

## **Расширенная аннотация доклада**

### **Проект «Модернизация ускорителя ЭГ-5 и развитие его экспериментальной инфраструктуры»: текущее состояние дел и стратегия развития**

В сообщении будут рассмотрена перспективная научная программа исследований на электростатическом ускорителе ЛНФ, проведено сравнение результатов планируемой модернизации имеющегося ускорителя ЭГ-5 посредством фирмы HV Europe BV с вариантами установки нового ускорителя по техническим параметрам и стоимости. Цель сообщения – получить рекомендации ПКК относительно стратегии развития работ по запуску в ОИЯИ электростатического ускорителя для ядерно-физических исследований.

**Докладчик**

**Дорошкевич А.С. (ЛНФ)**

**E-mail: doroh@jinr.ru**

### **Project «Modernization of the EG-5 accelerator and development of its experimental infrastructure»: current state of affairs and development strategy**

A promising scientific research program of the investigation in the FLNP with using the electrostatic accelerator will be consider in the report. The results of the planned modernization of the existing accelerator EG-5 by means of HV Europe BV are compared with the options of installing a new accelerator in terms of technical parameters and cost. The purpose of the report was to obtain the PAC recommendations regarding the development strategy for the launch of an electrostatic accelerator for nuclear physics research at JINR.

## **1. Введение.**

В настоящий момент крайне актуальными являются ядерно-физические исследования с использованием электростатических ускорителей. Актуальная информация о процессах трансмутации ядер с помощью нейтрон-индуцированных реакций крайне важна для астрофизики и ядерной энергетики [1]. Данные о реакциях с вылетом заряженных частиц, индуцированных быстрыми нейтронами, представляют значительный интерес для изучения механизмов ядерных реакций, структуры атомных ядер, радиационного материаловедения и проведения расчетов при создании новых установок для ядерной энергетики. Ионно-лучевые спектрометры, построенные на базе электростатических ускорителей, обладают астрономической точностью и крайне важны и актуальны в современных исследованиях, сопряженных с нанотехнологиями. Крайне перспективным и жизненно важным направлением науки является радиационная медицина. Требуется новые знания о взаимодействии высокоэнергетических частиц с биологическими объектами. В тоже время, микропучковые ионно-лучевые инструменты позволяют проникнуть внутрь биологической клетки и изучить радиационные эффекты на микроскопическом уровне, проводить сканирующие спектроскопические исследования твердых объектов (в том числе предметы исторического наследия) на микроскопическом масштабном уровне, проводить ионное легирование микроскопических областей в полупроводниковых кристаллах (нанoeлектроника и микросистемная техника).

Таким образом, в настоящий момент имеется широкий спектр актуальных для ряда отраслей народного хозяйства прикладных и фундаментальных научных задач, которые сопряжены с ядерными реакциями на быстрых нейтронах и с взаимодействием высокоэнергетических заряженных частиц с живой и неживой материей. Эти задачи требуют для своего решения использования электростатических ускорителей.

**1.1. Научная программа группы ЭГ-5.** В ПТП ОИЯИ сформулировано два основных

направления, которые мы планируем развивать с использованием электростатического ускорителя:

1. Исследование свойств возбужденных ядер, реакций с вылетом заряженных частиц, физики деления, получения актуальных данных для астрофизики, ядерной энергетики и проблемы трансмутации ядерных отходов с помощью нейтрон – и гамма индуцированных реакций.

2. Применение методов нейтронной физики в других областях науки и техники.

**Ядерная физика.** Научная программа ускорительного комплекса очень насыщена. Предполагается исследование целого спектра ядерных реакций с быстрыми квазимоноэнергетическими нейтронами, включая:

- исследование МНД и ТКЕ в реакциях  $^{235}\text{U}(n,f)$ ,  $^{238}\text{U}(n,f)$ ,  $^{237}\text{Np}(n,f)$  в области энергий нейтронов 1-5 МэВ/ядро (ЭГ-5) в геометрии с малой эффективностью регистрации МНД;
- исследование множественности МНД в реакциях  $^{235}\text{U}(n,f)$ ,  $^{238}\text{U}(n,f)$ ,  $^{237}\text{Np}(n,f)$  на быстрых нейтронах в геометрии с высокой эффективностью регистрации МНД;
- исследование процесса  $(n, \gamma')$  в реакции  $^{239}\text{Pu}(n_{\text{res}}, f)$ .
- исследование реакций с вылетом заряженных частиц.

**Физика конденсированных сред.** С использованием электростатического ускорителя запланированы исследования:

- глубинных элементных профилей приповерхностных слоев твердых тел (многослойные полупроводниковые архитектуры типа  $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ ,  $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2 / \text{Si}$ ,  $\text{GaAs}$  и др.);
- процессов структурной релаксации поверхностных слоев твердых тел, сопровождающейся окислением или гидrogenизацией (Металлические (Fe, Cu ) и металл-оксидные ( $\text{ZrO}_2$ , CuO, ZnO,  $\text{SnO}_2$ ) твердые растворы - керамики и др)
- исследования кислородной подсистемы поверхностных слоев материалов по методу ядерных реакций (>3,1МэВ, NRA).

Также запланированы:

- работы с биологическими объектами, в частности, мониторинг хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови человека.

Кроме того, планируется освоение новых исследовательских методик, включая методологию работы с нанопорошковыми объектами, создание устойчивой коллаборации с партнерами в РФ, ближнего и дальнего зарубежья, открытие новой юзерской программы на спектрометрах ЭГ-5.

На момент 2020 г. в рамках темы № 03-4-1128-2017/2022 подано 6 заявок на исследования в рамках совместных работ ОИЯИ – страны участницы:

1. Проект «Синтез, структура и магнитные свойства пленок диоксида олова, содержащих кластеры магнитных металлов» БГУ, 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Беларусь - ОИЯИ);
2. Проект «The study by DLS and RBS methods of structures and elemental composition of surface layer of nanoparticles  $\text{ZrO}_2$  under hydration conditions», UNIVERSITY «LUCIAN BLAGA» of SIBIU, 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Румыния - ОИЯИ);
3. Проект «Development and characterisation of magnetic nanostructured systems for targeted cancer therapy by means of Nuclear Physical Methods», National Centre for Nano and Micromaterials - University POLITEHNICA of Bucharest (CNMN-PUB), 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Румыния - ОИЯИ);
4. Проект «Investigation of the properties of deposited on different plastic substrates organic thin films after high-energy ion and neutron irradiation», Institution(s): National Institute for Materials Physics (NIMP), 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Румыния - ОИЯИ);
5. Проект «Формирование переходных слоев в керамике SiC посредством ионной имплантации и исследование распределения имплантированных ионов по глубине. Исследование влияния имплантации ионов на элементный состав и оптические свойства многослойных диэлектрических

структур на полупроводниковых подложках», Институт Физики УМКС, г. Люблин, 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Польша - ОИЯИ);

- б. Проект «The relationship among features of crystal and magnetic structures and physical properties of nanosized ferrites», 2020 г., (Конкурс научных проектов в рамках программы сотрудничества Румыния - ОИЯИ);

В перспективе - взаимодействия с новыми научными группами из РФ, стран ближнего и дальнего зарубежья:

- University of Lisbon (i3N/CENIMAT, Department of Materials Science, Faculty of Science and Technology, New University of Lisbon and CEMOP/UNINOVA, Portugal),
- National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies, Cluj-Napoca, România;
- National Nuclear Research Center CJSC, Baku, Azerbaijan;
- Университет Дубна, Дубна, РФ.

**1.2. Область применения ускорителей типа Ван-де-Граафа.** Созданный на основе генератора Ван де Граафа электростатический ускоритель ЭГ-5 стационарно действует в ОЯФ ЛНФ ОИЯИ (Дубна) с 1965 года. Благодаря относительной простоте и надежности конструкции а, также, характерным для ускорителей прямого действия уникальным параметрам ускоренного пучка ионов (непрерывность, высокие интенсивность и стабильность по энергии (0.01%)), ускоритель ЭГ-5 безальтернативно является самым эффективным и удобным ядерно-физическим инструментом для решения широкого спектра актуальных научных задач физики ядра, физики конденсированных сред, биологии, электроники, медицины и др.

С возможностью получения с помощью ЭГ-5 быстрых нейтронов во многом связано развитие в ОИЯИ экспериментальной ядерной физики (d,d – реакции, реакции нейтрон - заряженная частица, изучение прохождения ядерных излучений через различные среды, калибровка нейтронных детекторов, и др.), радиобиологии (мониторинг хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови человека, и др.), радиационного материаловедения (взаимодействие ядерных излучений с веществом, всесторонние исследования радиационной стойкости материалов и изделий различного назначения, исследование материалов для ядерных реакторов, радиационное легирование полупроводниковых материалов), физики конденсированных сред (исследование элементного и изотопного состава, элементных глубинных профилей приповерхностного слоя материалов) и др.

**1.3. Уникальность ускорителей типа Ван-де-Граафа с энергией свыше 3МэВ.** В настоящий момент в мире наметилась тенденция использовать электростатические ускорители в основном для решения прикладных задач материаловедения, физики конденсированного состояния и медицины. Как правило, производятся дешевые каскадные (тандемные) перезарядные ускорители с энергией ускоряемых частиц до 3МэВ. Так, элементный состав и ионное облучение может быть проведено только в РФ, не менее чем в 12 ядерных центрах, включая ОИЯИ. Тем не менее, приборы (электростатические ускорители прямого действия) с энергией более 3МэВ крайне важны для решения ряда уникальных задач, которые заложены в Программно-тематический план ОИЯИ.

Существенным преимуществом линейных ускорителей прямого действия, к которым относится ЭГ-5, является высокая пространственная и энергетическая стабильность ионного пучка. Пространственная стабильность (вплоть до 0,1 мм в диаметре) обуславливает возможность создания на основе таких ускорителей уникальных микропучковых спектрометров. Единственный в настоящий момент в РФ микропучковый спектрометр, произведенный в Институте прикладной физики НАНУ (г. Сумы, Украина) находится в г. Сарове и, по известным причинам, является труднодоступным для большинства пользователей. Энергетическая стабильность, обусловленная отсутствием перезарядной мишени, является важным фактором для достижения высокой разрешающей способности в исследованиях тонких поверхностных слоев. Таким образом, в настоящий момент в ОИЯИ имеется единственный ускоритель выпуска 1965 г., который по своим потенциальным техническим возможностям подходит для решения современных научных задач экспериментальной ядерной физики, ядерной астрофизики (звездный нуклеосинтез) [2] и бионанотехнологий. С развитием нанотехнологий и приложений ядерной энергетики ежедневно расширяется спектр прикладных исследовательских задач

для электростатических ускорительных комплексов типа ЭГ-5.

**1.4. Имеющийся задел.** С использованием ускорителя ЭГ-5 проведены измерения выхода нейтронов из твердотельной и газовой мишеней, полученных в реакции  $D(d,n)^3\text{He}$ ; выполнена калибровка нейтронного монитора, необходимая для измерения абсолютного потока нейтронов в измерениях; создан спектрометр заряженных частиц на базе ионизационной камеры с сеткой и модуля электроники для регистрации, накопления и первичной обработки данных на основе PIXIE-4 и PIXIE-16. С использованием ЭГ-5 проведено тестирование спектрометра заряженных частиц на базе ионизационной камеры с сеткой и модуля электроники для регистрации, накопления и первичной обработки данных на основе PIXIE-4 для измерений на ускорителе HV-2500 Института экспериментальной и прикладной физики Чешского технического университета, Прага, Чехия.

**1.5. Текущее состояние ускорителя.** В настоящее время проведение экспериментов с быстрыми нейтронами невозможно ввиду существенного снижения мощности ускорителя в результате исчерпания срока эксплуатации высоковольтной ускоряющей трубки. Тем не менее, существующие параметры ЭГ-5 позволяют обеспечить работу ионно-лучевых спектрометров RBS, ERD и PIXE. На пучках ионов гелия в настоящий момент проводятся уникальные неразрушающие экспериментальные исследования элементных глубинных профилей с разрешением по глубине около 10 нанометров. (Метод RBS) [3]. Имеется уникальная возможность исследования слоистых структур. Предел чувствительности метода составляет  $10^{15}$  ат. · см<sup>2</sup> [4], что позволяет, например, определять содержание примеси в количестве 0,001 ат.% [5] или распознать вещество в виде слоя толщиной до 1 нм. При комплексном использовании методы неразрушающего контроля: Метод протонов отдачи (Elastic Recoil Detection, ERD), Метод ядерных реакций (Nuclear Reaction Analysis, NRA), Метод индуцированного частицами излучения в рентгеновском диапазоне (Particle Induced X-Ray, PIXE), базирующиеся на пучках протонов и ионов гелия с энергиями от 1 до 3,1 МэВ / ядро позволяют определять с высокой точностью количественный состав и пространственное распределение в объеме приповерхностного слоя всех элементов таблицы Менделеева и их изотопов (включая легкий водород).

**Технической проблемой** в настоящий момент является физический износ основных узлов и систем установки и моральное старение научно-экспериментальной базы. Потеря мощности ускорителем (ток пучка снизился с 50мкА до 100нА) привела к невозможности его использования для изучения ядерных реакций, генерации нейтронов и для разработки на его основе микропучкового спектрометра – опций, которые являются в настоящий момент уникальными в ОИЯИ и в РФ.

Следует отметить, что проблема устаревания и остановки ускорителей за последние 30 лет в РФ имела системный характер. Только за период с 1990 по 2014 г. количество ускорителей сократилось с 27 до 12 – 15 единиц. В РФ практически прекратились разработки и производство собственных ускорителей (кроме г. Сарова), тогда как лидирующие позиции по производству и количеству ускорителей закрепились за США. Для решения указанной технической проблемы в ЛНФ согласно Концепции Семилетнего плана развития ОИЯИ на 2017 - 2023 гг., предусматривающей концентрацию ресурсов для обновления ускорительной и реакторной базы Института [6], в настоящий момент идет подготовка проекта модернизации ускорителя ЭГ – 5 и его экспериментальной инфраструктуры.

**Целью заявляемого проекта является** обеспечение технических условий для выполнения научной программы по исследованию процессов взаимодействия высокоэнергетических частиц с веществом в рамках Дорожной карты ОИЯИ и Проблемно-тематического плана (ПТП) ОИЯИ, в частности, реакций с быстрыми квазимоноэнергетическими нейтронами, взаимодействия радиационных излучений с биологическими объектами, конденсированными средами, обеспечение технических возможностей для реализации проекта микропучка, развитие комплекса ионно-лучевых спектрометров RBS, ERD, NRA, PIXE и др.

## **2. Задачи проекта и мероприятия, проводимые в настоящий момент для их решения**

Главной технической задачей проекта (**Задача 1**) является достижение технологических параметров ускорителем ЭГ-5: напряжения на кондукторе 3,2 -4,1 МВ при токе пучка до 100 мкА (состояние вопроса будет рассмотрено ниже).

Не менее важной задачей (**Задача 2**) является развитие приборной инфраструктуры, что позволит максимально использовать производственный потенциал ускорительного комплекса, чем повысить

выход научной продукции и расширить область применимости имеющихся исследовательских методов. В настоящий момент в разработке находится проект лаборатории для формирования монолитных объектов из порошковых материалов. Проектированием лаборатории занимается компания ООО ПК «СПЕЦАТОМСЕРВИС». Лабораторию планируется оснастить комплементарными ядернофизическими методами, в частности, методами исследования электрических, оптических и электронных свойств поверхности и приповерхностных слоев объектов (методы спектроскопии электрохимического импеданса; вольтамперометрии, эллипсометрии). Лаборатория позволит проводить коррекцию и подготовку образцов на месте, проводить независимые исследования, сопряженные с исследовательскими методами ЭГ-5.

Крайне важной является задача **модернизации научно - экспериментальной части ускорительного комплекса (Задача 3)**. Оборудование, используемое в настоящий момент для исследований элементного состава материалов, было разработано и произведено более 50 лет назад. Оно сильно устарело в моральном плане. Современные ионно-лучевые спектрометрические измерительные системы имеют существенно более высокую производительность. С целью повысить эффективность исследований объектов и выход научной продукции, предлагается заменить устаревшие спектрометры (методы RBS, ERD, NRA и PIXE) новым современным многофункциональным аналитическим модулем RC43, производства фирмы NEC. Этот модуль позволит увеличить количество спектрометров в камере, расширить рабочий диапазон и разрешение спектрометра RBS, полностью автоматизировать процесс съемки образцов и обработки данных, осуществить переход на современные стандарты и форматы данных. Камера анализатора с расположением основных элементов представлена на рис. 1. Кассета предполагает одновременную загрузку до 16 образцов. Система способна в автоматическом режиме параллельно проводить обработку сигналов от семи спектрометров с использованием функционала соответствующих методов:

1. RBS – метода анализа (RBS analysis);
2. Метода протонов отдачи (Elastic Recoil Detection ERD);
3. Метод ядерных реакций (Nuclear Reaction Analysis NRA);
4. Индуцированного частицами излучения в рентгеновском диапазоне (Particle Induced X-Ray Emission, PIXE);
5. Индуцированного протонами  $\gamma$ -излучения (Proton Induced Gamma Emission, PIGE);
6. Индуцированного ионным потоком люминесценции (Ion Beam Induced Luminescence, IBIL);
7. RBS – анализ высокого разрешения (Magnet/MCP high-resolution RBS measuring system).

В настоящий момент на стадии рассмотрения коммерческое предложение на покупку модуля RC43, фирмы NEC.

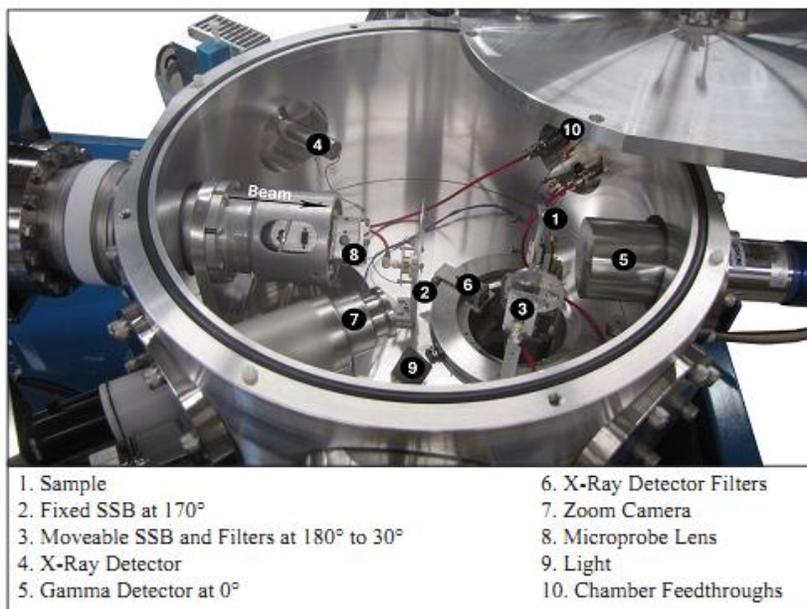


Рис. 1. Рабочая камера ионно-лучевого анализатора RC43 производства фирмы NEC. Цифрами показаны

основные элементы.

Перечень основных возможностей ускорительного комплекса после выполнения проекта модернизации приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

Возможности ускорительного комплекса до и после выполнения проекта модернизации.

<b>Before modernization</b>	<b>After modernization</b>
- Nuclear physics experiments - NRA (3,1 MeV) - <b>not possible</b>	Nuclear physics experiments - <b>possible</b> , - NRA (3,1 MeV) - <b>possible</b> .
Microbeam option installing – <b>not possible</b>	Microbeam option installing – <b>possible</b> ;
Work with biological objects - <b>not possible</b>	Work with biological objects - <b>possible</b>
The performance of EG-5 spectrometers: - <b>3</b> samples / per day, <b>Methods:</b> 1. Rutherford backscattering (RBS); 2. Elastic Recoil Detection (ERD); 3. Particle Induced X-Ray Emission (PIXE);	The performance of EG-5 spectrometers: - <b>32</b> samples / per day, <b>Methods:</b> 1-3. RBS, ERD, PIXE 4. Nuclear Reaction Analysis (NRA); 5. Proton Induced Gamma Emission (PIGE); 6. Ion Beam Induced Luminescence (IBIL); 7. High-resolution (HR RBS).

Кроме модернизации и расширения приборной базы ускорительного комплекса, в задачи проекта входит закладка кадрового потенциала на ближайшие 20-30 лет (**задача 4**). Для ее решения в составе сектора СИНЯВ ОЯФ создана отдельная группа «Установка ЭГ-5», включающая ведущих ученых – профильных специалистов (Др. А.П. Кобзев, Др. М. Кулик), высококлассных инженерно-технических работников (А.Н. Лихачев) и молодых сотрудников – студентов университета Дубна (9 человек). За период выполнения проекта планируется обучение и освоение будущими специалистами приборов ускорительного комплекса. В настоящий момент для молодежи организованы еженедельные лекции - семинары (М. Кулик) и индивидуальные практические занятия по методу РБС (М. Кулик, А.П. Кобзев). Проводится ознакомление с техническими принципами работы ускорителя и его сервисных систем (А.Н. Лихачев). Ребята активно принимают участие в научных конференциях различного уровня, занимают лидирующие позиции на университетских олимпиадах и конференциях.

### **3. Ответ на резолюцию 51st meeting of the PAC for Nuclear Physics относительно целесообразности ремонта старого ускорителя в противовес покупке нового.**

**Стратегия решения задачи 1.** Задача 1 предполагает решение 2х подзадач:

- достижения ускорителем мощности, достаточной для генерации нейтронов и
- фокусировки пучка, достаточной для установки микропучкового спектрометра.

С учетом рекомендаций ПКК рассмотрены два варианта решения задачи 1:

- Вариант с ремонтом старого ускорителя ЭГ-5 и
- Вариант с покупкой нового ускорителя такого же класса.

**3.1. Вариант с ремонтом имеющегося ускорителя ЭГ-5.** Для решения задачи предполагается проведение комплекса мероприятий, которые будут являться отдельными техническими проектами. В частности, предполагается: реализовать минимум 4 технических проекта:

- на замену высоковольтной ускоряющей трубки;
- на ремонт служебных помещений;
- замену газокompрессорного оборудования;
- модернизацию сервисных систем ускорителя (вакуумного хозяйства (переход на безмасляную откачку); электронных систем (замена морально устаревших приборов); кабельного хозяйства (ввиду

исчерпания последним ресурса); автоматизацию исполнительных механизмов (переход на дистанционно управляемые вакуумные затворы с целью обеспечения аварийного отсечения ускорительной трубки в автоматическом режиме).

**Ожидаемые технические параметры ускорителя ЭГ-5 после модернизации.** Технические параметры ускорителя до и после модернизации приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**

Технические параметры ускорителя ЭГ-5 до и после модернизации

Before modernization	After modernization
Terminal voltage - 2,1 MV Beam current – 100nA Ion Energy – 2,9 MeV	Terminal voltage - 4,1 MV Beam current – 50-100mkA Ion Energy – 4,1 MeV
- Nuclear physics experiments conducting is <b>not possible</b> , - NRA (3,1 MeV) - <b>not possible</b>	- Nuclear physics experiments conducting is <b>possible</b> , - NRA (3,1 MeV) - <b>possible</b>
Microbeam option installing – <b>not possible</b>	Microbeam option installing – <b>possible</b> ;
Work with biological objects - <b>not possible</b>	Work with biological objects – <b>possible</b>

После модернизации укорителя ЭГ-5 ускорительный комплекс получит следующие улучшения:

- появится возможность проведения ядерно-физических экспериментов на пучках квазимонохроматических ионов;
- появится возможность установки уникальной опции микропучка.

**Оценочная стоимость модернизации ЭГ-5.** Смета основных затрат на решение задачи 1 путем ремонта ускорителя ЭГ-5 приведена в табл. 3.

**Таблица 3.**

Расчетная смета основных затрат на решение задачи 1 путем ремонта ускорителя ЭГ-5

	Stage	Period	Cost, (thousand US dollars)
1	Accelerator technical condition assessment and preparatory work	2020	\$2
2	Cosmetic repair of the accelerator tower premise and the control room	2020-2021	\$ 90
3	Floor repair under the analyzing magnet in the right experimental room	2020-2021	\$ 25
4	Repair of experimental halls and technological premises	2021-2022	\$ 25
5	<u>Replacement of a high-voltage tube with divider and ion source</u>	2021	\$ 318
6	<u>Automation of technological systems of EG-5</u>	2021-2022	\$105
7	Modernization of research infrastructure EG-5.		
	Spectroscopic ellipsometer SER 800 SEN research 4.0;	2021	\$168
	Installation of a complex of spectrometers RBS “Endstation RC43”.	2021-2022	\$ 628
8	<u>Replacing a compressor in the gas compressor section</u>	2021-2022	\$ 64
9	Installation of a laboratory for the research samples preparation	2021-2022	\$ 50
	Total	2021-2022	\$ 1500

Как видно из табл.1., большая часть финансирования отводится на мероприятия, связанные с ремонтом помещений и наращиванием приборной инфраструктуры (\$ 1013). Они должны быть выполнены независимо от того, будет ли проводиться ремонт старого ускорителя или будет осуществлена поставка нового. Лишь третья часть (\$ 487) отводится на закупку модулей, требующихся для восстановления работоспособности ускорителя (подчеркнуто в таблице).

Таким образом, оценочная стоимость проекта модернизации составляет \$500 тыс / год. Срок выполнения Проекта составляет три года.

### 3.1.1. Краткий SWOT- анализ варианта с ремонтом ЭГ-5.

**Сильные стороны обновленного ЭГ-5.** На фоне обновления и расширения приборной инфраструктуры (установка нового комплекса ионно-лучевых спектрометров, монтаж лаборатории для

формирования объектов исследования) и закладки кадрового потенциала, сильной стороной варианта обновленного ускорителя является:

- высокое качество ионного пучка (ток и фокусировка) достаточное для достижения цели проекта;
- ремонтпригодность и полная автономность ускорительного комплекса в течение длительного времени;
- низкая эксплуатационная стоимость установки ЭГ-5;
- повышение квалификации собственных инженерных кадров в процессе модернизации;
- (возможно, потребуется) развитие собственной технологической базы для обеспечения необходимых условий для модернизации, а также дальнейшего обслуживания ускорителя.

В ОИЯИ имеется вся необходимая производственная инфраструктура и материальная база (запчасти, жидкий азот, сервисные системы и т.д.), необходимые для поддержания своими силами работоспособности установки очень продолжительный период времени после замены трубки. ЭГ-5 не требует использования дорогостоящих материалов и оборудования, не содержит узлов с неизвестными параметрами (программируемые микропроцессорные модули системы управления сервисным оборудованием и т.д.), не требует для проведения ремонтов и сервисных работ приглашения иностранных специалистов.

Данный вариант решения основной задачи является менее затратным в финансовом плане.

**Слабые стороны обновленного ЭГ-5.** По сравнению с современными промышленными образцами ускорителей обновленный ЭГ – 5 имеет ограниченный набор функций, преобладающая часть регулировок осуществляется в ручном режиме.

**Основные риски, которые могут повлечь невыполнение поставленных задач в срок или недостижение требуемых технических параметров ускорителем** могут быть связаны с:

- ошибками при проектировании трубки на заводе – изготовителе;
- ошибками при установке новой трубки;
- несоответствием технических условий, обеспечиваемых сервисными системами ЭГ-5, техническим условиям, необходимым для эксплуатации новой ускорительной трубки (требования по вакууму, параметрам диэлектрического газа и др.);
- наличием дополнительных неисправностей в ускорителе помимо потери параметров ускорительной трубкой.

### **3.2. Вариант с покупкой нового ускорителя.**

Решение задачи 1 путем приобретения нового ускорителя предполагает проведение следующих мероприятий – технических проектов:

- демонтаж ускорителя ЭГ-5 (в случае использования помещений ЭГ-5);
- капитальный ремонт с переделкой технологических помещений / возведение нового помещения;
- установку нового ускорителя и соответствующих сервисных систем, обучение персонала правилам эксплуатации и техническому обслуживанию нового ускорителя.

**Ценовая политика производителей ускорительной техники.** Цена ускорительной техники находится в пределах от \$1млрд (1ГэВ, Европейский Расщепительный Источник (European Spallation Source — ESS) [7]) до \$1млн (Pelletron 6SDH, NEC). В своей нише компактных, дешевых в строительстве и в эксплуатации систем и установок, позволяющих генерировать пучки заряженных и вторичных нейтральных частиц, а так же, вызывать ядерные реакции, электростатические ускорители типа ЭГ-5 имеют наиболее низкую стоимость. Цена ускорителей с энергией ускоренных частиц 3 – 5МэВ (линейные электростатические ускорители типа Ван-де-Граафа, Тандетроны и др.) в среднем находится в пределах 1- \$10млн. Для грубой оценки стоимости нового ускорителя С применима формула:

$$C = \$1000\ 000 \times V, \text{ где} \quad (1)$$

V – максимальная энергия ускоряемых частиц. Соответственно, расчетная стоимость нового ускорителя класса ЭГ-5 будет порядка \$4-5млн.

### **Сравнительный анализ технических параметров ЭГ-5 и новых ускорителей того же класса.**

Задачи получения большой мощности пучка для получения быстрых нейтронов и его хорошей

фокусировки (до 0,1 мм), необходимой для работы микропучкового спектрометра с позиций проектирования современной ускорительной техники являются плохо совместимыми.

В современных ускорителях для увеличения энергии ускоряемых частиц при одновременном, снижении массогабаритных характеристик и удешевлении конструкции ускорителей применяется принцип перезарядки, предложенный У. Х. Беннеттом (США) в 1935. [8]. Использование перезарядки позволяет при том же напряжении генератора увеличить энергию протонов вдвое, а энергию более тяжелых частиц в несколько раз. Так называемые тандемные системы формируют мощные (1,3 мА Tandetron (HVE) 3MV Tandetron 4130 MC+(HC)) пучки, способные «разгонять» до высоких широкий спектр химических элементов, включая Au, Cu, Ni и т.д, однако такие системы принципиально не могут сформировать узконаправленный пучок (менее 2мм), требуемый для создания микропучкового спектрометра. Для такой задачи лучше подходит мощный одноступенчатый электростатический ускоритель, например, ЭГ-5 или Singletron (HVE) с относительно высоким (свыше 4MV) напряжением на кондукторе. Такие ускорители способны формировать узконаправленные пучки при максимальном токе пучка до 100 мкА. Таким образом, достигается компромисс между подзадачами установки микропучкового спектрометра и генерации нейтронов. Новые ускорители полностью автоматизированы и более функциональны, в частности, допускают импульсный режим, быстро перестраиваются на различные режимы по вольтажу и мощности. В таблице 4 представлены предельные электрические параметры и функциональные возможности приборов класса ЭГ-5, рекомендованные к приобретению представителями фирм NEC и HVE.

**Таблица 4.**

Предельные технические параметры и функциональные возможности модернизированного ускорителя ЭГ – 5 и наиболее близких аналогов, предложенных фирмами NEC и HVE.

<b>EG-5 after modernization</b>	<b>Singletron (HVE)</b>	<b>Tandetron (HVE) 3MV Tandetron 4130 MC+(HC)</b>	<b>Pelletron - tandem (NEC) 6SDH</b>
Terminal voltage - <b>4,1 MeV</b>	Terminal voltage – <b>3.5 MV</b> or <b>5.0 MV</b>	Terminal voltage - <b>3,3 MV</b>	Terminal voltage - <b>2 MV</b>
Beam ion current – <b>50-100mkA</b>	Beam ion current – <b>100 mkA</b> (Short bottle RF ion source) - 200 мкА (Long bottle RF ion source)	Beam ion current - <b>1300mkA</b>	Beam ion current – <b>50mkA</b>
Ion beam energies: <b><sup>1</sup>H<sup>+</sup> - 4.0 MeV</b>	Ion beam energies: <b><sup>1</sup>H<sup>+</sup> - 4.0 MeV</b>	Ion beam energies: <b><sup>1</sup>H<sup>+</sup> – 4.0 MeV</b>	Ion beam energies: <b><sup>1</sup>H<sup>+</sup> – 4.0 MeV</b>
Terminal Voltage stability: <b>±600V;</b> With sit stabilisation: <b>±50V (manual mode);</b>	Terminal Voltage stability: <b>±500V;</b> With sit stabilisation: <b>±30V</b>	Terminal Voltage stability: <b>±400V;</b> With sit stabilisation: <b>±30V;</b>	Terminal Voltage stability: <i>no data;</i> With sit stabilisation: <i>no data;</i>
Terminal Voltage ripple: 1000V; Whith tde-rippling kit 350V;	Terminal Voltage ripple: <b>1000V;</b> Whith tde-rippling kit: <b>350V;</b>	Terminal Voltage ripple: <b>300V;</b> Whith tde-rippling kit: <b>50V;</b>	Terminal Voltage ripple: 200V; Whith tde-rippling kit: <i>no data;</i>
Pulse regime: <b>missing;</b>	Pulse regime: <b>present;</b>	Pulse regime: <b>present;</b>	Pulse regime: <b>present;</b>
The ability to accelerate heavy ions: <b>missing;</b>	The ability to accelerate heavy ions: <b>present;</b>	The ability to accelerate heavy ions: <b>present;</b>	The ability to accelerate heavy ions: <b>present;</b>
The ability to accelerate negative ions: <b>missing.</b> Minimal beam size: 0,1mm;	The ability to accelerate negative ions: <b>missing.</b> Minimal beam size: 0,1mm;	The ability to accelerate negative ions: <b>present.</b> Minimal beam size 2mm;	The ability to accelerate negative ions: <b>present.</b> Minimal beam size: 2mm;
Nuclear physics experiments conducting - <b>possible;</b> Microbeam – <b>possible;</b> NRA (3,1 MeV) - <b>possible.</b>	Nuclear physics experiments conducting - <b>possible;</b> Microbeam – <b>possible;</b> NRA (3,1 MeV) - <b>possible.</b>	Nuclear physics experiments conducting - <b>possible;</b> Microbeam – <b>possible;</b> NRA (3,1 MeV) - <b>possible.</b>	Nuclear physics experiments conducting - <b>possible;</b> Microbeam – <b>possible;</b> NRA (3,1 MeV) - <b>possible..</b>
Work with biological objects – <b>possible.</b>			
Cost (thousand dollars) : <b>400</b>	Cost: (thousand dollars): 4000-5000*	Cost: (thousand dollars):: <b>4300</b>	Cost (thousand dollars): <b>1000</b>

\*Оценочная стоимость рассчитана по формуле 1. Коммерческое предложение фирма не предоставила.

Из таблицы 4, следует, что наиболее подходящими для решения задачи 1 приборами (по техническим параметрам) является ЭГ-5 и ускоритель **Singletron** производства компании HV Europe BV с максимальным напряжением на кондукторе 3,5MV или 5MV. Повышение энергии свыше предельного для ЭГ-5 (4,1МэВ), позволит расширить доступный диапазон энергий быстрых нейтронов.

**Оценочная стоимость проекта при решении задачи 1** путем ремонта ускорителя ЭГ-5 приведена в табл. 5.

**Таблица 5.**

Смета основных затрат на решение задачи 1 путем покупки нового ускорителя.

	<i>Stage</i>	<i>Period</i>	<i>Cost, (thousand US dollars)</i>
1	Major overhaul / new building of the accelerator tower premise	2020-2021	\$ 300
	<u>Accelerator purchase</u>	2021	\$ 4000 000
3	Modernization of research infrastructure EG-5.		
	Spectroscopic ellipsometer SER 800 SENresearch 4.0;	2021	\$168
	Installation of a complex of spectrometers RBS "Endstation RC43".	2021-2022	\$ 628
4	Installation of a laboratory for the research samples preparation	2021-2022	\$ 50
	Total		\$ 5 146 000

Как видно из табл. 5, даже если не проводить мероприятия по модернизации приборной базы ускорительного комплекса, большая часть суммы (4 300 000 из 5 200 000) тратится на закупку ускорителя и ремонт / постройку помещения для него.

Оценочная стоимость проекта модернизации составляет около \$1 700тыс / год. Срок выполнения Проекта составляет три года.

### **3.2.1 Краткий SWOT - анализ варианта с закупкой нового ускорителя**

**Сильные стороны варианта с покупкой нового ускорителя.** Новый ускоритель имеет ряд новых возможностей, в частности, имеет опцию автоматической стабилизации геометрического положения пучка, что в ЭГ – 5 реализуется в ручном режиме. Эта опция крайне важна для микропучкового спектрометра.

Ускоритель опционально может быть укомплектован ионным источником, допускающим инжекцию тяжелых ионов.

Новый прибор имеет существенно меньшие, чем ЭГ – 5 габариты, требует меньшее количество обслуживающего персонала.

При покупке нового ускорителя исчезают риски несовместимости новой трубки с сервисными системами ЭГ-5 и др.

Новый прибор состоит из новых деталей и блоков, имеющих невыработанный ресурс и, следовательно, более низкую вероятность отказов, чем в ЭГ-5.

Компания – производитель планирует дистанционно консультировать обслуживающий персонал ускорителя при устранении неисправностей и контролировать состояние ускорителя в течение всего срока эксплуатации.

Увеличение энергии пучка (до 6 МэВ) по сравнению с имеющимся в ЭГ-5, позволит расширить диапазон ядерно-физических исследований

Покупка нового ускорителя будет сопровождаться постройкой специализированного помещения, в котором будут предусмотрены конструктивно условия для подавления отраженных нейтронных потоков, что позволит повысить точность и безопасность экспериментов с быстрыми нейтронами.

**Слабые стороны варианта с покупкой нового ускорителя.** Новый прибор состоит из сложных высокотехнологичных элементов, не подлежащих ремонту силами технического персонала ЭГ-5. Для ремонта потребуются вызывать специалистов фирмы производителя. Таким образом, ЛНФ попадает в зависимость от производителя и его сервисных центров. Фирма NEC как опцию, предлагает фирменное обслуживание прибора не менее 10-20 тыс. долларов в год. Можно предположить, что примерно такая сумма будет требоваться ежегодно в среднем на техобслуживание ускорителя с привлечением

специалистов из сервисных центров фирм производителей.

В РФ отсутствует база комплектующих и расходных материалов, необходимая для ремонта устранимых дефектов. Детали придется заказывать на заводе-производителе. На поставки может повлиять политическая ситуация в мире. Завод изготовитель производит детали на старые модели не более 20 лет, после чего детали, на которые не удастся найти современные аналоги, нужно будет делать под заказ за большие деньги.

Новый ускоритель имеет горизонтальную конструкцию, что приведет к серьезным переделкам помещений ЭГ – 5 (в случае, его установки на место ЭГ-5) и существенному удорожанию ремонтных и строительных работ.

В отличие от ЭГ-5 новый прибор критичен к температуре влажности и чистоте окружающего воздуха, что потребует покупку мощного кондиционера и организации «чистого» помещения, и как следствие, дополнительных затрат.

#### 4. Заключение

На современном этапе НТР существует широкий спектр актуальных научных задач, решаемых с использованием спектрометров ускорительного комплекса на основе линейных электростатических ускорителей с энергией ускоренных частиц до 5МэВ.

Модернизация электростатического ускорителя ЭГ-5 и его приборной инфраструктуры позволит решить ряд задач из Проблемно-тематического плана ОИЯИ (тема 03-4-1128-2017/2022 «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств нейтронов»). В частности, обеспечит проведение исследований в ОИЯИ реакций с быстрыми квазиодноэнергетическими нейтронами, возможность работы с биологическими объектами.

Кроме того, будет подготовлена база для реализации проекта микропучкового спектрометра, повышена производительность имеющихся методов (RBS, ERDA, NRA, PIXE) и существенно расширен их спектр за счет современных методик HR RBS, Proton Induced Gamma Emission (PIGE), Ion Beam Induced Luminescence. Экспериментальная база будет дополнена нелучевыми комплементарными методами исследования электрических, оптических и электронных свойств поверхности (эллипсометрия, импедансная спектроскопия). Будет установлена лаборатория для получения широкого спектра исследуемых объектов, включая порошковые. Переоснащение экспериментальной части современным автоматизированным оборудованием позволит осуществить переход комплекса на круглосуточный режим работы.

Модернизированный ускоритель позволит получать энергии до 4,1 МэВ при токе пучка до 100 мкА / нуклон, а его экспериментальная база будет иметь стандартный для мировой практики интерфейс платформы Beam Analysis (IBA) Endstation System.

Реализацию данного проекта в масштабе ОИЯИ следует рассматривать как подготовительный, но обязательный этап развития ускорительного комплекса. ОИЯИ, как международный ядерный научный центр должен обеспечить возможность решения научных задач на высоком техническом уровне широкому кругу исследователей из стран участниц. Широкий спектр актуальных научных задач свидетельствует о необходимости приобретения в перспективе дополнительно нового современного электростатического ускорителя с энергией ускоряемых частиц порядка 5 МэВ и выше, что соответствует концепции Семилетнего плана развития ОИЯИ на 2017 – 2023 гг., предусматривающей концентрацию ресурсов для обновления ускорительной и реакторной базы Института [9].

#### 5. Список использованных литературных источников

---

1 Интернет – ресурс: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/trans.htm>.

2 Интернет – ресурс: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188315>.

3 Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / Под ред. В. И. Сергиенко. — М.: Наука, 2006. — 490 с.

4 Комаров Ф.Ф., Кумахо М..А., Ташлыков И.С. Неразрушающий анализ поверхности твердых тел ионными пучками. Мн.: - Университетское.1986, - 256с.

---

5 Ташлыкова-Бушкевич И.И. Метод Резерфордского обратного рассеяния при анализе твердых тел. Учебно-методическое пособие. Мн.: БГУИР, 2003. – 52с.

6 Интернет – ресурс: [http://www.jinr.ru/jinr\\_facilities/](http://www.jinr.ru/jinr_facilities/).

7 Интернет – ресурс: <https://habr.com/ru/post/389279/>.

8 Интернет – ресурс: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/tech/byId/description/292/index.html>.

9 Интернет – ресурс: [http://www.jinr.ru/jinr\\_facilities/](http://www.jinr.ru/jinr_facilities/).