

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИМ. В.И. ВЕКслЕРА И А.М. БАЛДИНА

*На правах рукописи*

**СУМБАЕВ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ**

**УСКОРИТЕЛЬ ЛУЭ–200 - ГЕНЕРАТОР ФОТОНЕЙТРОНОВ  
ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА РЕЗОНАНСНЫХ НЕЙТРОНОВ  
ИРЕН**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Дубна, 2022

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований

**Научный консультант** *Мешков Игорь Николаевич,*  
*доктор физико - математических наук, профессор,*  
*академик РАН, Объединённый институт ядерных*  
*исследований / Лаборатория физики высоких*  
*энергий, главный научный сотрудник, г. Дубна*

**Официальные оппоненты** *Винокуров Николай Александрович,*  
*доктор физико – математических наук, профессор,*  
*член – корреспондент РАН, ФБГУН Институт*  
*ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН /*  
*Лаборатория 8-1, главный научный сотрудник,*  
*г. Новосибирск*

*Симонов Карл Георгиевич, доктор технических наук,*  
*старший научный сотрудник, АО "НПП "Исток" им.*  
*Шокина" / Научно – производственный комплекс 2,*  
*начальник лаборатории,*  
*г. Фрязино*

*Парамонов Валентин Витальевич, доктор физико -*  
*математических наук, ФБГУН Институт ядерных*  
*исследований РАН / Лаборатория ускоряющих*  
*систем Отдела Ускорительного комплекса,*  
*ведущий научный сотрудник, г. Москва*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединённого института ядерных исследований в информационно - телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://lib.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио - Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного Совета  
кандидат физико - математических наук,  
старший научный сотрудник

В.А. Арёфьев

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Созданная в Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) Объединённого института ядерных исследований научная школа по нейтронной ядерной физике добилась общепризнанных результатов в исследовании свойств нейтрона, в изучении эффектов нарушения симметрии фундаментальных взаимодействий нейтронов с ядрами, структуры возбужденных компаунд - состояний тяжелых ядер, образованных после захвата резонансных нейтронов, а также механизмов ядерного деления и альфа-, гамма- и протонного распада этих состояний. Эти успехи в значительной степени обусловлены наличием и использованием в ЛНФ собственных импульсных источников нейтронов. В 1960 г. в ЛНФ ОИЯИ был запущен первый в мире реактор периодического действия ИБР, основанный на принципе механической модуляции реактивности, с длительностью импульса нейтронов до 80 мкс. С тех пор Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ фактически постоянно занималась не только физическими исследованиями в области нейтронной физики, но и созданием новых интенсивных импульсных источников нейтронов, их модификацией и развитием как профильных базовых установок.

С целью сокращения длительности импульса нейтронных пучков в 1964 году реактор периодического действия ИБР был реконструирован в нейтронный источник бустерного типа - комбинацию модернизированного реактора ИБР и электронного ускорителя – микротрона на 30 МэВ. Электронный пучок микротрона в урановой мишени генерировал тормозные гамма – кванты, которые затем производили фотонейтроны. Подкритическая сборка размножала первичные потоки нейтронов в 100 - 200 раз. Длительность импульса нейтронов при этом сократилась до 3 - 4 мкс.

После успешной работы в течение нескольких лет в 1968 году реактор ИБР был остановлен. И реактор, и микротрон были демонтированы, а в 1969 году реактор периодического действия с вариацией реактивности ИБР был реконструирован в нейтронный источник ИБР-30 бустерного типа - комбинацию модернизированного реактора с вращающейся частью активной зоны и генератора первичных фотонейтронов - линейного ускорителя на бегущей волне с пучком электронов с

энергией до 35 МэВ. Линейный ускоритель электронов, известный как ЛУЭ-40, вошёл в строй в марте 1970 года и проработал более 30 лет.

До 1988 года нейтронный источник ИБР-30 работал в режиме импульсного реактора и в режиме импульсного бустера, а с 1988 года только в режиме бустера. Импульс пучка электронов ускорителя был сфазирован с модуляцией реактивности активной зоны (от  $k_{эф} = 0.944$  между импульсами до  $k_{эф} = 0.995$  в импульсе быстрых нейтронов). При использовании урановых вкладышей во вращающейся части активной зоны с коэффициентом размножения нейтронов бустером  $\approx 200$  источник обеспечивал интенсивность генерации нейтронов до  $5 \cdot 10^{14}$  н/с в импульсах длительностью 4.5 мкс с частотой 100 Гц.

К концу тридцатилетнего периода эксплуатации нейтронный источник ЛУЭ-40 + ИБР30 выработал свои ресурсы механической и радиационной стойкости и был остановлен в 2001 году, но уже в 1989 – 1991 гг. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ началось обсуждение предложений по новому источнику, условно названному «НИВР» - нейтронный источник высокого разрешения (в английской транскрипции HRNS). При выработке концепции нового источника нейтронов с учётом опыта работы ЛНФ с электронными ускорителями был определён вариант бустера с драйвером – линейным электронным ускорителем на бегущей волне дециметрового диапазона.

В окончательном виде проектное предложение нового источника, концепция которого являлась прямым развитием идеи бустерного источника нейтронов ЛУЭ-40 + ИБР30, было сформулировано в Сообщении ОИЯИ в 1992 году [1]. В нём была представлена новая ядерная установка - источник нейтронов с энергией в области резонансных нейтронов (от тепловых до быстрых), базирующийся на подкритической сборке без модуляции реактивности активной зоны с внешней инжекцией фотонейтронов, образованных гамма - квантами, возникающими при торможении электронного пучка линейного ускорителя в мишени - конвертере. Основное предназначение нового источника – обеспечение импульсными потоками нейтронов времяпролётных (TOF - Time Of Flight) спектрометров высокого разрешения. В таблице 1 приведены характеристики импульсных источников нейтронов Лаборатории нейтронной физики этого типа вместе с новым источником.

Целевое направление развития этих источников состояло в сокращении длительности импульса нейтронных потоков. При этом не обязательным, но желательным условием его развития было сохранение средней интенсивности потока нейтронов.

Таблица 1. Характеристики ряда импульсных источников нейтронов ЛНФ ОИЯИ

Параметры	ИБР	ИБР + Микротрон	ИБР - 30 (лиак ЛУЭ-40 + ИБР)	Проект ИРЕН (лиак ЛУЭ-200 + размножающая мишень)
Длительность нейтронного импульса	36 мкс	3 - 4 мкс	4.5 мкс	0.4 мкс
Частота циклов	8 - 80 Гц	50 Гц	100 Гц	150 Гц
Коэффициент размножения нейтронов в активной зоне	400	200	от 200 до неск. тысяч в режиме реактора	32.7
Средняя интенсивность (в 4π пространство)	-	-	$5 \times 10^{14}$ н/сек	$9 \times 10^{14}$ н/сек

В новый источник предлагалось включить:

- “размножающую” мишень – выполненный из тяжелого материала е-γ-п конвертер, окружённый бланкетом с быстрой глубоко подкритической плутониевой сборкой, размножающей нейтроны за счёт деления ядер плутония, инициированного фотонейтронами, что по оценкам позволяло обеспечить получение короткого импульса быстрых нейтронов (до 0.43 мкс) со средней интенсивностью до  $9 \cdot 10^{14}$  н/с.
- драйвер источника нейтронов - современный электронный линейный ускоритель на бегущей волне дециметрового диапазона с длительностью электронного импульса  $\sim 0.2$  мкс и мощностью электронного пучка  $\approx 10$  кВт.

Новая установка получила название **ИРЕН** (импульсный **И**сточник **Р**езонансных **Н**ейтронов) и проектировалась, в первую очередь, для нейтронных спектрометров по времени пролёта с развитой сетью экспериментальных нейтронных каналов. **При сокращении длительности импульса нейтронов в десять раз в проект ИРЕН заложено улучшение «качества» нейтронных спектрометров (отношение потока нейтронов к квадрату длительности импульса) более, чем на два порядка.** Достижение проектных параметров позволяло Объединённому институту ядерных исследований стать обладателем современного нейтронного источника для ядерной и прикладной физики с параметрами, близкими к лучшим мировым источникам нейтронов.

## **Цель и задачи работы**

Цель работы состояла в реализации проекта ИРЕН, в первую очередь, в части создания линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200, отвечающего требованиям, сформулированным в первоначальном предложении источника ИРЕН [1,2]. Диссертационная работа посвящена разработке технического проекта ускорителя, исходя из требования формирования пучка электронов с параметрами:

- энергия - более 60 МэВ,
- ток пучка в импульсе - 1.5 А,
- средняя мощность  $\approx 10$  кВт,
- цикличность  $\leq 200$  Гц,
- длительность импульса  $\leq 0.3$  мкс.

При разработке технического проекта линейного ускорителя электронов, возникли и решены конкретные задачи проектирования, создания и размещения целого ряда основных, инфраструктурных и технологических систем, образующих линейный ускоритель электронов, таких как СВЧ система, магнитная система, система модуляторов - источников высоковольтного импульсного питания клистронов, система управления, система диагностики, вакуумная система, система охлаждения и термостабилизации ускоряющих секций и СВЧ компонентов и др. По мере выполнения проектных задач, задач изготовления и монтажа оборудования ускорителя на штатных местах работа над реализацией проекта перешла в стадию наладки систем ускорителя и запуска ускорителя в целом. Результаты проектных разработок, работ по наладке, запуску и развитию ускорителя и всего комплекса источника нейтронов составляют предмет диссертации, определяют её содержание, актуальность, новизну и практическую ценность.

## **На защиту выносятся следующие результаты, определяющие практическую ценность и научную новизну диссертации**

1. Основные проектные решения технического проекта ускорителя ЛУЭ-200:
  - Компоновка основных узлов и систем ускорителя и их расположение в здании источника нейтронов ИРЕН.
  - Результаты анализа возможностей построения вариантов СВЧ станций на базе мощных импульсных клистронов дециметрового диапазона для ускоряющей системы ускорителя ЛУЭ-200.

- Обоснование схемы модулятора – генератора высоковольтных импульсных источников питания клистронов ускорителя.
  - Результаты разработки и создания магнитной системы ускорителя с системой питания.
  - Результаты разработки и создания магнитного спектрометра энергий ускоренного пучка.
2. Результаты экспериментальных и расчётных исследований эффективности ускоряющей системы.
  3. Экспериментальные результаты по физическому пуску  $I^{-0й}$  очереди ускорителя ЛУЭ-200: по проводке пучка, оптимизации канала транспортировки, измерению энергии и энергетического спектра пучка электронов и по энергетическому пуску ускорителя ЛУЭ-200 в работу с частотой циклов 25 – 50 Гц.
  4. Экспериментальные результаты по физическому пуску  $II^{-0й}$  очереди ускорителя ЛУЭ-200.
  5. Результаты физического пуска и развития импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН.

#### **Апробация диссертации**

Результаты работ, положенных в основу диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ряде ведущих отечественных ускорительных центров: (ИЯФ СО РАН, ОИЯИ, МИФИ), на Российских и международных конференциях по ускорителям заряженных частиц: RuPAC2002 (Обнинск, РФ), RuPAC2004 (Дубна, РФ), RuPAC2006 (Новосибирск, РФ), RuPAC2012 (С-Петербург, РФ), RuPAC2016 (С-Петербург, РФ), LINAC96 (Geneva, Швейцария), LINAC98 (Chicago, USA), LINAC2000 (Monterey, USA), LINAC2002 (Gyeongju, Korea), LINAC2004 (Lubek, Germany), LINAC2014 (Geneva, Швейцария), LINAC2018 (Beijing, China), на международных научных семинарах по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти профессора В.П. Саранцева (2001г. Дубна; 2003г. Дубна; 2005г. Алушта; 2009г. Алушта; 2011г. Алушта; 2013г. Алушта; 2015г. Алушта; 2017г. Алушта, 2019г. Алушта), докладывались на Международной Сессии – конференции секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук 12 - 15 апреля 2016г. (Дубна, ОИЯИ).

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:** 7,8,9,10,12,13,14, 15,16,17,18,19,20,21,22,24,25,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45.

### **Личный вклад автора**

В процессе проектирования ускорителя под руководством автора подготовлены проектные задания на разработку и проектирование базовых и инфраструктурных систем ускорителя, включающие либо технические предложения по проектируемым системам, либо готовые технические решения. В качестве главного инженера проекта линейного ускорителя ЛУЭ-200 автор осуществлял проектирование и авторское сопровождение производства, монтажа, наладки и испытаний изготовленных систем и узлов ускорителя.

При проведении тестирования ускоряющих секций в ИЯФ СО РАН автором совместно с ведущими специалистами ИЯФ разработаны программы и методики экспериментов, проведены измерения, обработаны и проанализированы результаты экспериментов, подготовлены итоговые отчёты и публикации.

Автором лично проведены расчёты и разработка соленоидального канала магнитной системы, магнитного спектрометра, магнитных корректоров траектории пучка, системы диагностики пучка ускорителя, обоснована и рассчитана схема модулятора клистронов.

Все пуско – наладочные работы на системах ускорителя ЛУЭ-200 и работы по физическому пуску ускорителя и нейтронного источника ИРЕН в целом выполнены под руководством автора и при его определяющем участии.

Автором проведены анализ и обобщение результатов экспериментов на ускорителе, лично подготовлены практически все научные сообщения и публикации по результатам, полученным на ускорителе ЛУЭ-200.

### **Публикации**

По материалам диссертации автором опубликовано более 30 работ, в том числе 12 статей в рецензируемых изданиях, включённых в перечень изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации результатов докторских диссертаций.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, трёх приложений и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации составляет 275 страниц и включает 160 рисунков и 38 таблиц. Список цитируемой литературы включает 179 позиций.



## Содержание диссертации

**Во введении** представлены краткая история создания и развития импульсных реакторов ИБР в ЛНФ ОИЯИ, концепция источника нейтронов ИРЕН, сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована их актуальность.

**В первой главе** проанализированы требования к ускорителю, как генератору фотонейтронов нейтронного источника, и представлены предложения по физическому обоснованию проекта линейного ускорителя электронов на бегущей волне, подготовленные в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [2], общая схема которого приведена на рис. 1. Она представляет собой типичную для линейных ускорителей схему, состоящую из электронной пушки, группирователя и двух ускоряющих секций, магнитной системы с магнитным спектрометром и каналом транспортировки пучка к мишени.

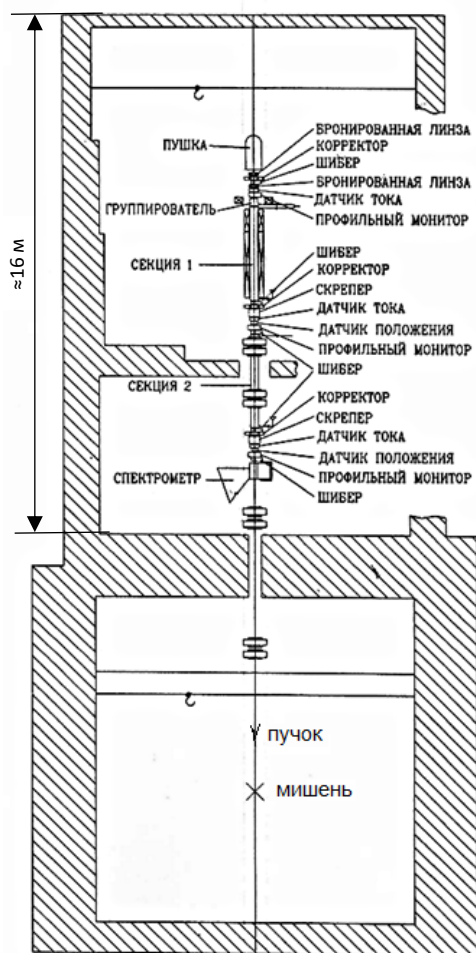


Рис. 1. Общая схема ускорителя ЛУЭ-200 [2]

Решение о создании ускорителя в рамках проекта ИРЕН было принято Учёным Советом ОИЯИ в 1994 году после приобретения Объединённым институтом клистрона 5045 SLAC и получения от ИЯФ СО РАН гарантий на изготовление и поставку в ОИЯИ двух ускоряющих секций. При этом предполагалось, что на первом этапе создания ускоритель будет состоять из одной ускоряющей секции, запитываемой от одного клистрона с использованием системы компрессии СВЧ мощности. Развитие установки до двухсекционного ускорителя с полной проектной мощностью предполагалось осуществить позднее, после приобретения второго клистрона 5045 SLAC, обладающего высокой коммерческой стоимостью.

При разработке технических заданий на проектирование комплекса оборудования ускорителя [3,4] в них сформулированы основные параметры технического проекта ускорителя, предложены решения по общей компоновке и «привязке» вертикально ориентированного ускорителя к зданию существовавшего ранее источника ЛУЭ40 + ИБР-30. Для обеспечения указанных требований структура ускорителя разбита на модули, содержащие отдельные узлы или компоненты ускорительного тракта. Сформированные модули смонтированы в верхнем ускорительном зале на установленной вертикально несущей ферме, а в нижнем ускорительном зале – на вертикальных колоннах – опорах, выполненных из толстостенных нержавеющей труб (рис. 2, рис. 3).

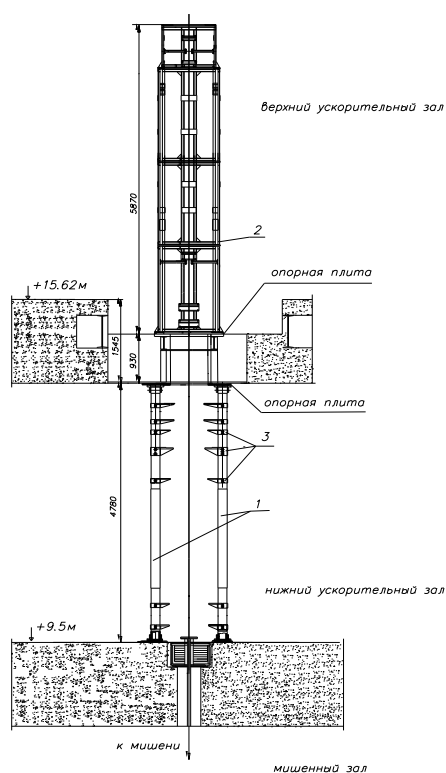


Рис. 2. Общая компоновка несущих конструкций ускорителя. 1 – опорные колонны для нижних модулей, 2 - несущая ферма для модулей верхнего этажа, 3 – кронштейны для монтажа оборудования



Рис. 3. Общая компоновка ускорителя. Вид снизу

**Во второй главе** представлены базовые системы ускорителя ЛУЭ-200: ускоряющая система, система источников СВЧ мощности, система модуляторов, магнитная система, источник электронов. Проанализированы требования к этим системам, предложены и представлены технические решения, реализованные на ускорителе.

**Ускоряющая система.** Схема ускоряющей системы, предложенная ИЯФ в физобосновании [2], реализована на ускорителе с изменениями в части подключения группирователя к питанию СВЧ мощностью (рис. 4). В схеме заложено питание каждой из ускоряющих секций клистрономы дециметрового диапазона (2856 МГц) 5045 SLAC. Каждый клистрон запитывается от собственного модулятора. Возбуждение клистронов синхронизировано от единого генератора – синтезатора частоты 2856 МГц. В СВЧ тракты, питающие ускоряющие секции, включены системы компрессии СВЧ мощности типа SLED, состоящие из двух накопительных резонаторов и 3<sup>x</sup>-децибельного щелевого моста. Разработанные и изготовленные в ИЯФ ускорительные секции [5,6], представляют собой круглые диафрагмированные волноводы с постоянным импедансом. Секции изготовлены из 83 резонаторных ячеек и двух согласующих трансформаторов типа СВЧ волны - преобразователей основной моды волноводного тракта H<sub>10</sub> в ускоряющую моду E<sub>01</sub> бегущей вдоль секции электромагнитной волны.

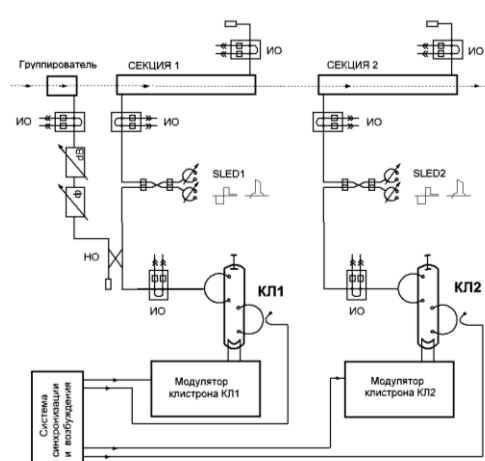


Рис. 4. Структурная схема ускоряющей системы ЛУЭ-200

Питание группирователя предусмотрено ответвлением от СВЧ тракта первой ускоряющей секции (перед SLED1) части СВЧ мощности первого клистрона через волноводный направленный ответвитель (НО) с ослаблением 17 дБ и дополнительную цепочку с фазовращателем “Ф” (0 - 350°) и регулятором мощности - аттенуатором “дВ” (0 - 22 дБ).

Для группировки пучка в физобосновании ускорителя [2] в ИЯФ предложен группирователь на стоячей волне с экспоненциально нарастающим полем в структуре с большими потерями, состоящей из четырех ячеек, геометрия которых повторяет геометрию ячеек ускоряющей секции. Группирователь размещается в непосредственной близости от ускоряющей секции без пространства дрейфа, поэтому темп ускорения в нём должен превышать 20 МэВ/м, а СВЧ мощность, подаваемая на вход, должна составлять около 110 кВт.

**СВЧ станции.** В 2007 г. из-за повреждения клистрона 5045 SLAC при монтаже ускорителя ЛУЭ-200 и отсутствия в ОИЯИ второго аналогичного клистрона было принято решение об адаптации ускоряющей системы в составе одной секции под имеющиеся в наличии в ОИЯИ клистроны TH2129 Thomson с максимальной импульсной мощностью 20 МВт. В связи этим автором проанализированы [7] возможности построения СВЧ станций на базе источников СВЧ мощности – клистронов дециметрового диапазона разной мощности (20 МВт, 40 МВт, 50 МВт, 60 МВт). По результатам анализа:

- Показано, что снижение СВЧ мощности, поступающей от источника, приводит не только к снижению энергосодержания ускоренного пучка в импульсе и снижению его средней мощности, но и к трансформации его энергетического спектра со сдвигом в область меньших энергий и увеличением ширины спектра.

- Определено, что замена клистрона 5045 SLAC на клистрон TH2129 Thomson на ускорителе допустима в целях получения пучков электронов, способных создавать потоки нейтронов, представляющие интерес для постановки на ИРЕН спектрометрических экспериментов, основанных на методе времени пролёта. Замена клистрона 5045 на клистрон E3730A целесообразна для работы ускорителя в режимах с частотой циклов до 50 Гц.

- Сформулирован вывод о том, что при разработке модулятора для ЛУЭ-200 следует обеспечить «гибкий» вариант схемы с возможностью переформатирования модулятора к альтернативному клистрону с иным входным импедансом.

- Разработана система низковольтного питания модуляторов, включающая питание цепей накала катода, питание фокусирующих соленоидов и цепей размагничивания высоковольтных трансформаторов [8].

**Модуляторы.** Схема генераторов высоковольтного импульсного питания усилителей СВЧ мощности - клистронов выбрана на основе анализа различных вариантов, использующих формирование рабочего импульса напряжения на клистроне при разряде формирующих линий (ФЛ) на первичную обмотку высоковольтных импульсных трансформаторов, питающих клистроны. Аналитическими оценками и программными расчётами (Pspice) определены параметры ФЛ для клистронов S –диапазона (2856 МГц), выбраны основные компоненты схемы модулятора: высоковольтные зарядные устройства инверторного

типа, тиратроны CX1836A (E2V, England), конденсаторы GA 37574M производства компании General Atomics (USA).

По итогам расчётных и экспериментальных исследований на основании выполненных расчётов на ускорителе запущены два модулятора под условным наименованием “Модулятор 180 МВт/180 кВт” (рис. 5), изготовленные компанией Dawonsys (Korea) [9,10].

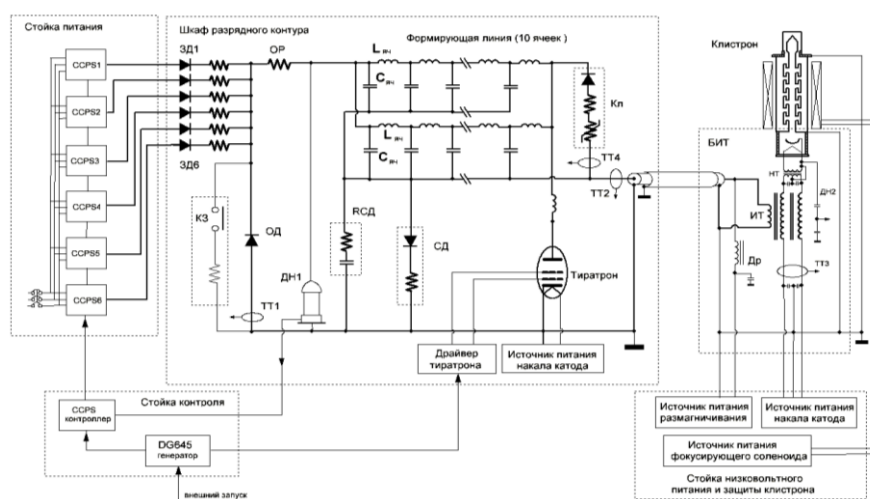


Рис. 5. Принципиальная схема “Модулятора 180 МВт/180 кВт”

**Магнитная система.** Магнитную систему ускорителя образует комплекс электромагнитов, формирующих магнитные поля сопровождения пучка при ускорении и транспортировке пучка, система электромагнитов, корректирующих траекторию пучка и система источников питания электромагнитов. Структура магнитной системы представлена на рис. 6. состоящей из канала соленоидальной фокусировки, канала жёсткой фокусировки, корректирующих магнитов и магнита спектрометра.

**Соленоидальный канал.** Формирование и фокусировка пучка на участке от катода пушки до входа в группирователь осуществляется короткими соленоидальными магнитными линзами МЛ1, МЛ2, МЛ3. В группирователе и в первой ускоряющей секции транспортировка пучка осуществляется непрерывным нарастающим магнитным полем соленоидальной катушки КГ и далее полем соленоида С1. Физическим обоснованием ускорителя ЛУЭ-200 [2] для магнитного сопровождения пучка при ускорении в первой ускоряющей секции предложена комбинация двух

соленоидов со встречными продольными полями. Величина и распределение магнитного поля в соленоидах оценивались на основе численного моделирования пучка частиц, двигающихся в канале с постоянным ускорением, имеющих энергию  $E_b = 200$  кэВ на входе и  $E_b \sim 100$  МэВ на выходе ускоряющей секции. Магнитное поле «подхватывает» пучок на входе в группирователь, затем поле плавно нарастает и сопровождает пучок по всей длине ускоряющей структуры.

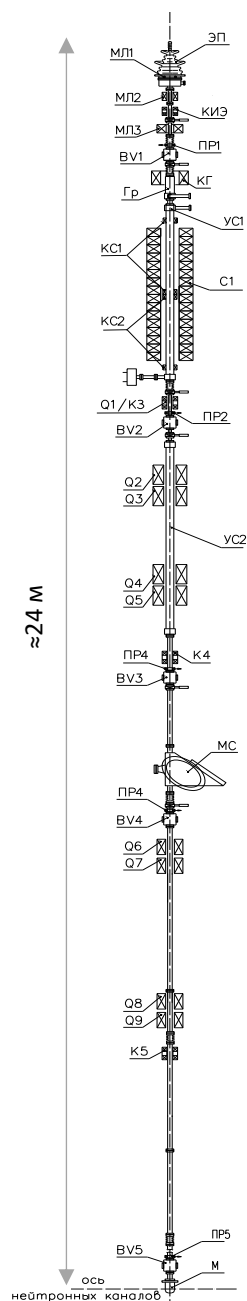


Рис. 6. Структура магнитной системы ускорителя

Элементы ускоряющей системы  
и системы диагностики пучка:

- ЭП – электронная пушка;
- Гр – СВЧ - группирователь;
- УС1 – первая ускоряющая секция;
- УС2 – вторая ускоряющая секция;
- ВВ1, ВВ2, ВВ3, ВВ4, ВВ5 – бимьюеры;
- ПР1, ПР2, ПР3, ПР4, ПР5 – пояса Роговского;
- М – мишень – конвертер;

Электромагниты:

- МЛ1, МЛ2, МЛ3 – короткие соленоидальные магнитные линзы;
- КГ – короткий соленоид группирователя;
- С1 – фокусирующий соленоид первой секции;
- КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5 – корректирующие магниты;
- Q1 – первая квадрупольная линза;
- Q2/Q3, Q4/Q5 – дублиеты широкоапертурных квадрупольных линз;
- Q6/Q7, Q8/Q9 – дублиеты квадрупольных линз;
- МС – магнитный спектрометр.

Система двух соленоидов со встречными продольными полями предлагалась для компенсации азимутального «закручивания» пучка при входе в краевое поле первого соленоида. Эффективность решений, предложенных в [2], проверялась в экспериментах на первой ускоряющей секции форинжектора ускорительного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН [11,12] и в расчётах динамики пучка электронов в ускорительном тракте ЛУЭ-200 [13]. В них установлено, что для успешной транспортировки пучка ЛУЭ-200 в ускоряющей структуре с фокусирующими соленоидами можно отказаться от переполюсовки сопровождающего магнитного поля.

По итогам проводки пучка через ускоряющую секцию сделан вывод о том, что кроме величины сопровождающего поля существенное значение имеет его

качество, характеризуемое отношением поперечной компоненты магнитного поля  $B_{\perp}$  на оси ускоряющей системы к продольной компоненте  $B_{\parallel}$ . В соленоиде первой ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5 [11] соотношение компонент магнитного поля на оси  $B_{\perp}/B_{\parallel}$  составляет  $(5\div 7)\cdot 10^{-2}$ . Отмечено, что при улучшении указанного качества поля соленоида можно дополнительно снизить его максимальную величину, сохранив при этом поперечную устойчивость пучка. В результате автором было предложено решение [14] о разработке новой конструкции соленоида первой ускоряющей секции без переполюсовки магнитного поля. Фокусирующий соленоид с многослойной обмоткой возбуждения разработан, изготовлен и исследован на специализированном стенде [15], а затем установлен и исследован на штатном месте на ускорителе (рис. 7, таблица 2) [14, 16].

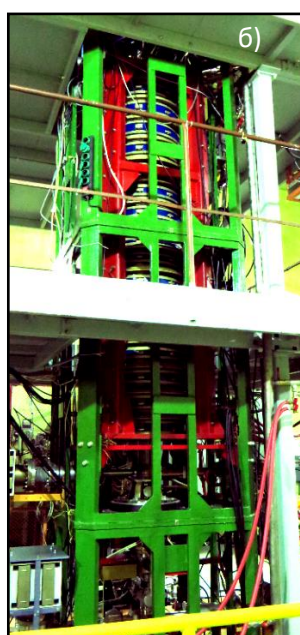


Рис. 7. Общий вид соленоида первой ускоряющей секции:  
а – на стенде при контрольной сборке,  
б – на ускорителе

Таблица 2.  
Параметры фокусирующего соленоида первой секции

Число катушек (секций)	16
Число витков в катушке	100
Сечение токонесущей медной шины (трубки)	12.5X12.5 отв.Ø7.5 мм
Номинальный ток	300 А
Максимальный ток	400 А
Максимальные значения поля $B_z$ в центре соленоида:	
при $I_c = 100$ А	0.08 Т
при $I_c = 200$ А	0.16 Т
Максимальное отношение $B_{r\max}/B_{z\max}$ :	
на оси	$\pm 5 \times 10^{-3}$
в апертуре Ø7 мм	$\pm 15 \times 10^{-3}$
в апертуре Ø14 мм	$\pm 25 \times 10^{-3}$
Длина соленоида	2.7 м
Вес отдельной катушки	130 кг
Вес сборки	2700 кг

### Жёсткофокусирующий канал

Для транспортировки пучка от выхода первой ускоряющей секции до мишени установлен жёсткофокусирующий канал квадрупольных линз: Q1 – на выходе первой секции, вдоль второй ускоряющей секции – дублеты широкоапертурных однотипных квадрупольных линз Q2/Q3 (рис. 8), Q4/Q5 и дублеты квадрупольных однотипных линз Q6/Q7 (рис. 9), Q8/Q9 при транспортировке пучка от выхода второй секции до мишени.

*Коррекция траектории пучка по ускорительному тракту и каналу транспортировки осуществляется корректорами - дипольными магнитами КИЭ, КС1, КС2, К3, К4, К5.*

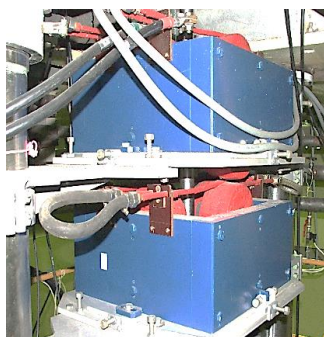


Рис. 8. Дублет линз Q2/Q3



Рис. 9. Дублет линз Q6/Q7



Рис. 10. Магнитный спектрометр

**Источник электронов.** Основные требования к источнику электронов ускорителя ЛУЭ-200 сформулированы в физобосновании ЛУЭ-200 [2]: энергия электронов – 200 кэВ, максимальный ток пучка в импульсе – 10 А, длительность тока пука – 250 нс, эмиттанс  $\leq 0.01\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$ . Эти требования определены для захвата частиц пучка в процесс группировки и дальнейшего ускорения в регулярных секциях.

В ЛУЭ-200 использована имевшаяся в наличии в ЛНФ импульсная двухэлектродная электронная пушка от ускорителя ЛИУ-30 (совместная разработка НИИЭФА и ЛНФ ОИЯИ, 1980 г.) на 200 кВ с катодной ножкой от клистрона КИУ-12, на которой смонтирован катодный узел серийной электронной лампы ГС-34. Пушка обеспечивает импульсный ток пучка до 8 - 10 А с продолжительностью импульса до 300 нс с частотой циклов до 150 Гц.

**В третьей главе** представлены инфраструктурные системы ускорителя ЛУЭ-200: вакуумная система, системы управления, синхронизации, система диагностики пучка, система термостабилизации ускоряющих секций и компонентов СВЧ тракта, система опорных геодезических сетей ускорителя.

**Вакуумная система** ускорителя ЛУЭ-200 [17] состоит из объёмов ускорительного тракта совместно с установленными на них высоковакуумными агрегатами, вакуумными шиберами, вентилями и вакуумными сенсорами. В состав вакуумных объёмов ускоряющих модулей включены объёмы СВЧ трактов - медные прогреваемые волноводы сечением 72 x 34 мм с резонаторами системы компрессии СВЧ мощности (SLED) и измерительными направленными ответвителями.



Требуемое разрежение остаточного газа в ускорительном тракте и, в первую очередь, в ускоряющих структурах составляет  $\leq 10^{-8}$  Торр. Предел разрежения определяется десорбцией со стенок вакуумных объёмов. Повышенная скорость газоотделения со стенок волноводного тракта, умножителя СВЧ мощности и ускоряющей структуры обусловлена воздействием СВЧ поля высокой напряжённости и попаданием части электронов на стенки ускоряющих структур и электропровода.

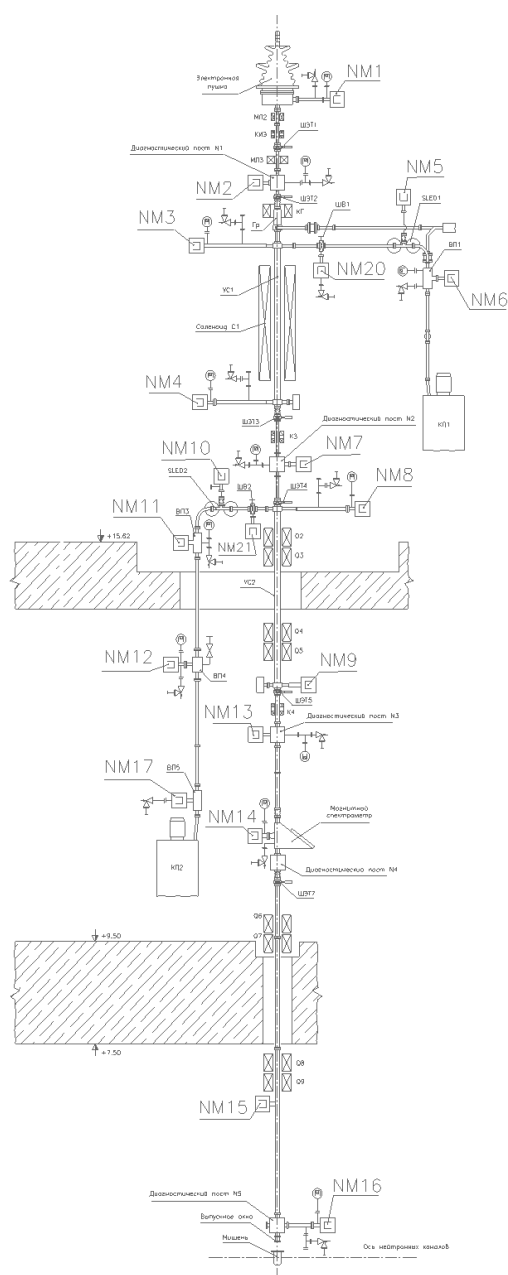


Рис. 11. Принципиальная схема вакуумной системы ускорителя ЛУЭ-200

Необходимое для работы ускорителя разрежение в ускорительном тракте и в СВЧ фидерах обеспечивается магниторазрядными агрегатами NM1 – NM21, установленными в соответствии со схемой на рис. 11. Предварительная (черновая) откачка производится мобильными вакуумными постами, выполненными на базе турбомолекулярных насосов с сухими форвакуумными насосами. На рис. 12 представлен компьютерный интерфейс, отражающий на операторском мониторе пульты управления ускорителя состояние вакуума в ключевых точках вакуумной системы. В правой половине графиков наблюдаются характерные пики, соответствующие кратковременным ухудшениям вакуума при появлении СВЧ пробоев в секции или в СВЧ фидере во время тренировки ускоряющей системы.



Рис. 12. Интерфейс вакуумной системы на операторском мониторе пульта управления с графиками токов магниторазрядных насосов (верхние графики) и графиками показаний вакуумных сенсоров (нижние графики)

В существующей конфигурации ускорителя ускоренный пучок транспортируется сверху вниз от второй ускоряющей секции к нейтронопроизводящей мишени по вакууммированному электропроводу, который заканчивается выпускным патрубком диаметром 40 мм, закрытым с нижнего торца мембраной из нержавеющей стали толщиной 0.3 мм, через которую пучок пропускается насквозь на атмосферу и вводится в мишень [18].

В качестве *автоматизированной системы контроля и управления* ускорителя ЛУЭ-200 (далее АСКУ) разработан комплекс электронного, компьютерного и сетевого оборудования [19-21], предназначенный для обеспечения качественного и надёжного контроля и управления ускорителем, включающий:

- систему синхронизации (синхронизатор);
- систему блокировки, защиты и сигнализации (СБС);
- систему диагностики пучка, включая магнитный спектрометр;
- систему контроля и управления СВЧ системой;
- систему управления источниками питания магнитной системы;
- систему контроля и управления вакуумной системой;
- аппаратуру контроля и управления системами охлаждения и термостабилизации.

АСКУ построена как централизованная система управления. Схема системы представлена на рис. 13. Сервером базы данных является Citadel сервер среды LabView. В качестве датчиков и органов управления используются сенсоры (измерители разряжения, датчики температуры и потока охлаждающего дистиллята), блоки питания насосов вакуумной системы, блоки питания магнитов, блоки управления приводами диагностических постов и другие. Промышленный компьютер поддерживает OPC - сервер для обмена всеми доступными данными с сервером базы данных.

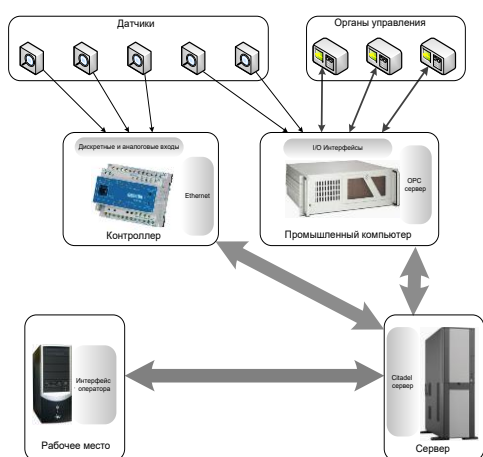


Рис. 13. Схема системы управления

В режиме отладки возможен обмен данными напрямую с рабочим местом оператора, расположенным на Пульте управления. В рабочем режиме все данные, получаемые промышленными компьютерами и контроллерами, хранятся и обрабатываются на Citadel сервере.

Информация, получаемая с датчиков и органов управления, собирается как контроллерами PLC-100K по дискретным и аналоговым входам, так и промышленными компьютерами по интерфейсам RS232/485 и CAN.

**Система синхронизации** (синхронизатор) состоит из задающего генератора, генератора задержанных импульсов, усилителей – формирователей и быстрых ключей. Концептуальная схема структуры синхронизатора представлена на рис. 14. Перечень основных объектов, управляемых системой синхронизации, представлен таблицей 3.

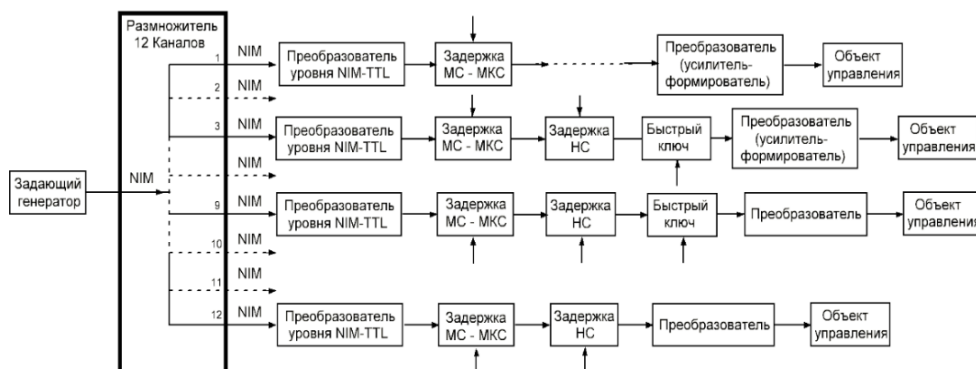


Рис. 14. Концептуальная схема структуры синхронизатора

На рис. 15 представлен операторский интерфейс синхронизатора с окнами управления и окнами информации о состоянии каналов управления. Основные блоки системы синхронизации выполнены в стандарте САМАС. Полный набор блоков системы размещается в двух САМАС - крейтах.

Таблица 3. Перечень основных объектов управления системы синхронизации

Функция синхроимпульса (наименование объекта, системы)	Диапазоны задержки
Старт системы зарядки модулятора пушки	2.5 мс
Запуск блока импульсного размагнич. в\в трансформатора пушки	1327 мкс
Запуск тиратрона модулятора пушки	6604 мкс + 80 нс
Старт системы зарядки модулятора МК1	3.4 мкс
Запуск тиратрона модулятора МК1	6604 мкс
Старт системы зарядки модулятора МК2	2.8 мкс
Запуск тиратрона модулятора МК2	6604 мкс
Переворот фазы системы возбуждения клистронов	6605 мкс
Строб – работы предусилителя СВЧ возбуждения клистрона 1	6598.8 мкс
Строб – работы предусилителя СВЧ возбуждения клистрона 2	6598.8 мкс
Запуск осциллографов	мс + мкс
Старт экспериментальных установок	мс + мкс
Резерв	мс + мкс

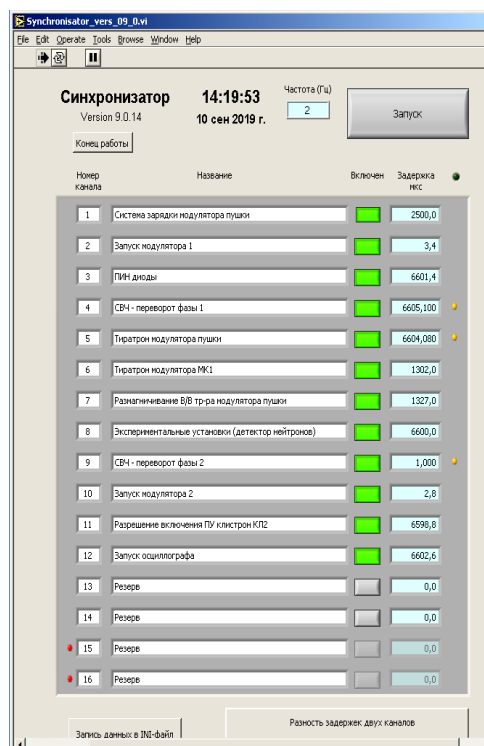


Рис. 15. Операторский интерфейс синхронизатора с окнами управления и окнами информации о состоянии каналов управления

Для системы предварительного возбуждения клистронов - усилителей СВЧ мощности в систему синхронизации ускорителя интегрирован двухканальный генератор – синтезатор рабочей (ускоряющей) частоты в диапазоне 2855 - 2872 МГц. Для обеспечения работы системы SLED в двух выходных каналах рабочей частоты синтезатора предусмотрена возможность переворота фазы на  $180^{\circ}$  относительно опорного сигнала.

### **Система диагностики пучка**

Диагностический комплекс ускорителя ЛУЭ-200 образуют 5 диагностических постов № 1 - № 5 (рис. 16,а), магнитный спектрометр МС – измеритель энергетических характеристик пучка и термопарный датчик «контроля положения» пучка, установленный перед вводом пучка в конвертер мишени. В комплект каждого диагностического поста входит стандартный набор средств диагностики: СМ (Current Monitor) + ВРМ (Beam Position Monitor). Расстановка диагностических постов на ускорителе представлена на схеме вакуумной системы (рис. 11).

В качестве мониторов тока пучка использованы магнитоиндукционные датчики– пояса Роговского (ПР), разработанные по схеме трансформаторов тока. В качестве датчиков положения пучка используются бимвьюеры BV1 – BV5 - вводимые на пучок люминофорные экраны, наблюдаемые ССD – видеокамерами, установленными снаружи (на атмосфере). Ввод – вывод люминофорных экранов в пучок/из пучка внутри диагностического поста осуществляются с помощью пневматических или электромеханических манипуляторов.

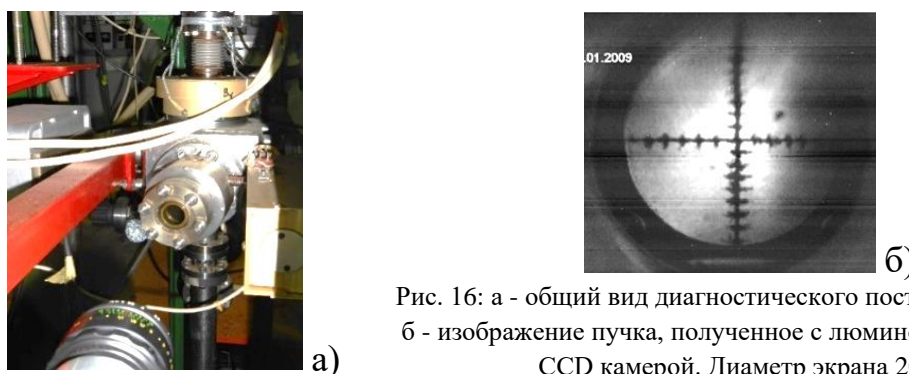


Рис. 16: а - общий вид диагностического поста с бимвьюером, б - изображение пучка, полученное с люминофорного экрана ССD камерой. Диаметр экрана 20 мм

Неразрушающий пучок терморпный датчик контроля положения пучка установлен на атмосфере ниже доньшка выпускного патрубка непосредственно перед вводом пучка в мишень. Чувствительными элементами датчика являются четыре термопары, установленные в плоскости, ортогональной оси пучка, на периферии области, занимаемой пучком. Дифференциал температур термопар, расположенных диаметрально по окружности, близкой к наружной границе сечения пучка, свидетельствует об отклонении пучка от оси. Информация о температурах термопар представляется в цифровом виде на операторском пульте и контролируется системой СБС. В случае, если дифференциал температур превышает заданное пороговое значение, вырабатывается команда для системы синхронизации на прерывание пучка (отключение запуска электронной пушки), сопровождаемая световыми и звуковыми «ALARM» – сигналами.

#### ***Анализатор энергии пучка - магнитный спектрометр***

В качестве анализатора энергий частиц на ускорителе ЛУЭ-200 автором совместно с Н.И. Тарантиным (ЛЯР ОИЯИ) предложена конструкция статического магнитного анализатора с совмещёнными функциями спектрометра и спектрографа [22] с поворотом пучка на угол, близкий к  $90^{\circ}$ . Внешний вид анализатора представлен на

рис. 10. В режиме спектрометра изменением уровня магнитного поля анализатор перестраивается для приема вдоль главной магнитооптической оси частиц с энергиями  $E_0$  от 10 МэВ до 140 МэВ. В режиме спектрографа при фиксированном уровне поля, соответствующем энергии электронов  $E_0$ , анализатор имеет возможность одновременно регистрировать частицы в диапазоне энергий  $E_0 \pm 0.5E_0$ . Таким образом, весь диапазон энергий частиц пучка, усваиваемых анализатором, составляет 0 - 210 МэВ. Диспергированные по энергиям частицы регистрируются позиционночувствительным коллектором со свинцовыми ламелями полного поглощения.

Основная погрешность измерений энергии анализатором  $\Delta E/E$  оценивается как отношение величины шага ламельной линейки  $\Delta L$  к радиусу траектории частиц  $R_L$ , попавших на конкретную ламель, т.е.  $\varepsilon_L = \Delta E/E = \pm \Delta L/2R_L$ . При объединении ламелей в группы (по  $n = 2, = 3, = 4$  ламели) разрешающая способность детектора ухудшается и зависит от количества ламелей, объединённых в одну группу:  $\varepsilon = n\varepsilon_L$ . В измерениях энергии пучка ускорителя использовались группы по 4 ламели и по 2 ламели разрешающая способность при этом была не хуже  $\approx \pm 5\%$ .

**Система термостабилизации** предназначена для обеспечения заданного температурного режима компонентов ускоряющей системы (ускоряющие секции, группирователь, резонаторы системы SLED), для которых температура и отклонение температуры от заданного значения являются факторами настройки ускоряющей системы, влияющими на качество пучка электронов на выходе ускорителя, таких его параметров, как средняя энергия частиц пучка и энергетический разброс.

Как известно, ширина полосы пропускания СВЧ резонатора  $\Delta f$  определяется как  $2\Delta f = f_c/Q$ , где  $f_c$  – резонансная частота секции. При добротности  $Q = 1.32 \cdot 10^4$  ширина полосы пропускания ускоряющей секции ЛУЭ-200 составляет  $2\Delta f_c = 0,2197$  МГц. При отклонении частоты задающего генератора от  $f_c$  на половину полосы пропускания  $\Delta f_c = 0,10985$  МГц ускоряющее напряжение в ускоряющей секции снижается до  $U = 0.7 \cdot U_{\text{макс}}$ . При этом фаза ускоряющего поля в секции изменится на  $\Delta \varphi \approx 20^\circ$ . При величине коэффициента температурного «ухода» собственной частоты секции  $k_t = 0.05$  МГц/град такие изменения могут произойти уже при изменении температуры ускоряющей секции всего на  $2.2 \text{ C}^0$ .

Ещё более критично влияние температуры для резонаторов системы компрессии SLED. При добротности резонаторов  $Q = 8.62 \cdot 10^4$  ширина полосы пропускания резонаторов  $2\Delta f_p = 0,0331$  МГц,  $\Delta f_p = 0,01655$  МГц. Уход температуры резонаторов на  $1 \text{ C}^0$  приведёт к сдвигу собственной частоты резонаторов  $f_p$  на  $0,045696$  МГц, то есть уход собственной частоты резонаторов при изменении их температуры на один градус будет почти в 2.76 раза больше  $\Delta f_p$ , что приведёт к существенному снижению мощности, излучаемой из резонатора в нагрузку. Фаза СВЧ поля в резонаторах при этом также «уйдёт» на  $\Delta\varphi \approx 50^0$ . Исходя из этого, требования к стабильности температуры компонентов ускоряющей системы формулируются, как  $\Delta t \leq \Delta f_p / k_t$  : для ускоряющей секции  $\Delta t \leq \pm 2.0 \text{ C}^0$  и для резонаторов системы SLED  $\Delta t \leq \pm 0.33 \text{ C}^0$ .

С учётом сформулированных требований для проекта системы термостабилизации автором предложено [23] техническое решение в виде двухконтурной схемы, обеспечивающей отбор излишних тепловыделений, регулирование рабочей температуры секций и резонаторов системы SLED в диапазоне  $32 - 42 \text{ }^\circ\text{C}$ . Управление схемой контроллером компании Eurotherm позволяет адаптировать систему для нескольких режимов работы, регулирование рабочей температуры и её стабилизацию с точностью не хуже  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  [24].

### ***Опорные геодезические сети***

Ввиду отсутствия в физобосновании допусков на точность установки оборудования ускорителя принципы формирования опорных геодезических сетей для инструментального контроля монтажа оборудования ускорителя сформулированы автором в Техническом задании [3,25]. При этом требования на точность выставки ускоряющих секций и элементов магнитной системы в плане определены как 0.01 от поперечного размера пучка, что составляет  $\pm \leq 0.1$  мм. Точность установки секций по вертикали (вдоль оси) составляет  $\pm \leq 1.0$  мм и по угловому отклонению  $\pm \leq 0.2$  мрад. Результатами исполнительной съёмки положения смонтированного оборудования подтверждено [26], что величины среднеквадратических погрешностей установки оборудования ускорителя ЛУЭ-200 в проектное положение соответствуют требованиям Технического задания.

**В четвёртой главе** представлены этапы создания и наладки ускорителя, результаты

экспериментов по тестированию ускоряющих секций, результаты физического пуска 1-й очереди, затем второй очереди ускорителя и всей установки ИРЕН в целом.

Монтаж и наладка ускорителя в ЛНФ ОИЯИ осуществлены после проведения в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН тестирования головных образцов ускоряющих секций и поставки двух ускоряющих секций в ОИЯИ. Общий и главный итог тестирования состоял в том, что в тестовых экспериментах впервые подтверждена принципиальная возможность получения в ускоряющих секциях, разработанных и изготовленных в ИЯФ СО РАН, пучков электронов с зарядом до 200 нК, ускоренных до энергий 80 – 90 МэВ [12,27-30].

**Физический пуск 1-й очереди ЛУЭ-200.** В конце 2008 г. монтаж ускорителя ЛУЭ-200 в объёме одной секции, запитанной от одного клистрона ТН2129, был завершён (рис. 17), пучок электронов с импульсным током 0.3 – 0.4 А, длительностью 100 - 150 нс ускорен до энергии 20 МэВ [31]. В начале 2009г. был смонтирован электроновод от ускорителя до штатной неразмножающей мишени, затем настройкой ускоряющей системы и последовательной настройкой систем формирования и транспортировки пучка осуществлена проводка пучка на мишень.

В процессе проводки пучка электронов состояние пучка контролировалось бимбьюерами. «Автографы» пучка, полученные с диагностического поста № 5 (перед мишенью) при настройке дублета квадрупольных линз Q4/Q5, представлены на рис. 18.



Рис. 17. Общий вид первой очереди ускорителя ЛУЭ-200

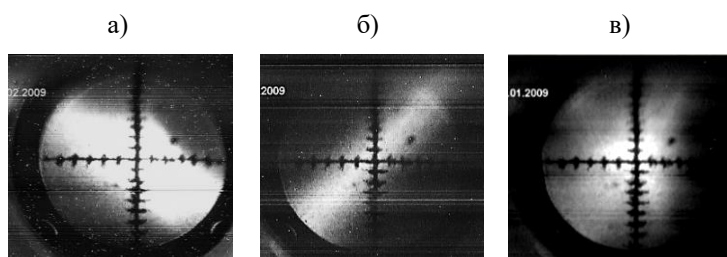


Рис. 18. Изменения «автографа» пучка на бимбьюере № 5 (перед мишенью) при настройке дублета квадрупольных линз Q4/Q5: а) линза Q4 включена, Q5 выключена; б) линза Q4 выключена, Q5 включена; в) включены линзы Q4 и Q5



На рис. 19. представлены осциллограммы импульсов тока пучка, полученных с поясов Роговского (ПР), установленных вдоль ускорительного тракта.

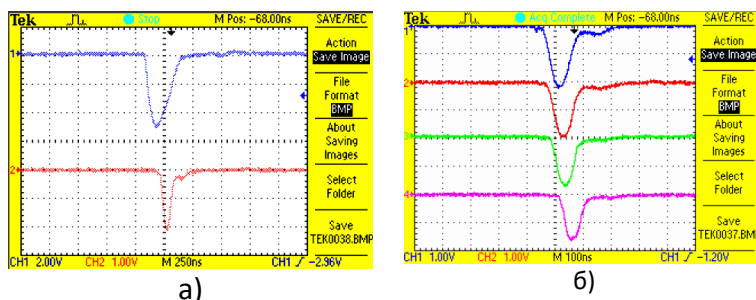


Рис. 19. Осциллограммы тока пучка с поясов Роговского (ПР):  
 а) верхний луч - ПР1, 2 А/дел.,  
 нижний луч - ПР2, 1А/дел.,  
 250 нс/дел.;  
 б) сверху вниз – ПР2, ПР3, ПР4,  
 ПР5, 1А/дел, 100 нс/дел.

Прохождение пучка через первую секцию составило около 40%,хождение пучка от конца первой ускоряющей секции до мишени составляет около 80%, а общее прохождение пучка от пушки до мишени составляет немного более 30%. В 2009г. ток пучка ускоренных электронов повышен до 2.4 А с длительностью импульса 70 нсек на полувысоте при частоте циклов 25 Гц, а при подключении системы компрессии СВЧ мощности энергия пучка повышена до 30 – 35 МэВ [32].

На рис. 20 представлены энергетические спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона ТН2129 Thomson при выходной мощности клистрона 17 МВт при различных токах пучка  $I_p$  в секции (1А и 2А) и различных уровнях мощности возбуждения клистрона. При увеличении тока ускоренного пучка ширина спектра увеличивается, а положение максимума спектра смещается в область более низких энергий; максимальное значение энергии ускоренных электронов не превышает значений 45 – 46 МэВ. Результатом запуска и наладки ускорителя стала регистрация фотонейтронов, генерированных ускоренным пучком на неразмножающей мишени, установленной в мишенном зале.

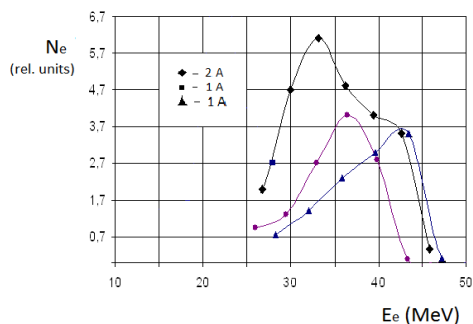


Рис. 20. Спектры пучка электронов, ускоренных в первой секции ЛУЭ-200, запитанной от клистрона ТН2129 Thomson, при различных токах пучка  $I_p$  и различных уровнях мощности возбуждения. Кривая 1 -  $I_p = 2$  А, кривые 2 и 3:  $I_p = 1$  А при различных уровнях мощности возбуждения клистрона

После запуска и наладки ускорителя в экспериментальном зале установки ИРЕН на пролётной базе длиной 10 м проведены измерения времяпролётных и энергетических спектров нейтронов (рис. 21), сделаны оценки выхода нейтронов,

которые хорошо совпали расчётными значениями. В декабре 2009г. осуществлён режим ускорения пучка электронов на частоте циклов 50 Гц с током пучка 1.5 А, длительностью импульса 100 нс. Интегральный поток нейтронов от мишени (в 4л) в оптимальных настройках достигал  $2.6 \div 3.0 \cdot 10^{11}$  н/с [33].

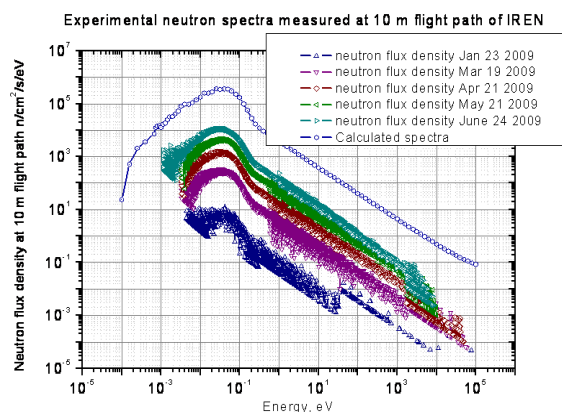


Рис. 21. Спектры энергий нейтронных пучков, полученных в процессе отладки первой очереди ускорителя в первой половине 2009 года

**Физический пуск 2-й очереди ЛУЭ-200.** Первая очередь ускорителя отработала на эксперимент несколько тысяч часов, после чего в соответствии с планами развития ускорителя до второй очереди [34,35] предусматривалось включение в ускоряющую систему ускорителя второй ускоряющей секции со вторым клистроном с собственным модулятором. Возможность реализации этих планов появилась после приобретения Объединённым институтом нового мощного клистрона E3730A Toshiba. При установке на ускоритель второй ускоряющей секции изменена схема питания секций клистрономов. Первая (верхняя) секция запитана от клистрона E3730A. Клистрон TH2129 Thomson установлен для питания второй (нижней) секции (рис. 22). После предварительной СВЧ тренировки второй секции с СВЧ трактом достигнуты следующие уровни СВЧ мощности: 30 МВт на клистроне КЛ1 (E3730A Toshiba) и 17 МВт на клистроне КЛ2 (TH2129 Thomson). Произведена проводка пучка с током 1.0 – 1.2 А по тракту до магнитного спектрометра, а затем до мишени. Как и при работе первой очереди, длительность тока пучка составляла около 100 нсек. Токопрохождение пучка по тракту ускорителя сохранилось на прежнем уровне; основные потери пучка ( $\approx 50\%$ ) приходятся на участок группирователь + первая ускоряющая секция. На рис. 23 представлены спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200, при различных токах пучка электронной пушки  $I_n$  [36].



Рис. 22. Вторая очередь ускорителя ЛУЭ-200.  
Вид нижней части ускорителя

На достигнутых параметрах пучка электронов проведено несколько долговременных сеансов работы ускорителя по генерации нейтронов при частоте циклов 25 и 50 Гц [36,37].

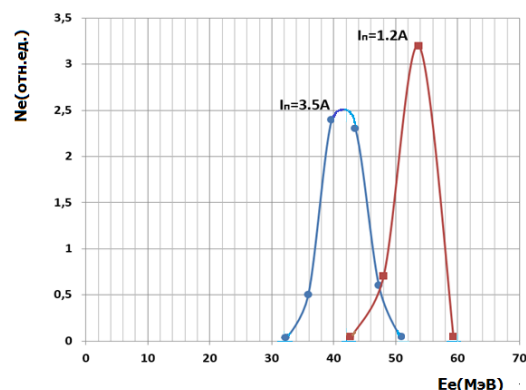


Рис. 23. Спектры пучка электронов, ускоренных в двух секциях ЛУЭ-200, при различных токах пучка электронной пушки  $I_n$ : 3.5 А и 1.2 А.

Таблица 4. Параметры 1-й и 2-й очереди ускорителя ЛУЭ-200

	1-я очередь	2-я очередь	
	1 секция	1-я секция	2-я секция
Количество ускоряющих секций	1 секция	2 секции	
Тип клистрона на ускоряющих секциях	ТН2129 Thomson	Е3730А Toshiba	ТН2129 Thomson
Импульсная мощность клистрона номинальная	20 МВт	50 МВт	20 МВт
Мощность клистрона реализованная	17 МВт	30 МВт	17 МВт
Средняя/максимальная энергия электронов	35/42 МэВ	60/80 МэВ	
Средний ток пучка в импульсе	1.5 А	1.5 А	
Длительность импульса тока	100 нс	100 нс	
Частота циклов	25 Гц	50 Гц	
Средняя мощность пучка	0.131 кВт	0.412 кВт	

Сравнение спектров нейтронных пучков источника ИРЕН, полученных при работе первой очереди ускорителя ЛУЭ-200 (2009г.) и при работе второй очереди ЛУЭ-200 (декабрь 2016г.), представлено на рис. 24. Оценки интегрального выхода нейтронов из W – мишени, произведённые по измерению плотности потока нейтронов штатными детекторами установки ИРЕН, показывают увеличение интегрального выхода нейтронов по сравнению с выходом нейтронов первой очереди в 2 - 3 раза.

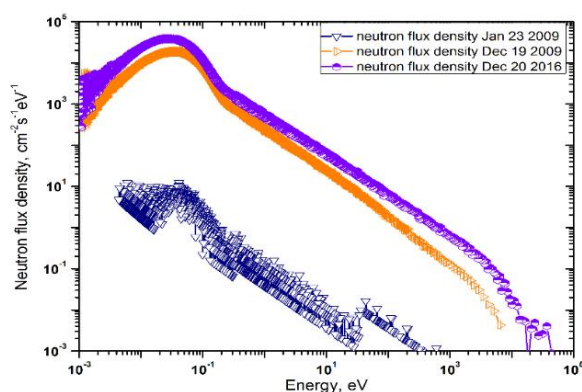


Рис. 24. Спектры нейтронных пучков источника ИРЕН с первой очередью ЛУЭ-200 и при работе второй очереди ЛУЭ-200 (декабрь 2016г.)

В пятой главе обсуждаются итоги работы ускорителя [38], рассматриваются проблемы, ограничивающие получение проектных параметров ускорителя [39 - 44], предложены меры по повышению эффективности ускорителя.

На рис. 25 представлены энергетические спектры пучков, ускоренных в двух секциях [38], измеренные после длительной «тренировки» ускоряющей и СВЧ систем. Рисунки 25,а и 25,б иллюстрируют увеличение как средней энергии пучка (до 60 - 64 МэВ) по сравнению со спектрами, представленными на рис. 23, так и смещение верхней границы энергетического спектра.

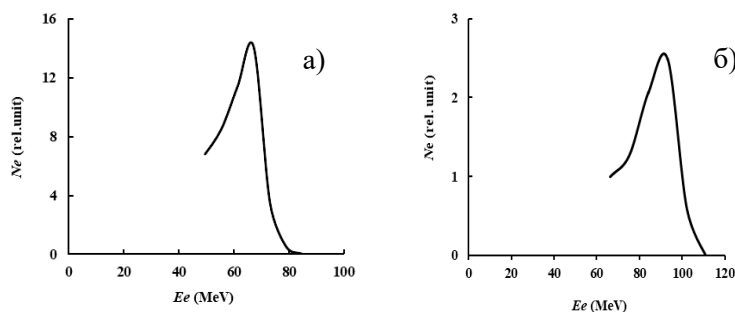


Рис. 25. Энергетические спектры пучков, ускоренных в двух секциях, измеренные после длительной «тренировки» ускоряющей и СВЧ - систем

Измерениями, выполненными на предельно малых значениях тока пучка, при уровне СВЧ мощности, отбираемой от клистронов, 35 МВт (Кл1) и 20 МВт (Кл2) установлено, что в ускоренном пучке регистрируются фрагменты, имеющие энергию более 100 МэВ (рис. 25,б). Сравнение проектных и измеренных параметров (таблица 4) показывает, что измеренная энергия пучка 1-й очереди ускорителя оказывается почти на 25% ниже ожидаемой. В результатах, полученных на второй очереди ускорителя [36,38], также заметен недостаточный уровень энергии и мощности пучка.

Среди факторов, вызывающих потери пучка, рассмотрены особенности краевого электрического поля ускоряющей секции [39] и роль группирователя [40,41]. Если

представить инжекцию частиц ускоряемого пучка в начальную часть первой ускоряющей структуры в области ввода СВЧ мощности в общем виде как движение частиц в аксиально - симметричных магнитном и электрическом СВЧ полях, то можно проанализировать воздействие на частицы пучка отдельно электрического поля при  $B_z(z) = 0$  с помощью уравнения электростатической линзы с фокусным расстоянием  $f_e \approx 2\gamma\beta^2 U_0/E_{z0}$ , где  $U_0 = 0.511$  МэВ – энергия покоя электрона. Выполненные оценки показывают, что краевое электрическое поле на входе первой ускоряющей структуры для пучка с начальной энергией 200 кэВ является достаточно жёстким. Оно может вносить дополнительный вклад в фокусировку пучка при инжекции в структуру, что в итоге может привести к усилениям осцилляций огибающей пучка, возрастанию эмиттанса пучка и нежелательным потерям частиц, которое следует учитывать в численных расчётах. Эффект электрической линзы возникает и на выходе из ускоряющей секции, причём этот эффект имеет дефокусирующий характер, однако Лоренц - фактор частиц при ускорении в секции возрастает более, чем на два порядка и «фокусное расстояние» такой линзы увеличивается, а её влияние на пучок падает в той же степени.

В численных экспериментах [40,41] проведены расчёты динамики пучка электронов в процессе группировки и захвата пучка в ускоряющее поле первой регулярной секции, выявлены особенности работы группирователя в ускоряющей системе ЛУЭ-200. Численное моделирование показало, что группирователь оказывает существенное влияние на динамику пучка в ускорителе в целом, но используемый в ускорителе группирователь, изготовленный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, не обеспечивает эффективного сжатия пучка по фазам и увеличения средней энергии сгустка до значения 4.0 МэВ, оптимального для перезахвата в режим ускорения регулярной секцией. Особенности использованного группирователя приводят к тому, что ширина энергетического спектра пучка на выходе остаётся не лучше, чем  $\pm 20$  % по основанию. Коэффициент токопрохождения в группирователе составляет  $\leq 70$  %. При ненулевом токе пучка фазовый размер пучка на выходе близок к  $\pi$ , что не позволяет обеспечить эффективный перезахват пучка регулярной секцией. В результате общие потери пучка в группирователе вместе с секцией достигают 50%.

Среди факторов, ограничивающих энергетические и мощностные характеристики пучка ЛУЭ-200, рассмотрены подгрузка поля ускоряющей структуры пучком и ограничения, вызванные недостаточной электрической прочностью структуры [42 - 45]. В работе [42] проведены аналитические оценки набора энергии пучка от длительности импульса тока при моделировании нагрузки ускоряющей структуры пучком с проектными параметрами (1.5 А, 250 нс). Результаты оценок представлены на рис. 26 для одной секции (кривые 1, 2) и для двух секций (кривые 3, 4). Незначительные различия между собой кривых 1 и 2 и кривых 3 и 4 объясняются использованием либо точных, либо упрощённых формул.

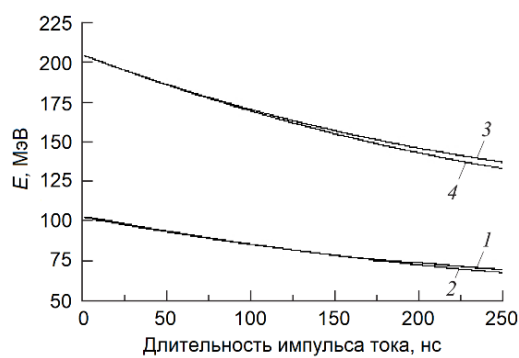


Рис. 26. Результаты расчёта подгрузки структуры пучком с током 2 А в зависимости от длительности импульса тока

Общее заключение, полученное в расчётах, состоит в том, что потери энергии (точнее, «недобор» энергии) пучка в зависимости от длительности тока, могут достигать 25% и более.

В работах [43,44,45] аналитическими расчётами показано, что значения критических токов электронного пучка для ускоряющих секций ЛУЭ-200 при использовании систем компрессии СВЧ мощности находятся в диапазоне 3.0 - 3.5 А. Таким образом, ускоренный пучок подгружает ускоряющие поля, но эта нагрузка не имеет подавляющего характера.

Результаты расчёта нагрузки током пучка с длительностью 100 нс для ускоряющей структуры, запитанной от генераторов разной мощности (от клистронов трёх типов), при трёх значениях тока ускоренного пучка представлены на рис. 27 [44]. Из этих расчётов следует, что пучок длительностью 100 нс снижает ускоряющее поле таким образом, что даже при относительно высокой средней энергии частицы пучка обладают значительным разбросом по энергии. Следует отметить, что расчётные результаты качественно согласуются с результатами,

полученными в измерениях энергетических спектров пучка ускорителя ЛУЭ-200 после первой ускоряющей секции при работе с клистроном TH2129 Thomson, работающим с импульсной мощностью 17 МВт с системой SLED [33].

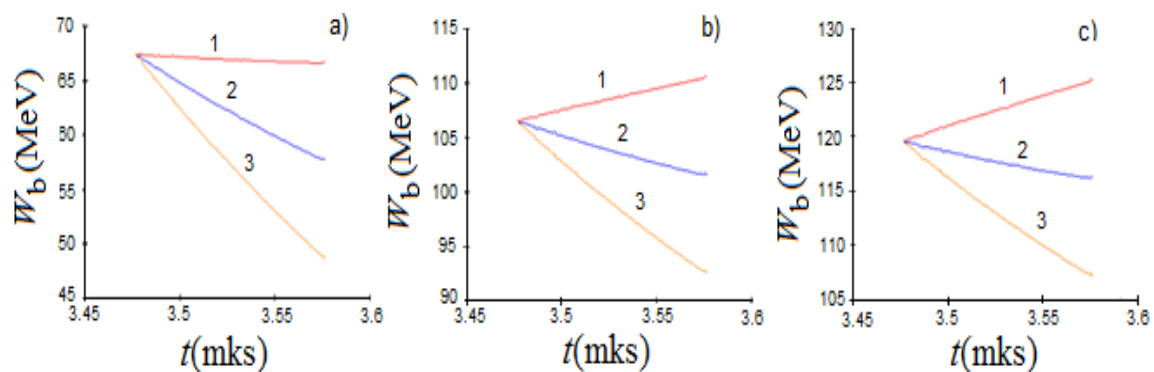


Рис. 27. Полная энергия пучка, получаемая пучком с длительностью 100 нс в ускоряющей структуре при разной мощности генератора (мощности клистроны) и разных токах пучка  $I_b$ :  
 а) 20 МВт (TH2129 + SLED, б) 50 МВт (E3730A + SLED), в) 63 МВт (5045 SLAC + SLED;  
 кривые: 1 при токе  $I_b = 1$  А, 2 при токе  $I_b = 2$  А, 3 – при токе  $I_b = 3$  А

Как отмечено в результатах измерений энергии, клистроны, использованные как в первой очереди, так и во второй очереди ускорителя, работали с выходной мощностью ниже максимальной паспортной. Наиболее высокие показатели по энергии пучка были достигнуты при  $P_{Кл1} = 35$  МВт, и  $P_{Кл2} = 20$  МВт. Это вынужденное ограничение объясняется недостаточной электрической прочностью ускоряющих структур по отношению к СВЧ пробоям. Результаты аналитических расчётов ускоряющих полей, формируемых в ускоряющих структурах ЛУЭ-200, выполненные для различных значений коэффициента усиления по мощности системы SLED и трёх различных уровней первичной СВЧ мощности, генерируемой клистроном, представленные на рис. 28, показывают [45], что уровни напряжённостей электрического поля на оси начальных участков ускоряющей структуры могут достигать 40 МВ/м и выше (для проектных параметров 70 МВ/м и выше). При этом напряжённости полей на поверхности структуры, оценённые с учётом паспортного коэффициента перенапряжения 1.7 (отношение напряжённости электрического поля на поверхности структуры к напряжённости поля на оси) могут приближаться к пределам электрической прочности структур по критерию Килпатрика для частоты 2856 МГц [46] и даже превышать их, что может приводить к пробоям.

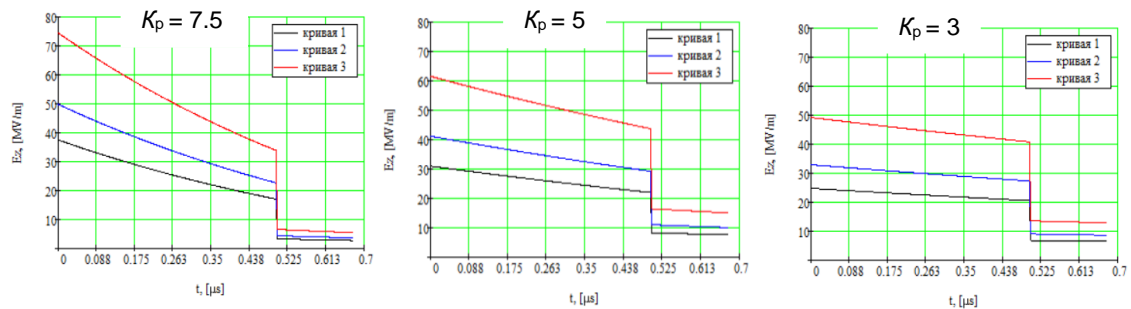


Рис. 28. Напряжённости электрических полей на оси в начале ускоряющей структуры в зависимости от времени при  $I_0 = 0$  для клистронов различной мощности. Слева направо: для коэффициента усиления по мощности системы SLED  $K_p = 7.5$ ;  $K_p = 5$ ,  $K_p = 3$ . Кривые 1 - мощность клистрона = 17 МВт, кривые 2 – 30 МВт, кривые 3 – 67 МВт

Несмотря на проведение нескольких длительных сеансов тренировки, достичь нужной электрической прочности ускоряющих структур ещё не удалось. Следует признать, что установленные на ускорителе ЛУЭ-200 ускоряющие секции не обладают электрической прочностью, достаточной для получения среднего ускоряющего градиента, обеспечивающего достижение проектных параметров пучка по энергии.

Возможности повышения мощности пучка ускорителя связаны с переходом на питание ускоряющих секций от клистронов E37340 Canon, способных работать с частотой циклов до 150 Гц. Таким образом, за счёт повышения цикличности ускорителя можно увеличить мощность пучка электронов для источника ИРЕН в 2 - 3 раза.

**В шестой главе** обобщены характеристики источника ИРЕН, как базовой установки Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (рис. 29).

Первоначально установка ИРЕН планировалась как источник бустерного типа с использованием подкритической активной зоны и драйвера – линейного ускорителя электронов, однако в связи с тем, что в процессе проектирования из-за административных и финансовых проблем разработчикам проекта пришлось отказаться от использования активной зоны и от статуса ядерной установки вообще, установка ИРЕН перешла в разряд источников, генерирующих нейтроны на основе фотоядерной реакции, инициированной тормозными гамма – квантами пучка



электронов от ускорителя, т.е. в разряд так называемых ADS установок (Accelerator Driving System).

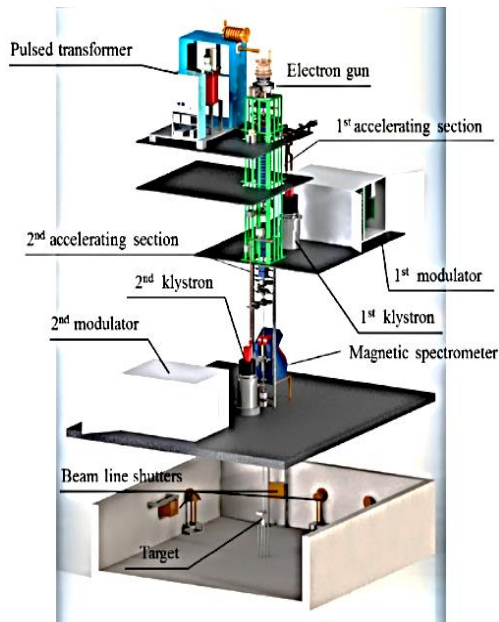


Рис. 29. Источник нейтронов ИРЕН - базовая установка Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ им. И.М. Франка [47]

Тип - ADS (Accelerator Driving System)  
 Энергия нейтронов  $1 - 10^4$  эВ  
 Длительность нейтронной вспышки  
 по быстрым нейтронам - 100 нс  
 Частота циклов 25 - 50 Гц  
 Количество экспериментальных  
 нейтронных каналов - 8  
 Интегральный поток нейтронов:  
 $6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$  по состоянию на конец 2016 года  
 $(0.9 - 1.0) \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$  по состоянию на конец 2017г.

Из - за отсутствия активной зоны, размножающей нейтроны, проектное интегральное значение выхода нейтронов на установке снижается в 30 раз. Тем не менее, благодаря сокращению длительности нейтронного импульса, установка ИРЕН позволяет генерировать пучки нейтронов, существенно повышающие разрешающую способность экспериментальных установок времяпролётного типа по сравнению с установкой ИБР-30. На рис. 30 для сравнения представлены спектры нейтронов, полученных ранее на установке ИБР30+ЛУЭ-40 и на самом начальном этапе работы источника ИРЕН [29].

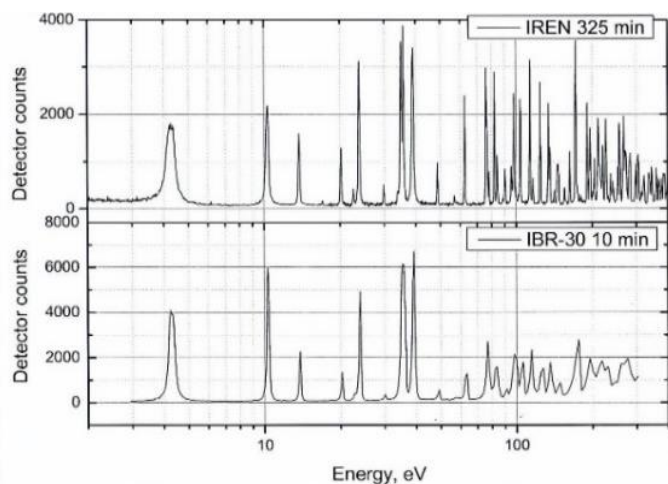


Рис. 30. Сравнение разрешающих способностей источников «ИБР30 + ЛУЭ40» и «ИРЕН». Спектры нейтронов получены при облучении образца из Та, размещённого внутри жидкостного сцинтиллятора [33]

Несмотря на отличие в скорости счёта преимущество в энергетической разрешающей способности источника ИРЕН очевидно. Для целого ряда исследований такое преимущество может иметь решающее значение.

В таблице 6 представлены современные литературные данные по импульсным ADS источникам нейтронов, базирующимся на ускорителях электронов. Как видно из таблицы, источник ИРЕН уступает по интегральному потоку нейтронов таким рекордсменам, как «ORELA» (Oak Ridge, USA), или GELINA (Geel, Belgium), но вполне вписывается в ряд действующих источников нейтронов, систематически работающих на получение ядерных данных.

Таблица 6. Основные потребительские характеристики установки ИРЕН в сравнении с другими источниками нейтронов.

Установка	Местоположение	Энергия электронов (МэВ)	Мишень	Длительность импульса (нс)	Мощность пучка (кВт)	Частота циклов (Гц)	Пролётная База (м)	Поток нейтронов (с <sup>-1</sup> )
RPI	RPI, Troy, USA	60	Ta	5-5000	0.45	500	15-250	$1.8 \cdot 10^{12}$
ORELA	ORNL, Oak Ridge, USA	180	Ta	2-30	60	12-1000	9-200	$1.0 \cdot 10^{14}$
GELINA	EC-JRC-IRMM, Geel, Belgium	100	U	1	10	40-800	5-400	$3.4 \cdot 10^{13}$
PNF	PAL, Pohang, Korea	75	Ta	2000	0.09	12	11	$2.1 \cdot 10^{11}$
KURRI	Kumatori, Japan	46	Ta	2-4000	6	300	10, 13, 24	$8.0 \cdot 10^{11}$
ЛУ-50	ВНИИЭФ Саров, Россия	55	U	10	10	1 - 2400	-	$3.0 \cdot 10^{13}$ по быстрым нейтронам
Источник с подкритической сборкой (проект)	ХФТИ Харьков	100	U,W	2700	100	625	-	По фотонейтронам: $3.0 \cdot 10^{14}$ на U $1.9 \cdot 10^{14}$ на W
ИРЕН	ОИЯИ, Дубна, Россия	50	W	100	0.4	25	10 - 500	$3.0 \cdot 10^{11}$ *) $6.0 \cdot 10^{11}$ **) $(1-2) \cdot 10^{12}$ ***)

\*) Источник ИРЕН с первой очередью ускорителя ЛУЭ-200.

\*\*) Источник ИРЕН со второй очередью ускорителя ЛУЭ-200.

\*\*\*) Измерения в сеансах с настройкой максимального выхода нейтронов.

**В заключении** излагаются основные результаты диссертации.

Главным результатом работ, положенных в основу диссертации, является создание и ввод в действие линейного ускорителя ЛУЭ-200 на базе ускоряющих структур с бегущей волной дециметрового диапазона - драйвера импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН, основанного на фоторождении нейтронов в мишени, выполненной из металла с высоким атомным номером.

Под руководством автора и при его определяющем участии решены следующие задачи:

1. Произведён выбор и обоснование основных конструктивных решений по компоновке ускорительных модулей и их размещению в ускорительном комплексе.
2. Предложены и реализованы концептуальные и технические решения по проектированию следующих базовых систем ускорителя:
  - Разработана и создана магнитная система ускорителя, в том числе:
    - соленоидальный канал, включающий фокусирующий соленоид первой ускоряющей секции с высокой степенью однородности магнитного поля на оси,
    - жёсткофокусирующий канал,
    - система коррекции траектории пучка,
    - система питания электромагнитов магнитной системы.
  - На основе анализа принципов построения СВЧ станций обоснована и рассчитана схема модулятора “180МВт/180кВт” - высоковольтного импульсного генератора для питания клистронов ускорителя ЛУЭ-200.
  - Разработан и создан уникальный магнитостатический анализатор энергии ускоренного пучка электронов с совмещёнными функциями (спектрометр/спектрограф) на основе дипольного магнита с секторными полюсами с преобразованием изображения пучка типа “параллели в точку”.
3. Разработаны и созданы инфраструктурные системы ускорителя:
  - вакуумная система ускорителя,
  - система управления ускорителя,
  - система диагностики ускоренного пучка,
  - системы охлаждения и термостатирования.
4. В результате выполненных разработок и исследований:
  - Осуществлён физический пуск I-ой очереди ускорителя ЛУЭ-200 с параметрами: максимальная энергия электронов – 40 МэВ; импульсный ток пучка – 1.5 А; длительность импульса тока – 100 нс; частота циклов – 25 Гц – 50 Гц, средняя мощность пучка при частоте 25 Гц  $\approx 0.11$  кВт.
  - Осуществлён физический пуск II-ой очереди ускорителя ЛУЭ-200 с параметрами пучка электронов: максимальная энергия 60 МэВ, ток пучка 1.5 А, длительность импульса тока пучка 100 нс, максимальная частота циклов 50 Гц, средняя мощность пучка 0.5 кВт.

- Осуществлён физический пуск импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН. Создана и введена в действие новая базовая установка Объединённого института ядерных исследований ИРЕН – источник резонансных нейтронов с параметрами нейтронных потоков  $\sim 10^{12}$  н/с.
- Выявлены и оценены недостатки проекта, основной из которых состоит в том, что в проекте заложены ускоряющие секции с темпом ускорения, реализация которого не обеспечена электрической прочностью используемых ускоряющих структур.
- Сформулированы предложения по развитию ускорителя: переход на клистроны, способные работать на частоте циклов 120 – 150 Гц, повышение эффективности группирователя, внедрение источника электронов на основе СВЧ пушки.

***Практическая ценность и новизна.***

1. На основе предложенного в ИЯФ СО РАН физобоснования концепции линейного ускорителя с бегущей СВЧ волной дециметрового диапазона разработан технический проект современного линейного ускорителя электронов.
2. Создан полный комплект оборудования нового линейного ускорителя электронов ОИЯИ – драйвера источника нейтронов ADS типа (Accelerator Driving System).
3. Введён в действие новый современный ускоритель электронов, на котором произведено исследование эффективности использования ускоряющей структуры с системой компрессии СВЧ мощности типа SLED для ускорения пучков электронов с длительностью, соизмеримой с временем заполнения ускоряющей структуры СВЧ мощностью.
4. На основе ускорителя ЛУЭ-200 создана и введена в действие новая уникальная базовая установка ОИЯИ – источник нейтронов с интегральным потоком нейтронов до  $10^{12}$  н/сек в области резонансных энергий. После физического пуска на генерацию нейтронных потоков установка ИРЕН отработала более восьми с половиной тысяч часов; на ней поставлены и проведены десятки экспериментов.

Источник импульсных потоков нейтронов **ИРЕН**, используемый как для фундаментальных исследований методом времени пролёта в нейтронной ядерной физике, так и для прикладных исследований с применением нейтронов является единственным в РФ и в странах – участницах ОИЯИ специализированным источником резонансных нейтронов.

**В приложениях** содержатся официальные документы Российской академии наук и Объединённого института ядерных исследований в которых констатируется достижение результатов, положенных в основу диссертации.

### Список цитируемой литературы

1. V.L. Aksenov, N.S. Dikansky, V.L. Lomidse, et al. "Proposal for the Construction of the New Intense Resonance Neutron Source (IREN). Report of JINR E3-92-110, Dubna, 1992.
2. A.V. Novokhatski, A.V. Aleksandrov, M.S. Avilov et al., Linear accelerator for Intense Resonance Neutron source (IREN). Proc. of the 2<sup>nd</sup> Workshop on JINR Tau-Charm Factory. 27-29 April 1993, Dubna. JINR, D1,9,13-93-459, Dubna, 1994. P. 197 - 211.
3. Э.М. Лазиев, А.П. Сумбаев, А.А. Каминский, В.А. Швец. Техническое задание на проектирование комплекса оборудования для линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 установки ИРЕН. ОИЯИ. Проект ИРЕН, тема № 06-04-0993-94/96. Дубна, 1995 г.
4. Э.М. Лазиев, А.П. Сумбаев, А.А. Каминский. Техническое задание на общую компоновку ускорительных модулей линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 для установки ИРЕН. ОИЯИ. Проект ИРЕН, тема № 06-04-0993-94/96, Дубна, 1995 г.
5. А.Н. Косарев, Д.Е. Куклин, А.В. Новохатский, В.В. Подлевских, С.В. Шиянков. Ускоряющая структура форинжектора инжекционного комплекса ВЭПП-5. Proc. of the XV International Workshop on Charged Particle Linear Accelerators, Kharkov, September 16-21 1997. "Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki", Issue 2,3 (29,30), 122 - 124, Kharkov, 1997.
6. С.В. Шиянков. Основные системы и элементы форинжектора ВЭПП-5. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Специальность 01.04.20. ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Новосибирск, 2005г. 15 с. На правах рукописи.
7. В.М. Павлов, А.П. Сумбаев. Сравнительный анализ возможностей построения СВЧ – станций на базе мощных импульсных клистронов 10–см диапазона для ускоряющей системы ускорителя ЛУЭ-200. Отчёт о НИР. ИЯФ - ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна, 2008г.
8. А.С. Каюков, А.В. Калмыков, В.Ф. Минашкин, А.П. Сумбаев. Система питания фокусирующих соленоидов клистронов E37340 Toshiba ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4 (229). С. 523 - 528.
9. Kim Dong Su, A.P. Sumbaev, V.N. Shvetsov. 180 MW/180 KW Pulse Modulator for S-Band Klystron of LUE-200 Linac of IREN Installation of JINR. Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, JINR, Dubna. V. 11, N. 5(189), P. 1040 - 1044, 2014.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_2014\\_5/21\\_kim.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_2014_5/21_kim.pdf)
10. Ким Донг Су, Ли Су Ёнг, Е.А. Голубков, В.В. Кобец, А.П. Сумбаев. 180 МВт/180 кВт модулятор ускорителя ЛУЭ-200. Первые результаты запуска и наладки. Постерное сообщение. XI Международный научный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти профессора В.П. Саранцева. 07 - 11 сентября 2015г, Алушта, Крым.
11. V.E. Akimov et. al. Test Of Accelerating Structure For VEPP-5 Preinjector. LINAC2000 Conference. Monterey, California. August 21 - 25, 2000. TUA21.  
[https://www.researchgate.net/publication/279190373\\_Test\\_of\\_Accelerating\\_Structure\\_for\\_VEPP-5\\_Preinjector](https://www.researchgate.net/publication/279190373_Test_of_Accelerating_Structure_for_VEPP-5_Preinjector)
12. S.N. Dolya, W.I. Furman, V.V. Kobets, E.M Laziev, Yu.A. Metelkin, V.A. Shvets, A.P. Soumbaev. Linac LUE200. First Testing Results. XX International Linac Conference LINAC2000. Monterey, California, U.S.A. August 21 - 25, 2000. TUE11.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/100/papers/TUE11.pdf>
13. В.С. Александров, Н.Ю. Казаринов, А.П. Сумбаев, В.Ф. Шевцов. Расчёт динамики пучка электронов ускорителя ЛУЭ-200. Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters. 2004. Т.1, № 3(120), p. 70-77. Электронный ресурс. Режим доступа:

[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan\\_letters/panl\\_3\\_2004/12\\_alex.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/PePan_letters/panl_3_2004/12_alex.pdf)

14. А.П. Сумбаев, С.И. Кукарников. Фокусирующий соленоид первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200. Сообщение ОИЯИ Р9-2016-48. ОИЯИ, Дубна, 2016г.
15. А.В. Калмыков, С.И. Кукарников, В.М. Лачинов, В.К. Маковеев, В.К. Сподарец, А.П. Сумбаев. Стенд для моделирования и испытания магнитных элементов системы фокусировки и транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-49. Дубна, 2011г.
16. В.С. Александров, Н.Ю. Казаринов, И.Н. Мешков, А.П. Сумбаев, А.В. Тузиков, В.Ф. Шевцов. Влияние ошибок соленоидального магнитного поля первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 на динамику пучка электронов. Сообщение ОИЯИ 39-2016-47. Дубна, 2016г.
17. Ю. Булычева, В. Минашкин, А.П. Сумбаев, В.Г. Шабратов и др. Вакуумная система установки ИРЕН. Постерное сообщение. VIII Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева, 31 августа - 5 сентября 2009г. Алушта, Украина.
18. I.V. Burkov, A.P. Sumbaev. Development of a technique for the express assessment of temperature fields on the outlet window membrane of the LUE-200 accelerator. Physics of particles and nuclei. Letters, Vol. 17, No. 4, 2020. P. 595 - 603.
19. A.P. Soumbaev, A.S. Kayukov, V.A. Shvets, O.V. Strekalovsky, M.M. Korjovkina. Plans for a Control System for The LUE-200 Linac in JINR. Proc. of the XXI International LINAC Conference LINAC2002. August 19-23, 2002, Gyeongju, Korea. TH440. P. 689-691.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/102/PAPERS/TH440.PDF>
20. А.С. Каюков, О.В. Стрекаловский, А.П. Сумбаев, В.А. Швец. Принципы построения системы управления линейным ускорителем электронов ЛУЭ-200. Труды XVIII конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2002. Обнинск, 1 - 4 октября 2002г., т. 2, стр. 686. Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 2004 г.
21. Yu. Becher, E.A. Golubkov, I.S. Zhironkin, V.N. Zamriy, A.S. Kayukov, A.V. Kalmykov, V.V. Kobets, V.F. Minashkin, A.P. Sumbaev, I.D. Ponomarev, V.G. Pyataev, K.V. Udovichenko, V.N. Shvetsov. Control System of LUE-200 of IREN Facility - Status. Poster communication. XXV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC2016. November 21-25, 2016. St. Petersburg, Russia.
22. A.P. Sumbaev, N.I. Tarantin, V.I. Shokin. The Magnetic Energy Analyzer for Electron Beam of LUE-200 Linac of IREN Facility. Proceedings of RuPAC2016, November 21 - 25, St. Petersburg, Russia, THPSC051.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc051.pdf>
23. А.П. Сумбаев. Техническое предложение на разработку рабочей документации системы термостабилизации элементов СВЧ системы ускорителя ЛУЭ-200. Проект «ИРЕН», тема № 06-4-0993-94/2004. ОИЯИ, Дубна, 2004г.
24. В.Н. Замрий, А.П. Сумбаев. Прецизионная термостабилизация секции ускорителя ЛУЭ-200. Сообщение ОИЯИ Р9-2013-10, Дубна, ОИЯИ, 2013г.
25. А.П. Сумбаев, В.Г. Пятаев. Техническое задание на выполнение высокоточных геодезических работ по теме «Геодезическое обеспечение монтажа ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН». ЛФВЭ - ЛНФ ОИЯИ, Дубна, 2015г.
26. Экспресс - отчёт «Создание планово – высотного обоснования для обеспечения монтажа ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН (этап I)» ГСПИ 318-ВИ-ПД-8. Москва, 2003г.
27. П.В. Логачёв, П.А. Бак, С.М. Гуров, А.А. Корепанов, Н.Х. Кот, В.М. Павлов, Б.А. Скарбо, А.А. Старостенко, А.Р. Фролов, А.П. Сумбаев, В.А., Швец, В.В. Кобец. Испытание опытного образца ускоряющей секции для ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Отчёт о НИР ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2001г.
28. В.В. Кобец, И.Н. Мешков, А.П. Сумбаев, В.И. Фурман, В.А. Швец, П.В. Логачёв, В.М. Павлов, А.Р. Фролов, С.М. Гуров. Проект ИРЕН: Статус и первые результаты. Труды IV-

- го Научного семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 26 - 28 сентября 2001г. ОИЯИ, Д9-2002-23, Дубна, 2002г. стр. 150 – 160.
29. A.P. Soumbaev, W.I. Furman, V.V. Kobets, I.N. Meshkov, et al. LUE200 Linac. Full-Scale Testing of Accelerating Sections. Proc. Oh The XXI International LINAC Conference LINAC2002. August 19 - 23, 2002, Gyeongju, Korea. TU405. P. 311 - 313.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/102/PAPERS/TU405.PDF>
  30. V.D. Anan'ev, A.R. Frolov, W.I. Furman, S.M. Gurov, V.V. Kobets, R.P. Kuatbekov, P.V. Logachev, I.N. Meshkov, V.M. Pavlov, V.G. Pyataev, G.D. Shirkov, V.A. Shvets, B.A. Skarbo. A.P. Soumbaev, I.T. Tretyakov. Intense Resonance neutron source for Nuclear Physical and applied investigations. Письма в ЭЧАЯ, 2005г., т. 2, №3 (126), ОИЯИ, Дубна, стр. 11 - 18.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_3\\_2005/01\\_anan.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_3_2005/01_anan.pdf)
  31. A. Sumbaev, V. Shvetsov. Physical Startup of the First Stage of the IREN Facility. JINR News, 1/2009, JINR, Dubna, 2009. P. 9 - 13.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/News/News\\_1\\_2009.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/News/News_1_2009.pdf)
  32. А.В. Белозёров, Ю. Бечер, Ю.К. Булычёва, В.Н. Замрий, А.С. Каюков, В.В. Кобец, И.Н. Мешков, В.Ф. Минашкин, В.А. Петров, В.Г. Пятаев, П.В. Седышев, А.В. Скрыпник, А.П. Сумбаев, А.В. Уфимцев, В.Г. Шабратов, В.А. Швец, В.Н. Швецов, А.А. Фатеев. Физический пуск установки ИРЕН. Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7 (163). С. 923 - 932.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_7\\_2010/33-bel.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_7_2010/33-bel.pdf)
  33. Belikov O.V., Belozerov A.V., Becher Yu., et al. Physical Startup of the First Stage of IREN Facility. Proceedings of the XVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-17), Dubna, May 27 - 29, 2009. JINR, E3-2010-36, Dubna, 2010. P. 10 - 16.
  34. Бечер Ю., Голубков Е.А., Егоров В.А., Зайцева Ю.К., Замрий В.Н., Каюков А.С., Кобец В.В., Корокин А.Ж., Минашкин В.Ф., Павлов В.М. Пятаев В.Г., Репкин А.Н., Скрыпник А.В., Сумбаев А.П. и др., Ускоритель ЛУЭ-200 установки ИРЕН: состояние и развитие. Physics of Particles and Nuclei. Letters, ISSN:1814-5957, Изд: JINR, 11, 5(189), 1029 - 1039, 2014.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_2014\\_5/20\\_becher.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_2014_5/20_becher.pdf)
  35. A.P. Sumbaev, A.S. Kayukov, V.V. Kobets, V.F. Minashkin, V.G. Pyataev, V.G. Shabratov, V.A. Shvets, V.N. Shvetsov. LUE-200 Linac. Status & Development. LINAC2014, TUPP096. Proc. of LINAC2014, Geneva, Switzerland, August 31- September 05, 2014.  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2014/papers/tupp096.pdf>
  36. Голубков Е.А., Кобец В.В., Минашкин В.Ф., Михайлов К.И., Репкин А.Н., Сумбаев А.П., Удовиченко К.В., Швецов В.Н. Первые результаты наладки второй ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщение ОИЯИ Р9-2017-77, Дубна, 2017г.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_2018\\_5/13\\_Grozdanov.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_2018_5/13_Grozdanov.pdf)
  37. E.A. Golubkov, V.V. Kobets, P.V. Sedyshev, A.P. Sumbaev, V.G. Pyataev, V.I. Furman, V.N. Shvetsov, E.V. Lychagin. Pulsed Neutron Source IREN at Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR. XXVI International Seminar on Interaction of Neutron with Nuclei. Xi'an, China. May 28 – June 1, 2018. Proceedings. JINR, E3-2019-18, Dubna, 2019. P. 147 – 157.
  38. A. Sumbaev, V. Kobets, V. Shvetsov, N. Dikansky, P. Logatchov. LUE-200 Accelerator – A Photo-neutron Generator For The Pulsed Neutron Source "IREN". Journal of Instrumentation. 2020\_JINST\_15\_T11006.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/11/T11006/pdf>
  39. М.В. Арсентьева, А.М. Барняков, А.Е. Левичев, А.П. Сумбаев. Анализ фокусирующих свойств краевого электрического поля ускоряющей структуры ускорителя ЛУЭ-200. Известия вузов. Физика. 2020. № 7. С. 26 – 30.
  40. T.V. Bondarenko, S.M. Polozov, A.P. Sumbaev. Numerical simulation of the beam loading effect at the LUE-200 accelerator. Particles and Nuclei, Letters. JINR, Dubna, V.13, No.7(205), p.1432-1437. 2016.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_2016\\_7/33\\_bondarenko.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_2016_7/33_bondarenko.pdf)

41. T.V. Bondarenko, A.V. Butenko, S.M. Polozov, V.V. Kobets, A.P. Sumbaev. Beam Dynamics Optimization and Future Plans for LUE-200 Linac Upgrade. Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), May 8 - 13, 2016, Busan, Korea. TUPOW021.
42. В.С. Александров, Н.Ю. Казаринов, М.Н. Сазонов, А.П. Сумбаев, В.Ф. Шевцов. Моделирование нагрузки током пучка ускорителя ЛУЭ-200. Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters. 2005, V. 2, № 3(126), p. 72 - 75.  
[http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan\\_letters/panl\\_3\\_2005/12\\_alek.pdf](http://wwwinfo.jinr.ru/publish/Pepan_letters/panl_3_2005/12_alek.pdf)
43. A.P. Sumbaev, A.M. Barnyakov, A.E. Levichev. On the Limits for the Accelerated Beam Current in the LUE-200 Linac of the IREN Facility. JINR report E9-2019-4, Dubna, 2019.
44. Сумбаев А.П., Барняков А.М., Левичев А.Е. Анализ нагрузки током пучка ускоряющего поля ускорителя ЛУЭ-200. Известия вузов. Физика. 2020, №.3. Стр. 152 - 156.
45. М.В. Арсентьева, А.Е. Левичев, А.М. Барняков, К.Н. Бердников, А.П. Сумбаев. Моделирование динамики пучка ускорителя ЛУЭ-200. Часть I: Аналитические расчёты. ИЯФ 2020-06. Новосибирск, 2020.
46. W.D. Kilpatrick. "Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC". Rev. Sci. Instrum. Vol. **28**, number 10, 824 - 826 (1957).  
  
T. J. Boyd, Jr., *Kilpatrick's criterion*, Los Alamos Group AT-1 report AT-1:82-28, February 12, 1982.
47. Valery N. Shvetsov. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of Joint Institute for Nuclear Research. Review. Quantum Beam Sci. 2017, 1, 6; doi:10.3390/gubs1010006.  
[http://www.mdpi.com/search?q=&authors=Valery+N.+Shvetsov&article\\_type=&journal=qub&section=&special\\_issue=&search=Search](http://www.mdpi.com/search?q=&authors=Valery+N.+Shvetsov&article_type=&journal=qub&section=&special_issue=&search=Search)