

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

Վահրապյան Լուսինե Ռուդոլֆի

ԱԱԳԼ-ի 75 ՄԷՎ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ԳԾԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՅՈՒՑՉԻ ՈՐՈՇ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ԵՎ ԱՐԴԻԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԸ

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

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

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

Ваградян Лусине Рудольфовна

ИЗУЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 75 МЭВ ННЛА И ВОПРОСЫ МОДЕРНИЗАЦИИ

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН – 2026

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

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր

Մարուքյան Հրաչյա Հովհաննեսի (ԱԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր

Հարությունյան Սուրեն Գուրգենի (ԱԱԳԼ)

Տեխ. գիտ. թեկնածու

Շահինյան Ալբերտ Հայրապետի (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի պետական համալսարան (ԵՊՀ)

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026 թ. մարտի 10-ին ժամը 14:00-ին, ԱԱԳԼ-ում գործող ԲԿԳԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026 թ. փետրվարի 4-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական

քարտուղար՝ Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր



Հրաչյա Մարուքյան

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

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

Марукян Грачья Оганесович (ННЛИА)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук

Арутюнян Сурен Гургенович (ННЛИА)

канд. техн. наук

Шагинян Альберт Айрапетович (ННЛИА)

Ведущая организация:

Ереванский государственный университет (ЕГУ)

Защита диссертации состоится 10 марта 2026 г. в 14:00 на заседании действующего в ННЛИА специализированного совета КВОН 024 по «Физике» (Ереван, 0036, ул. братьев Алиханян 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ННЛИА.

Автореферат разослан 4 февраля 2026 г.

Ученый секретарь специализированного

совета: доктор физ.-мат. наук



Марукян Грачья

Общая характеристика работы

Цель и актуальность работы

Все более расширяется круг задач, которые решаются с помощью ускорителей заряженных частиц: в науке (научные ускорители) для исследований в области ядерной физики и физики элементарных частиц, в промышленности (технологические ускорители), в медицине для получения тераностических изотопов и лечения, для стерилизации медицинского инвентаря (медицинские ускорители), в биологии для исследования влияния излучений на биологические объекты, в сельском хозяйстве для исследования влияния малых доз облучения семян на урожайность. Кроме указанных областей, ускорители успешно используются в системах безопасности в инспекционном качестве на таможенных контролях, для экологических задач с целью выявления вредных для здоровья составляющих промышленных отходов. Научные ускорители по разным данным составляют от 3 до 5% от всего количества действующих в мире ускорителей (это примерно 40 000).

Синхротрон АРУС, построенный в 60-ых годах по инициативе и под руководством выдающегося ученого Артема Исааковича Алиханяна на энергию 6.1 ГэВ был в свое время самым большим электронным синхротроном Советского Союза и одним из крупнейших в мире. На нем была реализована масштабная исследовательская программа, научные результаты которой получили широкое признание [1 – 3].

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна служил инжектором синхротрона АРУС [4], а после его остановки продолжает работать в автономном режиме и обеспечивает электронными пучками и вторичными излучениями для проведения экспериментов в области задач фундаментальной и прикладной ядерной физики низких энергий.

На основе электронных пучков линейного ускорителя на 75 МэВ проводятся эксперименты, которые отражаются в высокорейтинговых журналах и находят признание в международной научной среде.

Актуальность работы заключается в том, что всё возрастающее требование к качеству проводимых опытов, а также повышение востребованности ускорителя в последние годы, повышают требования и к параметрам самого электронного пучка, точности требуемой энергии пучка при проведении прецизионных экспериментов и др. Целью настоящей диссертации является:

- а) повышения информативности об электронном пучке путем изучения его характеристик; создание новых режимов ускорителя;
- б) повышение надежности и безопасности проводимых пучковых сеансов, сокращение времязатратности получения требуемых экспериментом режимов.

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

Впервые были рассчитаны потери энергии электронов в выходных окнах рассматриваемой ускорительной станции в зависимости от материала окна, его толщины и расстояния до мишени в воздухе; расчетным и экспериментальным путем исследована зависимость расходимости электронного пучка от параметров выходных окон и расстояния до мишени. Были измерены интегральные профили пучка для различных энергий ускоренных частиц.

Впервые были проведены комплексные измерения магнитного поля анализирующего магнита. Были измерены остаточные и рассеянные поля, а также изучена однородность магнитного поля вдоль траектории пучка в зазоре магнита. Была проведена калибровка анализирующего магнита и сравнение вновь полученных, скорректированных результатов калибровки с предыдущими результатами, чтобы убедиться в высокой воспроизводимости калибровочной кривой магнитного анализатора.

Впервые была изучена зависимость изменения энергии ускоренных электронов от температурной стабильности ускоряющих секций. Полученные результаты служат основой для обоснования требований как к существующей, так и к планируемой модернизированной системе термостабилизации.

Была проведена оптимизация вакуумной системы с целью улучшения вакуума в системе параллельной транспортировки электронного пучка и сокращения времени получения необходимого вакуума. Впервые благодаря этим работам на линейном электронном ускорителе ЛУЭ-75 был получен электронный пучок с энергией 76,5 МэВ.

После уموощнения поворотных магнитов и транспортировки пучков низкой и сверхнизкой интенсивности с энергией, увеличенной с 50 до 75 МэВ, впервые были изучены и разработаны режимы работы ускорителя, включая оптику параллельной транспортировки.

Впервые были использованы дистанционное управление мишенью в горизонтальной плоскости и визуализация пучка в экспериментальных зонах, что позволяет осуществлять оперативное управление пучком и положением мишени.

Практическая значимость работы

Изученные вопросы востребованы опытом совместной работы с физиками-экспериментаторами – потребителями электронных пучков ускорителя ЛУЭ-75. Для повышения качества проводимых опытов экспериментаторам нужна более полная информация о параметрах электронного пучка. Рассмотренные в диссертации параметры пучка – расходимость, профиль, энергетические потери при прохождении электронного пучка через выводные устройства в атмосферу – ранее не исследовались, имеют важное значение при работе с пучком, поэтому они востребованы экспериментаторами.

Проведенные работы по изменению конфигурации вакуумного тракта позволили повысить вакуум в 6 – 8 раз в пучкопроводе параллельного переноса, что позволило без риска СВЧ-пробоев повысить энергию пучка на 1.5 МэВ, доведя до 76.5 МэВ. Увеличение энергии электронов открывает возможность изучения фотоядерных процессов при реакциях, имеющих более высокий энергетический порог.

Рассчитанная зависимость изменения энергии ускоренных электронов от стабильности температуры ускоряющих секций служит основой для обоснования требований как к действующей в настоящее время, так и к планируемой при модернизации системе термостатирования.

Измерения, проведенные на магнитном анализаторе, и его калибровка имеют важное значение при решении прикладных задач в экспериментах в области ядерной физики.

Работы, выносимые на защиту

- ✓ Определение энергетических потерь ускоренных электронов в выводных устройствах ускорителя.
- ✓ Расчет и измерение экспериментальным путем расходимостей и измерение интегральных профилей пучка.
- ✓ Определение зависимости стабильности энергии ускоренных электронов от стабильности температуры ускоряющих секций.
- ✓ Улучшение вакуума в тракте параллельного переноса электронного пучка, упрочнение магнитов параллельного переноса; изучение режимов магнитной оптики в диапазоне 50 – 75 МэВ для получения и проводки пучков низкой и сверхнизкой интенсивностей в зону тестирования разного типа детекторов, в частности, кристаллов, измерения полей магнитного анализатора; проверочно-калибровочные работы и уточнение калибровочной кривой, увеличение энергии электронов на 1.5 МэВ, в результате чего кинетическая энергия электронов доведена до 76.5 МэВ.

Апробация работы и публикации

Кроме семинаров, проведенных в ННЛИА, результаты диссертационной работы в основном опубликованы в семи статьях в журнале Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 114 страниц, включая 43 рисунка и 21 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 89 наименований.

Краткое содержание работы

Во **Введении** раскрываются цель и актуальность темы исследования, отмечается практическая значимость работы, ее научная новизна, личный вклад автора; приводятся положения, выносимые на защиту и апробация результатов.

В **главе 1** кратко описан линейный ускорительный комплекс на энергию 75 МэВ, состоящий из линейного ускорителя электронов и тракта параллельной транспортировки пучка (рис. 1). Описаны источник электронов с модулятором электронной пушки,

генераторы и их модуляторы, расположение экспериментальных зон линейного комплекса. Приведены характеристики анализирующего магнита, системы автономной 0.1%-ой стабильной трехфазной электрической сети, питающей ускорительный комплекс.

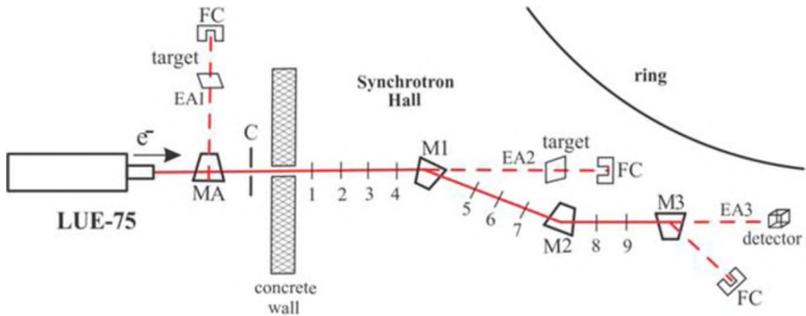


Рис. 1. Экспериментальные зоны EA1 - EA3 с выводными окнами на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-75. MA – дипольный анализирующий магнит; FC – цилиндр Фарадея; C – коллиматор; M1 и M2 – поворотные магниты параллельного переноса; M3 – магнит beat dump для получения фотонных пучков; 1 – 9 – квадрупольные линзы. Для простоты схемы корректирующие катушки и элементы вакуумной техники не показаны.

Приведены основные параметры электронных пучков и СВЧ-генерирующих установок. Указаны особенности ускорителя, а именно, его многофункциональность, адаптируемость к проведению различных экспериментов, широкий энергетический диапазон и диапазон интенсивностей пучка. Описана роль тракта параллельного переноса пучка, позволяющего проводить прецизионные эксперименты вдали от помех и шумов, производимых электро- и радиотехническими системами ускорителя. Для обоснования важности поставленной задачи и востребованности ускорителя, вначале кратко перечислены некоторые значимые работы, выполненные за последние годы на линейном ускорителе ЛУЭ-75, далее сжато описаны работы, выполняемые в настоящее время, а также запланированные работы.

Кратко описаны работы, связанные с повышением энергии пучка от 50-ти до 75 МэВ [5] после упрочнения поворотных магнитов тракта параллельного переноса (рис. 2). Методика получения сверхнизкоинтенсивных пучков до 50 МэВ была успешно применена и для повышенного энергетического диапазона 50 – 75 МэВ — были отработаны режимы не только собственно линейного ускорителя, но и элементов магнитной оптики тракта параллельного переноса: упрочненных поворотных магнитов, квадрупольных линз и корректоров. Полученные режимы, сохраненные в виде файлов, обеспечивают оперативное выставление нужных значений магнитной оптики, сокращение времязатратности при настройке ускорительного комплекса.

Приведены выполненные измерения и оценка требуемых числовых характеристик вакуумной системы линейного ускорителя ЛУЭ-75. Рассмотрены некоторые реализованные работы по улучшению и оптимизации вакуумной системы: приведение ее в соответствие с форматом работы линейного ускорительного комплекса в

автономном режиме – в условиях остановки работы синхротронного кольца; достигнуто улучшение вакуума в 6 – 8 раз в тракте переноса пучка, достигнув давления остаточных газов, примерно равного давлению в ускоряющих секциях (10^{-6} Торр) собственно ускорителя; в результате стало возможным повысить энергию на 1.5 МэВ, тем самым довести максимальную энергию до 76.5 МэВ без риска СВЧ-пробоев; сокращено время получения рабочего вакуума, что привело к экономии потребляемой электроэнергии, упрощению эксплуатации и др. Увеличение энергии ускоренных электронов позволяет проводить эксперименты по исследованию фотоядерных реакций, имеющих более высокий энергетический порог.



Рис. 2. Поворотный магнит тракта параллельной транспортировки пучка, расположенный в зале синхротрона, с дополнительными обмотками.

Описаны работы по улучшению процесса настройки пучка и его использования, создана возможность дистанционного перемещения мишени и визуального контроля изображения и формы пучка на сцинтилляционном экране – в режиме онлайн обеспечивается компьютерный мониторинг (рис.3). В результате сравнения характеристик различных сцинтилляционных материалов обоснован выбор порошка сернистого цинка, легированного серебром $ZnS:Ag$ в качестве люминофора экранов-флажков на выходах экспериментальных участков.



Рис.3. Промежуточный дистанционно управляемый люминофорный экран в зоне ЕА3.

Приведены характеристики используемой на ускорителе силовой электроники, проведено сравнение с современными аналогами, сделаны рекомендации по модернизации мощных модуляторов и подмодуляторов.

Глава 2 посвящена оценке потерь энергии пучка в выпускных окнах при энергиях до 75 МэВ, характерных для линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 [6]. Описываются экспериментальные участки, где находятся исследуемые вакуумные окна (рис.1).

Расчеты велись с использованием формул Бете-Блоха, Бете-Гайтлера [7 – 10], данных, приведенных в работах ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) основанных на первоисточниках [11, 12], а также программы eSTAR. Рассчитаны отдельно ионизационные, радиационные и суммарные потери в используемых фольгах из нержавеющей стали. Ионизационные потери рассчитаны с учетом поправки на эффект плотности Ферми [13]. Суммарные потери, рассчитанные по программе eSTAR и по методике, рекомендованной ICRU, отличаются незначительно, как видно из рис. 4а. Для нержавеющей стали, представляющей собой сложное вещество, использовалось правило Брегга. Получены графики зависимостей линейных энергетических потерь электронов от их кинетической энергии для нержавеющей стали и железа. Сравнение показывает, что потери в железе и нержавеющей стали отличаются незначительно (рис. 4а).

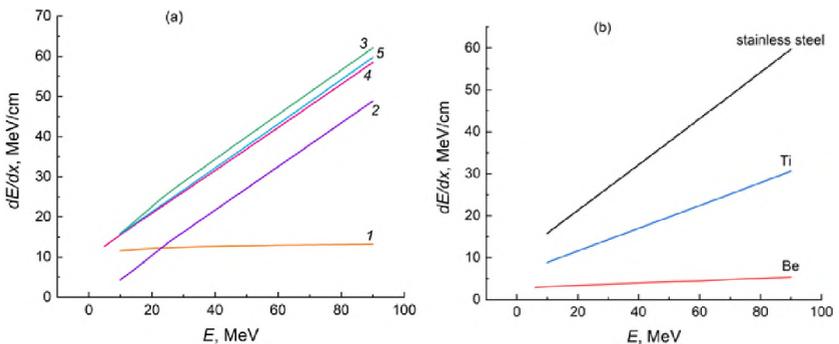


Рис.4. Линейные энергетические потери электрона:(а) кривые потерь в нержавеющей стали: 1– ионизационные потери, 2 – радиационные потери, 3 – рассчитанные по формулам суммарные потери, 4 – суммарные потери согласно программе eSTAR, 5 – суммарные потери в железе по eSTAR; (б) кривые потерь в различных металлах.

Полученные графики потерь энергии электронов при прохождении различных материалов (рис. 4б) показывает преимущество титановых и бериллиевых по сравнению со стальными, рекомендуется замена используемых в настоящее время стальных фольг на бериллиевые.

Рассчитаны зависимости суммарных потерь в фольгах и в воздухе для различных расстояний до мишени от кинетических энергий, характерных для рассматриваемого ускорителя. При расчетах использовалась также программа eSTAR.

Расчеты потерь энергий электронов выполнены также для каптоновой пленки, представляющей собой полиимидный полимер $(C_{22}H_{10}N_2O_5)_n$ толщиной 70 мкм, используемой в выводном окне в зоне ЕА3 (рис.1) тестирования кристаллических детекторов. Расчетные данные зависимости суммарных потерь энергии электрона в пленке из каптона и в воздухе при различных толщинах и фиксированном расстоянии 130 см до испускаемых кристаллов от различных кинетических энергий сведены в таблицу 1.

Потери в воздухе на таком расстоянии, необходимом для размещения свинцовой защиты и устройств, необходимых при измерениях, значительно увеличивают суммарные энергетические потери, существенно превосходя потери в самом каптоне.

Рассмотрены вопросы тепловыделения в фольгах, радиационной стойкости и герметичности разделительных вакуумно-плотных окон. Показано, что при режимах низкой и сверхнизкой интенсивностей, характерных для участка ЕА3, где используется каптоновое окно, поглощенная пленкой доза за всё предыдущее время ее эксплуатации намного меньше 10^7 Гр, что позволяет длительное её использование без замены.

Для одних экспериментов приведенными выше потерями можно пренебречь, для других, например, при энергетической калибровке кристаллических детекторов и других прецизионных экспериментах, их необходимо учитывать. К примеру, приведенные данные потерь из-за наличия разделительного окна и воздушного слоя между окном и кристаллами учитывались при тестировании кристаллов в совместных экспериментах ННЛА – ОИЯИ (Дубна) [14].

Таблица 1. Зависимость суммарных потерь энергии электрона в МэВ от его кинетической энергии, толщины каптона по программе eSTAR и пройденного расстояния в воздухе 1.3 м.

Толщина, мкм	E, МэВ			
	10	25	50	75
35	0.347	0.434	0.553	0.663
50	0.351	0.439	0.559	0.67
70	0.356	0.445	0.567	0.68
100	0.365	0.456	0.58	0.696

Рассчитаны пробеги электронов в материалах, применяемых на ускорителе в коллиматорах, цилиндрах Фарадея, разделительных вакуум – атмосфера устройствах, поглотителях электронов, используемых в (γ, n) реакциях.

Глава 3 посвящена вопросам расходимости и профиля пучка [15]. Рассмотрены также измерения, проведенные на анализирующем электромагните. Рассчитаны требования к системе термостатирования и охлаждения с точки зрения обеспечения энергетической стабильности пучка [16].

Расходимость и профиль пучка важно знать, чтоб иметь информацию о распределении электронов в поперечной плоскости пучка в месте установления изучаемого объекта. Такие данные важны в работах по энергетической калибровке детекторов элементарных частиц на пучках сверхнизкой интенсивности, исследованию излучения каналированных электронов в кристаллах [17, 18] и т. д.

При измерениях угловых расходимостей и профиля электронного пучка использовался дистанционно управляемый сканер. Установка сканера и сетевых камер обеспечивает визуальный компьютерный мониторинг и точное расположение облучаемого образца. При обработке изображений пучка использовалась программа ImageJ.

Расходимость пучка важно знать для оценки эффективности воздействия пучка на облучаемый образец, правильного выбора места его расположения под пучком и, в случае необходимости, применить коллимацию. На линейном ускорителе электронов ЛУЭ-75 в выводных окнах трех экспериментальных зон используются стальные фольги и каптоновая пленка.

Рассчитана зависимость среднего угла многократного кулоновского рассеяния электронов при прохождении через стальную фольгу толщиной 50 мкм от кинетических энергий, характерных для ЛУЭ-75 [15], с учетом эффектов экранирования: степень экранирования ядра электронами атома с приближением налетающего электрона к ядру уменьшается и, наоборот, на расстояниях, больших радиуса атома вещества, экранирование ядра считается полным [7, 8].

Расчет проведен также для каптоновой пленки толщиной 70 мкм [15, 19, 20]. Сравнение полученных данных показывает, что в результате многократного рассеяния, в зависимости от энергии падающей частицы, каптон вносит примерно в три-пять раз меньшее расхождение пучка по сравнению со сталью. Объясняется это низкой плотностью каптона и структурным различием этих веществ. Хотя каптон и вносит малое расхождение, при большой интенсивности электронного пучка и высокой поглощенной дозе металлические вакуумные окна надежнее [6, 19, 20]. Приведенные кривые показывают, что с увеличением энергии электронов расходимость пучка уменьшается: объясняется это тем, что ускоряется продольная составляющая скорости при практически неизменной поперечной.

Большинство экспериментов на линейном ускорителе электронов на энергию 75 МэВ проводятся вне вакуумного объема – в воздухе после вакуумно-плотного окна, когда нет возможности поместить мишень в вакуумную камеру. Поэтому следует учитывать также расходимость в воздушном промежутке между окном и мишенью. Расходимости электронов в средах носят статистический характер, поэтому результирующая расходимость определяется суммой квадратов средних углов рассеяния в фольге и в воздухе – рассеяния в них представляют собой независимые случайные процессы.

Таблица 2 отображает зависимость суммарного среднего угла рассеяния электронов от первоначального направления в зависимости от расстояния до расположенной в воздухе мишени в зоне EA1, где проводится большинство экспериментов.

Таблица 2. Суммарный средний угол отклонения электронов при прохождении стальной фольги толщиной 50 мкм и разных, типовых для этого участка, расстояний до мишени в воздухе в мрад (в скобках – в градусах) в зависимости от кинетической энергии.

Расстояние, см	<i>E</i> , МэВ							
	10	15	20	30	40	50	60	80
1	92.47 (5.3)	64.62 (3.7)	49.81 (2.85)	34.42 (1.97)	26.45 (1.52)	21.2 (1.21)	17.73 (1.06)	13.32 (0.76)
5	94.4 (5.4)	65.95 (3.77)	50.84 (2.91)	35.13 (2.01)	27 (1.55)	21.65 (1.24)	18.11 (1.04)	13.61 (0.78)
10	96.75 (5.54)	67.59 (3.87)	52.1 (3)	36 (2.1)	27.66 (1.58)	22.2 (1.27)	18.58 (1.06)	13.96 (0.8)
15	99.05 (5.68)	69.18 (3.96)	53.33 (3.06)	36.85 (2.11)	28.31 (1.62)	22.73 (1.3)	19.04 (1.09)	14.31 (0.82)
20	101.3 (5.8)	70.74 (4.05)	54.53 (3.12)	37.68 (2.16)	28.95 (1.66)	23.25 (1.33)	19.49 (1.12)	14.64 (0.84)
25	103.5 (5.9)	72.26 (4.14)	55.71 (3.19)	38.49 (2.21)	29.57 (1.69)	23.76 (1.36)	19.92 (1.14)	14.97 (0.86)

В таблице 3 приведена зависимость среднего угла рассеяния электрона при прохождении каптоновой плёнки и расстояния в воздухе до мишени в экспериментальной зоне, где ведутся исследования детекторов, в частности, кристаллов [15].

Таблица 3. Суммарный средний угол отклонения электрона при прохождении каптоновой плёнки толщиной 70 мкм и расстояния 130 см до мишени в воздухе в мрад (в скобках – в градусах) в зависимости от его кинетической энергии.

Расчитанная расходимость	<i>E</i> , МэВ							
	10	15	20	30	40	50	60	80
	111 (6.36)	77.21 (4.42)	59.54 (3.41)	41.09 (2.35)	31.51 (1.81)	25.61 (1.47)	21.7 (1.24)	16.32 (0.94)

Основной вклад в расходимость пучка на участке ЕАЗ (см. табл. 4) вносит значительный слой воздуха. Расхождение получается существенным, что делает необходимым применение коллимации при получении и использовании тестовых пучков. В расчетах полагается, что падающие на поверхность материала электронные пучки являются мононаправленными нормально к поверхности материала и имеют гауссово поперечное распределение частиц. Ускорительные установки, даже одного и того же

класса машин, могут иметь свои особенности как конструктивные, так и электрические – лишь измерения могут дать нужные для экспериментаторов характеристики. В настоящее время применяется несколько методов определения расходимости и профиля пучков [21 – 23]. Нами использовался приближенный метод измерения: сравнение размеров следов, оставляемых проходящим пучком на экране на разном удалении от выходного коллиматора. Измерения проводились в зоне за поворотным магнитом анализатора и на участке исследования детекторов [6]: в этих зонах проводится подавляющее большинство экспериментов на ЛУЭ-75. Из-за отсутствия возможности поместить мишень в вакуумный объем измерения проводились в воздухе, т.е. измерялась расходимость в зависимости от расстояния мишени от коллиматора при данной энергии.

На участке EA1 (рис. 1) пучок после магнитного анализатора, пройдя дрейфом прямой участок пучкопровода, пересекает стальную фольгу выходного фланца и, пролетая коллимирующее отверстие, попадает на экран. Источником электронов в измерениях считалась коллимационная щель диаметром 14 мм. В качестве экрана использовалось либо стекло, либо тонкая пластинка с люминесцентным покрытием. По изображениям пучка (след на экране) можно определить расходимость пучка и его интегральный профиль в измеряемом месте. Измерения были проведены для разных энергий. На рис. 5 приведено изображение пучка с энергией 22 МэВ, оставленной на стекле и профили, полученные во время осенних сеансов 2024 г.

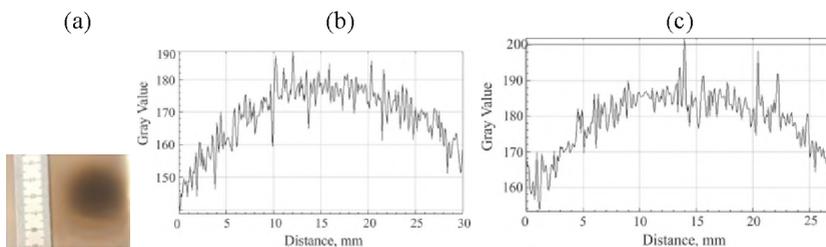


Рис. 5. (a) – след пучка с энергией 22 МэВ на стекле на расстоянии 21 см от коллиматора с диаметром 14 мм в воздухе: средний ток пучка 0.65 мкА, время экспозиции 12 мин.; (b) и (c) – горизонтальный и вертикальный профили соответственно.

Увеличение слоя воздуха, а также само стекло, служащее в данном случае мишенью, увеличивает область гало вокруг пучка. Любые нестабильности пучка в течение времени экспозиции приводят к расширению гало: флуктуации в продольном и поперечном плоскостях (отметим, что флуктуации пучка в поперечной плоскости приводят к нестабильности в продольной), нестабильность энергии и др.; проходя через слой воздуха, пучок ионизирует молекулы последнего – взаимодействие пучка с плазмой также вносит вклад в размеры, форму и неоднородность гало. Но оно образуется в основном из-за вторичных излучений, создаваемых первичным релятивистским пучком. Это явление «загрязняет» пучок, размывая его границы, что вносит свой вклад в приближенность измерений. С этой точки зрения измеренные изображения и профили являются интегральными, они отражают картину в месте, где располагаются мишени.

В таблице 4 приведены углы расходимости, измеренные по полученным на стеклянных пластинках изображениям для энергий электронов 22 и 40 МэВ. Разница измеренных после магнитного анализатора (экспериментальная зона EA1) и рассчитанных углов рассеяния объясняется не только приближенностью применяемого метода из-за наличия гало. В аналитических формулах, по которым рассчитывается расходимость, полагается, что пучок моноэнергетичен и нерасходящийся и падает на поверхность строго перпендикулярно; пучок ЛУЭ-75 имеет спектр шириной порядка 4.0% на низких энергиях до 1.7% на высоких энергиях (полная ширина на полувысоте), контролируемый с помощью магнитного анализатора. Несмотря на хорошую укомплектованность электромагнита и анализатора в целом, на выходе за зазором были обнаружены слабые рассеянные поля. Эти поля, а также вышесказанное, обуславливают разницу рассчитанных и измеренных углов расходимости. Также было обнаружено незначительное отклонение оси пучка от нормали к плоскости поперечного сечения.

Таблица 4. Сравнение измеренных и рассчитанных углов рассеяния в воздухе в мрад (в скобках – в градусах).

Энергия, МэВ	Углы отклонения в мрад (градусы)	
	измеренные	рассчитанные по ICRU
22	гориз. 34 (1.95); верт. 31 (1.78)	22 (1.26)
40	гориз. 19 (1.08); верт. 14.4 (0.83)	12 (0.69)

На участке EA3 нет магнитного анализатора. Тестируемые детекторы устанавливаются на расстоянии 130 см от каптонового окна, поэтому облучаемые стекла устанавливались там же. Измеренные и рассчитанные углы расходимости отличались не более (10 – 15)%, что приемлемо для большинства проводимых опытов. Естественная расходимость пучка в воздухе на таком удалении значительна, поэтому использование коллиматора необходимо. В настоящее время используются коллиматоры разных диаметров в зависимости от условий эксперимента. Следует отметить, что наряду с ограничением размеров пучка, коллиматор, во-первых, уменьшает интенсивность пучка, во-вторых, своими краями вводит рассеяние электронов, что может ухудшить профиль пучка. Поэтому выбор и расчет конструкции коллиматоров представляют собой отдельную задачу, не рассматриваемую в настоящей работе.

На рис. 6 приведены следы и профили пучков на участке тестирования детекторов EA3. Измерения проводились при энергиях 50 и 60 МэВ и средних токах порядка десятков нА. На рис. 6а видно, что центр пучка несколько смещен. Это может быть следствием неоптимальной настройки. В дальнейшем планируется применение визуального компьютерного мониторинга и соответствующих программ, что позволит контролировать и корректировать профиль пучка в режиме онлайн.

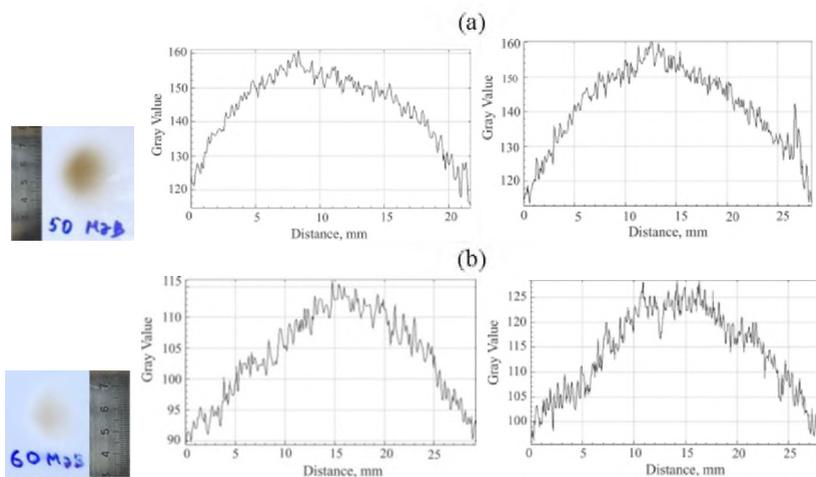


Рис.6. Следы и горизонтальные (слева) и вертикальные (справа) профили пучков с энергиями 50 и 60 МэВ; (а) – 50 МэВ; (б) – 60 МэВ

На рис. 7 показан горизонтальный профиль 40 МэВ-го низкоинтенсивного пучка на участке тестирования скитилиационных кристаллов [15, 24] с использованием пальчикового (finger counters) пластикового счетчика; перемещение счетчика поперек пучка осуществлялось дискретно с шагом 5 мм с помощью дистанционно управляемого компьютером сканера; максимум соответствует интенсивности 60 – 70 е⁻/с. Как видно из рис. 7, обеспечивается достаточная симметричность профиля пучка.

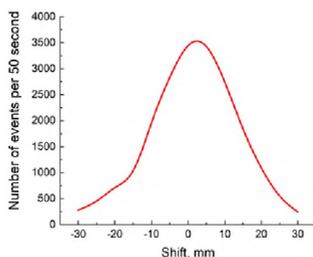


Рис. 7. Горизонтальный профиль пучка экстремально низкой интенсивности со средней энергией 40 МэВ.

Анализирующий магнит является основным диагностирующим инструментом линейного ускорителя ЛУЭ-75. С октября 2024 г. по январь 2025 г. после проведения полной ревизии и профилактики анализатора и цепей его питания были осуществлены проверочно-калибровочные измерения с целью уточнения калибровочной кривой.

Зависимость индукции в зазоре от требуемой энергии влетающего в зазор электромагнита электрона служит основой для калибровки магнитного анализатора.

$$B = \frac{(E + E_0)\beta}{ecR},$$

где E_0 – энергия покоя электрона, c – скорость света в вакууме, e – заряд электрона, β – приведенная скорость электрона. Конструкция рассматриваемого магнита рассчитана на радиус поворота траектории электрона $R = 50$ см. На рис. 8 приведена указанная зависимость индукции от кинетической энергии электрона. С помощью этой зависимости определяется калибровочная кривая магнитного анализатора $E = f[B(I)]$, где I – ток через обмотку электромагнита.

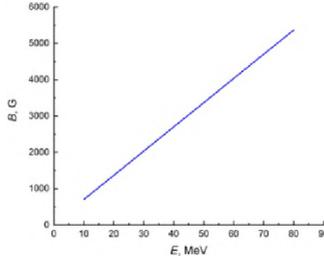


Рис. 8. Зависимость индукции магнитного поля от энергии электрона при радиусе поворота 0.5 м.

Впервые проведены комплексные измерения магнитного анализатора. Измерены остаточные и рассеянные поля. Измерения индукции в различных режимах проводились в точках вдоль траектории пучка.

Во время сеансов 2025 г. были получены энергетические спектры пучков при разных энергиях и интенсивностях (рис. 9). Проведенные сеансы показали хорошее рабочее состояние магнитного анализатора.

После проведения измерений в действующей системе термостатирования и охлаждения (потоков циркулирующей воды в разных ветвях, температур, расчета мощностей выделяемых в ускоряющих секциях и в резонаторах клистронов) была исследована зависимость изменения энергии ускоренных электронов от стабильности температуры ускоряющих секций, с учетом фазовой стабильности ускоряющей волны. Сформулированы требования к системе термостатирования [16],

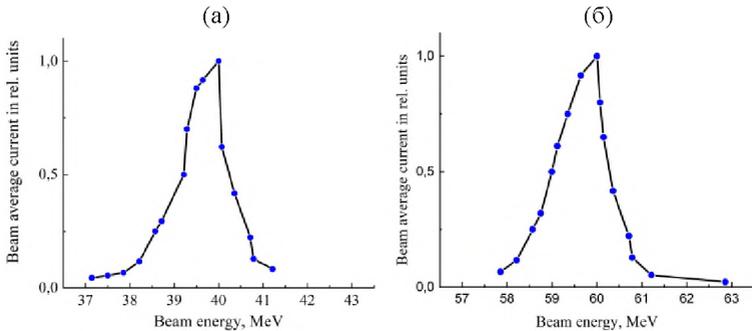


Рис. 9. Спектры пучков при энергиях: (а) – 40 МэВ, (б) – 60 МэВ.

Связь между шириной энергетического спектра пучка с электродинамическими и тепловыми данными системы приведена к удобному для инженерных расчетов виду:

$$-\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\pi^2}{3c^2} \left(\frac{f}{\beta_{gr}} L \alpha_T \Delta T \right)^2,$$

где ΔT – изменение температуры, f – собственная частота ускоряющего волновода, L – активная длина волновода, α_T – температурный коэффициент линейного расширения материала волновода, β_{gr} – относительная групповая скорость ускоряющей волны в диафрагмированном волноводе.

Получен график зависимости абсолютной величины относительного изменения выходной энергии пучка от изменения температуры ускоряющих секций. Приведена таблица зависимости величины уменьшения средней энергии пучка электронов от изменения температуры при настройке на энергию 75 МэВ.

Показано что, при стабильности температуры в пределах $\pm 0.2^\circ\text{C}$ нестабильность энергии при 75 МэВ составляет менее 0.1%. Полученные данные служат основой для обоснования требований как к действующей в настоящее время, так и к планируемой при модернизации системе термостатирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы

1. Впервые на ускорительном комплексе ЛУЭ-75 исследованы расчетным и экспериментальным путем расходимости электронного пучка в зависимости от параметров выводных окон и расстояний до мишени. Измерены интегральные профили пучков при различных кинетических энергиях ускоренных частиц.
2. Впервые на рассматриваемой ускорительной установке рассчитаны энергетические потери электронов в выводных окнах в зависимости от материала окна, его толщины и расстояния в воздухе до мишени; таблицы и графики сохранены в виде файлов для использования экспериментаторами.
3. Впервые были проведены комплексные измерения магнитного поля анализатора; измерены остаточные и рассеянные поля; исследована однородность магнитного поля вдоль траектории движения пучка в зазоре магнита. Проведена калибровка анализирующего магнита. Сравнение вновь полученной уточненной калибровки с результатами прежних лет показало высокую воспроизводимость калибровочной кривой магнитного анализатора.
4. Определена зависимость изменения энергии ускоренных электронов от стабильности температуры ускоряющих секций. Полученные результаты служат основой для обоснования требований как к действующей в настоящее время, так и к планируемой при модернизации системе термостатирования.
5. Реализована оптимизация вакуумного тракта, которая привела к улучшению вакуума в тракте параллельного переноса электронного пучка в 6 – 8 раз, сокращено время получения вакуума. Существенное улучшение вакуума позволило без риска СВЧ-

пробоев повысить максимальную энергию электронов на 1.5 МэВ, впервые доведя ее до 76.5 МэВ, что открывает возможность изучения фотоядерных процессов при реакциях, имеющих более высокий энергетический порог.

6. Реализованы дистанционное управление мишени в горизонтальной плоскости и визуализация пучка в экспериментальных зонах, что облегчает работу не только обслуживающего персонала, но и экспериментаторов.
7. Изучены и отработаны режимы ускорителя в целом, включая магнитную оптику параллельного переноса, после упрочнения поворотных магнитов и проводки низкоинтенсивных пучков с повышенной энергией с 50 до 75 МэВ. Результаты используются для оперативной проводки пучка в зону тестирования детекторов.

Проведенные измерения и расчеты повышают информацию об электронном пучке, знание измеренных параметров повышает качество экспериментов, что, в свою очередь, повышает востребованность ускорителя. Проведенные работы способствуют продлению научной жизни ускорителя.

ПУБЛИКАЦИИ

1. L.R. Vahradyan, «On Modernization of the LUE-75 Linear Electron Accelerator of the AANL (YerPhI)», J. Contemp. Phys. vol. 58, p. 333, (2023)
2. L.R. Vahradyan, A.S. Hakobyan, L.A. Poghosyan, G.D. Movsesyan, H.H. Marukyan, «On the Output Vacuum Windows of Accelerator Facilities Used in the AANL (YerPhI) Experiments», J. Contemp. Phys. vol. 59, p. 450, (2024).
3. A.S. Hakobyan, L.R. Vahradyan, L.A. Poghosyan T.V. Kotanjyan, H.H. Marukyan, «On the Divergence and Profile of the Beam of the LUE-75 Linear Electron Accelerator Operating at the AANL (YerPhI)», J. Contemp. Phys. vol. 60, p. 121, (2025).
4. 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, «Linear Electron Accelerator LUE-75 of Yerevan Physics Institute at Energies of 10–75 MeV», J. Contemp. Phys. vol. 54, p. 225, (2019).
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, «Test Electron Beams Based on the Linear Accelerator Complex LUE-75 of A.I. Alikhanyan National Scientific Laboratory», J. Contemp. Phys. vol.57, p. 12, (2022).
6. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, L.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, K. Katovsky, «Investigations at the LUE-75 Linear Accelerator Facility of A.I. Alikhanyan National Science Laboratory», J. Contemp. Phys. vol. 57, p. 209, (2022).
7. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, G.G. Gulbekyan, H.T. Torosyan, A.Z. Babayan, and L.R. Vahradyan, «On Some Projects of Modernization of the Yerevan Synchrotron ARUS», J. Contemp. Phys. vol. 57, p. 317, (2022).

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Alikhanian, et al., «Status Report Of The Erevan Electron Synchrotron, Proceedings, 6 th International Conference on High-Energy Accelerators», HEACC 1967: Cambridge, Massachusetts, September 11–15, p. 401, (1967).
2. A.I. Alikhanian, et al., «High Energy Particle Identification by Means of X-ray Transition Radiation (XTR) Detectors», Nucl. Instrum. Meth. vol. 89, p. 147, (1970).
3. A.I. Alikhanian, et al., «Detection of X-ray Transition Radiation by Means of a Spark Chamber», Phys. Rev. Lett. vol. 25, p. 635, (1970).
4. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, ..., L.R. Vahradyan, «On Some Projects of Modernization of the Yerevan Synchrotron ARUS», J. Contemp. Phys. vol. 57, p. 317, (2022).
5. A.M. Sirunyan, A.S. Hakobyan, A.Z. Babayan, H.H. Marukyan, ..., L.R. Vahradyan, «Linear Electron Accelerator LUE-75 of Yerevan Physics Institute at Energies of 10–75 MeV», J. Contemp. Phys., vol. 54, p. 225, (2019).
6. L.R. Vahradyan, et al., «On the Output Vacuum Windows of Accelerator Facilities Used in the AANL (YerPhi) Experiments», J. Contemp. Phys., vol. 59, p. 450, (2024).
7. К.Н. Мухин, «Экспериментальная ядерная физика», Кн. 1. М. Энергоатомиздат, (1993).
8. В.А. Климанов, Е.А. Крамер-Агеев, В.В. Смирнов, «Дозиметрия ионизирующих излучений». Москва, НИЯУ «МИФИ» (2015).
9. S. Eidelman. «Passage of Particles Through Matter», Physics Letters B, vol. 592, p. 1, (2004).
10. А.А. Воробьев, Б.А. Кононов, «Прохождение электронов через вещество». Томск, Изд. ТГУ (1966).
11. «Radiation Dosimetry. Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV». ICRU REPORT 35 (1984).
12. «Stopping Powers for Electrons and Positrons», ICRU REPORT 37, issued 1, (1984). «Тормозная способность электронов и позитронов», Доклад 37 МКРЕ. Пер. с англ. М. Энергоиздат, (1987).
13. Matthew Strait, «Precise computation of the density effect correction». University of Minnesota, USA (2019).
14. A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, ..., L.R. Vahradyan, et al., «Test Electron Beams Based on the Linear Accelerator Complex LUE-75 of A.I. Alikhanyan National Scientific Laboratory». J. Contemp. Phys. vol. 57, p. 12, (2022).
15. A.S. Hakobyan, L.R. Vahradyan, L.A. Poghosyan, T.V. Kotanjyan, H.H. Marukyan, «On the Divergence and Profile of the Beam of the LUE-75 Linear Electron Accelerator Operating at the AANL (YerPhi)», J. Contemp. Phys. vol. 60, p. 121, (2025).
16. L.R. Vahradyan, «On Modernization of the LUE-75 Linear Electron Accelerator of the AANL (YerPhi)», J. Contemp. Phys. vol. 58, p. 333, (2023).
17. A.R. Mkrtchyan, et al., «Radiation from 20 MeV electrons in piezoelectric single crystals in the presence of external acoustic fields», J. Contemp. Phys. vol. 48, p. 154, (2013).
18. A.R. Mkrtchyan, E.A. Mkrtchyan, «Influence of acoustic oscillations on coherent bremsstrahlung of electrons», J. Contemp. Phys. vol. 48, p. 158, (2013).

19. J. Engel, M. Gross, G. Koss, O. Lishilin, G. Loisch, S. Philipp, D. Richter, F. Stephan, «Polymer foil windows for gas–vacuum separation in accelerator applications», AIP Advances, 10, 025224 (2020).
20. Dupont Kapton: Summary of Properties, <https://ru.scribd.com/document/387357734/advances>
21. Takeshi Mukoyama, Yoshihisa Watanabe, «Monte Carlo Calculations of Transmission of Electrons through Thin Foils», Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ. 55, No. 1, (1977).
22. A.G. Shkvarunets, et al., « Electron Beam Divergence Measurements at Low Energies Using a Novel Optical Diffraction Radiation Transmission Interferometer», TUPTPF048 Proceedings of VIW08, Tahoe City, California, p. 218, (2008).
23. В.В. Полянский, А.В. Кольцов, А.В. Серов, «Особенности рассеяния протонов и релятивистских электронов, пересекающих тонкую плоскую мишень под малым углом к ее поверхности», ЖЭТФ т. 146, вып. 2(8), стр. 240, (2014).
24. A.S. Hakobyan, ..., L.R. Vahradyan, et al., «Investigations at the LUE-75 Linear Accelerator Facility of A.I. Alikhanyan National Science Laboratory», J. Contemp. Phys. vol. 57, p. 209, (2022).

Վահրադայան Լուսինե Ռուդուֆի

ԱԱԳԼ-ի 75 ՄԷՎ էներգիայով գծային էլեկտրոնային արագացուցչի որոշ բնութագրերի ուսումնասիրումը և արդիականացման խնդիրները

Ամփոփագիր

1. Առաջին անգամ ԼՌԻԷ-75 արագացուցչային համալիրում հաշվարկային և փորձնական եղանակով հետազոտվել է էլեկտրոնային փնջի ցրվածության կախվածությունը էլքային պատուհանների պարամետրերից և թիրախի հեռավորությունից: Չափվել են փնջի ինտենզիտային պրոֆիլները արագացված էլեկտրոնների տարբեր կինետիկ էներգիաների դեպքում:
2. Առաջին անգամ դիտարկվող արագացուցչային կայանում հաշվարկվել են էլքային պատուհաններում էլեկտրոնների էներգիայի կորուստները՝ կախված պատուհանի նյութից, դրա հաստությունից և թիրախի օդում եղած հեռավորությունից: Աղյուսակներն ու գրաֆիկները պահպանվել են ֆայլերի տեսքով՝ փորձարարների կողմից օգտագործելու համար:
3. Առաջին անգամ իրականացվել են վերլուծիչի մագնիսական դաշտի համապարփակ չափումներ: Չափվել են մնացորդային և ցրված դաշտերը, ինչպես նաև հետազոտվել է մագնիսական դաշտի միատարրությունը փնջի հետագծի երկայնքով մագնիսի բացվածքում: Վերլուծիչ մագնիսը տրամաչափվել է: Նոր ստացված, ճշգրտված արդյունքների համեմատությունը տրամաչափման նախորդ արդյունքների հետ ցույց է տվել մագնիսական վերլուծիչի տրամաչափման կորի բարձր վերարտադրելիություն:
4. Ուսումնասիրվել է արագացված էլեկտրոնների էներգիայի փոփոխության կախվածությունը արագացնող սեկցիաների ջերմաստիճանային կայունությունից: Ստացված արդյունքները հիմք են հանդիսանում ինչպես ներկայումս գործող, այնպես էլ պլանավորված արդիականացված ջերմակայունության համակարգին ներկայացվող պահանջների հիմնավորման համար:
5. Իրականացվել է վակուումային համակարգի օպտիմալացում, որի արդյունքում էլեկտրոնային փնջի զուգահեռ տեղափոխման համակարգում վակուումը բարելավվել է 6-8 անգամ և կրճատվել է վակուում ստանալու համար անհրաժեշտ ժամանակը: Վակուումի զգալի բարելավումը հնարավորություն է տվել առանց գերբարձր հաճախականային պարպումների ռիսկի մեծացնել էլեկտրոնների առավելագույն էներգիան 1.5 ՄԷՎ-ով՝ այն առաջին անգամ հասցնելով 76.5 ՄԷՎ-ի, ինչը հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել ֆոտոմիջուկային պրոցեսները ավելի բարձր էներգետիկ շեմ ունեցող ռեակցիաներում:

6. Կիրառվել է թիրախի հեռակառավարումը հորիզոնական հարթությունում և փնջի վիզուալիզացիան փորձարարական գոտիներում, ինչը հեշտացրել է ոչ միայն սպասարկող անձնակազմի, այլև փորձարարների աշխատանքը:
7. Շրջող մագնիսների հզորացումից և 50-ից 75 ՄԷՎ բարձրացված էներգիայով ցածր ինտենսիվությամբ փնջերի տեղափոխումից հետո ուսումնասիրվել և մշակվել են արագացուցչի, ներառյալ զուգահեռ տեղափոխման օպտիկայի ռեժիմները:
Արդյունքները օգտագործվում են դետեկտորների փորձարկման տարածք փնջի օպերատիվ ուղղորդման համար:

Կատարված չափումներն ու հաշվարկները մեծացնում են տեղեկությունը էլեկտրոնային փնջի մասին: Չափված պարամետրերի իմացությունը բարելավում է փորձերի որակը: Կատարված աշխատանքները նպաստում են արագացուցիչի գիտական կյանքի երկարացմանը:

Lusine Rudolf Vahradyan
Study of some characteristics of the 75 MeV linear electron accelerator of the
AANL and modernization issues
Summary

1. For the first time, the dependence of electron beam dispersion on the parameters of the exit windows and the distance to the target has been investigated computationally and experimentally in the LUE-75 accelerator complex. The beam integral profiles have been measured for different kinetic energies of accelerated electrons.
2. For the first time, the energy losses of electrons in the exit windows were calculated at the observed accelerator station, depending on the material of the window, its thickness, and the distance to the target in air. The tables and graphs were saved as files for use by the experimenters.
3. For the first time, comprehensive measurements of the magnetic field of the analyzer were carried out: the residual and scattered fields were measured, as well as the homogeneity of the magnetic field in the magnet gap along the beam path was investigated. The analyzer magnet was calibrated. Comparison with the previous results of the newly obtained, adjusted calibration showed high reproducibility of the calibration curve of the magnetic analyzer.
4. The dependence of the energy change of accelerated electrons on the temperature stability of the accelerating sections has been studied. The results obtained serve as a basis for substantiating the requirements for both the currently operating and planned modernized thermal stability system.
5. Optimization of the vacuum system was carried out, as a result of which the vacuum in the parallel electron beam transport system was improved by 6-8 times and the time required to obtain a vacuum was reduced. Significant improvement of the vacuum made it possible to increase the maximum electron energy by 1.5 MeV without the risk of microwave breakdowns, bringing it to 76.5 MeV for the first time, which makes it possible to study photonuclear processes in reactions with a higher energy threshold.
6. Remote control of the target in the horizontal plane and beam visualization in the experimental zones were implemented, which facilitated the work of not only the service personnel, but also the experimenters.
7. After the strengthening of the rotating magnets and the transfer of low-intensity beams with increased energy from 50 to 75 MeV, the modes of the accelerator, including parallel transfer optics, were studied and developed. The results are used for operational beam guidance to the detector test area.

The measurements and calculations performed increase the knowledge about the electron beam. Knowledge of the measured parameters improves the quality of experiments. The work performed contributes to the extension of the scientific life of the accelerator.

