՒԷ-75-ի պոտենցիալ հնարավորությունը՝ որոշվել է նվազագույն հոսանքի արժեքը, որը կարելի է ստանալ առկա խափանումների ֆոնի վրա առաջին փորձարարական գոտում (մագնիսական վերլուծիչից հետո)՝ հաշվի առնելով մութ հոսանքները:

5. ԱԱԳԱ-ում առաջին անգամ լուծվել է գերցածր ինտենսիվությամբ կառավարվող փնջերի ստեղծման խնդիրը: Մշակվել է առաջնային էլեկտրոնային ծայրահեղ ցածր ինտենսիվությամբ փնջերի ստացման մեթոդիկա դետեկտորների փորձարկման գոտում: Ձևավորված այդ փնջերի հիման վրա իրականացվել է (10 – 20) e<sup>-</sup>/վ միջին արժեքով

ինտենսիվությունների գրանցում դետեկտորների թեստավորման գոտում տեղադրված չափիչ սարքավորումների էլքում:

6. Ստեղծված չափազանց ցածր ինտենսիվությամբ փնջերի հիման վրա մշակվել է տարրական մասնիկների սցինտիլյացիոն դետեկտորների տրամաչափման մեթոդիկա: ԼՈՒԷ-75 էլեկտրոնային գծային արագացուցչային համալիրի հիման վրա ստեղծվել է դետեկտորների տրամաչափման ստենդ: ԱԱԳԼ (ԵրՖԻ) – JINR (Դուբնա, ՌԴ) համատեղ աշխատանքը ցուցադրեց ստենդի և մեթոդիկայի գործունակությունը:

7. Հիմնավորվել է գծային արագացուցչային համալիրի կարևոր հանգույցների փուլային արդիականացման նպատակահարմարությունը, ժամանակակից տեխնոլոգիաների ներդրման, համակարգչայնացման, տվյալների հավաքագրման համակարգի ստեղծման միջոցով որպես ավտոմատացման համար անհրաժեշտ սկզբնական փուլ:

Կատարված աշխատանքների շնորհիվ էլեկտրոնային գծային արագացուցչային համալիրը ներկայումս անխափան ծառայում է հիմնարար և կիրառական միջուկային ֆիզիկայի բնագավառի գիտափորձերի իրականացման համար:

Կատարված աշխատանքները ընդլայնել են ԼՈՒԷ-75 գծային արագացուցչային համալիրի հնարավորությունները և մեծացրել նրա պահանջարկը:

## Ashot Sahak Hakobyan

### Studies on obtaining the regimes with energies up to 75-MeV and low intensity regimes of the AANL electron linear accelerator

#### Summary

1. The status of the electron linear accelerator complex LUE-75 of the AANL (YerPhI) and its operating modes were studied, and an analysis of the possibilities and limitations of the parameters was carried out.

2. The 3rd accelerator station of the LUE-75 was completely restored, which was substantially dismantled and did not function for more than 25 last years. The 70-MeV mode has been restored.

For the first time, the energy of the accelerator has been brought up to the design value of 75 MeV. The third accelerator station was tested in the long-term continuous operation mode, after which the station was put into operation.

For the first time at this accelerator, duplication of the 2nd and 3rd accelerator stations was implemented for regimes in the energy range (25 – 50) MeV. The influence of various factors on the energy spread of the beam was studied by calculation, the results were taken into account in the above works. The accelerator regimes are investigated at various energies. The magnetic optics for the parallel transfer of the beam have been modernized for the accelerator operation during long sessions in the energy range (20 - 75) MeV, and the beams with different energies and intensities

been transported to the end of the path, into the zone of study of elementary particle detectors.

3. For the first time, dark currents of the LUE-75 linear accelerator have been studied. Dark current spectra were obtained. As a result of these research, regimes were found in which no dark currents were detected at the end of the parallel transfer path — in the zone of calibration work — by available measuring equipment, and they were below the level of interference and noise. The reasons for the appearance of dark currents are given, an explanation is given for the influence of various factors on the level of dark currents.

4. A low-intensity controlled electron beam in the subpicoampere range with an average current of 300 fA was obtained for the first time at the linear accelerator behind the analyzing magnet. The minimum current is determined that can be obtained at the experimental point behind the magnetic analyzer against the existing background, provided that dark currents are minimized:

5. For the first time in the AANL, the problem of creating primary ultra-low intensity controlled beams has been solved. A technique for obtaining such beams has been developed. On the basis of the beams formed, experiments were carried out with registration of intensity with an average value of (10 – 20) e<sup>-</sup>/s at the output of the measuring equipment installed in the detector testing zone.

6. Based on the extremely low intensity beams created, a method for testing scintillation detectors of elementary particles has been developed. A stand for calibration of detectors has been created on the basis of the LUE-75 linear accelerator complex. The joint work of the AANL (YerPhI) - JINR (Dubna) showed the performance of the stand.

7. The author considers the most appropriate step-by-step modernization of the vital support systems of the linear accelerator complex, which also includes a path for transporting and parallel beam transfer, through the introduction of modern technology, computerization, and the creation of a data acquisition system as a necessary stage for automation.

Thanks to the work carried out, the linear accelerator and the beamline of the transport path with parallel transfer magnetic optics are currently used without failure for experimental work.

The work carried out expanded the capabilities of the electron linear accelerator complex LUE-75 and increased its demand.