

**ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На правах рукописи

**НОЗДРИН**  
Михаил Александрович

**КОМПЛЕКС АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ  
СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНАК-200  
И ПРОТОТИПА ФОТОИНЖЕКТОРА ОИЯИ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединённого института ядерных исследований, Дубна.

Научные руководители:

Ширков Григорий Дмитриевич, доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН

Минашкин Владимир Федорович, кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Карнаев Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Канцырев Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, Лаборатория физики высокой плотности энергии в веществе при воздействии интенсивных ионных пучков Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», начальник лаборатории

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита диссертации состоится “\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина в Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ  
и на сайте [http://www.info.jinr.ru/dissertation/disser\\_Nozdryn.pdf](http://www.info.jinr.ru/dissertation/disser_Nozdryn.pdf)

Учёный секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук

Арефьев  
Валентин Александрович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Современная физика высоких энергий характеризуется все возрастающей сложностью экспериментальных установок, все увеличивающимися размерами, все возрастающим временем разработки и постройки детекторов и ускорителей, все возрастающей стоимостью эксперимента. Создание и эксплуатация новых установок становится не под силу отдельным институтам и даже странам и стало основой широкого международного сотрудничества, что хорошо видно на примере постройки и работы Большого адронного коллайдера в CERN. Существующие сегодня крупные ускорители и детекторы строились в течение более десяти лет, а первые работы по подготовке проекта начались и того раньше. При этом, обсуждаемые сегодня новые проекты потребуют не только новых принципов ускорения, детектирования и обработки данных, но и поиска новых инженерных и конструкторских решений. Работа в этих направлениях будет совместно вестись в различных странах в рамках международного сотрудничества и, при осознании важности таких исследований, в ней нужно принимать участие на всех этапах этого длительного пути. Это будет иметь большой побочный технологический эффект, стимулирует развитие технологий и коммуникаций, а также, в силу масштабности проектов, способствовать техническому образованию в стране [1].

В ОИЯИ работа в этой области ведется в рамках проекта «Проектирование, изготовление и испытания прототипов элементов ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей», включающего в себя три направления:

- тестовый стенд с электронным пучком на основе линейного ускорителя Линак-200 с энергией до 200 МэВ,
- создание прототипа DC-фотоинжектора с энергией до 400 кэВ,
- создание на базе стенда линейного ускорителя комплекса лабораторных и практических работ.

Важными элементами вышеперечисленных установок являются системы управления и диагностики, о которых и пойдет речь в данной диссертации.

### Основные цели работы

1. Анализ требований к системе управления линейного ускорителя электронов Линак-200, разработка и создание на этой основе системы

управления, удовлетворяющей этим требованиям.

2. Разработка и создание стенда для проведения исследования термо- и фотокатодов.
3. Разработка и создание систем диагностики электронного пучка для ускорителя Линак-200 и стендов фотопушки и фотоинжектора, и лазерного пучка для стенда фотопушки.

## **Научная новизна**

1. Разработана концепция минимального и достаточного набора подсистем управления для запуска линейного ускорителя электронов Линак-200 взамен устаревших либо избыточно сложных аналогов ускорителя МЕА, создано недостающее оборудование для этих подсистем и оригинальное программное обеспечение.
2. При непосредственном участии автора разработан, создан и используется стенд для исследования термо- и фотокатодов, на котором в настоящий момент проводятся поисковые исследования по одной из основных задач в области фотокатодных разработок — созданию фотокатода, не требующего для работы сверхвысокого вакуума, но при этом обладающего приемлемыми квантовым выходом ( $10^{-3}$  и выше) и временем жизни (не менее года). Фотокатодная сборка с предложенным в ОИЯИ «прозрачным» фотокатодом интегрирована в ускоряющую структуру фотоинжектора, осуществлен физический пуск прототипа фотоинжектора.
3. Разработанная система диагностики электронного пучка на основе высокочувствительной видеокамеры Prosilica позволила впервые в ОИЯИ получить изображение поперечного профиля электронного пучка с разрешением до 35 пикселей на мм и изображение лазерного пучка на виртуальном катоде с аналогичным разрешением.

## **Практическая значимость работы**

1. Созданная система управления ускорителя Линак-200 позволила обеспечить:
  - (а) физический запуск ускорителя Линак-200: запущены все ускорительные станции, импульсный ток пучка на выходе ускорителя составил 1,5 мА, энергия электронов на выходе составляет

200 МэВ, что соответствует проектному значению; ток на пользовательском выводе пучка (энергия 22 МэВ) составил 15 мА в импульсе;

- (б) получение генерируемого пучком электронов инфракрасного излучения на ондуляторе (длина волны 13,7 мкм, мощность 30 мВт);
  - (в) бесперебойную работу ускорителя, в частности, работу на экспериментальное исследование кристаллических сцинтилляторов для новых детекторов частиц на выведенном электронном пучке предельно низкой интенсивности; исследование радиационной стойкости полупроводниковых материалов для создания калориметра малых углов для будущих электрон-позитронных коллайдеров в рамках международной коллаборации FCAL.
2. Созданный стенд фотопушки позволил проводить исследовательские работы по развитию и оптимизации DC-фотоинжектора с энергией электронов в пучке до 30 кэВ на базе предложенного «прозрачного» для лазерного луча фотокатода; по разработке и совершенствованию фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требования к вакуумным условиям. Создаваемый полномасштабный стенд фотоинжектора позволит проводить эти исследования с новым лазерным драйвером и пучком электронов с энергией до 400 кэВ.
3. Системы диагностики электронного пучка на ускорителе Линак-200 и стенде фотопушки предоставили возможность регистрации профиля, размеров и распределения интенсивности пучка электронов (а на стенде фотопушки — и лазерного луча).

### **Личный вклад автора**

Непосредственно автором разработано программное обеспечение для систем управления электронной пушкой, радиационного контроля и контроллера системы термостабилизации ускорителя Линак-200, плата контроллера электронной пушки (электроника и программное обеспечение микроконтроллера платы), системы видеодиагностики для Линак-200 и стенда фотопушки, и система измерения эмиттанса для стенда фотопушки. Личный вклад автора в получение остальных защищаемых результатов также является определяющим.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Концепция новой системы управления линейного ускорителя электронов Линак-200, основанная на обособленных подсистемах управления с минимальными временными и финансовыми затратами при создании.
2. Основные компоненты системы управления ускорителем:
  - (а) Система управления электронной пушки, выполненная на базе аппаратуры катодной электроники инжектора ускорителя МЕА с новой платой контроллера и оригинальным программным обеспечением под MS Windows XP.
  - (б) Концепция системы синхронизации с использованием разработок ОИЯИ в стандарте КАМАК.
  - (в) Система радиационного контроля ускорителя Линак-200, основанная на оборудовании НПО «Аспект» и оригинальное программное обеспечение для нее.
  - (г) Система блокировок и сигнализаций, выполненная на базе промышленной аппаратуры АВВ с целью повышения отказоустойчивости.
  - (д) Система термостабилизации ускоряющих секций ускорителя Линак-200, выполненная на базе промышленного оборудования и программного обеспечения ОВЕН.
3. Концепция и аппаратура стенда для проведения исследования термо- и фотокатодов.
4. Система видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя Линак-200, позволяющая осуществлять диагностику профиля пучка электронов и дистанционное видеонаблюдение за обстановкой в зале ускорителя
5. Диагностический пост для стенда фотопушки, позволяющий определять различные параметры пучка (профиль, размеры, эмиттанс и т.д.), включая оригинальное программное обеспечение для расчета эмиттанса.

## **Апробация работы**

Результаты работы были опубликованы в реферируемых научных журналах, трудах конференций и Сообщениях ОИЯИ, а также докладывались автором на следующих российских и международных научных семинарах и конференциях:

1. Научная сессия ОФН РАН «Современные проблемы фотоинжекторов электронных пучков с предельной яркостью», 2017 (Москва, Россия).
2. 19-я и 20-я международные летние школы по вакуумным, электронным и ионным технологиям (VEIT), 2015–2017 (Созополь, Болгария).
3. 9-й и 10-й международные семинары по персональным компьютерам и управлению ускорителями заряженных частиц (PCaPAC), 2014 (Калькутта, Индия) и 2016 (Кампинас, Бразилия).
4. Совещания коллаборации PITZ (Photo Injector Test facility in Zeuthen), 2015–2016 (Цойтен, Германия).
5. VIII, IX и XI международные семинары по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, 2009–2015 (Алушта, Крым).
6. Международная конференция по вакуумным электронным источникам (IVESC), 2014 (Санкт-Петербург, Россия).
7. I, II и III школы-конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС Алушта), 2012–2014 (Алушта, Крым).
8. XV и XVIII научные конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС), 2011–2014 (Дубна, Россия).
9. 33-я и 37-я сессии Программно-консультативного комитета по физике частиц ОИЯИ, 2010–2012 (Дубна, Россия).
10. XXII и XXIII всероссийские конференции по ускорителям заряженных частиц (RuPAC), 2010 (Протвино, Россия) и 2012 (Петергоф, Россия).
11. Научный семинар в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ (отчетный доклад лауреата стипендии им. В. И. Векслера), 2012 (Дубна, Россия).
12. 10-й европейский семинар по диагностике пучка и оборудованию для ускорителей частиц (DIPAC2011), 2011 (Гамбург, Германия).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 115 страниц, включая 64 рисунка и 14 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 83 наименования.

## Основное содержание работы

Во **введении** раскрывается актуальность темы исследования, описываются основные цели работы, научная новизна, практическая значимость работы, личный вклад автора, приводятся положения, выносимые на защиту, и апробация результатов.

В **главе 1** приводится обзор существующих систем управления ускорителей, описываются различные подходы к созданию таких систем и аргументируется выбор подхода с созданием отдельной подсистемы управления для каждой системы ускорителя.

В **главе 2** описывается ряд систем управления ускорителем Линак-200. В **разделе 2.1** дается информация об ускорителе, описываются его структура и параметры. Линак-200 представляет собой линейный ускоритель электронов на энергию до 200 МэВ с отводом пучка с энергией 22 МэВ, базирующийся на оборудовании линейного ускорителя МЕА, переданного в ОИЯИ институтом НИКНЕФ. В **разделе 2.2** приводятся требования к системе управления Линак-200 и постановка задачи. В **разделе 2.3** описывается организация системы управления ускорителем и обосновываются принятые решения по созданию новой системы управления. Оборудование и программное обеспечение системы управления МЕА было разработано в 80-х и начале 90-х гг., т.е. на момент начала активной работы над ускорителем Линак-200 (середина 2000-х) существенно устарело и не поддерживалось производителем. Используемая операционная система **CENIX** и программное обеспечение систем управления, кроме того, были разработаны НИКНЕФ для внутреннего использования, результатом чего стало практически полное отсутствие документации (а имеющийся минимум был на голландском языке). В связи с этим было принято решение о разработке собственной системы управления. Другим фактором, повлиявшим на это решение, была ограниченность финансовых и человеческих ресурсов. Поэтому базовой задачей было обеспечение получения пучка электронов ценой минимальных вложений времени и финансов. Это обусловило децентрализационный подход, при котором обособленные подсистемы управления создаются по мере возникновения необходимости в них. В конце раздела приводится состав текущего варианта системы управления.

**Раздел 2.4** посвящен описанию аппаратуры электронной пушки. Схема системы управления электронной пушкой представлена на рис. 1. Особое внимание уделено катодной электронике и новой плате контроллера пушки. Плата состоит из контроллера, четырех каналов ЦАП, 16 каналов для измерения напряжения с последовательным опросом, входного регистра на 8 входов и выходного регистра также на 8 выходов (уровни TTL). Описывается порядок обмена информацией между управляющим



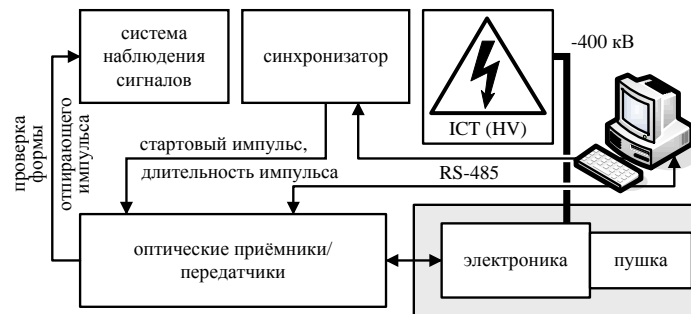


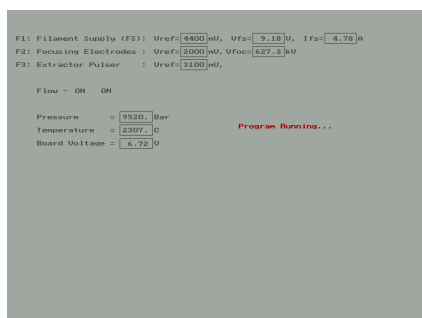
Рис. 1. Схема системы управления электронной пушкой Линак-200

компьютером и платой контроллера через последовательный порт и соответствующее программное обеспечение: разработанная для тестирования и настройки платы контроллера программа TestBoard и две версии программы GunCtrl для управления электронной пушкой. Первая версия была написана на языке Pascal под операционную систему MS DOS и работала с последовательным портом напрямую, через предопределенный массив Port. Вторая версия (используемая в настоящее время) была написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP. Основными отличиями от предыдущей версии стали новый интерфейс с использованием стандартных элементов Windows, работа с портом средствами WinAPI и возможность сохранения и загрузки опорных напряжений. Скриншоты DOS- и Windows-версий программы GunCtrl приведены на рис. 2 а) и б) соответственно. Обе версии программы предоставляют оператору возможность устанавливать опорные напряжения  $V_{ref}$  для:

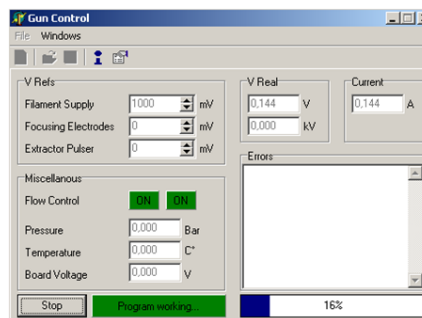
- накала катода (**Filament Supply**),
- первого фокусирующего электрода (**Focusing Electrodes**),
- экстрактора (**Extractor Pulser**).

Во время работы программы на экран в реальном времени выводятся:

- реальные напряжения накала катода ( $V_{fs}$ ) и первого фокусирующего электрода ( $V_{foc}$ ),
- ток ( $I_{fs}$ ) накала катода,
- давление (**Pressure**) и температура (**Temperature**) элегаза в танке пушки,



а) DOS-версия



б) Windows-версия

Рис. 2. Основное окно двух версий программы GunCtrl

- напряжение на плате катодной электроники (**Board Voltage**),
- статус системы термостабилизации платы (**Flow**).

**Раздел 2.5** посвящен системе синхронизации ускорителя. Описываются система синхронизации МЕА, новый вариант системы в принятом в ОИЯИ конструктиве на базе стандарта КАМАК, и причины замены.

**Раздел 2.6** содержит информацию о системе термостабилизации ускоряющих секций ускорителя. Термостатирование охлаждающей воды обеспечивается с помощью двух ТЭНов по 3 кВт каждый и теплообменника с вентилятором. Построение системы базировалось на максимальном использовании аппаратуры и программного обеспечения промышленных систем, основным управляющим элементом является универсальный измеритель-регулятор ОВЕН ТРМ138.

В **разделе 2.7** описывается система радиационного контроля. Аппаратура радиационного контроля ускорителя МЕА не была передана в ОИЯИ в связи с тем, что это оборудование не сертифицировано для применения в России. Ввиду этого была реализована собственная система радиационного контроля, основными элементами которой являются детекторы нейтронного и гамма-излучения (2 и 7 шт. соответственно) производства НПЦ «Аспект» и компьютер со специально разработанным для данной системы программным обеспечением RadCtrl. Все детекторы соединены с помощью последовательной линии связи RS-485 с использованием коммуникационного протокола Modbus RTU. Схема расположения радиационных детекторов в помещениях ускорителя представлена на рис. 3.

Программное обеспечение RadCtrl было создано для отображения в реальном времени показаний детекторов системы и сигнализации о превы-

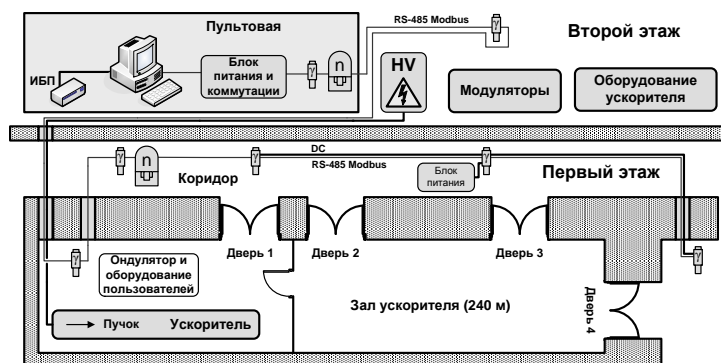


Рис. 3. Схема системы радиационного контроля Линак-200. Символами  $n$  и  $\gamma$  обозначены детекторы нейтронного и гамма-излучения соответственно

шении порогов мощности эффективной дозы (МЭД). Релизована также архивация показаний детекторов. Программа написана в среде Borland Delphi на языке Object Pascal и работает под управлением Windows XP. Проведена калибровка ПО в Отделе радиационной безопасности ОИЯИ — определены и внесены в программу коэффициенты перевода счета гамма-детекторов в МЭД.

**Раздел 2.8** посвящен системе блокировок и сигнализаций (СБиС) ускорителя. В соответствии с нормами радиационной безопасности входы в зал ускорителя должны перекрываться защитными дверьми, связанными с системой блокировок и управляемыми специальной схемой электрооборудования. Система исключает возможности открывания двери в режиме работы ускорителя и включения ускорителя при открытой двери, а также обеспечивает отключение и блокировку режима работы ускорителя при отсутствии питающего напряжения и возможность повторного включения пучка только в случае закрытой двери и активации пусковой кнопки на управляющем пульте. Система сигнализации обеспечивает персонал световой, звуковой и визуальной информацией о состоянии ускорителя. СБиС основана на промышленном оборудовании производства компании АВВ. Такой подход позволяет достигнуть максимальной отказоустойчивости.

Глава 3 посвящена стендам фотопушки и фотоинжектора. В разделе 3.1 речь идет о разработанных в ОИЯИ концепциях «полого» и «прозрачного» фотокатодов. «Полый» фотокаод представляет собой шайбу толщиной несколько миллиметров с цилиндрическим или коническим отверстием в центре (рис. 4). Катод может быть изготовлен как из массивного материала (ниобий, медь), так и методами тонкопленочной технологии (CsIТе и алмазоподобный углерод в виде пленок на медной основе). Рабочей поверхностью фотокаода является образующая конуса или цилиндра. Такая геометрия катода позволяет увеличить квантовый выход за счет поверхностного фотоэффекта, обусловленного нормальной к поверхности материала компонентой электрического поля волны фотона (т.н. векторильный фотоэлектрический эффект, [2, § 10.4]).

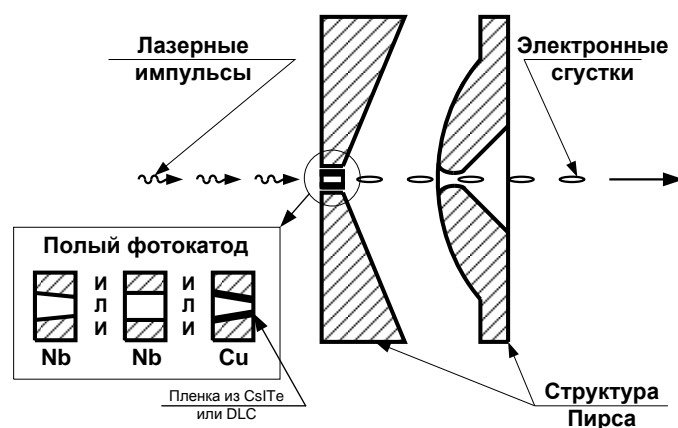


Рис. 4. Принципиальная схема электронной пушки прямого действия с полым фотокаодом

В процессе экспериментальных исследований полый фотокаод был заменен на «прозрачный», представляющий собой либо сетку из металлической проволоки диаметром 30 мкм и размером ячейки 40 мкм × 40 мкм, либо кварцевую/сапфировую пластину. Сетка или пластина служит подложкой для создания пленочных катонов из различных фотоматериалов (сетка, помимо этого, может использоваться в качестве фотокаода и сама по себе, без пленки) — как металлов, так и полупроводников. Облучение с тыльной стороны также радикально упрощает наводку на эмитирующую поверхность и ее лазерную чистку как после первоначальной установки катода, так и в процессе эксплуатации.

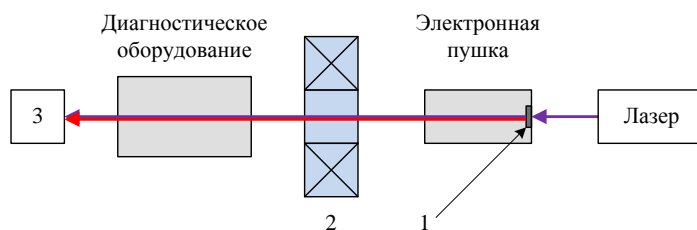


Рис. 5. Схема стенда фотопушки. Цифрами обозначены: 1 — «прозрачный» фотокатод, 2 — фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, 3 — поглотитель пучка. Фиолетовым цветом показано излучение лазера, красным — пучок электронов

В разделе 3.2 описывается стенд фотопушки. Стенд был создан для исследования катодов (как термо-, так и фотоэмиссионных) для ускорителя Линак-200. В дальнейшем ускоряющая структура с термокатодом была перенесена на Линак-200, а стенд стал использоваться для разработки и совершенствования «полых», а затем «прозрачных» фотокатодов с целью увеличения квантового выхода, времени жизни и снижения требований к вакуумным условиям. Показано развитие стенда с момента его создания до настоящего времени. Сейчас на стенде в качестве лазерного драйвера используется ультрафиолетовый лазер LOTIS TII LS-2134 с длительностью импульса 15 нс, максимальная энергия электронов в пучке составляет 30 кэВ. Схема стенда представлена на рис. 5.

Раздел 3.3 посвящен развитию стенда фотопушки — стенду фотоинжектора. На этом создающемся стенде энергия электронов будет достигать 400 кэВ. Основными элементами стенда являются УФ лазерный драйвер, оптическая линия транспортировки лазерного излучения на фотокатод, чиллер для охлаждения твердотельных оконечных усилителей лазера, источник высокого напряжения и ускоряющая структура прямого действия с прозрачным фотокатодом. В качестве УФ лазерного драйвера используется созданная совместно с ИПФ РАН система, позволяющая получать микроимпульсы длительностью порядка 10 пс, объединенные в макроимпульсы (до 8000 микроимпульсов в каждом). Используемая ускоряющая структура, за исключением катода, аналогична установленной на Линак-200.

В апреле 2017 г. на стенде был получен первый пучок фотоэлектронов. Зарегистрированы макроимпульсы с зарядом 15 нКл, что соответствует току микроимпульса порядка 200 мА, макроимпульса 20 мкА и среднему току 150 нА при частоте повторения 10 Гц. Напряжение на катоде составляло -80 кВ. Использовался прозрачный катод из медной сетки с размером

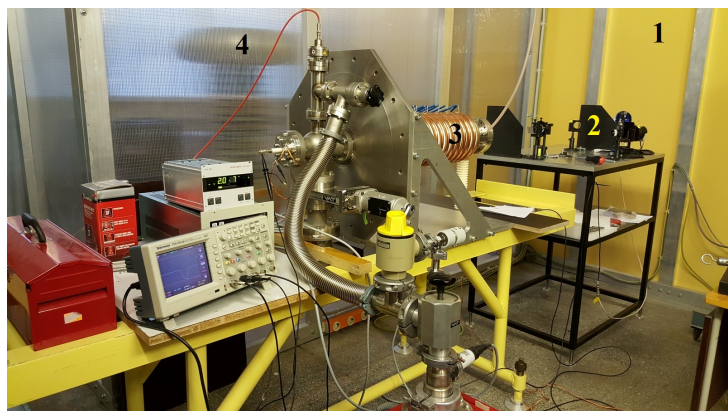


Рис. 6. Общий вид стенда фотоинжектора при физическом пуске. Цифрами обозначены: 1 — внешняя стенка лазерной комнаты, 2 — оптическая линия транспортировки, 3 — ускоряющая структура с фотокатодом, 4 — высоковольтный источник

ячейки  $40 \text{ мкм} \times 40 \text{ мкм}$  и диаметром проволоочки  $30 \text{ мкм}$ . Общий вид стенда при физическом пуске приведен на рис. 6.

В **главе 4** дается обзор средств диагностики на ускорителе Линак-200 и стендах фотопушки и фотоинжектора. Разработанные диагностические системы принципиально не привязаны к какой-то конкретной установке и могут использоваться (и используются) на других. Поэтому диагностическим устройствам посвящена отдельная глава.

В **разделе 4.1** приведено описание системы видеодиагностики и видеонаблюдения ускорителя Линак-200. Система разработана для визуализации профиля и положения пучка (используются IP-камеры Aviosys) и общего контроля происходящего в зале ускорителя (используется аналоговая камера, подключенная к телевизору). Предусмотрены широкие возможности для развития системы. Так, программное обеспечение Surf 16 Ch от Aviosys позволяет одновременно работать с 16 IP-камерами, а имеющийся IP-видеосервер IP Video 9100A Plus позволяет подключать до 4 аналоговых камер по локальной сети (и, соответственно, также работать с ними в Surf 16 Ch или через браузер).

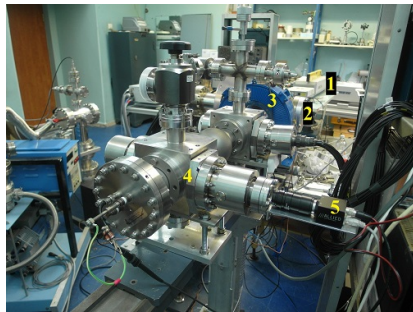
**Раздел 4.2** посвящен системе видеодиагностики стенда фотопушки (и, впоследствии, стенда фотоинжектора). Основным видеоборудованием является высокочувствительная цифровая видеокамера AVT Prosilica GC1380 с объективом Kowa LM50JCM. Важной особенностью этой камеры является возможность синхронизации с лазерным драйвером стенда.

В начале раздела приводится описание используемого программного обеспечения. В поставляемый производителем камеры программный пакет Vimba SDK входит программа Vimba Viewer, позволяющая просматривать изображение с камеры и дающая доступ к ее параметрам. Однако для работы в качестве диагностического ПО данная программа имеет достаточно слабый функционал. В связи с этим было принято решение об использовании разработанного в DESY Цойтен программного обеспечения AVINE.

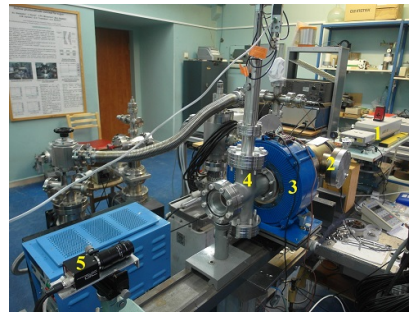
AVINE — Advanced Video and Imaging Network Environment — разработанный в DESY набор программных инструментов для создания систем видеодиагностики (в первую очередь поперечного профиля пучка ускоренных частиц) на физических установках. Серверная часть системы написана на C++ и работает под управлением MS Windows XP или 7, клиентская часть имеет C++ версию, которая также работает только под управлением Windows и кроссплатформенную Java-версию. Важной особенностью системы является то, что серверная и клиентская части могут быть установлены на одном компьютере [3]. Именно в таком варианте AVINE используется на стенде фотопушки, установленная на ноутбуке ASUS U36S.

Затем описывается видеодиагностика электронного пучка. Первым использованным вариантом было размещение люминофорного экрана в специальной вакуумной камере под углом  $45^\circ$  к оси пучка (видеокамера размещалась на боковом фланце, рис. 7, а). Однако в связи с намагничиванием вакуумного бокса, от этого варианта пришлось отказаться, несмотря на то, что пока этот вариант единственный, в котором удалось выделить электронный пучок.

В текущем варианте люминофорный экран закреплен на выходном фланце вакуумного бокса измерения эмиттанта (рис. 7, б). Основной проблемой для наблюдения пучка электронов является засветка люминофора лазером (усугубляющаяся малой яркостью люминофора из-за низкой энергии электронов). В частности, выделить электронный пучок в варианте с расположением люминофора под углом  $90^\circ$  пока не удастся. Возможны следующие варианты минимизации влияния фактора засветки (в порядке убывания приоритета): установка диагностического узла с двумя новыми типами экранов; отклонение электронного пучка с помощью дипольного магнита (т.к. этот вариант позволяет полностью избавиться от засветки, в отличие от предыдущего, он, вероятнее всего, будет реализован незави-



а)



б)

Рис. 7. Два варианта видеодиагностики электронного пучка — под углом 45 (а) и 90 (б) градусов к оси пучка. Цифрами обозначены: 1 — лазерный драйвер, 2 — электронная пушка, 3 — фокусирующий магнит с корректирующими обмотками, 4 — диагностический бокс, 5 — видеокамера

симо от того, насколько будет снижена засветка при использовании новых экранов); установка на пути пучка фольги, проницаемой для электронов и непроницаемой для лазера (вероятно, будет реализовано на стенде фотоинжектора); размагничивание имеющегося бокса.

Вышеупомянутый бокс измерения эмиттанса представляет собой вакуумную камеру с щелевой маской внутри и предназначен для измерения поперечного эмиттанса пучка щелевым методом. Бокс оснащен двухпозиционным пневмоприводом для ввода/вывода маски в/из тракта. На данный момент реализовано и протестировано на лазерном пучке оборудование и программное обеспечение для расчета поперечного эмиттанса пучка в вертикальной плоскости. В зависимости от результатов тестирования с электронным пучком планируется либо заменить пневматический привод на трехпозиционный (с двумя масками со взаимно перпендикулярными щелями), либо использовать метод Реррег-рот, при котором вместо щелевой маски используется маска с несколькими рядами отверстий. Для расчета эмиттанса щелевым методом было создано программное обеспечение EmCa (рис. 8). Программа написана в среде MS Visual Studio 2010 на языке C++ и работает с изображениями, сохраненными в видеоклиенте AVINE. Для вычисления эмиттанса используется формула, выведенная в [4]. Планируется работа с произвольным количеством бимлетов (сейчас их число фиксировано и равно трем), их автоматического выделения, отображения пучка в фазовом пространстве и вычисления общего поперечного эмиттанса (после аппаратной реализации).



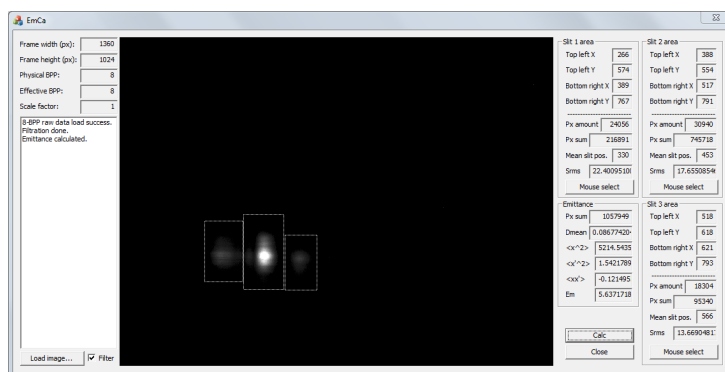


Рис. 8. Программное обеспечение EmCa

Далее описывается диагностика лазерного пучка, которая осуществляется в двух местах: там же, где электронного, и на т.н. «виртуальном катоде». Последний представляет собой такое расположение диагностического оборудования, при котором профиль пучка на люминофорном экране соответствует профилю пучка на катоде. Достигается это расположением экрана таким образом, что расстояние между лазером и экраном равно расстоянию между лазером и катодом. Были проведены кратковременные (30 минут) измерения временной стабильности координаты пучка и его среднеквадратичного размера на виртуальном катоде. Обнаружено, что пучок имеет тенденцию к горизонтальному сдвигу. Для определения причин этого планируется провести более продолжительные исследования.

Завершается раздел описанием тестирования системы на Линак-200. Было получено изображение пучка на люминесцентном экране (рис. 9), среднеквадратичный размер пучка составил 3,2 мм × 2,9 мм.

В заключительном **разделе 4.3** описывается прочая диагностика на стендах: измерение энергии лазерного излучения и температуры термокаатода.

В **Заключении** приводятся основные результаты и выводы работы, а также благодарности.

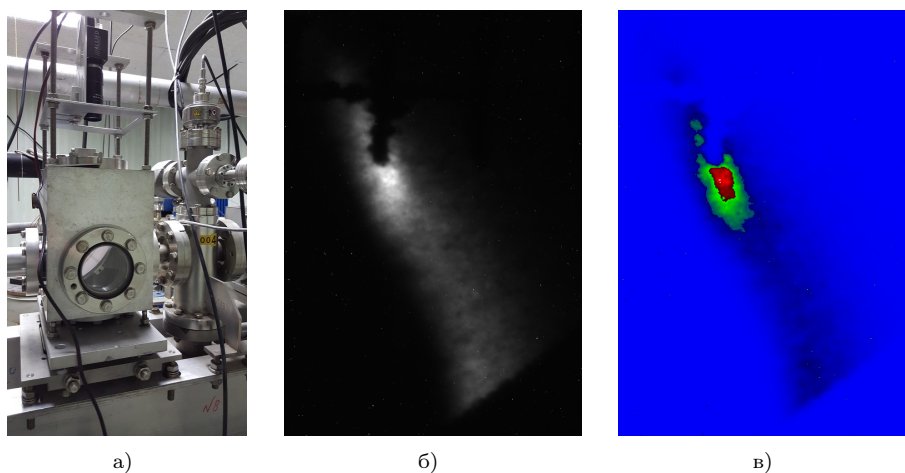


Рис. 9. Бокс с люминесцентным экраном на Линак-200 (а) и изображения пучка Линак-200: в оттенках серого (б) и ложном цвете (в)

## Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ требований к системе управления линейного ускорителя электронов Линак-200, на основе которого разработана, создана и введена в эксплуатацию система управления ускорителя. Разработаны и созданы следующие основные компоненты системы управления ускорителем Линак-200:
  - (а) система управления электронной пушки, обеспечивающая регулировку тока пучка ускорителя в пределах от 15 мА до величин порядка 100 нА, требуемых при исследовании кристаллических сцинтилляторов, и контроль параметров пушки;
  - (б) концепция системы синхронизации, позволившая запускать две и более ускоряющих станции синхронно с импульсом пушки;
  - (в) система радиационного контроля, предоставляющая информацию о радиационной обстановке в зале ускорителя, модуляторном зале, пультовой и прилегающих помещениях;
  - (г) система блокировок и сигнализаций, обеспечивающая предотвращение доступа персонала в зоны с повышенным уровнем ионизирующего излучения и предупреждение персонала о возможной радиационной опасности с помощью звуковых и световых

сигнализаторов;

- (д) система термостабилизации ускоряющих секций ускорителя, обеспечивающая необходимые параметры секций (тем самым обеспечивая необходимые параметры пучка), а также позволившая увеличить время непрерывной работы ускорителя с нескольких часов до нескольких суток.
- 2. При определяющем участии автора разработан и создан стенд фотопушки на энергию электронов до 30 кэВ для проведения исследований термо- и фотокатодов. Фотокатодная сборка интегрирована в ускоряющую структуру фотоинжектора на 400 кэВ, что позволило осуществить физический пуск нового стенда — фотоинжектора. Получен пучок электронов с энергией 80 кэВ и зарядом 15 нКл.
- 3. Разработаны и созданы системы диагностики электронного пучка, позволяющие регистрировать профиль, размеры и распределение интенсивности пучка электронов на ускорителе Линак-200 и стенде фотопушки. На последнем также реализована возможность наблюдения профиля лазерного луча. Установлено оборудование измерения эмиттанса пучка с помощью щелевого метода. Разработано оригинальное программное обеспечение для расчета эмиттанса.

## Список цитируемой литературы

1. *Ширков Г. Д., ...* [и др.] Проект «Проектирование, изготовление и испытания прототипов элементов ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей» / ОИЯИ. — Дубна, Россия, 2015.
2. *Ворончев Т. А., Соболев В. Д.* Физические основы электровакуумной техники. — М. : Высшая школа, 1967. — 352 с.
3. *Weisse S., ...* [et al.] Status, Recent Developments and Perspective of TINE-powered Video System, Release 3 // Proceedings of the 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS2011, Grenoble, France, Oct. 10–14, 2011) / ed. by M. Robichon, C. Cassady, C. Finlay, L. Graham, M. Marx, R. Müller, M. Power, V. R. Shaa, T. Thuillier, E. Vernay. — 2011. — Pp. 405–408.
4. *Zhang M.* Emittance Formula for Slits and Pepper-pot Measurement. — Oct. 1996. — FERMILAB-TM-1988.

## Публикации автора по теме диссертации

### В реферируемых журналах

1. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Researching the Characteristics of Photo- and Thermoemission Cathodes // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2008. — Vol. 5, no. 7. — Pp. 605–608.
2. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Control System of Injector for Linear Electron Accelerator LINAC-800 // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2010. — Vol. 7, no. 7. — Pp. 525–528.
3. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] On Radiation Protection at the LINAC-800 Linear Electron Accelerator // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2012. — Vol. 9, no. 4–5. — Pp. 452–455.
4. *Gacheva E. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 2014. — July. — Vol. 50, no. 7. — Pp. 522–529.
5. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Transmission photocathodes based on stainless steel mesh and quartz glass coated with N doped DLC thin films prepared by reactive magnetron sputtering // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 700, no. 1. — P. 012050. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/700/i=1/a=012050>.
6. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] JINR LHEP Photoinjector Prototype // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2016. — Vol. 13, no. 7. — Pp. 897–900.
7. *Балалыкин Н. И., ..., Ноздрин М. А., ...* [и др.] Электронная пушка с прозрачным фотокатодом для фотоинжектора Объединённого института ядерных исследований // *Успехи физических наук*. — 2017. — Т. 187, № 10. — С. 1134–1141.

### В нереферируемых журналах

8. *Ноздрин М. А., ...* [и др.] Диагностика на стенде фотопушки ЛФВЭ ОИЯИ. — 2016. — Сообщения ОИЯИ: Р9-2016-6.

### В трудах конференций

9. *Nozdrin M. A., ...* [et al.] Hollow Photocathode Concept for e-Gun // *Proceedings of the XXII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2010, Protvino, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2010)* / ed. by M. Kuzin, V. R. Schaa. — 2010. — Pp. 59–61.

10. *Nozdrin M. A., ...* [и др.] Система радиационного контроля линейного ускорителя электронов ЛИНАК-800 // Труды XV-ой научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС2011, Дубна, Россия, 14–19 февр. 2011) / под ред. А. В. Филиппов. — 2011. — С. 131–134.
11. *Nozdrin M. A., ...* [et al.] Hollow Photocathode Prototype for e-Gun // Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011, Hamburg, Germany, May 16–18, 2011) / ed. by M. Marx, J. Chrin, I. Martin, R. Mueller, V. R. Schaa. — 2011. — Pp. 242–244.
12. *Nozdrin M. A., ...* [et al.] Development of the new control systems for JINR e-Linac Accelerator Test Bench // Proceedings of the XXIII Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012) / ed. by M. Kuzin, V. R. Schaa. — 2012. — Pp. 626–628.
13. *Huran J., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Photocathode based on deuterated diamond like carbon films prepared by reactive magnetron sputtering and PECVD technology // Proceedings of the Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM2012, Smolenice, Slovakia, Nov. 11–15, 2012). — 2012. — Pp. 263–266.
14. *Nozdrin M. A., ...* [et al.] Progress of the JINR e-Linac Accelerator Test-bench Control Systems // Proceedings of the 9th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC2012, Kolkata, India, Dec. 4–7, 2012) / ed. by V. R. Schaa, T. Bhattacharjee, K. Datta, S. Sahoo. — 2012. — Pp. 203–205.
15. *Balalykin N., ..., Nozdrin M., ...* [et al.] JINR Powerful Laser Driver Applied for FEL Photoinjector // Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014, Dresden, Germany, June 15–20, 2014) / ed. by C. Petit-Jean-Genaz, G. Arduini, P. Michel, V. R. Schaa. — 2014. — Pp. 2906–2908.
16. *Balalykin N. I., ..., Nozdrin M. A., ...* [et al.] Detailed investigation of the DLC films in the transmissive photocathode DC gun application // Emission Electronics (ICEE), 2014 2nd International Conference on (ICEE2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30–July 4, 2014). — 2014. — Pp. 1–5. — DOI: 10.1109/Emission.2014.6893973.

17. *Nozdrin M. A., ...* [et al.] Diagnostics at JINR LHEP Photogun Bench // Proceedings of the 11th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC2016, Campinas, Brazil, Oct. 25–28, 2016) / ed. by P. Renan, V. R. Schaa, L. M. Volpe. — 2016. — Pp. 117–119.