

ПРОЕКТ

**МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Тема: «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств нейтрона»

Шифр темы: 03-4-1128-2017/2022

Авторы проекта:

Дорошкевич А.С.	г. Дубна, ОИЯИ
Лычагин Е.В.	г. Дубна, ОИЯИ
Швецов В.Н.	г. Дубна, ОИЯИ

Руководитель проекта: Дорошкевич А.С.

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО 15.11.2020

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ 19.11.2020 НОМЕР ДОКУМЕНТА 22

ДАТА УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА _____.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА**МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ****ТЕМА:** «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств
нейтрона»**ШИФР ТЕМЫ:** 03-4-1128-2017/2022

		ПОДПИСЬ	ДАТА
УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ			«___»_____2020
СОГЛАСОВАНО			
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ	Р. Ледницки		«___»_____2020
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ	А.С. Сорин		«___»_____2020
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	Б.Н. Гикал		«___»_____2020
НАЧАЛЬНИК НОО	Н.И. Сисакян		«___»_____2020
ДИРЕКТОР ЛНФ	В.Н Швецов		«___»_____2020
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛНФ	А.В. Виноградов		«___»_____2020
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	А.С. Дорошкевич		«___»_____2020
ОДОБРЕН			
ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ			«___»_____2020

Краткая аннотация проекта

Проект направлен на модернизацию высоковольтной части электростатического ускорителя заряженных частиц ЭГ-5 и соответствующих сервисных систем, развитие экспериментальных методик, использующих высокоэнергетические потоки частиц для определения элементного состава приповерхностных слоев твердых тел.

Целью проекта является выполнение научной программы по исследованию процессов взаимодействия высокоэнергетических частиц с веществом в рамках Дорожной карты ОИЯИ и Проблемно тематического плана (ПТП) ОИЯИ.

Задачи проекта. Главной технической задачей Проекта является восстановление технологических параметров ускорителя ЭГ-5: Энергия ускоренных частиц; 4,1 МэВ/ядро при токе ионного пучка: 50-100мкА; получение потока нейтронов, достаточного для проведения ядерно-физических экспериментов с быстрыми нейтронами и энергетической стабильности ионного пучка, достаточной для создания микропучкового спектрометра / ядерного микрозонда.

В задачи проекта, так же входит создание производственной инфраструктуры, способной обеспечить бесперебойную работу Ускорителя в течение 20 лет, включая, закладку кадрового потенциала, интенсификацию международного научно – технического сотрудничества, организацию юзерской политики, образование на базе ЛНФ ОИЯИ центра компетенции в области техники электростатических ускорителей и сопряженной с ней методологической базы.

Актуальность проекта продиктована востребованностью данной установки в составе научно-технической инфраструктуры ЛНФ ОИЯИ, в частности, необходимостью возобновления исследований ядерных реакций с быстрыми нейтронами, необходимостью реализации на ускорителе ЭГ-5 уникальной опции – микропучкового спектрометра (ядерного микрозонда), необходимостью проведения прочих ядерно-физических экспериментов. Ввод в эксплуатацию на номинальной мощности ускорителя позволит увеличить объем проводимых в ЛНФ научных исследований в рамках Дорожной карты ОИЯИ и ПТП ОИЯИ, обеспечит возможность осуществления юзерской политики на установке ЭГ-5.

Пути решения задач. Для решения поставленных задач и достижения цели Проекта в составе сектора СИНЯВ ОЯФ создана отдельная группа «Установка ЭГ-5», включающая ведущих специалистов в области ионно-лучевых методов исследования твердых тел (Др. А.П. Кобзев, Др. М. Кулик), разработки ускорительной техники (проф. Романов В.А.), молодых сотрудников – студентов и высококлассных инженерно – технических работников. В настоящий момент проводится обучение молодых сотрудников навыкам работы с ускорителем и элементами его экспериментальной инфраструктуры.

При участии специалистов компании High Voltage Engineering Europa B.V. планируется провести замену утратившей рабочие характеристики высоковольтной ускорительной трубки, источника ионов и квадрупольной линзы, что позволит получить требуемые технические параметры ускорителя. В процессе реализации проекта будет проведен косметический ремонт помещений ускорителя и выполнен определенный объем работ по созданию новой лаборатории для приготовления объектов исследования.

Предполагается организация круглосуточной работы ускорителя и создание устойчивой колаборации с партнерами в РФ, ближнего и дальнего зарубежья, увеличение выхода научной продукции ЛНФ ОИЯИ.

Оценочная стоимость проекта модернизации составляет \$471 тыс. Срок выполнения Проекта составляет 1 год.

Содержание

Приложение 1 Титульный лист (Форма № 24).....	1
Приложение 2 Лист согласований проекта (Форма № 25).....	2
Краткая аннотация проекта	3
Содержание	4
1. Введение.....	5
1.1. Научная программа группы ЭГ-5.....	5
1.2. Уникальные возможности ускорителя.....	6
1.3. Проблематика проекта.....	7
1.4. Задачи проекта и мероприятия, предполагаемые к проведению для их решения.....	7
2. Ожидаемые результаты.....	8
3. Состояние исследований по заявленной научной проблеме.....	9
3.1. Имеющийся задел.....	9
3.2. Описание современного состояния научно-технологической проблемы.....	10
3.3. Потенциально возможный альтернативный путь достижения заявленной в проекте цели....	11
3.4. Краткий SWOT - анализ варианта с закупкой нового ускорителя.....	12
3.5. Пояснение, почему должен быть открыт данный Проект и описание задач, остающихся нерешенными в рамках уже ведущихся исследований.....	13
4. Описание предлагаемого исследования / Описание хода работ.....	14
4.1. Этапы работ (в хронологической последовательности).....	14
4.2. Пути решения задач.....	16
5. Оценка кадровых ресурсов.....	24
6. Оценка бюджета Проекта.....	25
7. Краткий ССВУ - анализ проекта.....	25
7.1. Сильные стороны проекта.....	25
7.2. Слабые стороны проекта.....	26
7.3. Основные риски.....	26
Заключение.....	26
Литература.....	27
Приложение 3. Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта (Форма № 26).....	28
Приложение 4 Смета затрат по проекту (Форма № 29)	29
Приложение 5. Коммерческое предложение фирмы HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.....	30
Приложение 6. Сметная стоимость и описание основных мероприятий, планируемых к выполнению в рамках проекта модернизации ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальной инфраструктуры в рамках темы «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств нейтрона» с финансированием в рамках бюджета текущего 7-летнего плана развития ОИЯИ в 2021 - 2022гг и в рамках продленной текущей или новой темы по физике нейтронов в 2023- 2024гг.....	42
Приложение 7. Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта (Форма № 26 на срок выполнения 3 года).....	43
Приложение 8. Смета затрат по проекту на 3 года.....	44

1. Введение

Обоснования значимости исследований

Тематический план исследований в ЛНФ, связанных с ускорителем ЭГ-5 (сектор востребованности ускорителя ЭГ-5). 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. Требуются 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 твердотельных объектов (в том числе, объекты микроскопического масштаба, предметы исторического наследия) на микроскопическом масштабном уровне, проводить ионное легирование микроскопических областей в полупроводниковых кристаллах (наноэлектроника 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 (ЭСУ).

1.1. Научная программа группы ЭГ-5. В ПТП ОИЯИ сформулировано три основных направления, которые мы планируем развивать с использованием электростатического ускорителя.

1. Ядерная физика. (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. Физика конденсированного состояния.

3. Прикладные и методические исследования (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 деления быстрыми нейтронами: измерения спектров *мгновенных нейтронов деления* (МНД) и полных кинетических энергий (ТКЕ) в реакциях $^{235}\text{U}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,f)$, $^{237}\text{Np}(n,f)$ в области энергий нейтронов 1-5МэВ/ядро;
- исследование множественности МНД в этих реакциях на быстрых нейтронах в геометрии с высокой эффективностью регистрации МНД;
- измерение спектров заряженных частиц из реакций (n,α) и (n,p) в зависимости от энергии нейтронов в области до 5 МэВ и выше;
- измерение интегрального и дифференциального сечений этих реакций в зависимости от энергии нейтронов;
- исследование спектра и угловых распределений заряженных частиц при энергии нейтронов ~20МэВ с целью изучения нестатистических эффектов;
- изучение реакций (α, n) и (p, n) в сочетании, соответственно, с реакциями (n, α) и (n,p) ;
- исследование упругого и неупругого рассеяния быстрых нейтронов атомными ядрами;
- использование методики TOF в импульсном режиме работы ускорителя ($f \sim 1 \text{ MHz}$, $dt \sim 1-10 \text{ ns}$).

Физика конденсированных сред. С использованием электростатического ускорителя запланированы исследования:

- глубинных элементных профилей приповерхностных слоев твердых тел (многослойные полупроводниковые архитектуры типа $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$, $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2 / \text{Si}$, GaAs и др.);
- процессов структурной релаксации поверхностных слоев твердых тел, сопровождающихся окислением или гидрогенизацией (металлические (Fe, Cu) и металл-оксидные (ZrO_2 , CuO, ZnO, SnO_2) твердые растворы - керамики и др)

- исследования кислородной подсистемы поверхностных слоев материалов по методу ядерных реакций ($E > 3,1 \text{ МэВ}$, NRA).

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

Методические исследования предполагают развитие методической и экспериментальной инфраструктуры, необходимой для проведения научных работ с использованием техники ЭСУ в рамках первых двух направлений.

1.2. Уникальные возможности ускорителя. Созданный на основе генератора Ван де Граафа электростатический ускоритель ЭГ-5 стационарно действует в ОЯФ ЛНФ с 1965 года. Благодаря относительной простоте и надежности конструкции а так же, характерным для одноступенчатых электростатических ускорителей уникальным параметрам ускоренного ионного пучка (высокая пространственная и энергетическая стабильность при относительно большом токе), ускоритель ЭГ-5 в настоящий момент безальтернативно остается наиболее эффективным и удобным ядерно-физическим инструментом для решения широкого спектра актуальных научных задач физики ядра, физики конденсированных сред, биологии, электроники, медицины. Относительно высокий ток ионного пучка (до 100 мкА) позволяет получать в результате облучения тритиевой мишени дейтронами (реакция $D(d,n)^3\text{He}$) широкий спектр нейтронов для ядерно-физических исследований в области энергий до 20 МэВ . Как видно из списка наиболее актуальных задач современной ядерной физики (Nuclear Data High Priority Request List, Табл. 1), данный диапазон энергий является наиболее востребованным в современных исследованиях физики ядра.

Таблица 1.

Список наиболее актуальных задач современной ядерной физики «Nuclear Data High Priority Request List» [2].

ID	View	Target	Reaction	Quantity	Energy range	Sec.E/Angle	Accuracy	Cov Field	Date
2H		8-O-16	(n,a),(n,abs)	SIG	2 MeV-20 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
3H		94-PU-239	(n,f)	prompt g	Thermal-Fast	$E_g=0-10 \text{ MeV}$	7.5	Y Fission	12-MAY-06
4H		92-U-235	(n,f)	prompt g	Thermal-Fast	$E_g=0-10 \text{ MeV}$	7.5	Y Fission	12-MAY-06
8H		1-H-2	(n,e1)	DA/DE	0.1 MeV-1 MeV	0-180 Deg	5	Y Fission	16-APR-07
15H		95-AM-241	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-Fast		See details	Fission	10-SEP-08
18H		92-U-238	(n,in1)	SIG	65 keV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fission	11-SEP-08
19H		94-PU-238	(n,f)	SIG	9 keV-6 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
21H		95-AM-241	(n,f)	SIG	180 keV-20 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
22H		95-AM-242M	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
25H		96-CM-244	(n,f)	SIG	65 keV-6 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
27H		96-CM-245	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
29H		11-NA-23	(n,in1)	SIG	0.5 MeV-1.3 MeV	Emis spec.	See details	Y Fission	12-SEP-08
32H		94-PU-239	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
33H		94-PU-241	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
34H		26-FE-56	(n,in1)	SIG	0.5 MeV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fission	12-SEP-08
35H		94-PU-241	(n,f)	SIG	0.5 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
37H		94-PU-240	(n,f)	SIG	0.5 keV-5 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
38H		94-PU-240	(n,f)	nubar	200 keV-2 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
39H		94-PU-242	(n,f)	SIG	200 keV-20 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
41H		82-PB-206	(n,in1)	SIG	0.5 MeV-6 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
42H		82-PB-207	(n,in1)	SIG	0.5 MeV-6 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
45H		19-K-39	(n,p),(n,np)	SIG	10 MeV-20 MeV		10	Y Fusion	11-JUL-17
97H		24-CR-50	(n,g)	SIG	1 keV-100 keV		8-10	Y Fission	05-FEB-18
98H		24-CR-53	(n,g)	SIG	1 keV-100 keV		8-10	Y Fission	05-FEB-18
99H		94-PU-239	(n,f)	nubar	Thermal-5 eV		1	Y Fission	12-APR-18
102H		64-GD-155	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-100 eV		4	Y Fission	09-MAY-18
103H		64-GD-157	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-100 eV		4	Y Fission	09-MAY-18
114H		83-BI-209	(n,g)Bi-210g,m	BR	500 eV-300 keV		10	Y ADS,Fission	09-NOV-18
115H		94-PU-239	(n,tot)	SIG	Thermal-5 eV		1	Y Fission	08-APR-19

Следует отметить, что эти задачи трудно и дорого решать на других типах нейтронных установок.

Исследования индуцированных нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц дают ценную информацию о механизмах протекания ядерных реакций и структуре атомного ядра, процессах звездного нуклеосинтеза и т.д.

Наиболее уникальное свойство одноступенчатого ускорителя – высокая энергетическая стабильность (свыше 0,01%) ионного пучка позволяет с очень высокой точностью проводить исследования элементного состава поверхностных слоев материалов и обуславливает возможность создания на основе ЭГ-5 уникального микропучкового спектрометра с диаметром пучка менее 1 мкм . Такие пучки не могут быть получены, например, на популярных сейчас перезарядных ускорителях -

тандетронах.

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.

С развитием нанотехнологий и приложений ядерной энергетики ежедневно расширяется спектр прикладных исследовательских задач для электростатических ускорительных комплексов типа ЭГ-5. Ионно-лучевой «микросонд» диаметром порядка 1 мкм существенно расширяет возможности ядерно-физических методов ЛНФ ОИЯИ в области естественных наук, незаменим при решении задач нанофизики и бионанотехнологии. Таким образом, ЭГ-5, в настоящий момент является единственным в ОИЯИ ускорителем, который по своим техническим возможностям потенциально подходит для решения современных научных задач экспериментальной ядерной физики, ядерной астрофизики (звездный нуклеосинтез) [3] и бионанотехнологий (обозначенных в ПТП ОИЯИ).

1.3. Проблематика проекта имеет и организационно – технический характер и связана с физическим износом основных узлов и систем установки, моральным старением научно-экспериментальной базы, утратой кооперационных связей и общим снижением эффективности работы группы, осуществляющей научное сопровождение ускорительной тематики в ЛНФ ОИЯИ.

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 50 мкА до 100 нА) привела к невозможности его использования для генерации нейтронов, изучения ядерных реакций 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 [4], предполагается реализация данного проекта по модернизации ускорителя ЭГ – 5 и его экспериментальной инфраструктуры.

1.4. Задачи проекта и мероприятия, предполагаемые к проведению для их решения.

Задача 1. Главной технической задачей проекта является достижение технологических параметров ускорителем ЭГ-5: напряжения на кондукторе 4,1 МВ при токе пучка до 100 мкА. (Задача 1).

В качестве подзадачи 1.1 следует отметить ремонт помещений, в которых находятся системы ускорительного комплекса (зал ускорителя, правый и левый экспериментальные залы). Обеспечение достаточно высокого уровня чистоты в помещениях (хотя бы класс ISO-9) при условии кондиционирования воздуха в помещениях позволит повысить примерно до 20% напряжение на кондукторе ускорителя и энергию ускоряемых частиц.

Подзадача 1.2. включает в себя комплексную проверку, чистку и ремонт элементов высоковольтной структуры и оборудования, обеспечивающего высокое напряжение на кондукторе ускорителя.

Следует отметить, что обеспечение надлежащего уровня безопасности работы с ускорителем и элементами его инфраструктуры так же является подзадачей (подзадача 1.3.) первой задачи.

Задача 2. Не менее важной задачей является **развитие экспериментальной инфраструктуры** ускорительного комплекса, что позволит максимально использовать его производственный потенциал, чем повысить выход научной продукции и расширить область применимости имеющихся исследовательских методов (**Задача 2**).

Подзадача 2.1. – проверка работоспособности и приведение в надлежащее функциональное состояние всех узлов и систем ускорителя. В качестве подзадачи 2.2. следует отметить автоматизацию и модернизацию функциональных узлов и сервисных систем ускорителя. Необходимость выполнения этой задачи диктуется необходимостью повышения степени контроля и удержания параметров пучка. В частности, для планируемого к установке микропучкового спектрометра требуется обеспечить высокую степень не только энергетической, но и пространственной стабилизации пучка, для чего необходима автоматизация системы позиционирования пучка с прецизионной точностью.

RBS–камера. 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 (**подзадача 2.3.**). В настоящий момент на стадии рассмотрения коммерческое предложение на покупку модуля RC43, 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.

Лаборатория для изготовления образцов. Предполагается монтаж новой лаборатории для формирования монолитных объектов из порошковых материалов (подзадача 2.4.). Лаборатория предназначена для выполнения работ по подготовке экспериментальных образцов в виде монолитных объектов, тонких и толстых пленок и из широкого спектра твердотельных материалов, включая порошковые, для исследований ядерно-физическими методами RBS, ERD и PIXE. Планируется оснастить новую лабораторию методиками, комплементарными ядерно-физическим методам исследования (подзадача 2.5.), в частности, методами исследования электрических, оптических и электронных свойств поверхности и приповерхностных слоев исследуемых 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.

Задача 3 (персонал) предполагает закладку кадрового потенциала, который обеспечит автономную работу ускорителя на наработку научной продукции в перспективе 20 – 30 лет. Предполагается обучение сотрудников ионно-лучевым методам исследования материалов и сервисному обслуживанию ускорителя (подзадача 3.1.), привлечении в группу и обучении молодых специалистов из числа студентов местных ВУЗов с хорошей успеваемостью, привлечение высококлассных специалистов по ускорительной технике, организация конференций и симпозиумов международного уровня на базе ЛНФ ОИЯИ, формирование центра квалификации в области ускорительной техники и сопряженных с ней экспериментальных методик (подзадача 3.2).

2. Ожидаемые результаты

В результате выполнения Проекта будут восстановлены технические параметры ускорителя (энергия ускоряемых частиц 4,1MeV при токе 100мкА, табл. 2.), что позволит проводить в ОИЯИ исследования реакций с быстрыми нейтронами, обеспечит технические условия для установки микропучкового спектрометра. Перечень основных возможностей ускорительного комплекса после выполнения проекта модернизации приведены в табл. 3.

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 not possible , - NRA (3,1 MeV) - not possible	- Nuclear physics experiments conducting is possible , - NRA (3,1 MeV) - possible
Microbeam option installing – not possible	Microbeam option installing – possible ;
Work with biological objects - not possible	Work with biological objects – possible

Таблица 3.

Возможности ускорительного комплекса до и после выполнения проекта модернизации.

Before modernization	After modernization
- Nuclear physics experiments - not possible - NRA (3,1 MeV) - not possible	Nuclear physics experiments - possible , - NRA (3,1 MeV) - possible .
Microbeam option installing – not possible	Microbeam option installing – possible ;

Work with biological objects - not possible	Work with biological objects - possible
The performance of EG-5 spectrometers: - 3 samples / per day, Methods: 1. Rutherford backscattering (RBS); 2. Elastic Recoil Detection (ERD); 3. Particle Induced X-Ray Emission (PIXE).	The performance of EG-5 spectrometers: - 32 samples / per day, Methods: 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).

Будет установлен новый современный высокопроизводительный ионно-лучевой исследовательский модуль RC43 фирмы NEC с расширенными возможностями (RBS высокого разрешения (High-resolution - HR RBS), Метод ядерных реакций (Nuclear Reaction Analysis - NRA), методы анализа спектров индуцированных ионным пучком гамма излучения (Proton Induced Gamma Emission - PIGE) и люминесценции (Ion Beam Induced Luminescence -IBIL). Будет создана новая специализированная лаборатория для подготовки объектов исследования, укомплектованная комплементарными методами исследования оптических и электронных свойств поверхности, как эллипсометрия, оптическая и электронная микроскопия, методиками исследования электрических свойств на постоянном и переменном токе (вольтамперометрия импедансметрия).

Кроме модернизации и расширения приборной базы ускорительного комплекса будет проведена закладка кадрового потенциала на ближайшие 20-30 лет.

Модернизация ЭГ-5 в ОИЯИ, где имеются высококвалифицированные специалисты, хорошая детектирующая аппаратура и ценные наработки по исследованию атомных ядер нейтронами, даст возможность проведения в краткосрочной перспективе ряда новых, уникальных экспериментов по измерению энергетических спектров и угловых распределений заряженных частиц из реакций (n , α) и (n , p) / (α , n) и (p , n) и интегрального и дифференциального сечений последних в интервале энергий нейтронов до ~20 МэВ, процессов деления атомных ядер быстрыми нейтронами, активационного анализа [5,6] и др.

3. Состояние исследований по заявленной научной проблеме

3.1. 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).

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.

Ремонт ускорителя, проведенная работа. Для решения задачи 1 руководством ЛНФ было проведено ряд мероприятий (консультационного характера), направленных на выявление причин потери ускорителем работоспособности и путей устранения выявленных технических проблем. По заказу ЛНФ группой экспертов из Института прикладной физики НАНУ (Сумы, Украина), специализирующейся на разработке ускорительной техники под руководством проф. А.Г. Пономарева была проведена научно-техническая работа «Анализ технического состояния и измерение параметров электростатического ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ», позволившая установить основные причины снижения эффективности работы ускорителя. Независимо, ведущим экспертом в области ЭСУ проф. Романовым В.А. (в настоящий момент - советник директора ЛНФ) по месту было проведено исследование режимов работы и технического состояния основных узлов ускорителя. Полученные рекомендации были положены в основу плана работ по ремонту ускорителя (задачи 1, 2).

Ядерный микрозонд. В 2015 году сотрудниками Института прикладной физики НАН Украины (г. Сумы) были выполнены расчетно-проектные работы на канал микрозонда (Устоявшийся термин Nuclear microprobe) на базе ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Конструкторская документация в полном объеме находится в ЛНФ.

Группа «Установка ЭГ-5». Для решения поставленных в проекте задач в составе сектора СИНЯВ ОЯФ в сентябре 2019г 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, Ткаченко С.В., Кудрявцев В.П. Зайцев И.А.) и молодых сотрудников – студентов и аспирантов университета Дубна (9 человек). В настоящий момент проводится обучение будущих специалистов особенностям работы приборов ускорительного комплекса. Организованы еженедельные лекции - семинары (М. Кулик) и индивидуальные практические занятия по методу RBS (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. С целью повышения уровня компетенции группы в технических вопросах на должность Советника директора ЛНФ принят ведущий специалист в области разработки ускорительной техники проф. Романов. Техническая часть группы усилена приходом двух молодых сотрудников на должности ведущего инженера и лаборанта с соответствующим распределением вакантных трудовых функций.

Международное научно-техническое сотрудничество. На момент 2020 г. в рамках темы № 03-4-1128-2017/2022 выиграно 9 проектов 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., (JINR - 2020; BSU) Order №246 / 2020 p.23.
2. Проект «The study by DLS and RBS methods of structures and elemental composition of surface layer of nanoparticles ZrO_2 under hydration conditions», Project, JINR – Romania - 2020, Order №268 / 20.05.2020, p.57, "UNIVERSITY "LUCIAN BLAGA" of SIBIU.
3. Проект «Development and characterization of magnetic nanosytructured systems for targeted cancer therapy by means of Nuclear Physical Methods», National Centre for Nano and Micromaterials. Project JINR – Romania - 2020, Order № 268 / 20.05.2020, p.63, University POLITEHNICA of Bucharest.
4. Проект «Investigation of the properties of deposited on different plastic substrates organic thin films after high-energy ion and neutron irradiation», Project, JINR -Romania - 2020, Order № 268 / 20.05.2020, p.59, "National Institute for Materials Physics (NIMP), Bucharest-Magurele.
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», Project, JINR - Republic of Poland - 2020, Order №75 from 03.02.2020, p.31, Institute of Physics" of UMKS, Lüblin.
6. Проект «The relationship among features of crystal and magnetic structures and physical properties of nanosized ferrites», Project, JINR -Romania - 2020, Order № 268 / 20.05/2020, p.58, "National Institute of Research and Development for Technical Physics (NIRDTP)" - IFT, Iasi.
7. Protocol No. 4890 4-20/22 JINR-CTU, Prague " Research and development to study the reactions induced by fast and thermal neutrons with the yield of charged particles".
8. Protocol №15.03.2005 JINR-PU, Beijing, China "Studies on the mechanism of interaction of neutrons with nuclei and on the properties of high excited nuclear states".
9. Agreement 11.11.2019 No. 313/1670-D "Experimental studies of the cross section of the reaction (n, α) on a number of isotopes for the national library of nuclear physical data "BROND".

3.2. Описание современного состояния научно-технологической проблемы. К сожалению, в настоящий момент в РФ и странах участницах ОИЯИ имеется всего один микропучковый спектрометр в г. Сарове [7] и не более пяти действующих ускорителей, пригодных для производства быстрых нейтронов [8], что существенно ограничивает исследовательские возможности в области современной радиационной биологии, медицины, физики конденсированного состояния и физики атомного ядра.

Реакции с быстрыми нейтронами. Из-за исчерпания технического ресурса ускорителя ЭГ-5 в настоящий момент в ОИЯИ практически остановлены или вынесены за границы РФ исследования реакций с квазимоноэнергетическими быстрыми нейтронами. Последние весомые результаты, указывающие на необходимость уточнения имеющихся представлений об основном источнике нейтронов в астрофизических процессах - реакции $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$, были получены группой под руководством профессора Ю.М. Гледенова на аналогичном ускорителе в Пекинском Университете [9]. В течение последних трех лет нашей группой на быстрых нейтронах были измерены сечения (n, α) –

реакций для элементов ^{144}Sm , ^{66}Zn , ^{10}B , ^{25}Mg , $^{54,56}\text{Fe}$, $^{58,60,61}\text{Ni}$ и в настоящий момент вместе с Обнинским «ГНЦ РФ – ФЭИ» ведутся работы над Российской библиотекой ядерных данных BROND по ряду ядер (^6Li , ^{14}N , ^{35}Cl , ^{91}Zr и ^{56}Fe).

Ионно-лучевая спектроскопия. С использованием установки ЭГ-5 на пучках ионов гелия в настоящий момент проводятся неразрушающие экспериментальные исследования глубинных профилей элементов с разрешением по глубине около 10 нанометров. Имеется уникальная возможность исследования слоистых структур. Для анализа используются неразрушающие методики RBS, ERD и PIXE, базирующиеся на пучках ионов гелия с энергиями от 1 до 3 МэВ / ядро. Проводятся исследования многослойных высокотемпературных сверхпроводниковых систем [10]. Кроме того, активно ведутся работы по исследованию процессов ионной имплантации поверхности твердых тел (GaAs , слоистых систем $\text{TiO}_2 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$, $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2 / \text{Si}$) ионами N^{2+} , Ar^+ , Xe^+ , Bi^+ , N^{2+} , Al^+ , In^+ и индуцированных облучением и последующим термическим отжигом (при температурах: 500°C , 700°C и 900°C) процессов структурной релаксации [11, 12], сопровождающейся окислением [13,14] или гидрогенизацией [15] поверхностных слоев.

Биологические исследования. В настоящий момент ввиду потери интенсивности потока частиц отсутствует возможность проведения ядерно-физических экспериментов, возможность работы с биологическими объектами. В частности, пробные эксперименты по облучению образцов крови нейтронами (d,d реакция) на ускорителе ЭГ-5 на расстоянии 1см от выхода, проводившиеся в мае 2018 г показали, неудовлетворительную для работы с биологическими объектами интенсивность. При токе пучка 0.1мкА/ч длительность облучения для накопления требуемой дозы 0.4 Гр заняла более 4ч, что оказалось неприемлемо и привело к гибели биологических образцов. Для проведения дальнейших работ с биологическими объектами предполагаемый ток пучка должен составлять не менее $i = 1\text{мкА/ч}$, энергия нейтронов $E_{\text{нейтронов}} \sim 5\text{ МэВ/ядро}$).

На грани срыва работы на спектрометрах RBS, ERD, PIXE ввиду потери стабильности пучка: ускоритель работает в предельных (минимальных), далеких от номинальных режимах, ввиду чего усиливаются процессы пространственной неустойчивости ионного пучка.

3.3. Потенциально возможный альтернативный путь достижения заявленной в проекте цели. Цель Проекта может быть достигнута путем приобретения нового ускорителя.

Сравнительный анализ технических параметров ЭГ-5 и новых ускорителей того же класса. Задачи получения большой мощности пучка для генерации быстрых нейтронов и его хорошей фокусировки (до 1 мкм), необходимой для работы микропучкового спектрометра с физических позиций являются сложно совместимыми при проектировании с использованием одного ускорительного устройства. Требуется получить одновременно и большой ток пучка и малый энергетический разброс, что обычно взаимоисключающие параметры.

В частности, 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. [16]. Использование перезарядки позволяет при том же напряжении генератора увеличить энергию протонов вдвое, а энергию более тяжелых частиц в несколько раз. Так называемые тандемные системы способны «разгонять» до высоких энергий широкий спектр химических элементов, включая Au , Cu , Ni и т.д., однако такие системы принципиально не могут сформировать узконаправленный пучок (менее 20мкм), требуемый для создания микропучкового спектрометра. Для такой задачи лучше подходит мощный одноступенчатый электростатический ускоритель, например, ЭГ-5 или Singletron (HVE) с относительно высоким (свыше 4МВ) 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 HV Europe BV.

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 3,5МВ или 5МВ. Можно видеть, что наряду с ускорителем ЭГ-5 по своим техническим возможностям подходят синглетроны с максимальным напряжением до 5-6МВ. Повышение энергии свыше предельного для ЭГ-5 (4,1МэВ), позволит расширить доступный диапазон энергий быстрых нейтронов.

Ценовая политика производителей ускорительной техники. Цена ускорительной техники находится в пределах от \$1млрд (1ГэВ, Европейский Расщепительный Источник (European Spallation Source — ESS) [17]) 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 – 5 МэВ (линейные электростатические ускорители типа Ван-де-Граафа, Тандетроны и др.) в среднем находится в пределах 1- \$10 млн. Для грубой оценки стоимости нового ускорителя С применима формула:

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

V – максимальная энергия ускоряемых частиц. Соответственно (1), расчетная стоимость нового ускорителя класса ЭГ-5 будет порядка \$4-5 млн.

Таблица 4.

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

EG-5 after modernization	Singletron (HVE)	Tandetron 4130) (HVE)	Pelletron 6SDH (NEC)
Terminal voltage - 4,1 MV Beam current – 50-100 mA Ion beam energies: 1H⁺ - 4.1 MeV Terminal voltage stability ±400V ; Pulsed mode: missing ; The ability of accelerating heavy ions: missing ; The ability of accelerating negative ions: missing .	Terminal voltage - 5.0 MV Beam ion current – 100mA (Short bottle RF ion source): 1H⁺ - 5.0 MeV Terminal voltage stability ±500V ; Pulsed mode: present ; The ability of accelerating heavy ions: present ; The ability of accelerating negative ions: missing .	Terminal voltage - 3,3 MV Beam ion current - 50mA Ion beam energies: 1H⁺ – 6.6 MeV Terminal voltage stability ±300V ; Pulsed mode: present ; The ability of accelerating heavy ions: present ; The ability of accelerating negative ions: present .	Terminal voltage - 2 MV Beam ion current – 50mA Ion beam energies: 1H⁺ – - 4.0 MeV Terminal voltage stability: ± 200;V Pulsed mode: present ; The ability of accelerating heavy ions: present ; The ability of accelerating negative ions: present ;
Nuclear physics experiments - possible ; Microbeam – 1mm ; NRA (3,1 MeV) - possible .	Nuclear physics experiments - possible ; Microbeam – 1mm ; NRA - possible .	Nuclear physics experiments - possible ; Microbeam – 20mm ; NRA - possible .	Nuclear physics experiments - possible ; Microbeam – 20mm ; NRA - possible ..
Work with biological objects – possible .	Work with biological objects – possible .	Work with biological objects – possible .	Work with biological objects – possible .
Cost: \$ 0,6 mln	Cost: \$ 4- 5mln*	Cost: 4,3 mln	Cost: 1 mln

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

3.4. 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. 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 конструкционно будут предусмотрены 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. 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 перепланировке 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 существенно критичен к температуре влажности и чистоте окружающего воздуха, что потребует покупку мощного кондиционера и организации «чистого» помещения, и как следствие, дополнительных затрат.

3.5. Пояснение, почему должен быть открыт данный Проект и описание задач, остающихся нерешенными в рамках уже ведущихся исследований. Ускоритель ионов работает с 1965 года и уже требуется его модернизация. Кроме того, в аспекте развития аналитических методик необходимо создание методики микропучковой спектрометрии, что позволит исследовать не только глубинные профили элементов в поверхностном слое твердотельных объектов, но и проводить сканирование по поверхности с высоким разрешением (соизмеримым с размером пучка ионов). Новую аналитическую методику следует создавать на базе уже модернизированного ускорителя. В России пока нет действующей методики.

Кроме того, высокоэнергетический пучок заряженных частиц после модернизации установки ЭГ-5 будет удовлетворять условиям для проведения экспериментальных работ в области физики ядра в 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;

Следует отметить, что исследование ядерных реакций с Плутонием крайне важны для разработки нового реактора, который перейдет на смену ИБР-2.

- Исследование счетных характеристик камеры деления в токовом и шумовом (Кеммбелла) режимах в применении к измерению времени жизни нейтрона на пучках ИБР2, ИРЕН, ЭГ-5;

Методика активационного анализа, как один из возможных новых методов может быть развита после модернизации ускорителя.

Исследование биологической эффективности излучений с разными физическими характеристиками является главной задачей ЛРБ ОИЯИ. Хромосомные aberrации - результат неотрепарированных или неправильно репарированных повреждений ДНК – являются наилучшим индикатором поглощенной дозы излучений. Мониторинг aberrаций хромосом в лимфоцитах крови человека является практически единственным надежным методом биодозиметрии человека и ускоритель ЭГ – 5 с диапазоном энергий до 20 МэВ/ядро является наилучшим источником ускоренных заряженных частиц.

Использование планируемого к установке на ЭГ-5 микропучкового спектрометра позволит существенно продвинуться в разработке новых функциональных материалов, приборов и технологий для ряда областей народного хозяйства, включая технологии высокотехнологичного здравоохранения, технологии производства функциональных продуктов питания, входящие в перечень задач приоритетного научно-технического развития РФ [18].

Ряд новых возможностей по исследованию влияния облучения потоками ускоренных частиц на биологические объекты, твердые тела и функциональные структуры на их основе открывается после модернизации ускорителя.

Перспективы взаимодействия с новыми научными группами из РФ, стран ближнего и дальнего зарубежья открываются после модернизации Ускорителя. В частности, польских коллег из Университета Щецина интересуют потоки нейтронов с энергиями 0.1-15 МэВ/ядро, обеспечивающих время набора максимальной дозы 0.1-2 Гр не более 2 ч. Есть интерес к работе с ЭГ – 5 у коллег из Университета Лиссабона (i3N/CENIMAT, Department of Materials Science, Faculty of Science and Technology, New University of Lisbon and CEMOP/UNINOVA, Portugal), Румынии (National Institute for

Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies, Cluj-Napoca, România) и др. Коллеги из Вьетнама, Азербайджана, Украины в настоящий момент работают в группе «Установка ЭГ-5», (соответственно, Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ, Киев, Украина; National Nuclear Research Center CJSC, Baku, Azerbaijan; и др.).

На ускорителе ЭГ – 5 планируются работы с Университетом Дубна по исследованию элементного состава тонкопленочных кестеритных фотоэлектронных преобразователей, с Белорусским Государственным Университетом – работы по исследованию новых полупроводниковых структур, способных работать в условиях сильного радиационного излучения, с болгарскими коллегами (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики ИЯИЯЕ БАН, Институт физики твердого тела БАН) по исследованию радиационно-стойких материалов, Донецким Республиканским Университетом, Лабораторией радиационной биологии и др. Таким образом, Использование возможностей имеющегося ускорителя ЭГ-5 в инфраструктуре ЛНФ ОИЯИ позволит существенно повысить выход научной продукции и увеличить количество международных кооперационных научных связей, чем усилить позиции ОИЯИ в международном научном сообществе.

4. Описание предлагаемого исследования / Описание хода работ

Исходя из экспертной оценки состояния ускорителя проф. В.А. Романовым и данным из отчета проф. А.Г. Пономарева (Сумы, Украина) по научно-технической работе «Анализ технического состояния и измерение параметров электростатического ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ» следует необходимость выполнения следующих мероприятий в процессе реализации проекта модернизации.

4.1. Этапы работ (в хронологической последовательности)

1. Проведение мероприятий для повышения безопасности работ с ускорителем.
 - 1.1. Покраска ионопровода в яркую краску.
 - 1.2. Установка защиты и сигнализации потенциально опасных мест в Зале ускорителя.
 - 1.3. Установка ограждений вокруг открытых технологических окон на съемной ремонтной площадке ускорителя.
2. Проведение мероприятий по повышению электрической прочности газовых сред ускорителя, включая воздух в помещениях.
 - 2.1. Ремонт и приведение служебных помещений ускорителя в соответствие санитарным нормам, обеспечение режима «Чистой зоны» (ISO-9).
 - 2.2. Установка входных фильтров от масла в систему подготовки диэлектрического газа.
 - 2.3. Добавление в азотную газовую смесь элегаза SF₆.
 - 2.4. Установка системы подачи газов с атомной осушкой. Достижение предела осушения 60%.
 - 2.5. Устранение утечек в баллонах / системе по изолирующему газу.
 - 2.6. Изготовление и установка перед камерой образца азотной ловушки для улавливания паров масла из системы.
 - 2.7. Переход на турбомолекулярные наносы.
 - 2.8. Ремонт компрессора / замена газокompрессорного оборудования для получения и осушения азота, обновление баллонов.
 - 2.9. Установка системы обработки и хранения элегаза.
3. Проверка работоспособности всех систем ускорителя, устранение факторов, ухудшающих качество работы установки (снижающих предельное напряжение и ток пучка, увеличивающих энергетический разброс), проведение подготовительных мероприятий к замене высоковольтной ускоряющей трубки.
 - 3.1. Ремонт полов, устранение наклона магнита анализатора. Компенсация отклонения пучка от горизонтали постоянными магнитами.
 - 3.2. Проверка соосности камеры магнитного анализатора с ионнопроводом.
 - 3.3. Проверка формы пучка на входе и на выходе ускорительной трубки.
 - 3.4. Изготовление и установка фокусирующей квадрупольной линзы для повышения эффективности прохождения пучка после измерительного магнита.
 - 3.5. Очистка поверхности высоковольтного терминала (области коронирующего триода), высоковольтных изоляторов колонны (градиентных колец) растворителем и плавиковой кислотой (для получения наименьшего коэффициента рекомбинации ионов H⁺).
 - 3.6. Очистка зарядной ленты.

- 3.7. Сглаживание перехода с малого диаметра экрана колонны на большой для нивелирования градиента поля и устранения пробоев.
 - 3.8. Усиление изоляции пружин, удерживающих трубку в колонне (посредством тефлоновых трубок).
 - 3.9. Регулировка (строго в одной плоскости) и частичная замена игл в коронирующем триоде.
 - 3.10. Регулировка зазора на разрядных щетках.
 - 3.11. Изменение конфигурации перезарядных щеток: разделение монолитных пластин на три секции, что позволит снизить давление на ленту и ее износ.
 - 3.12. Отжиг и полировка диафрагмы, формирующей и выравнивающей ионный пучок.
 - 3.13. Ревизия резисторов делителя с изменившимися в процессе эксплуатации номиналами. Замена резисторов на компенсирующем участке (5 секций после участка с прямыми полями).
 - 3.14. Тренировка источника высоким напряжением для получения хорошего тока.
 - 3.15. Установка внешней системы контроля размеров щелей, динамическое кольцо для подавления вторичных электронов и принудительное охлаждение в системе стабилизации энергии пучка.
 - 3.16. Оптимизация геометрии индукционной катушки источника ионов.
 - 3.17. Согласование ионной оптики источника ионов для согласования параметров пучка на выходе трубки.
4. Замена ускоряющей трубки совместно со специалистами фирмы ("High Voltage Engineering Europa B.V.").
- 4.1. Проведение испытаний, ввод ускорителя в штатный режим работы.
5. Ремонт в экспериментальных залах.
- 5.1. Косметический ремонт в левом экспериментальном зале.
 - 5.2. Установка пассивной системы подавления вибраций (плиты – основания для микропучкового спектрометра на песчаной подушке, развязанной механически от пола в зале спектрометров).
 - 5.3. Заделка гипсокартонном технологического прохода между залами, заполненного бетонными блоками (биологическая защита).
6. Монтаж железобетонного каркаса лаборатории для приготовления объектов для исследований ионно-лучевыми методами.
7. Разработка, изготовление и установка новой высокопроизводительной камеры для ионно-лучевых исследований материалов (RBS, ERD, PIXE).
8. Модернизация сервисного оборудования. Автоматизация узлов ускорителя, крайне важных для реализации функций микропучкового спектрометра и генератора квазимоноэнергетических нейтронов.
- 8.1. Автоматизация системы пространственной стабилизации положения пучка.
 - 8.2. Замена морально устаревших приборов на Пульте.
9. Подготовка персонала для работы на установке из числа молодых сотрудников, интенсификация международного сотрудничества, организация юзерской программы.
10. Укомплектование экспериментальной инфраструктуры комплементарными методами исследования поверхностных слоев материалов (электрические, электронные и оптические свойства).

Прочие мероприятия

- 11. Восстановление технической документации (КД) на ускорительную трубку.
- 12. Подготовка и подписание документов для включения ускорителя в список СЭС.

Дополнительные мероприятия (выполнение при наличии возможности)

- 13. Изготовление дополнительного вакуумного ввода в верхней части сосуда с ускоряющей трубкой (дифференциальной откачки колонны).
- 14. Монтаж лаборатории для приготовления объектов для исследований ионно-лучевыми методами (отделочные работы, монтаж коммуникаций и оборудования).
- 15. Закупка и установка ионно-лучевого модуля RC43 производства фирмы NEC.

16. Установка системы разведения и гомогенизации пучка на 200мм в диаметре (закупка в "High Voltage Engineering Europa B.V.").
17. Установка системы контроля координат пучка с документальной фиксацией.
18. Закупка комплекта запасных лент (в Ярославле, РФ).
19. Организация экспериментального участка для изготовления и испытания высоковольтных трубок. Доукомплектация участка для склейки трубки недостающим оборудованием, подготовка бокса для склейки трубки для проведения соответствующих работ.
20. Изготовление сверхстабильно ионного источника с энергетическим разбросом менее 10эВ с использованием имеющихся отечественных разработок. Рассмотрение возможности применения источника Пеннинга для работы в режиме нейтронного генератора, который позволяет получать пучок ионов He^{2+} , что в случае необходимости позволит повысить энергию пучка в 2 раза.
21. Замена ПВА в клеевых соединениях трубки мене «газящим» клеем.
22. Замена морально устаревших ламповых вакууметров полупроводниковыми аналогами.
23. Установка дистанционно управляемых мониторов контроля формы и тока пучка (цилиндр Фарадея), кварцевым экраном с фиксацией положения пучка, видеокамерой с возможностью визуального наблюдения за изображением и положением пучка на пульте.
24. Переход на дистанционно – управляемые вакуумные затворы с целью обеспечения аварийного отсечения ускорительной трубки (в автоматическом режиме) в случае появления течи в ионопроводах.
25. Поверка сосуда высокого давления и всех систем ЭСУ.
26. Замена кабелей силового электропитания и системы управления ускорителем ввиду окончания ресурса эксплуатации.
27. В источнике питания анализирующего магнита рекомендуется замена проточной системы охлаждения стационарной замкнутого цикла.
28. Разработка плана мероприятий (последовательности действий) согласно проекту ядерного микронзонда на базе ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ от 2015, выполненного сотрудниками Института прикладной физики НАН Украины.
29. Заказ в мастерских ЛНФ основных узлов установки согласно конструкторской документации на изготовления канала в ЛНФ.
30. Организация котлована, необходимого для проведения экспериментов с быстрыми нейтронами в правом экспериментальном зале.

4.2. Пути решения задач. Все мероприятия проекта будут выполняться поэтапно. Мероприятия п1 для повышения безопасности работ с ускорителем (Покраска ионопровода в яркую краску, установка защиты и сигнализации потенциально опасных мест в Зале ускорителя, установка ограждений вокруг открытых технологических окон на съемной ремонтной площадке ускорителя) будут проведены в первоочередном порядке.

4.2.1 Задача 1. Для решения задачи 1 предполагается проведение комплекса мероприятий включающих:

- замену высоковольтной ускоряющей трубки;
- ремонт служебных помещений;
- ревизию высоковольтной структуры, модернизацию сервисных систем ускорителя (вакуумного хозяйства (переход на безмасляную откачку); газокompрессорного оборудования, электронных систем (замена морально устаревших приборов) и др.

Мероприятия п.2. по повышению электрической прочности газовых сред ускорителя необходимы для обеспечения условий долговременной работы новой ускоряющей трубки при номинальном напряжении на кондукторе и токе ионного пучка. В частности, чистота воздуха в помещении ускорителя и чистота изолирующего газа дает увеличение эффективности по величине напряжения до 20%). Поэтому мероприятия 2.1 – 2.8 должны быть проведены до поставки высоковольтной трубки фирмой «High Voltage Engineering Europa B.V.». В противном случае поверхности новой высоковольтной трубки будут загрязнены с внешней стороны содержащимися в атмосфере частицами пыли и парами масла из вакуумной магистрали с внутренней стороны при первом же включении. Это не позволит достичь ускорителем требуемых технических параметров и существенно ускорит старение и разрушение конструктивных элементов новой трубки. С большой вероятностью, при несоблюдении требований по чистоте газовых сред, в которых будет работать ВВ - трубка, поставщики сократят срок ее гарантийного обслуживания.

По п.2.1. предполагается проведение ремонта помещений ускорителя до их соответствия классу чистоты ISO-9. Будут проведены мероприятия, направленные на удаление паров масла от газокompрессорного и вакуумного оборудования путем установки масляных фильтров, осушителей газов в первом случае, и азотных ловушек и турбомолекулярных насосов вместо паромасляных, (п.2.7.), соответственно – во втором. Кроме того, диэлектрическая проницаемость газовой среды с внешней стороны ВВ-трубки будет повышена до требуемого значения (задается производителями

ВВ-трубки) путем добавления дорогостоящего диэлектрического «элегаза» SF₆. Работа с дорогостоящим элегазом потребует проведения дополнительных работ по организации мест его хранения, устранения утечек в магистралях, по которым осуществляется его транспортировка. Пятиокись фосфора P₂O₅ планируется использовать для осушения диэлектрического газа (пп.2.2 - 2.6). Будет проведена заливка поверхности полов в помещениях ускорителя специальной полимерной эмалью на основе эпоксидной смолы, проведена окраска стен масляной краской, установка локальной системы термостабилизации воздуха в помещениях ускорителя, проведена ревизия системы вентиляции (п.2.1).

Перед установкой новой ВВ-трубки (после демонтажа старой) будет проведена ревизия и очистка поверхности высоковольтного терминала (области коронирующего триода), высоковольтных изоляторов колонны (градиентных колец) растворителем и плавиковой кислотой для получения наименьшего коэффициента рекомбинации H⁺ (п.3.5.).

Сглаживание перехода с малого диаметра экрана колонны на большой для нивелирования градиента поля и устранения пробоев (Мероприятие п.3.7) будет проведено перед чисткой изоляторов. Потребуется оформить заказ в мастерские. Усиление изоляции пружин, удерживающих трубку в колонне посредством тефлоновых трубок (Мероприятия п.3.8) будет проведено после монтажа новой трубки.

После сборки колонны с установленной трубкой будет проведена тренировка источника высоким напряжением для получения хорошего тока (Мероприятие 3.14). Возможность применения источника Пеннинга, который позволяет получать пучок ионов He²⁺, что в случае необходимости позволит удвоить энергию пучка (мероприятие 3.18) будет рассмотрен отдельно, по мере исследования работы нового источника, поставленного фирмой «High Voltage Engineering Europa B.V.».

Ремонт компрессора / замена газокompрессорного оборудования для получения и осушения азота, обновление баллонов, установка системы обработки и хранения элегаза (мероприятия п. 2.8 и п. 2.9.) будут проведены в рамках текущего сервисного обслуживания технической инфраструктуры ускорителя.

Замена высоковольтной трубки. В целях гарантированного получения результата к концу выполнения проекта (1 год) был предложен вариант покупки высоковольтной трубки в специализированной фирме («High Voltage Engineering Europa B.V.») с условием установки и проведения пуско-наладочных работ фирмой – производителем а, так же с условием гарантийного обслуживания трубки в течение гарантийного срока эксплуатации. В целях реализации данного пункта плана после проведения всех подготовительных / ремонтных работ по высоковольтной структуре ускорителя в присутствии специалистов фирмы- производителя трубки «HV Europe B.V.» будет проведена замена (мероприятие п.4), испытание, и электрическая тренировка ВВ-трубки на высоком напряжении (мероприятие п.4.1). После чего будут изготовлены документы, свидетельствующие о состоявшемся пробном пуске Ускорителя и последующие разрешительные документы для СЭС (мероприятие пп. 11 - 12). Затем последует проведение испытаний, ввод ускорителя в штатный режим работы (мероприятие 4.1).

Ремонт помещений (мероприятие п.5.) будет иметь косметический характер и будет включать нижеследующие операции.

1. Демонтаж оборудования.
2. Удаление старой краски со стен и потолка.
3. Подготовка поверхности к шпатлеванию (грунтовка).
4. Шпатлевка.
5. Зашкуривание.
6. Покраска стен и потолка.
7. Подготовка пола к заливке полиуретановым покрытием.
8. Удаление расколотой плитки, заделывание цементом явных проблемных мест.
9. Обрамление кабельных каналов.
10. Заливка пола полимерным составом.
11. Изготовление и монтаж декоративных люков для кабельных каналов.
12. Демонтаж старых светильников.
13. Монтаж новых светильников (10 точек).
14. Заделка гипсокартонном технологического прохода между залами, заполненного бетонными блоками (биологическая защита) (п.5.3).

В левом экспериментальном зале кроме косметического ремонта (мероприятие 5.1.) будет установлена на песчаной подушке механически развязанная с полом массивная плита – основание для микропучкового спектрометра (мероприятие 5.2.)

4.2.2. Задача 2. Состояние высоковольтной колонны и сервисных систем ускорителя является крайне важным фактором при решении задачи восстановления повышения (по сравнению с параметрами по состоянию на 1965г) его технических параметров. Установке новой ВВ-трубке

должна предшествовать проверка всех систем ускорителя и устранение всех возможных неполадок (мероприятие п.3). Проведение подготовительных мероприятий к замене высоковольтной ускоряющей трубки является подзадачей 2.1. (мероприятие п.3). Предполагается устранение ряда серьезных нарушений, выявленных экспертами в конструкции ускорителя и здания, в котором он расположен.

Прежде всего, будет проведен ремонт полов – основания, на котором располагается анализирующий магнит и отклоняющие магниты в правом и левом экспериментальных залах (п. 3.1.). В частности, будет устранена просадка пола в правом экспериментальном зале, которая, по мнению экспертов, может приводить к потери соосности ионного пучка и ионопровода и, как следствие, - наблюдаемому резкому снижению тока пучка и повышению радиационного фона при работе ускорителя в режиме нейтронного генератора. Пол будет усилен путем армирования (стальная сварная конструкция) с последующей заливкой бетоном (мероприятие п. 3.1.). Для установления точной причины снижения тока в режиме нейтронного генератора, а так же после проведения ремонтных работ, будет проведена проверка соосности камеры магнитного анализатора с ионопроводом (п.3.2.). Величина зазора между пучком ионов и ионопроводом должна быть порядка 20 мм. Будет проведена проверка формы пучка на входе и на выходе ускорительной трубки (п.3.3). По форме пучка можно выявить несоосность (при ее наличии).

Организация котлована, необходимого для проведения экспериментов с быстрыми нейтронами (мероприятие п. 30.) требует разработки отдельного проекта и существенных финансовых затрат, поэтому относится к дополнительным мероприятиям, которые могут быть выполнены в рамках данного проекта при появлении дополнительных ресурсов.

Следующим по значению недостатком имеющейся конструкции ускорителя является отсутствие квадрупольного магнита на выходе анализирующего магнита. В настоящий момент используется только 30% пучка, потому как после магнита пучок сжат по горизонтали в вертикальный прямоугольник, из которого в дальнейшем диафрагмой вырезается отрезок порядка 5мм. Поэтому, следующим пунктом рабочего плана является изготовление и установка фокусирующей квадрупольной линзы для повышения эффективности прохождения пучка после измерительного магнита (п.3.4.).

Развитие экспериментальной инфраструктуры ускорительного комплекса. Мероприятия по подготовке к установке канала ядерного микрозонда (Подзадача 2.3.). Эскиз спроектированного канала ядерного микрозонда приведен на рис.1. Нижеследующие технические мероприятия (П.3.6, пп. 3.9-3.13, 3.15-3.17) будут выполнены для повышения стабильности тока, что необходимо для установки микропучкового спектрометра / канала ядерного микрозонда. Установка внешней системы контроля размеров щелей, динамическое кольцо для подавления вторичных электронов и принудительное охлаждение в системе стабилизации энергии пучка необходимо для очищения спектра ионного пучка от электронной составляющей. Оптимизация геометрии индукционной катушки источника ионов, согласование ионной оптики и источника ионов необходимы для снижения энергетического разброса ионного пучка и согласования параметров ионного пучка на выходе трубки. Регулировка строго в одной плоскости и частичная замена игл в коронирующем триоде на иглы из материала, устойчивого к разряду (иглы от немецких швейных машин) необходимо для снижения колебаний тока на коронирующем триоде. Критерием удачной настройки является ток в пределах 20-30мкА, отсутствие биения (колебаний) тока.

Регулировка зазора на разрядных щетках (п. 3.10). Установка зазора 6мм вместо имеющегося зазора 10мм на разрядных щетках приведет к повышению устойчивости тока ионного пучка и надежности ускорителя в целом за счет незначительного снижения напряжения перезарядки (аналог повышения величины отрицательной обратной связи). Изменение конфигурации перезарядных щеток - разделение монолитных пластин на три секции (п. 3.11) позволит снизить давление на ленту, уменьшит ее износ и уменьшит низкочастотные колебания тока ионного пучка. Очистка зарядной ленты растворителем будет проведена для снижения энергетического разброса ускорителя (п.3.6.), что крайне важно для последующей разработки микропучкового спектрометра. Отжиг и полировка диафрагмы, формирующей и выравнивающей ионный пучок (п.3.12), замена резисторов делителя с изменившимися в процессе эксплуатации номиналами на компенсирующем участке (5 секций после участка с прямыми полями (п.3.13), после ревизии резисторов под нагрузкой с помощью высоковольтного блока питания (10кВ)) так же повысит энергетическую стабильность пучка.

Так же к подготовке канала ядерного микрозонда в проекте относится мероприятие п.5.2. Под пассивной системой подавления вибраций подразумевается плита – основание для микропучкового спектрометра на песчаной подушке, развязанной механически от пола в зале спектрометров. Будет сделано углубление в полу высотой 0.7 м с последующей засыпкой его мелкозернистым песком на глубину 0.2 м и заливкой бетоном плиты, изолированной от пола. Такой фундамент нужен не на весь канал, а только на его финальную часть, где расположены линзы и камера мишеней (рис. 1.). Усиление пола (сократит расходы на активную систему подавления вибраций).

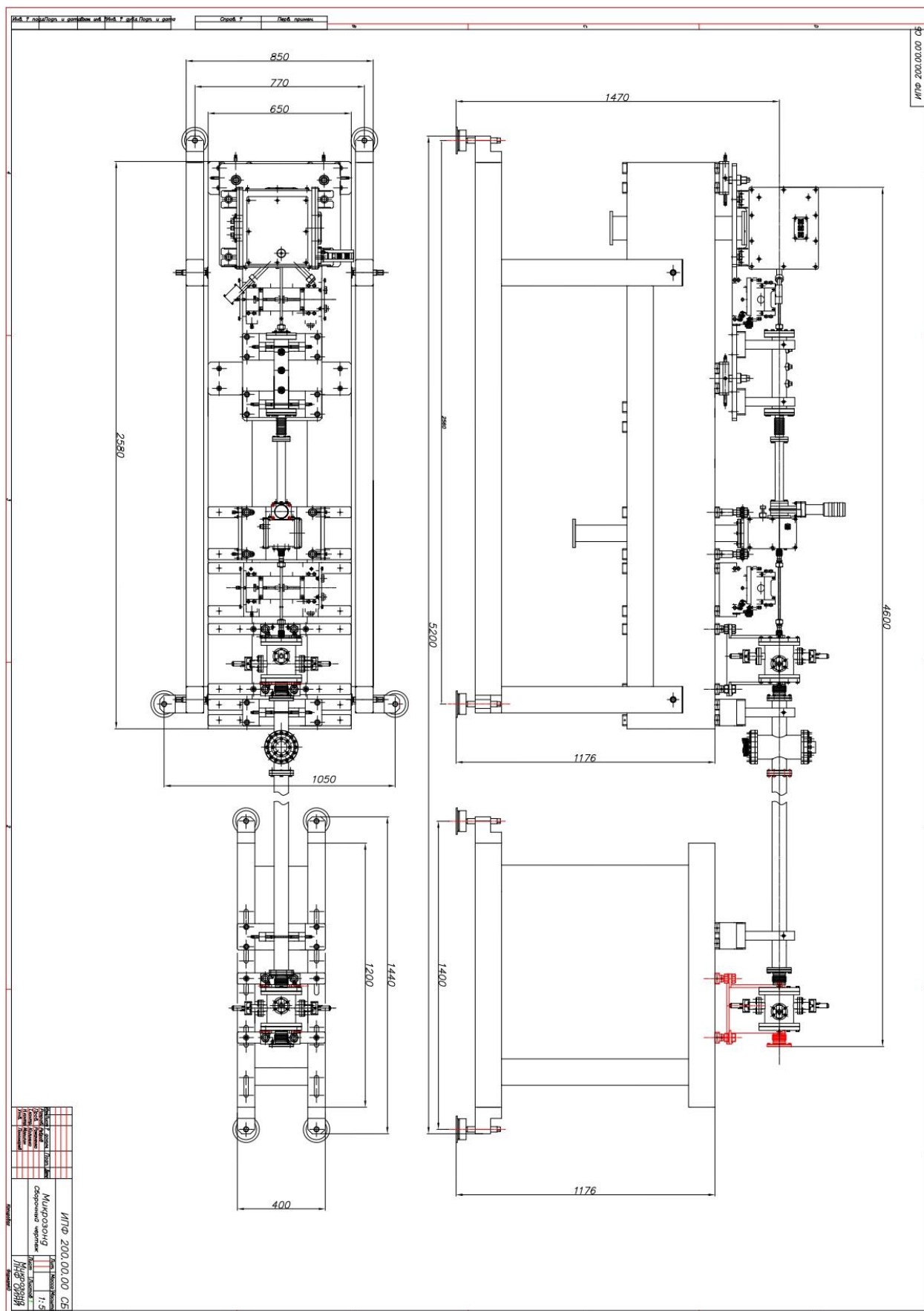


Рис. 1. Эскиз канала ядерного микрозонда.

Мероприятия (П.28 и П29), направленные на сборку микропучкового спектрометра (Разработка плана мероприятий - последовательности действий согласно проекту ядерного микрозонда на базе ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ от 2015, выполненного сотрудниками Института прикладной физики НАН Украины (Ответственный Дмитрий Магилин), и заказ в мастерских ЛНФ основных узлов согласно конструкторской документации на изготовления канала) а, так же, мероприятия п.11 и п.12 (Восстановление техдокументации (КД) на ускорительную трубку и подготовка / подписание документов для включения ускорителя в список СЭС) будут проводиться параллельно с основными мероприятиями отдельными сотрудниками, временно незадействованными в технических работах. По предварительным оценкам, потребуется ресурс Конструкторского бюро ЛНФ порядка 240 нормо-час и мастерских ЛНФ - не менее 1000 нормо-часов. Закупка соответствующей квадрупольной линзы с источниками питания, системы управления сканированием сфокусированным пучком у фирмы «Oxford microbeams» (<http://www.microbeams.co.uk/Products.html>) будет проведена после окончания проекта или в качестве дополнительного мероприятия при появлении соответствующих ресурсов.

Лаборатория по изготовлению образцов (задача 2.4). По функциональному назначению на площадке лаборатории (рис. 2) планируется помещение для дистанционного управления установкой «ТАНГРА» (П1), помещение химической лаборатории (П2), помещение измерительной лаборатории (П3) и участок высокотемпературного спекания и механической обработки консолидированных материалов (П4).

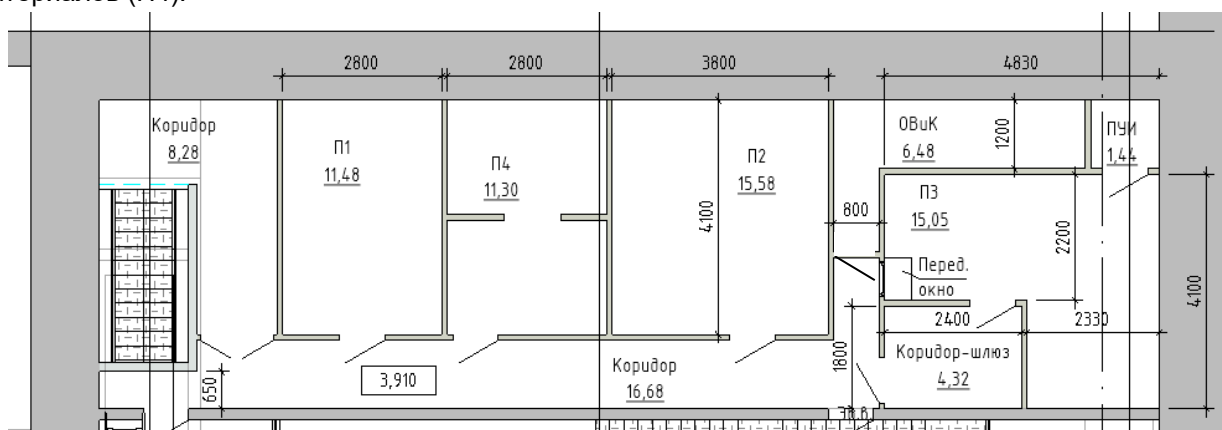


Рис. 2. Планировка помещений лаборатории на втором этаже Стенового зала №3, где:
 П1. - Помещение группы ТАНГРА.
 П2 – Химическая лаборатория.
 П3 – Измерительная лаборатория.
 П4 – Участок высокотемпературного спекания и механической обработки материалов (грязная зона).

Лаборатория будет располагаться на втором этаже в Стеновом зале №3 (рис.3, рис.4) и будет представлять собой изолированное помещение с отдельным входом и аварийным выходом.

Монтаж лаборатории для приготовления объектов для исследований ионно-лучевыми методами (мероприятия п.6, п.14) будет выполнен после установки ВВ трубки силами организации – подрядчика. В рамках выполнения проекта будет проведен монтаж металлоконструкций и перегородки, отделяющей лабораторию от помещения, где расположен нейтронный генератор «ТАНГРА» (рис. 3). Соответствующий технический проект на данный момент находится в стадии разработки фирмой «СРЕЦАТОМСЕРВИС» и к моменту установки ВВ-трубки будет готов. Остальные работы будут проводиться как дополнительные мероприятия. Лаборатория будет располагаться в новообразованных помещениях на втором этаже над боксами в Стеновом зале №3.

Доукомплектование экспериментальной инфраструктуры комплементарными методами исследования (подзадача 2.5.) поверхностных слоев материалов (электрические, электронные и оптические свойства, мероприятие 10) будет проводиться в процессе выполнения проекта.

Камера ионно-лучевых спектрометров. Разработка, изготовление и установка новой высокопроизводительной камеры для ионно-лучевых исследований материалов (RBS, ERD, PIXE, мероприятие п.7.) будет выполняться силами коллектива и производственной инфраструктуры ЛНФ. Мероприятия по закупке и установке ионно-лучевого модуля RC43 производства фирмы NEC (п.15, рис. 5) и системы разведения пучка (п.16) производства "High Voltage Engineering Europa B.V." (HVE) относятся к дополнительным мероприятиям и будут реализованы за пределами сроков выполнения проекта по мере поступления соответствующих финансовых средств.

Модернизация сервисного оборудования (мероприятие п.8.). Автоматизация узлов ускорителя, крайне важных для реализации функций микропучкового спектрометра и генератора квазимоноэнергетических нейтронов, в частности, автоматизация системы пространственной стабилизации положения пучка (п.8.1), будет проводиться после установки ВВ трубки. Замена морально устаревших приборов на Пульте (п.8.2) и в инфраструктуре ускорительного комплекса, в частности, замена паромасляных насосов турбомолекулярными будет проводиться на протяжении проекта в режиме сервисных работ силами коллектива группы «Установка ЭГ-5».

Подготовка кадров (Задача 3). Подготовка персонала из числа молодых сотрудников для работы на установке, интенсификация международного сотрудничества, организация юзерской программы (мероприятие п.9.) будет проводиться на протяжении выполнения проекта членами группы «Установка ЭГ-5» при поддержке вышестоящего начальства.

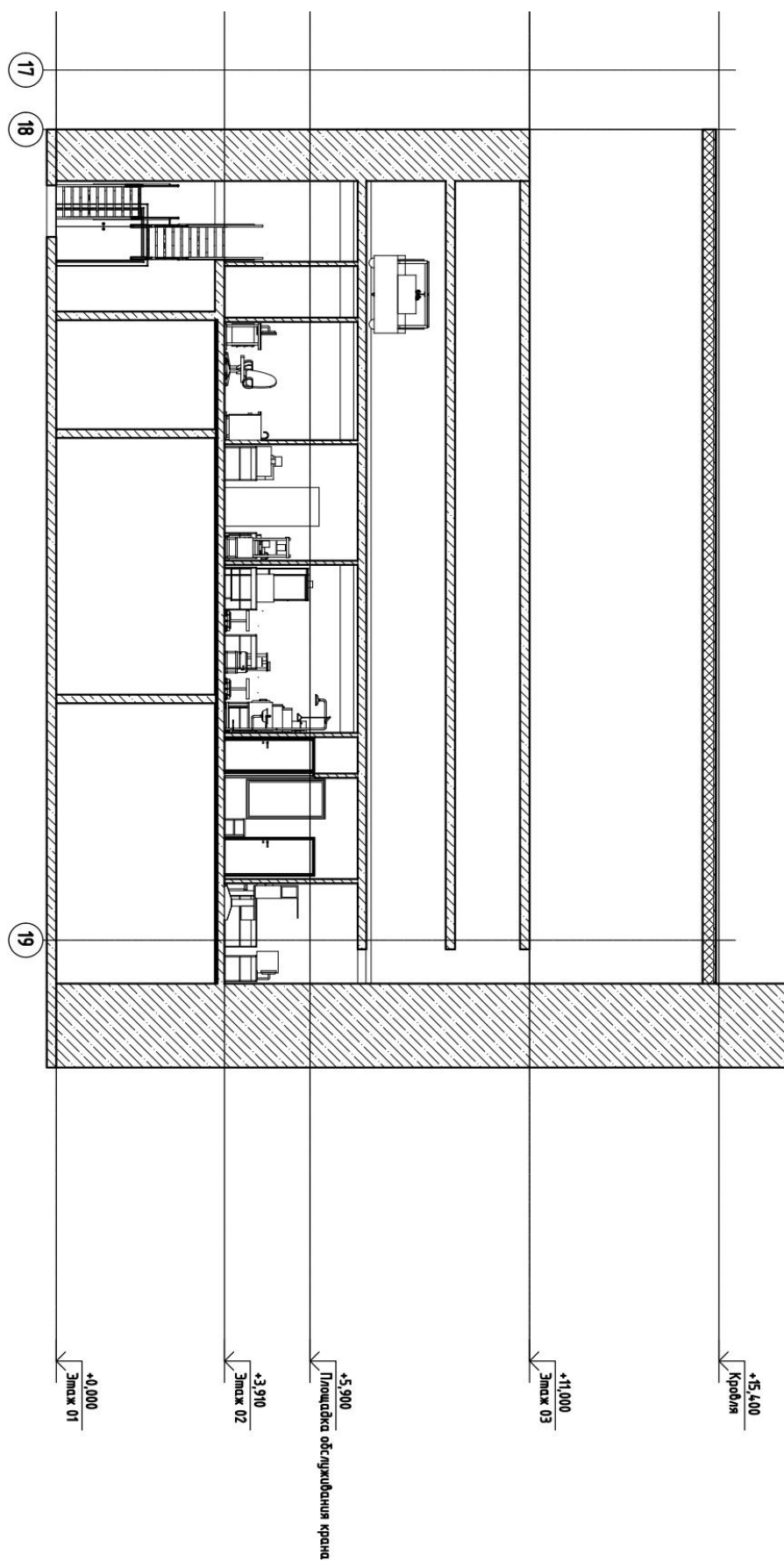
Задача 3.1. Для решения задачи 3.1. планируется привлечение к работе в группе, обучение, отбор и последующее трудоустройство на полную ставку наиболее мотивированных и способных ребят-студентов после окончания ими ВУЗа. Планируется завершить формирование группы и подготовку молодых кадров к концу 2023г. Предполагается адаптировать состав группы для посменной работы (перевод части научной подгруппы во вредные условия труда, сегментирование на подгруппы по выполняемым трудовым функциям).

Задача 3.2. Для решения задачи 3.2. под руководством проф. Романова планируется проведение ежегодных международных конференций и семинаров по электростатической ускорительной технике с привлечением ведущих специалистов в области техники ЭСУ и сопряженных с ней методов исследования, что позволит сформировать круг потенциальных заказчиков (из числа производственных и научных субъектов, предположительно представителей электронной промышленности, групп, специализирующихся в области радиационной биологии, наноматериаловедения и др.), а так же, усилить позиции ЛНФ ОИЯИ и с учетом значимости и объема потенциально выполнимых научных задач, позволит рассматривать ОИЯИ как центр компетенции в области техники ЭСУ и связанных с ней экспериментальных методов исследования.

Планируется увеличивать количество кооперационных связей, интенсифицировать взаимодействие с новыми научными группами из РФ, стран ближнего и дальнего зарубежья. В частности, в 2021г планируется начать взаимодействие с коллективами из • 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. И др.

Ниже следующие (дополнительные) мероприятия пп.13 – 27 будут выполнены при наличии требуемых ресурсов.

1. Изготовление дополнительного вакуумного ввода в верхней части сосуда с ускоряющей трубкой (дифференциальной откачки колонны) для повышения однородности вакуума (разница составляет 2 порядка 10^{-6} и 10^{-4} Торр) и предотвращения загрязнения верхних секций ВВ-трубки (п. 13).
2. Установка системы контроля координат пучка с документальной фиксацией (п.17).
3. Закупка комплекта запасных лент (в Ярославле, РФ) (п.18).
4. Организация экспериментального участка для изготовления и испытания высоковольтных трубок. Доукомплектация участка склейки ВВ-трубки недостающим оборудованием, подготовка бокса для склейки трубки для проведения соответствующих работ (п.19).
5. Изготовление сверхстабильно ионного источника с энергетическим разбросом менее 10эВ с использованием имеющихся отечественных разработок. Рассмотрение возможности применения источника Пеннинга для работы в режиме нейтронного генератора, который позволяет получать пучок ионов He^{2+} , что в случае необходимости позволит повысить энергию пучка в 2 раза (п.20).
6. Замена ПВА в клеевых соединениях трубки менее «газящим» клеем (п. 21).
7. Замена морально устаревших ламповых вакууметров полупроводниковыми аналогами (п. 22).
8. Установка дистанционно управляемых мониторов контроля формы и тока пучка (цилиндр Фарадея), кварцевым экраном с фиксацией положения пучка, видеокамерой с возможностью визуального наблюдения за изображением и положением пучка на пульте (п. 23).
9. Переход на дистанционно – управляемые вакуумные затворы с целью обеспечения аварийного отсечения ускорительной трубки (в автоматическом режиме) в случае появления течи в ионопроводах (п. 24).
10. Поверка сосуда высокого давления и всех систем ЭСУ (п. 25).
11. Замена кабелей силового электропитания и системы управления ускорителем ввиду окончания ресурса эксплуатации (п. 26).
12. Замена проточной системы охлаждения стационарной замкнутого цикла в источнике питания анализирующего магнита (п.27).



.Рис.4. Эскиз Стенового зала №3 – поперечное сечение.

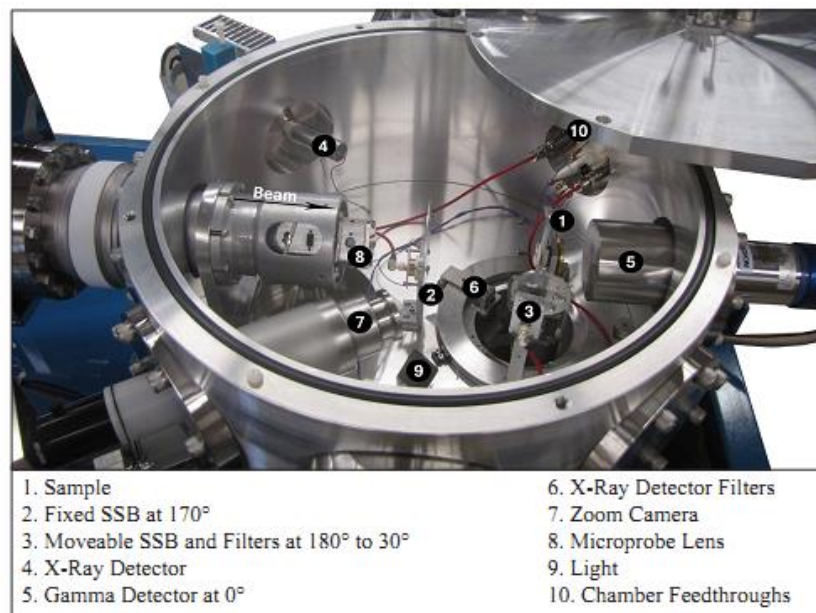


Рис. 5. Рабочая камера ионно-лучевого анализатора RC43 производства фирмы NEC, планируемого к закупке. Цифрами показаны основные элементы.

5. Оценка кадровых ресурсов

Коллектив проекта включает специалистов мирового уровня в области разработки ЭСУ – техники (проф. Романов В.А.), в области ядерной физики, химии и технологии, 7 инженерно-технических работников с многолетним опытом обслуживания и ремонта всех узлов установки ЭГ-5. Научный потенциал группы составляют известные ученые: проф. Кобзев А.П., проф. Романов В.А., проф. М Кулик. Группа содержит в своем составе более 50% молодых сотрудников, способных оперативно решать текущие технические задачи.

Каждый участник группы будет уделять работе в рамках Проекта по отношению к своей полной занятости следующее количество времени.

1. Лихачев Алексей Николаевич - ведущий инженер – 100%
2. Кобзев Александр Павлович – ведущий научный сотрудник - 50%
3. Кудрявцев Владимир Петрович – старший инженер - 100%
4. Ткаченко Станислав Николаевич – старший инженер - 100%
5. Бобраков Владимир Федорович – инженер - 100%
6. Зайцев Игорь Алексеевич – инженер - 100%
7. Кулик Мирослав – старший научный сотрудник - 50%
8. Мадазда Афаг Иса - старший научный сотрудник - 50%
9. Захарова Анна Сергеевна – лаборант - 25%
10. Логинов Алексей Андреевич- лаборант - 50%
11. Юренков Даниил Игоревич – лаборант - 25%
12. Александров Василий Алексеевич – лаборант - 25%
13. Студнев Константин Евгеньевич – лаборант - 100%
14. Татаринова Алиса Александровна – лаборант - 25%
15. Гридина Елизавета Алексеевна – лаборант - 25%
16. Зеленьяк Татьяна Юрьевна – инженер - 100%
17. Дорошкевич Александр Сергеевич – начальник группы - 100%
18. Чан Ван Фук – младший научный сотрудник - 100%
19. Тихонова Наталия Сергеевна – лаборант - 50%
20. Фан Луонг Туан научный сотрудник - 100%
21. Романов Валентин Александрович – советник директора ЛНФ – 20%.
22. Чепурченко Илья Андреевич – инженер -100%

Таким образом, группа располагает необходимым ресурсным потенциалом для проведения модернизации и последующей эксплуатации ускорителя.

6. Оценка бюджета Проекта

Основным затратным мероприятием является покупка высоковольтной трубы. Сметная стоимость расходов на покупку, доставку, установку с помощью специалистов и пролонгированный гарантийный срок эксплуатации приведена ниже (полный текст см. Приложение 5).

Total Equipment Price, EXW Seller's site, Amersfoort, NL €337.000,
-

1. Transportation, including insurance coverage, € 10.100, -
see elsewhere for details

Total Equipment Price, DAP Buyer's site, Dubna, Moscow region, €347.100,
-
Russian Federation

2. On-site Installation: € 19.600, -
Not included, Instead On-site assistance by Seller,
by 1 engineer during 5 days, arrival Sunday, departure Saturday,
incl. costs for travel, hotel and meals

3. Warranty: € 33.800, -
Instead of Warranty, Seller's standard terms and Seller's standard
period, Warranty, Seller's standard terms and Seller's standard period
extended by 24 months, see elsewhere for details

Grand Total Price €400.500,
-

=====

Общая сумма проекта составляет 400.5 тыс евр. = 471 тыс дол. Все работы по модернизации будут проводиться коллективом группы «Установка ЭГ-5» в рамках выполнения трудовых функций с использованием имеющейся в наличии ресурсной базы.

7. Краткий ССВУ - анализ проекта

7.1. Сильные стороны проекта.

1. **Подходящая конструкция ускорителя ЭГ-5 для решения поставленных задач** (создание ядерного микронизатора и нейтронного генератора). В проекте будут в полной мере реализованы уникальные возможности ускорителя ЭГ-5, в частности, возможность получения большой величины тока ионного пучка (до 250мкА) и его малого разброса (<100eV), что не может быть реализовано на установках тандемного типа.

2. **Низкая эксплуатационная стоимость установки ЭГ-5.** Отличная ремонтпригодность конструкции ускорителя ЭГ – 5 и наличие ресурсной базы позволяют провести модернизацию с минимальными затратами и обеспечить автономную работу ускорительного комплекса в течение длительного времени. 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 продолжительный период времени после замены трубы. 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.

3. **Повышение квалификации собственных инженерных кадров в процессе модернизации,** формирование кадрового потенциала на длительный срок эксплуатации ускорителя. В процессе реализации проекта будет проведено формирование кадровых ресурсов из выпускников ВУЗов, их обучение работе с элементами инфраструктуры ускорителя и ознакомление со спецификой научной работы в группе.

4. **Развитие полноценной экспериментальной инфраструктуры ускорительного**

комплекса. Экономия ресурсов за счет наличия собственной инфраструктуры позволит существенно расширить экспериментальную инфраструктуру. Установка нового комплекса ионно-лучевых спектрометров, монтаж лаборатории для формирования объектов исследования позволит существенно расширить спектр исследуемых объектов, чем - существенно повысить выход научной продукции.

5. Данный вариант решения основной задачи является менее затратным в финансовом плане по сравнению с покупкой нового ускорителя и созданию на его основе экспериментальной инфраструктуры.

7.2. Слабые стороны проекта.

1. **Моральное и техническое устаревание сервисных систем** и экспериментальной базы ускорителя. Потребуется значительные временные ресурсы для ревизии и модернизации всех систем ускорителя.

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

3. Пространственная стабилизация положения пучка, необходимая для установки ядерного микрозонда осуществляется в ручном режиме и требует отдельной доработки.

4. Отсутствует импульсный режим, необходимый для проведения исследований рассеяния нейтронов с использованием времяпролетной (TOF) спектрометрии.

5. Отсутствует возможность ускорения широкого спектра ионов.

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

- ошибками при проектировании ВВ-трубки на заводе – изготовителе;
- ошибками при установке новой ВВ-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.

Заключение

Модернизация электростатического ускорителя ЭГ-5 и его приборной инфраструктуры позволит решить большую часть 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 квазимоноэнергетическими нейтронами, возможность работы с биологическими объектами и возможность установки опции ядерного микрозонда.

Кроме того, будет повышена производительность имеющихся методов (RBS, ERDA, NRA, PIXE). Экспериментальная база будет дополнена нелучевыми комплементарными методами исследования электрических, оптических и электронных свойств поверхности (эллипсометрия, импедансная спектроскопия).

Модернизированный ускоритель позволит получать энергии до 4,1 МэВ при токе пучка до 100 мкА / нуклон.

Тем не менее, проект модернизации нужно рассматривать как важный, но промежуточный этап в развитии ЭСУ – комплекса ОИЯИ. Чтобы в рамках ОИЯИ успешно развивать рассмотренные выше направления нейтронных исследований и в дальнейшем занимать лидирующие позиции, в перспективе требуется покупка дополнительно нового современного электростатического ускорителя для работы в диапазоне энергий до 6МэВ.

Литература

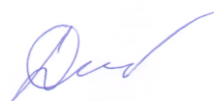
1. В. Швецов. «Трансмутация отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов один из вариантов стратегического развития атомной отрасли» [Электронный ресурс] // Сайт ядерная физика в интернете. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/trans.htm> (Дата обращения: 05.11.2020).
2. Nuclear Data High Priority Request List [Электронный ресурс] // Сайт NEA Nuclear Energy Agency URL: <https://www.oecd-neo.org/dbdata/hprl/search.pl?vhp=on> (Дата обращения: 05.11.2020).
3. М. Ю. Хлопов. "Физика Космоса" [Электронные ресурс] // Сайт Astronet URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188315> (Дата обращения: 05.11.2020).
4. Базовые установки ОИЯИ [Электронный ресурс] // Сайт Объединенный институт ядерных исследований URL: http://www.jinr.ru/jinr_facilities/ (Дата обращения: 05.11.2020).
5. Комар Е. Г. Основы ускорительной техники. М., Атомиздат, 1978, с. 368.
6. А.К. Вальтер. Электростатические ускорители заряженных частиц. Под редакцией академика АН УССР А.К. Вальтера., М., 1963 с. 302.
7. Miscellaneous [Электронный ресурс] // Сайт INCMTA2008 11th International conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications URL: <http://w3.atomki.hu/atomki/IonBeam/icnmta/microprobefac.html> (Дата обращения: 05.11.2020).
8. Doyle B. L., Hamm R. W. Reviews of Accelerator Science and Technology Vol. 10 (2019) 93–116 c© World Scientific Publishing Company //Reviews of Accelerator Science and Technology. – 2019. – Т. 10. – С. 93-116.
9. Gledenov, Yu. M.; Sedysheva, M. V.; Khuukhenkhuu, G.; Bai, Huaiyong; Jiang, Haoyu; Lu, Yi; Cui, Zengqi; Chen, Jinxiang; Zhang, Guohui (2018). reaction in the 4–6 MeV region. Physical Review C, 98(3), 034605–. doi:10.1103/PhysRevC.98.034605.
10. Антонова Л. Х. и др. Влияние протонного облучения на критические параметры композитныхвысокотемпературных сверхпроводящих лент //Перспективные материалы. – 2014. – №. 5. – С. 34-38.
11. Kulik M. et al. Effect of N 2+ Ion Implantation and Thermal Annealing on Near-Surface Layers of Implanted GaAs //Acta Physica Polonica, A. – 2015. – Т. 128. – №. 5.
12. Kulik M. et al. Chemical composition of native oxides on noble gases implanted GaAs //Thin Solid Films. – 2016. – Т. 616. – С. 55-63.
13. Horodek P. et al. Slow Positron Beam Studies of the Stainless Steel Surface Exposed to Sandblasting //Acta Physica Polonica, A. – 2014. – Т. 125. – №. 3.
14. Horodek P. et al. Positron beam and RBS studies of thermally grown oxide films on stainless steel grade 304 //Applied Surface Science. – 2015. – Т. 333. – С. 96-103.
15. Rzdokiewicz W. et al. Nuclear and Optical Analyses of MOS Devices //Acta Phys. Pol. A. – 2013. – Т. 123. – №. 5. – С. 851-853.
16. Межотраслевая интернет-система поиска и синтеза физических принципов действия преобразования энергии [Электронный ресурс] // Сайт РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина URL: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/tech/byId/description/292/index.html> (Дата обращения 05.11.2020).
17. Епропейский расщепительный источник [Электронный ресурс] // Сайт Хабр URL: <https://habr.com/ru/post/389279/> (Дата обращения 05.11.2020).
18. Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы [Электронный ресурс] // Сайт ФГБНУ «Дирекция НТП» URL: <http://fcpir.ru/business/priority-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya/> (Дата обращения: 05.11.2020).

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
проекта МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость потребности в ресурсах (тыс. долл.)	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов		
			1 год		
Затраты	Основные узлы оборудования, работы по его обновлению, наладке и т.п.	471	471		
	Строительство/ремонт помещений				
	Материалы				
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы	240 нормо-час	240 нормо-час	
			1000 нормо-час	1000 нормо-час	
Источники финансирования	Бюджетные средства	Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	471	471	
	Внебюджетные средства	Вклады колаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.			

РУКОВОДИТЕЛЬ

ПРОЕКТА



А.С. Дорошкевич

**Смета затрат по проекту МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

№	Описание статей затрат	Полная стоимость	2021	2022	2023	
Direct expenses						
1	Design	k\$		-	-	0
2	Материалы	k\$			0	0
3	Оборудование	k\$	0	471	0	471
4	Оплата НИР, выполняемых по договорам	k\$	0	0	0	0
5	Командировочные расходы	k\$	0	0	0	0
Всего		k\$	0	471	0	<u>471</u>

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



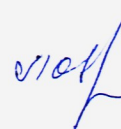
А.С. Дорошкевич

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ



В.Н. Швецов

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ



Л.С. Овсянникова



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

Conditions

Prices

Prices are exclusive of any taxes, duties, fees, etc. without limitation due to enumeration imposed by any governmental body other than The Netherlands.

Prices shall remain firm in the currency of the Contract throughout the duration of the Contract.

Taxes, duties and fees

All taxes, duties and fees arising outside of the Russian Federation in connection with the execution of the Contract shall, except where stated otherwise, be borne by Seller.

All taxes, duties and fees arising inside of the Russian Federation in connection with the execution of the Contract shall, except where stated otherwise, be borne by Buyer.

Country of origin and manufacturer

The Netherlands, High Voltage Engineering Europa B.V.

Approval for export

Delivery is subject to approval for export by the Government of The Netherlands.
Application for export approval can be submitted by Seller only after order is in place.

Buyer is to provide Seller with a suitable End-Use Certificate and End-User Statement (template available from Seller), together with the order.

Seller will complete all other documents necessary for Seller's application for export approval and will submit the application no later than one (1) week after receipt by Seller of Buyer's End-Use Certificate and End-User Statement.

Seller will notify Buyer about the outcome of the application for export approval that is generally obtained within twelve (12) to sixteen (16) weeks from application submission date.

In the event a suitable End-use Certificate and End-user Statement is not received by Seller within six (6) weeks after Contract, Seller has the right to extend the time of delivery based on Seller's order backlog at the moment of receipt by Seller of a suitable End-use Certificate and End-user Statement.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands

Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544

E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

5. Documentation package in the English language, including: Included

Within maximal ninety (90) days after notification of order, one set of:

- . Overall system layout drawing
- . Installation Requirements and Recommendations

With the delivery of the Equipment, one set of:

- . Mechanical assembly drawings
- . Electrical- and electronic schemes
- . Parts list with Seller's part name and part number
- . Manuals for the operation and maintenance

Total Equipment Price, EXW Seller's site, Amersfoort, NL	€	337.000, -
---	---	------------

6. Transportation, including insurance coverage, see elsewhere for details	€	10.100, -
--	---	-----------

Total Equipment Price, DAP Buyer's site, Dubna, Moscow region, Russian Federation	€	347.100, -
--	---	------------

7. On-site Installation: Not included, Instead On-site assistance by Seller, by 1 engineer during 5 days, arrival Sunday, departure Saturday, incl. costs for travel, hotel and meals	€	19.600, -
---	---	-----------

8. Warranty: Instead of Warranty, Seller's standard terms and Seller's standard period, Warranty, Seller's standard terms and Seller's standard period extended by 24 months, see elsewhere for details	€	33.800, -
---	---	-----------

Grand Total Price	€	400.500, -
--------------------------	---	-------------------



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

- Flanges, Upper & Bottom: as per Buyer's drawing
- Overall length: ~1150 mm
- Leak rate: 5×10^{-9} mbar ltr / sec

Overall accelerator tube:

- Electrodes:
 - . Material Titanium
 - . Shape Dished
 - . Outer diameter ~235 mm
- Insulators:
 - . Material Borosilicate glass
 - . Outer diameter ~215 mm
 - . Thickness: To suit 25.0 mm pitch
(center to center distance of electrodes)
- Discharge point assy's: 3 on each electrode at 120° interval
with voltage grading resistor mounting clip
- Sealing between sections: Viton "O-rings" (included by Seller).
- Voltage grading: by resistors mounted on accelerator tube
160 pcs + 10 pcs as spare
See Notes for mounting arrangement
- Overall length: ~4150 mm
- Electron suppression: by spiraled permanent magnets
located inside the vacuum
- Radiation level ⁽¹⁾: $< 2 \mu\text{Sv/hr}$

⁽¹⁾ measured at 100 cm from the tank wall, running a 1 μA He beam at nominal terminal voltage.

- 3. Pre-conditioning of all three (3) accelerator tube sections:** € 17.300, -
Pre-conditioning of all three (3) accelerator tube sections
@ Seller's plant in Seller's KN4000 Van de Graaff accelerator, incl.:
cost for temporarily providing one-off adapter flange

- 4. Assembly prior to transportation:** Included in item 2
- Accelerator tube section shall be assembled complete with discharge point assy's, voltage grading resistor mounting clips and voltage grading resistors prior to transportation. Support flanges and double layer temperature insulated packing will be provided to ensure safe transportation.
 - RF ion source shall be packed separately and be mounted on-site.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

We have the pleasure in offering you herewith, for use with your existing vertical Van de Graaff accelerator, Model EG-5:

1. RF Ion Source Model SO-173 (short bottle), including: € 20.100, -

- Source body
- Extraction electrode
- Alignment tool
- RF oscillator

- Ion beam current
 - . Hydrogen ($^1\text{H}^+$): 250 μA (typical)
 - . Deuterium ($^2\text{D}^+$): 170 μA (typical)
 - . Helium ($^4\text{He}^+$): 125 μA (typical)
- Energy spread: 100 eV (typical)
- Beam emittance: 1.2π mm mrad $\text{MeV}^{1/2}$

2. Acceleration tube with magnetic suppression, including: € 299.600, -

Accelerator tube section #1 of 3 (Upper section):

- Electrodes:
 - . Number: 73 pcs
 - . Beam apertures: 40 mm throughout tube section
- Insulators:
 - . Number: 72 pcs
- Flanges, Upper & Bottom: as per Buyer's drawing
- Overall length: ~1850 mm
- Leak rate: 5×10^{-9} mbar ltr / sec

Accelerator tube section #2 of 3 (Middle section):

- Electrodes:
 - . Number: 45 pcs
 - . Beam apertures: 40 mm throughout tube section
- Insulators:
 - . Number: 44 pcs
- Flanges, Upper & Bottom: as per Buyer's drawing
- Overall length: ~1150 mm
- Leak rate: 5×10^{-9} mbar ltr / sec

Accelerator tube section #3 of 3 (Bottom section):

- Electrodes:
 - . Number: 45 pcs
 - . Beam apertures: 40 mm throughout tube section
- Insulators:
 - . Number: 44 pcs



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands

Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544

E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

October 16, 2020

Phone: 007 496 216 2268/5989
Prof. Dr. Victor Anatolievich Matveev
Joint Inst. for Nuclear Research
Frank Laboratory of Neutron Physics
Joliot-Curie 6
141980 Dubna, Moscow region
Russian Federation

Our ref.: 01768/A31864-02

Dear Doroshkevich,

We have the pleasure in sending you herewith our updated budgetary quotation for
**an RF ion source and an Accelerator tube with voltage grading resistors for use with
your existing vertical Van de Graaff accelerator, Model EG-5.**

We trust this updated budgetary quotation to be of interest to you and we look forward to
hearing from you how to proceed from here.

Sincerely,

HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Henri van Oosterhout
Managing Director



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

Entire understanding, modification and waiver

This Agreement is the entire understanding and agreement between Parties with respect to the subject matter hereof, including extend of supply and specifications, and supersedes all prior understandings and agreements relating hereto. No modification, alteration or amendment shall be effective unless made in writing and signed by duly authorized representatives of each Party. No waiver of any breach hereof shall be deemed or held to be a waiver of any other or subsequent breach.

Applicable law and dispute resolution

The validity, construction and performance of this Agreement shall in all respects be governed by and interpreted in accordance with the laws of The Netherlands. All disputes which may arise during or from this Agreement shall be submitted for decision to a competent court in The Netherlands, Seller reserves the right however, to bring any claim it may have against Buyer before any other Court.

Validity

This quotation is valid for three (3) months after date.

Sincerely,

HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Henri van Oosterhout
Managing Director



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

such goods, apparatus or machine has been specially designed for Buyer. Buyer shall not be entitled to reverse engineer or build or have built any goods, apparatus or machine supplied by Seller.

Seller shall not be liable to Buyer or to any person for infringement of any patent resulting from use or disposal of any goods, apparatus or machine sold by Seller, except to the extent that Seller may be liable as an infringer to persons claiming patent rights which Seller may have infringed by this sale to Buyer.

Parts returned by Buyer:

Parts returned by Buyer for repair, refurbishing, for credit or for any other reason which are contaminated by radiation producing or poisonous material exceeding The Netherlands standard safety level will not be accepted by Seller and will be returned or, where mandatory under The Netherlands safety standards, be removed and destroyed at Buyer's cost. Buyer will be liable for any injury or damage to persons or property and for all costs of handling.

Seller's liability at Buyer's site:

Seller shall not be liable in any event for any loss or injury to persons or property (including the Equipment being installed) during On-site assistance that results in whole or in part from:

- a. negligence or fault of Buyer, its employees, agents and its other independent contractors;
- b. Buyer's failure to observe Seller's engineer's instruction;
- or
- c. the failure or malfunctioning of tools, equipment, facilities or devices not furnished by Seller, caused by defects therein not observable by Seller's engineer's visual inspection.

Non-assignment

This Agreement and any interest herein or therein, and any payment due or to become due hereunder may not be assigned by Buyer without the prior written authorization and approval by an authorized representative of Seller. Any attempted or purported assignment of delegation without such required consent would be void.

Cancellation

This contract may be cancelled by Buyer only upon the payment of reasonable cancellation charges to be determined by Seller which shall include but not be limited to expenses already incurred for labor and material costs, overhead, commitments made by Seller and a reasonable profit. Buyer will pay these charges within thirty days after invoice date. Cancellation will only be effective after payment of the cancellation charges.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

normal wear and tear (e.g. ion source parts). Not covered by the warranty are expenses for removal, re-installation and freight in connection with foregoing replacements.

All obligations of Seller under this warranty shall cease in the event of abuse, accident, alteration, misuse or neglect of the Equipment. In warranty repaired or replaced parts are themselves warranted for a period equal to the original warranty period applicable to the repaired or replaced parts.

Reasonable care must be used to avoid hazards. Seller expressly disclaims responsibility for loss or damage caused by use of its Products other than in accordance with proper operating procedures and written or verbal instruction.

Seller's liability to Buyer whether in contract or in tort arising out of warranties, representations, instructions or defects from any cause, shall be limited exclusively to correcting the Equipment on the terms and under the conditions as aforesaid, and all such liability shall terminate upon expiration of the applicable warranty period as aforesaid. In no event shall Seller be liable neither for any indirect, special or consequential damages nor for loss, damage or expenses directly or indirectly arising from the use of the Equipment delivered hereunder.

Warranty, Seller's standard, and Seller's standard period extended by 24 months:

Same as above except: for a period of thirty-six (36) months after EXW delivery.

Transfer of Risk, Title and Insurance

Title and right of possession of the Equipment sold hereunder or any replacements shall remain in Seller, regardless of mode of attachment to realty of other property, until the full price (including deferred payment and any notes or renewals or extensions) has been paid in cash. Buyer agrees to do all acts necessary to perfect and maintain said title and right in Seller.

Upon delivery DAP (INCOTERMS 2020) Buyer's site, Dubna, Moscow region, Russian Federation (unless otherwise agreed to in writing) of any of the Equipment, all risk of loss or damage shall pass to Buyer, and Buyer shall procure and maintain for the benefit of Seller and Buyer, as their interests may appear, adequate insurance on the Equipment against damage by fire and other casualty.

Intellectual Property Rights and Patents

As soon as the full price (including deferred payment and any notes or renewals or extensions) has been paid in cash Buyer acquires the right to use any goods, apparatus or machine sold by Seller and Buyer may transfer the right of use to subsequent owners. Seller retains the intellectual property rights to any goods, apparatus or machine sold by Seller even



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

Terms of Payment

Payment is to be effected in EURO (€) by an irrevocable Letter of Credit – in the amount of 100% of the contract value, conditions confirmatory to the order conditions and with validity up to 30 days after the scheduled date for Delivery - to be issued no later than 14 days after date of order, in accordance with following scheme:

- 30% as down payment after order, within 8 days against presentation of:
 - Invoice in the amount equal to the amount of the payment
- 70% as final payment after delivery, within 8 days against after presentation of:
 - Invoice in the amount equal to the amount of the payment
 - Document in proof of delivery

Due payments accrue interest at 1.5% per month when not paid on time.

In the event the delivery is delayed by reasons for which Seller cannot be held responsible, Buyer will reimburse Seller for the costs for storage, insurance and other overhead costs attributable to such delay.

Banking charges

Banking charges outside Russian Federation related to (i) opening of LC, (ii) payment out of LC, (iii) extending validity period of LC as a result of delay in Delivery due to reasons for which Seller can be held responsible and (iv) confirmation of LC by Dutch Bank, will be borne by Seller.

Banking charges inside Russian Federation related to (i) opening of LC, (ii) payment out of LC, (iii) extending period of LC as a result of delay in Delivery due to reasons for which Buyer can be held responsible, will be borne by Buyer.

Warranty:

Warranty, Seller's standard terms and Seller's standard period:

The Equipment to be delivered hereunder is, provided that the full price (including deferred payment and any notes or renewals or extensions) has been paid in cash, warranted to be free of defects in design, workmanship and material for a period of twelve (12) months after EXW delivery.

The warranty covers repair or replacement of defective parts with exception of parts that fail due to use outside their specifications or due to negligence and those parts that are subject to



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

Time of Delivery

6 - 9 Months after receipt by Seller of Buyer's order and Letter of Credit with conditions confirmatory to the conditions of the order, depending on final Equipment configuration and workload at the time of order and subject to confirmation at the time of order and provided that (i) suitable End-Use Certificate and End-User Statement and (ii) approval for export by the Government of The Netherlands have been timely received by Seller and (ii) all payments due at the time of delivery have been timely received by Seller..

In case of delay in Delivery for whatever reason, the L/C shall be extended without imposing Seller liquidated damages and/or cost.

Buyer and Seller will keep each other updated on progress on both sides.

Force Majeure

Seller shall not be liable for delays in delivery or failure to manufacture or deliver, due to causes beyond its reasonable control, such as acts of God, acts of Buyer, acts of civil or military authority, priorities, fires, strikes, floods, epidemics, quarantine restrictions, war, riot, delay in transportation, car shortages, and inability's due to causes beyond Seller's reasonable control to obtain necessary labor, materials or manufacturing facilities. In the event of any such delay, the delivery date shall be extended for a period of time equal to the period of delay and its consequences. Seller's liability for failure or delay in delivery, for any cause whatsoever, whether beyond Seller's control or not, shall not include indirect, special or consequential damages.

Custom clearance

Unless specifically ordered from Seller, custom clearance is not included and is to be arranged and paid for by Buyer, including (pre) payment of any import duties and other local taxes.

Opening of packing, report of damages and claims

Boxes are to be opened by Buyer only in presence of Seller's installation engineer. Claims for damages and/or missing parts will not be honored when boxes are opened without Seller's installation engineer being present.

Damages to boxes, if any, are (i) to be reported on the documents in proof of delivery at the time of arrival and (ii) to be reported to Seller by e-mail/fax within five (5) days thereafter. Boxes containing accelerator tubes are not to be opened within forty-eight (48) hours after arrival, see elsewhere.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

In the event approval for export by the Government of The Netherlands is not received by Seller within sixteen (16) weeks from Seller's application, Seller has the right to extend the time of delivery based on Seller's order backlog at the moment of receipt by Seller of the approval for export by the Government of The Netherlands.

Contract format and acceptance

In support of expeditious application for and decision about approval for export by the Government of The Netherlands:

- The Contract, including all annexes, if any, referred to therein shall be in English or in dual-language (Russian-English).
- The Contract shall clearly state the full name, street address, zip code, city, province/state, country, web-site, phone number, fax number, if any and the name and job title of the authorized representative of Buyer, intermediate Buyer(s), if any, Seller and End-User as well as their obligations in the execution thereof.

Seller shall have accepted the Contract first when and after the Contract has been signed by authorized representatives all parties referred to therein.

Packing

Packed in wooden boxes suitable for transportation by Air and air-suspended Truck and indoor storage.

Accelerator tubes contain glass-to-metal bonding and are as such sensitive to temperature changes and shocks. Accelerator tubes should be handled with extra care and kept at all times in a temperature controlled ambient: Temperature to remain in between +10 and +35 °C and not to vary more than 10 °C per hour. Let acclimatize 48 hours before opening the boxes.

Terms of Delivery

DAP (INCOTERMS 2020) Buyer's site, Dubna, Moscow region, Russian Federation, subject to the terms and conditions stated herein.

Mode of Transportation

Equipment will/is to be transported by Truck.

Freight forwarder

Seller is free to select the forwarder it deems best qualified.



HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Amsterdamseweg 63, 3812 RR Amersfoort, P.O. Box 99, 3800 AB Amersfoort, The Netherlands
Phone: +31-33-4619741. Fax +31-33-4615291. Trade register Amersfoort nr. 31014544
E-mail: info@highvolteng.com – Web: www.highvolteng.com

Joint Inst. for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation

01768/A31864-02
October 16, 2020

Entire understanding, modification and waiver

This Agreement is the entire understanding and agreement between Parties with respect to the subject matter hereof, including extend of supply and specifications, and supersedes all prior understandings and agreements relating hereto. No modification, alteration or amendment shall be effective unless made in writing and signed by duly authorized representatives of each Party. No waiver of any breach hereof shall be deemed or held to be a waiver of any other or subsequent breach.

Applicable law and dispute resolution

The validity, construction and performance of this Agreement shall in all respects be governed by and interpreted in accordance with the laws of The Netherlands. All disputes which may arise during or from this Agreement shall be submitted for decision to a competent court in The Netherlands, Seller reserves the right however, to bring any claim it may have against Buyer before any other Court.

Validity

This quotation is valid for three (3) months after date.

Sincerely,

HIGH VOLTAGE ENGINEERING EUROPA B.V.

Henri van Oosterhout
Managing Director

Сметная стоимость и описание основных мероприятий, планируемых к выполнению в рамках проекта модернизации ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальной инфраструктуры в рамках темы «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств нейтрона» с финансированием в рамках бюджета текущего 7-летнего плана развития ОИЯИ в 2021 - 2022гг и в рамках продленной текущей или новой темы по физике нейтронов в 2023-2024гг.

В данном приложении указана оценочная стоимость дополнительных мероприятий в рамках проекта модернизации при условии его продления на 2023 – 2024гг. и наличии необходимых финансовых ресурсов (табл.5).

Таблица 5.

Сметная стоимость основных мероприятий, планируемых к выполнению в рамках проекта модернизации ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальной инфраструктуры с учетом его продления.

Этапы / мероприятия		Стоимость, k\$
1	Ремонт помещений ускорителя	100
2	Замена ускорительной трубки с делителем и ионным источником	471
3	Автоматизация технологических систем ЭГ-5	100
5	Модернизация научно-исследовательской инфраструктуры ЭГ-5:	
	5.1. Модернизация комплекса ионно-лучевых спектрометров.	29
	5.2. Установка эллипсометрического комплекса	35
6	Монтаж лаборатории для подготовки исследовательских образцов	165
Всего		900

Общая стоимость проекта составляет 900 тыс. долларов из которых 52% составляет стоимость замены ускорительной трубки. Она будет выплачена в 2 этапа. Аванс 120 000 долларов будет выплачен в 2021г, остальная часть суммы – в 2022г в рамках заявленного проекта. 18% суммы планируется потратить на создание новой лаборатории для подготовки и исследования комплементарными методами порошковых объектов. По 100 000 долларов планируется потратить на ремонт производственных помещений и модернизацию / автоматизацию сервисного оборудования ускорительного комплекса. При этом \$50 000 из \$100 000 будет потрачено на приобретение материалов, а оставшиеся \$50 000 – на выполнение НИР по разработке электронных схем и программного обеспечения. На разработку нового ионно-лучевого спектрометра силами Лаборатории планируется потратить 29 000 долларов. На закупку эллипсометрического комплекса отечественного производства планируется использовать сумму, эквивалентную 35 000 долларов.

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов		
			1 год	2 год	3 год
Затраты	Основные узлы оборудования, работы по его обновлению, наладке и т.п.	556	471	50	35
	Строительство/ремонт помещений	265		100	165
	Материалы	79		50	29
Необходимые ресурсы	Нормо-час Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы	240 нормо-час 1000 нормо-час	240 нормо-час 1000 нормо-час		
Источники финансирования	Бюджетные средства Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	900	471	200	229
	Внебюджетные средства Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.				

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

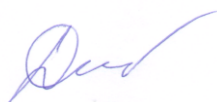


А.С. Дорошкевич

Смета затрат по проекту МОДЕРНИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5 И ЕГО
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

№	Описание статей расходов	Полная стоимость	2021	2022	2023	2024
Статьи расходов						
1	Проектирование	k\$				
2	Строительство / ремонт	k\$			100	165
3	Материалы	k\$			50	29
4	Оборудование	k\$	120	351		35
5	Оплата НИР, выполняемых по договорам	k\$			50	
6	Командировочные расходы	k\$				
Всего		k\$	120	351	200	229

Руководитель проекта



А.С. Дорошкевич