

*Форма открытия (продления) Проекта /  
Подпроекта КИП*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ  
ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта  
(далее КИП)**

**1.1. Шифр темы / КИП** (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

**1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП** (для продлеваемых проектов и подпроектов)

**1.2. Лаборатория ЛЯП**

**1.3. Научное направление** *Ускорители, детекторы, R&D, прикладные исследования*

**1.4. Наименование проекта / подпроекта КИП**

Виртуальное прототипирование циклотрона и создание испытательных стендов для тестирования отдельных систем ускорителя.

**1.5. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП**

Карамышева Галина Анатольевна

**1.6. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель проекта/ подпроекта КИП)**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Для создания медицинского циклотрона необходима разработка виртуального прототипа, на котором тестируются основные системы и выбираются базовые параметры ускорителя.

Виртуальный прототип представляет собой компьютерную модель физического объекта (в нашем случае циклотрона), позволяющую анализ и тестирование как отдельных систем, так и изделия в целом, включающее проектирование, изготовление и обслуживание как аналога реального объекта. Тем не менее, виртуального прототипирования оказывается недостаточно для производства эффективного циклотрона, так как некоторые системы требуют

экспериментальной проверки на моделях и опытных образцах. Наиболее важно оптимизировать и тестировать ионный источник и дефлектор, также для проведения пуско-наладочных работ циклотрона MSC230 требуется создание стенда для калибровки датчиков холла, необходимо разработать и изготовить траверсы транспортировки и монтажа секторов циклотрона для формирования требуемого магнитного поля.

В экспериментальном зале ЛЯП НЭОНУ целесообразно иметь следующие стенды:

1. Стенд внутреннего источника. Тестирование внутреннего источника, дефлектора.
2. Калибровочный стенд. Калибровка датчиков Холла.
3. Стенд для намотки катушек из ВТСП ленты.
4. Стенд для намотки медных обмоток.
5. Криогенный стенд для отработки методики охлаждения.
6. Стенд центральной области для внешней инжекции, который, по сути, будет представлять из себя полноценный циклотрон на 15 МэВ, однако работать будет в режиме до 700кэВ.

## **2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)**

В ближайшие годы планируется создать циклотрон и разработать оборудование для изучения методики Флэш облучения. Опыт совместной разработки в коллаборации ОИЯИ ASIPP (Хэфэй, Китай) медицинского циклотрона SC200 в Хэфэе позволит создать источник интенсивного пучка протонов, а опыт лечения методом конформной терапии, накопленный в Медико-техническом комплексе ЛЯП ОИЯИ, открывают возможности проведения модернизации оборудования для точного контроля и подведения высокой мощности дозы для исследований метода Флэш терапии.

Циклотрон SC200 был введен в эксплуатацию в Хэфэй в 2021 году, стабильно отработал более 600 часов, энергия выведенного пучка составляет 200 МэВ, ток выводимого пучка составил около 10 нА, а мощность дозы превышает 2 Гр/мин. Успешный пуск циклотрона подтвердил правильность расчетов разработанных циклотронных систем.

Актуальность проекта, ориентированного на моделирование циклотрона и его систем, обусловлена прежде всего важностью создания отечественного ускорителя для протонной терапии наиболее современными методами, отличающегося уникальной интенсивностью пучка, а также актуальностью медико-биологических исследований, которые будут проводиться в инновационном центре.

### **Медико-биологические исследования в ОИЯИ**

ОИЯИ имеет многолетний опыт фундаментальных и прикладных разработок в области радиационной биологии и медицины. Первые радиобиологические эксперименты в ОИЯИ с использованием пучков протонов синхроциклотрона были начаты в 60-х годах. Первые сеансы клинического применения пучков протонов, генерируемых синхроциклотроном ЛЯП ОИЯИ проводились с 1967 г. Впервые в России была реализована методика трехмерной конформной протонной лучевой терапии в МТК ЛЯП. В период с 2000 по 2019 гг. курс протонной лучевой терапии на пучках фазотрона прошли около 1300 пациентов (в том числе и не российских граждан из стран-участниц ОИЯИ) с различными новообразованиями.

## **Метод Флэш терапии.**

По сравнению с лучевой терапией, проводимой с обычной мощностью дозы (1–7 Гр/мин), Флэш облучение осуществляется при мощности дозы свыше 40 Гр/с за время менее чем 0.5 секунды. Здоровая ткань лучше противостоит Флэш облучению, в то время как опухоль обладает таким же уровнем чувствительности, что и к обычному лечению. Метод вызывает огромный интерес у специалистов, так как не только уменьшает воздействие на здоровые ткани, сокращает количество процедур лечения, но и позволяет лечить некоторые радиорезистентные опухоли. Сейчас активно проводятся исследования на пучках протонов разной интенсивности, верхний предел по интенсивности пучка, целесообразной для терапии не определен, в частности, в г.Троицке на сильноточном линейном ускорителе протонов (ЛУ) ИЯИ исследуют режим облучения биологических объектов при рекордных для протонов значениях мощности дозы 1 МГр/с, который можно назвать “экстремальным” Флэш-режимом.

Применение новой методики лечения Флэш терапии целесообразно начинать с методики трехмерной конформной протонной лучевой терапии, так как доставка необходимой дозы излучения при сверхвысокой мощности дозы, обеспечивающей Флэш метод, намного более проблематична при лечении посредством точечного сканирования.

Ожидаемые преимущества Флэш метода:

1. Уменьшает воздействие на здоровые ткани
2. Позволяет проводить более эффективное лечение радиорезистентных опухолей, а также рецидивных заболеваний
3. Уменьшает количество случаев, где необходимо применение ионов углерода
4. Сокращает количество процедур лечения

## **Моделирование циклотрона.**

С появлением нового метода облучения Flash потребность в сильноточных ускорителях возросла, что привело к разработке нового проекта MSC230 с малым магнитным полем 1,7 Тл в центре. Разработан проект циклотрона MSC230, основные технические решения которого основаны на опыте успешно работающих ускорителей (Varian, C235).

В результате циклотрон способен обеспечить максимально возможный ток в этом классе ускорителей, так как в дополнение к сравнительно невысокому полю имеет рекордный темп ускорения при минимальном энергопотреблении как магнитной, так и ускорительной систем.

В Институте электрофизической аппаратуры им. Ефремова в Санкт-Петербурге должны начаться техническое проектирование и изготовление основных систем циклотрона уже в текущем году.

Для достижения цели первого этапа проекта, то есть для успешного пуска циклотрона MSC230, требуется тестирование отдельных систем циклотрона на реальных моделях и прототипах. Ряд систем, являясь расходными материалами, будут нуждаться в замене в процессе эксплуатации, это прежде всего источник ионов, дефлектор. Для некоторых систем важной задачей будет оптимизация, направленная в конечном счете на увеличение интенсивности пучка, выведенного из ускорителя.

Вывод пучка из данного циклотрона будет осуществляться с помощью электростатического дефлектора (ЭСД), расположенного между секторами циклотрона, и двух пассивных фокусирующих магнитных каналов (МК1, МК2). Магнитные каналы применяют для

компенсации горизонтальной дефокусировки, которую испытывает пучок после отклонения дефлектором, попадая в область спадающего с радиусом магнитного поля.

При установке магнитного канала уровень магнитного поля в зоне вывода снижается и возникает первая гармоника в азимутальном распределении поля. Для полной компенсации нечетных гармоник магнитного поля будут установлены компенсирующие каналы. В расчетах компенсирующий канал представлял собой точную копию фокусирующего канала, расположенную центрально симметрично. Увеличение при этом второй гармоники в 2 раза не оказывает существенного негативного влияния на пучок. Необходимое среднее магнитное поле формируется за счет дополнительного увеличения азимутальной протяженности секторов в зоне вывода.

Из анализа динамики пучка в электро-магнитных полях видно, что орбиты на конечном радиусе ускорения не имеют пространственного разделения, таким образом мы имеем дело с многооборотным выводом, для разных режимов ускорения дефлектор захватывает протоны с последних 5-10 орбит. Шаг орбит благодаря высокому темпу ускорения в зоне вывода, обеспечиваемому четырьмя резонаторами и росту напряжения вдоль радиуса, составляет 1.5 мм, что определяет достаточный заброс пучка и эффективный вывод. Расчеты динамики пучка позволяют определить горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в электростатический дефлектор. Портреты пучка на входе в дефлектор показаны на Рис. 1, горизонтальный эмиттанс ( $\epsilon_x$ ) = 1.4  $\pi$  мм·мрад, вертикальный эмиттанс ( $\epsilon_z$ ) = 0.8  $\pi$  мм·мрад, разброс ионов по энергии ( $\delta W$ ) =  $\pm 0.5\%$ .

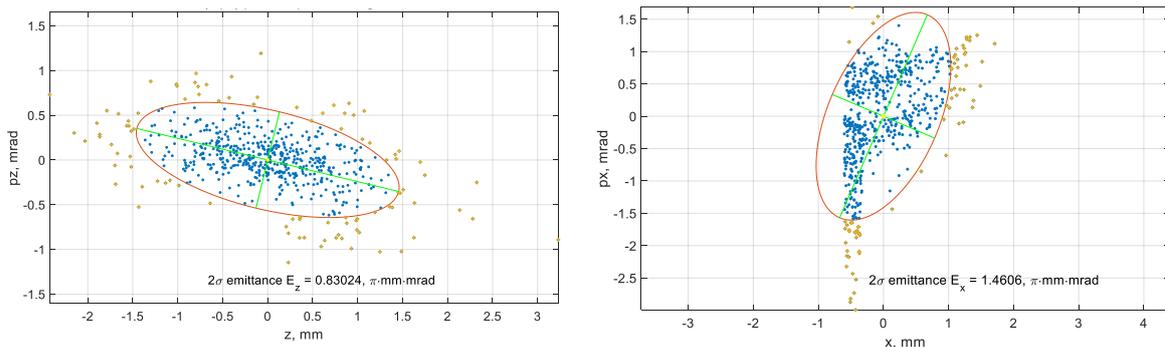


Рис. 1: Портрет пучка на входе в дефлектор на фазовых плоскостях ( $z, p_z$ ) и ( $r, p_r$ ).

Напряжение на ЭСД, необходимое для вывода пучка, составляет около 90-100 кВ/см. Пучок после прохождения через дефлектор проходит через ускоряющий резонатор и затем выходит из циклотрона по схеме, ранее разработанной для вывода пучка из циклотрона SC200. Пассивные магнитные каналы расположены вдоль секторов, первый магнитный канал вносит изменение магнитного поля 600 Гаусс и градиент 1000 Гс/см, второй магнитный канал вносит градиент 1700 Гс/см. Основные потери пучка происходят в основном на начальной части септума дефлектора и существенно зависят от его толщины, поэтому толщина септума выбрана 0.1 мм.

Толщина септума дефлектора циклотрона напрямую связана с величиной потерь при выводе пучка, именно величина потерь накладывает ограничение на максимальный ток выводимого пучка. Минимальная толщина септума будет зависеть от материала и технологии изготовления. Нуждается в проверке минимально достижимая высота дефлектора, что напрямую скажется на проектах следующих вариантов циклотрона.

Важно организовать точную калибровку датчиков Холла заблаговременно на магните, имеющемся в отделе, с тем чтобы обеспечить формирование магнитного поля изохронного циклотрона достоверной информацией, получаемой при проведении магнитных измерений. Имеющийся калибровочный магнит, требует переделки полюса с целью увеличения магнитного поля.

Подготовка к формированию магнитного поля циклотрона MSC230 не будет ограничиваться работами на калибровочном стенде. Уже подготовлена программа анализа характеристик изме-

ренных карт магнитного поля – *CORD*, которая была отгестирована на ранее полученных картах циклотрона *C235 ИВА*, и *C200 Хэфэй*. Продолжаются работы по подготовке планов шиммирования, а также по подготовке к тестированию степени изохронизма магнитного поля, а именно, разрабатываются методики обработки результатов измерения кривых Смита-Гаррена. Будут проведены расчеты влияния магнитного поля ускоряющей системы.

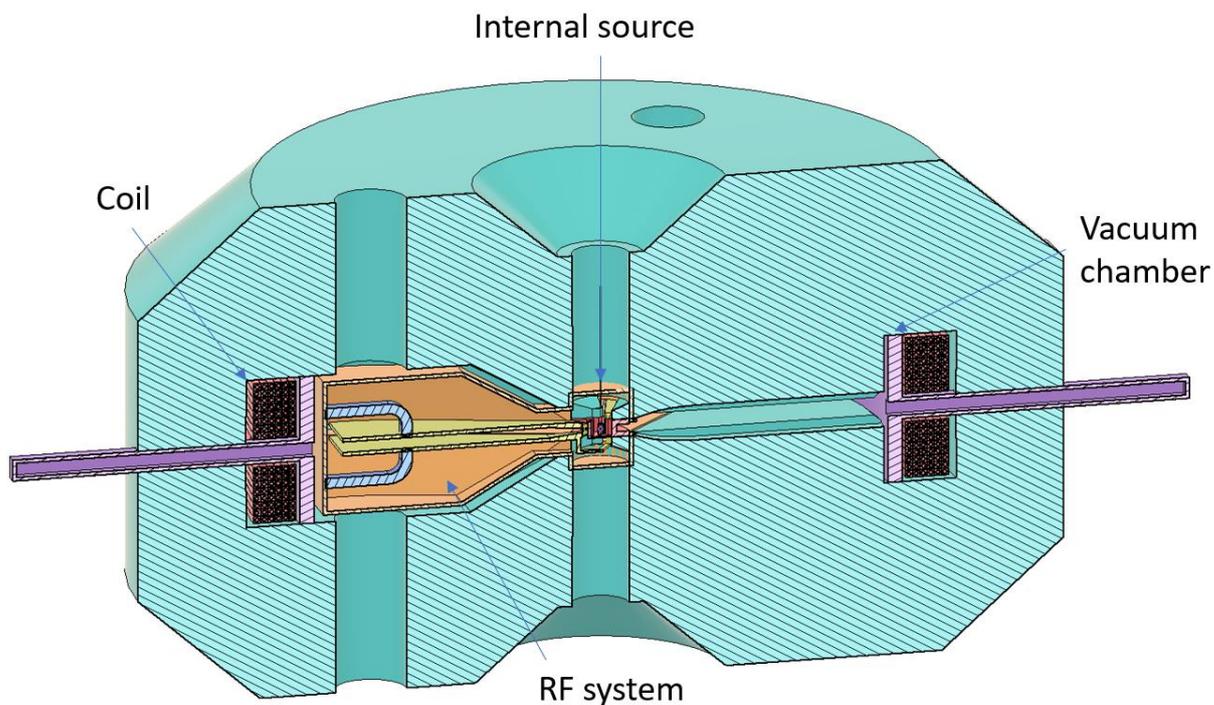
Перспектива применения обмоток из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в медицинских циклотронах не вызывает сомнений, так как ВТСП оправдывает применение сверхпроводимости не столько для достижения высокого поля, сколько для существенной экономии энергозатрат при простоте обслуживания, сравнимой с обслуживанием магнитов с медными обмотками. Единственным ограничением применения ВТСП на сегодня является высокая цена на сверхпроводник второго поколения, пригодный для изготовления обмоток циклотрона.

Оптимальный медицинский циклотрон должен обладать рядом характеристик, такие как простота эксплуатации, компактность, энергоэффективность. Большая часть этих характеристик достигается если свести к минимуму количество ампервитков, необходимое для питания магнита. Размеры катушек при этом уменьшаются, ускоритель становится более энергоэффективным и дешевым. Поскольку в таком случае циклотрон требует небольшого количества материала для производства катушек, использование ВТСП становится приемлемым по цене.

Так как обмотки из ВТСП до сих пор в циклотронах не применялись, предлагается создание тестовой ВТСП обмотки диаметром около 1 м для небольшого магнита, разработанного с целью минимизации количества ампер-витков при обеспечения магнитного поля параметром  $K=15$ . На первом этапе предлагается создание магнита и ВТСП катушки 20000 А\*витков.

В ОИЯИ ЛНФ имеется опыт создания тестового магнита изготовленного из ВТСП ленты, охлаждаемого криокулером замкнутого цикла, предназначенный для нейтронного эксперимента (Черников А.Н.). Использовалась ВТСП лента 12 мм шириной и 0.1 мм толщиной фирмы SUPERPOWER. Внешний слой ленты изготовлен из меди, изолирован.

Для контроля качества ленты использовался способ контроля каждого куска путем ввода тока по всей длине. Кусок наматывался в катушку без использования какой-либо изоляции - непосредственно медь на медь. Предполагалось, что при охлаждении и переходе в сверхпроводящее состояние ленты, медь будет являться изолятором. В центр катушки помещался датчик Холла. При вводе тока можно однозначно сделать вывод, что получаемое магнитное поле соответствовало модельному по размеру полученной катушки. Охлаждение производилось при помощи криокулера замкнутого цикла до 5 К. Катушка находилась в вакууме.



Вертикальный разрез.

Рис.2: Вид виртуального прототипа циклотрона на 15 МэВ (протоны).

Стенд для тестирования ВТСП обмотки в дальнейшем может быть доработан до стенда центральной области. Для этого нужно будет изготовить полноценную ускоряющую систему для тестирования захвата в ускорение из источника типа PIG, что в случае успеха будет прототипом небольшого циклотрона на энергию 15 МэВ (см.Рис.2).

**2.3. Предполагаемый срок выполнения**  
2024-2025 годы

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**  
ЛЯП, ЛИТ, ЛНФ, ЛФВЭ

#### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты					
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)					

#### 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
ASIPP	Китай	Хэфэй	Yuntao Song Chen Gen	Сотрудничество

**2.6. Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

### 3. Кадровое обеспечение

#### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	11	0
2.	инженеры	6	
3.	специалисты	5	
4.	служащие	2	
5.	рабочие	1	
	<b>Итого:</b>	<b>30</b>	<b>0</b>

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Карамышев О.В	НЭОНУ ЛЯП	Нач.с.№1	1
		Киян И.Н.	НЭОНУ ЛЯП	Нач.с.№3	1
		Гурский С.В.	НЭОНУ ЛЯП	Н.с.	1
		Доля С.Н.	НЭОНУ ЛЯП	С.н.с.	1
		Казакова Г.Г.	НЭОНУ ЛЯП	Н.с.	1
		Карамышева Т.В.	ЛИТ	С.н.с.	0.8
		Малинин В.А.	НЭОНУ ЛЯП	Н.с	1
		Ляпин И.Д.	НЭОНУ ЛЯП	М.н.с.	1
		Попов Д. В.	НЭОНУ ЛЯП	Н.с.	1
		Скрипка Г.М.	НЭОНУ ЛЯП	Н.с.	1
		Чеснов А.Ф.	НЭОНУ ЛЯП	С.н.с.	0.5
		Ширков С.Г.	НЭОНУ ЛЯП	С.н.с.	0.3
		Черников А.	ЛНФ	С.н.с.	0.2
Новиков М.	ЛФВЭ	С.н.с.	0.2		
2.	инженеры	Галкин Р.	НЭОНУ ЛЯП	Ст.и.	1
		Грасимов В.А.	НЭОНУ ЛЯП	Инж.-конст.	1
		Гоншиор А.Л.	НЭОНУ ЛЯП	И.	1
		Лепкина О.Е.	НЭОНУ ЛЯП	Ст.и.	1
		Ломакина О.В.	НЭОНУ ЛЯП	Ст.и.	1
		Мальш Д.А.	НЭОНУ ЛЯП	И.	1
		Петров Д.	НЭОНУ ЛЯП	Ст.и.	0.5
		Романов В.М.	ЛЯП	советник	1
		Синица А.А.	НЭОНУ ЛЯП	Инж.-конст.	1
Федоренко С.А.	НЭОНУ ЛЯП	Ст.и.			
3.	специалисты	Смирнов И.А.	НЭОНУ ЛЯП	Техник	1
		Евсеева И.В.	НЭОНУ ЛЯП	Техник	1
4.	рабочие	Рогозин Д.В.	НЭОНУ ЛЯП	механик	1
	<b>Итого:</b>				

#### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	<b>Итого:</b>		

#### 4. Финансовое обеспечение

##### 4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

500 000\$

##### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_

Год начала проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту \_\_\_\_\_

#### Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта / Подпроекта КИП

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования	Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
		1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Международное сотрудничество (МНТС)	10	10				
Материалы	400	400				
Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)						
Пуско-наладочные работы	50	50				
Услуги научно- исследовательских организаций						
Приобретение программного обеспечения	5					
Проектирование/строительство						
Сервисные расходы (планируются в случае прямой						

		<i>принадлежности к проекту)</i>						
<b>Необходимые ресурсы</b>	<b>Нормо-час</b>	Ресурсы						
		– сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора,.....						
<b>Источники финансирования</b>	<b>Бюджетные средства</b>	Бюджет ОИЯИ ( <i>статьи бюджета</i> )	460	460				
	<b>Внебюджет (доп. смета)</b>	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /  
ПОДПРОЕКТА КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

**1. Общие сведения по проекту / подпроекту КИП**

**1.1. Научное направление**

**1.2. Наименование проекта / подпроекта КИП**

**1.3. Шифр проекта / подпроекта КИП**

*Пример (04-4-1140-1-2024/2027)*

**1.4. Шифр темы / КИП**

*Пример (тема 04-4-1140-2024, КИП 02-0-1065-2007)*

**1.5. Фактический срок реализации проекта / подпроекта КИП**

**1.6. Руководитель(ли) проекта / подпроекта КИП**

**2. Научный отчет**

**2.1. Аннотация**

**2.2. Развернутый научный отчет**

Проведен анализ карт полей последней модификации изохронного циклотрона MSC230 для протонной терапии и медико-биологических исследований. В программе CORD, оформленной в виде исполняемых модулей (Executable Notebook) Live Editor Matlab, объединены методы и алгоритмы для точного и эффективного анализа электромагнитного поля циклотрона. Код CORD осуществляет анализ динамики частиц на основе комбинации анализа карты магнитного поля с анализом карты электрического поля. В первой части программы осуществляется поиск замкнутых орбит и расчет фокусирующих характеристик магнитного поля. Во второй части - анализ динамических характеристик поля магнита дополнен учетом электромагнитного поля ускоряющей системы, а также расчетом интегрального фазового сдвига и рядом полезных характеристик, таких как, количество оборотов и шаг орбиты в зависимости от радиуса.

**2.3. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта / подпроекта КИП**

(включая процент реализации заявленных этапов по проекту / подпроекту КИП

*(если применимо))*

**2.4. Результаты сопутствующей деятельности**

2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

2.4.3. Награды и премии.

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризаторская деятельность).

**3. Международное научно-техническое сотрудничество.**

Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения

**4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных**

#### 4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
	<b>Итого:</b>		

#### 4.2. Фактическая сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)						
	Материалы						
	Оборудование и услуги сторонних организаций						
	Пуско-наладочные работы						
	Услуги научно-исследовательских организаций						
	Приобретение программного обеспечения						
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы ( <i>планируются в случае прямой принадлежности к проекту</i> )						
<b>Необходимые ресурсы</b>	<b>Нормо-час</b>	Ресурсы					
		– Сумма FTE,					
		– ускорителя/установки,					
		– реактора					
<b>Источники финансирования</b>	<b>Бюджетные средства</b>	Бюджет ОИЯИ ( <i>статьи бюджета</i> )					

<b>Внебюджет (доп. смета)</b>	Вклады соисполнителей						
	Средства по договорам с заказчиками						
	Другие источники финансирования						

### 4.3. Другие ресурсы

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты					
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)					

### 5. Заключение

### 6. Предлагаемые рецензенты

Руководитель темы / КИП

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
 “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Руководитель проекта (шифр проекта) / подпроекта КИП

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
 “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Экономист Лаборатории

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
 “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Based on the experience of creating SC200 cyclotron which was successfully commissioned in Hefei in 2021. The current of the extracted beam was about 10 nA. The successful start-up of the cyclotron proved the correctness of the calculations of all

cyclotron systems developed by the department of new accelerator design of the new accelerator was proposed. It is inexpedient to create an isochronous cyclotron with a high magnetic field, because in this case the main advantage of the cyclotron - high beam intensity and ease of installation and operation - is lost.

With the advent of the new irradiation method Flash, the need for high-current accelerator increased, which led to the development of a new project MSC230 with low magnetic field 1.7 T in the center. The MSC230 cyclotron project has been developed, with key technical solutions based on the experience of successfully operating accelerators (Varian, C235).

As a result, the cyclotron is able to provide the maximum possible current in this class of accelerators, as it has a record acceleration rate with minimal power consumption of both magnetic and accelerating systems.

Technical design and manufacturing of the main cyclotron systems are about to begin in the Efremov Institute of Electrophysical Apparatus, St.-Petersburg.

Основываясь на опыте создания SC200, циклотрон был успешно введен в эксплуатацию в Хэфэй в 2021 году. Ток выводимого пучка составил около 10 нА. Успешный пуск циклотрона подтвердил правильность расчетов всех разработанных циклотронных систем, автор пришел к выводу о нецелесообразности создания изохронного циклотрона с сильным магнитным полем, т. циклотрон - высокая интенсивность пучка и простота монтажа и эксплуатации - теряется.

С появлением нового метода облучения Flash потребность в сильноточных ускорителях возросла, что привело к разработке нового проекта MSC230 с малым магнитным полем 1,7 Тл в центре. Разработан проект циклотрона MSC230, основные технические решения которого основаны на опыте успешно работающих ускорителей (Varian, C235).

В результате циклотрон способен обеспечить максимально возможный ток в этом классе ускорителей, так как имеет рекордную скорость ускорения при минимальном энергопотреблении как магнитной, так и ускорительной систем.

В Институте электрофизической аппаратуры им. Ефремова в Санкт-Петербурге должны начаться техническое проектирование и изготовление основных систем циклотрона.