

*На правах рукописи*

**БАРЛАДЯН Александр Константинович**

**УПРАВЛЕНИЕ КРИОГЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ  
ДЕТЕКТОРА КЕДР**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**НОВОСИБИРСК – 2015**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

ТИХОНОВ — доктор физико-математических наук, профессор, Юрий Федеральное государственное бюджетное учреждение Анатольевич науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

**Официальные оппоненты:**

АГАПОВ — доктор технических наук, старший научный сотрудник, Николай главный инженер Лаборатории физики высоких энергий Николаевич Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна

ВАСИЛЬЕВ — кандидат физико-математических наук, заведующий Александр лабораторией Криогенной и сверхпроводящей техники Анатольевич Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук

А.В. Бурдаков

# **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность темы**

В изучении фундаментальных свойств материи важнейшим инструментом современной экспериментальной физики высоких энергий служат универсальные детекторы на ускорителях встречных пучков заряженных частиц. Достичь существенных преимуществ им позволяет использование криогенных техники и технологий. В то же время, специфика работы с веществом при низких температурах требует непрерывного контроля и целенаправленного изменения параметров процессов криогенного обеспечения криогенных компонент детектора. Дистанционный способ их осуществления актуален вследствие ограничения доступа человека к криогенному оборудованию вблизи детектора из-за опасного радиационного фона от ускоряемых пучков частиц при проведении эксперимента.

## **Цель работы**

Создание средств и методов дистанционного управления криогенным комплексом жидкокриптонового калориметра и сверхпроводящих соленоидов универсального детектора КЕДР.

## **Личный вклад**

Представленные в диссертации результаты получены при ведущем участии автора, определяющем — в решении следующих задач:

- создания программного обеспечения;
- системной интеграции электроаппаратуры и вычислительной техники;
- испытаний при рабочей температуре всех впервые

смонтированных компонент и систем криокомплекса, их доработки;

- формирования технических заданий на разработку модулей электронных устройств, содействия их должной реализации и включения в электросистему управления;
- проектирования, монтажа и наладки всего электрооборудования криокомплекса, ввода его в эксплуатацию;
- методической разработки технологических процессов;
- личного участия в криогенном обеспечении цикла экспериментов по физике с детектором КЕДР на ускорительном комплексе ВЭПП-4М.

### **Научная новизна**

1. Задачи управления криогенным обеспечением решены на специфичном составе криогенного оборудования, встроенной в него аппаратуры и технологических режимов.
2. Разработка и функционирование программного обеспечения управления криогенным комплексом в реальном времени основывается на использовании открытого свободно доступного программного кода.
3. Разработка новых оригинальных мнемосхем для оператора-технолога осуществлена на базе принципиальных пневмогидравлических схем криогенных систем, что существенно упрощает управление криокомплексом в реальном времени и изучение его особенностей.
4. Впервые исследована работа уникальной криогенной системы детектора КЕДР в различных режимах и разработаны методики их практической реализации. Разработка новых методов осуществления технологических режимов криогенных систем учитывает выявленные проектные ошибки и последствия модернизации

криогенного оборудования.

5. Впервые осуществлена работа при проектных значениях криогенных температур уникальных жидко-криптонового калориметра и сверхпроводящих соленоидов детектора КЕДР, а также систем их криогенного обеспечения.
6. Впервые введён в постоянную эксплуатацию поршневой детандер гелиевого рефрижератора детектора КЕДР. Микроконтроллерное управление параметрами рабочего цикла поршневого детандера обеспечивает возможность их оперативной дистанционной коррекции в переходных режимах гелиевой криогенной системы (рефрижератора), и, тем самым, его стабильную работу.

### **Практическая ценность результатов**

Разработанные средства и методы дистанционного управления технологическими процессами криогенного комплекса в течение более 15 лет обеспечивают его непрерывную эксплуатацию и надёжное криогенное обеспечение циклов экспериментов по физике с универсальным детектором КЕДР на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-4М, в том числе — по измерению параметров ряда элементарных частиц ( $\tau$ -лептона, мезонов:  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $D^0$ ,  $D^+$ ,  $D^-$ ) с высокой или лучшей в мире точностью.

Полученный экономический эффект от отлаженного детандерного режима работы гелиевого рефрижератора выражается в снижении суточных затрат жидкого гелия вдвое — на 500 литров.

### **Основные выносимые на защиту положения**

- Система контроля и управления криокомплекса детектора КЕДР с центральным постом оператора-технолога

разработана и реализована на основе персональных ЭВМ и сопряжённых с ними криогенных, электронных преобразователей и исполнительных устройств.

- Программное обеспечение управления в реальном времени криокомплексом детектора КЕДР разработано и функционирует в вычислительной среде (GNU/Linux, англ.) с открытым, свободно доступным исходным кодом.
- Разработка мнемосхем на основе принципиальных пневмогидравлических схем криогенного комплекса существенно упрощает управление его технологическими режимами в реальном времени.
- Микроконтроллерное управление параметрами рабочего цикла поршневого детандера обеспечивает возможность их оперативной дистанционной коррекции в переходных режимах гелиевой криогенной системы (рефрижератора), и, тем самым, его стабильную работу, дающую двукратную экономию суточного объёмного расхода жидкого гелия — до пятисот литров.

### **Апробация работы**

Результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах, на российских и международных научных и научно-практических конференциях: «Симпозиуме по ионизационным калориметрам» (США, Стэнфорд, Калифорния, 2006 г.), «20-й Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц» (РФ, г. Новосибирск, 2006 г.), «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития» (РФ, г. Москва, 2004 г. и 2007 г.), «Сессии-конференции Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН» (РФ, г. Москва, ИТЭФ, 2007 г.), «Международных конференциях по магнитным технологиям» (РФ, г. Ленинград, 1991 г.; Швейцария, г. Женева, 2001 г.; Япония, г. Мориока, 2003 г.; Италия, г. Генуя, 2005 г.;

Франция, г. Марсель, 2011 г.).

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы из 92 наименований. Содержит 151 страницу с машинописным текстом, 17 таблицами и 45 рисунками.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыты актуальность проведённой научной работы, её цель и выносимые на защиту положения.

**Первая глава** посвящена рассмотрению специфики управления криогенным оборудованием и широко используемых средств его обеспечения. Аргументируется принятие за основу решения задач управления криогенным комплексом детектора КЕДР опыта управления ускорительными комплексами в ИЯФ СО РАН.

**Вторая глава** знакомит с универсальным детектором КЕДР, предназначенным для проведения прецизионных экспериментов на встречных электронных и позитронных пучках с проектной энергией в системе центра инерции от 1,8 ГэВ до 11 ГэВ ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4М.

**Третья глава** знакомит с назначением и устройством криогенных компонент детектора КЕДР.

Компенсирующие сверхпроводящие соленоиды (Рисунок 1) предназначены для создания постоянного магнитного поля до 6,55 Тл с целью зануления интеграла магнитного поля вдоль орбиты пучков внутри детектора.

Основной сверхпроводящий соленоид предназначен для создания продольного однородного постоянного магнитного поля до 1,83 Тл.

При юстировке основного соленоида, впаянного в гелиевый сосуд, использованы датчики линейных перемещений (Рисунок 2, справа), прокалиброванные с точностью 0,1 мм, установленные в вакууме на гелиевых трубах, а также на пружинных блоках подвесок соленоида для контроля их натяжения.

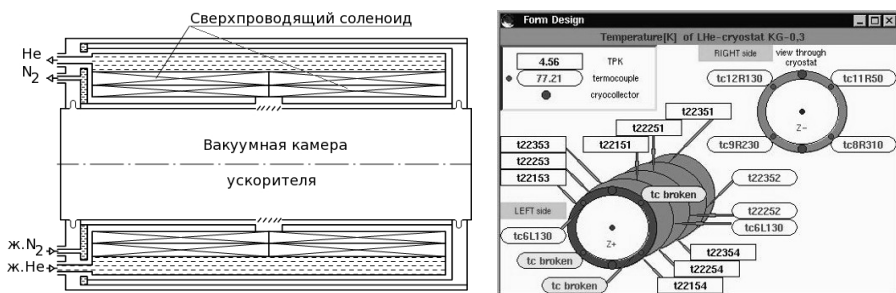


Рисунок 1. Компенсирующий соленоид (слева) и мнемосхема термоконтроля основного соленоида (справа)

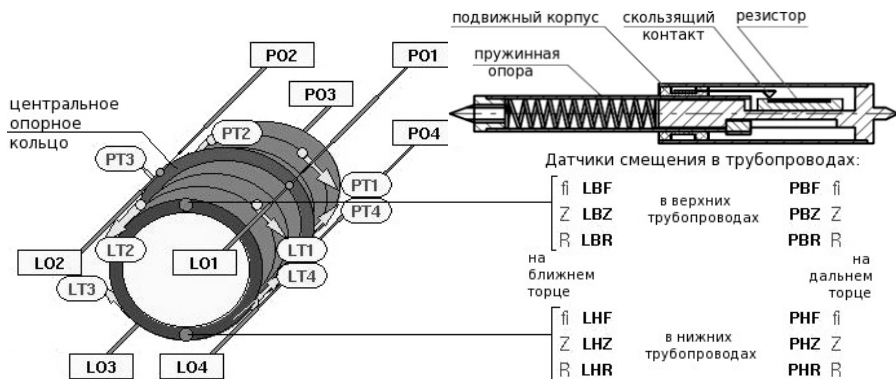


Рисунок 2. Контроль перемещений основного соленоида

Центральный жидкокриптоновый калориметр является ионизационным спектрометром полного поглощения и предназначен для определения с высокой точностью координат конверсии  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц, их идентификации и



измерения энергии.

На поверхности внутренних сосудов криостатов основного соленоида (Рисунок 1) и криптонового калориметра (Рисунок 3) расположены термодатчики.

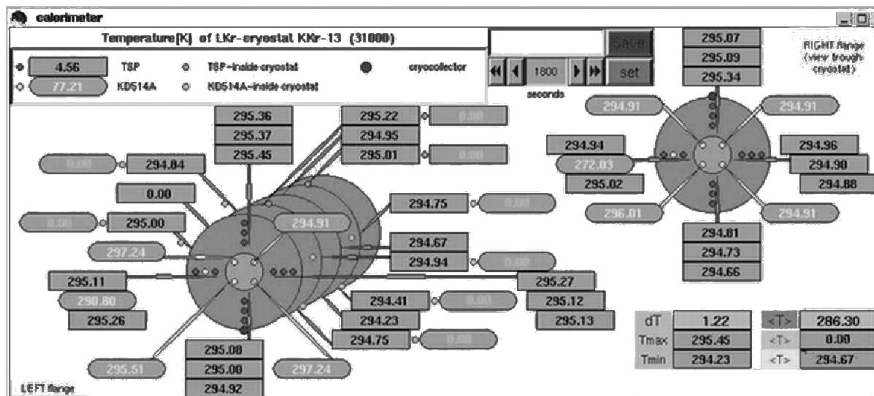


Рисунок 3. Мнемосхема термоконтроля калориметра

**Четвёртая глава** описывает системы криокомплекса детектора КЕДР (Таблица 1): гелиевую (Рисунок 4), криптоновую (Рисунок 5) и азотную (Рисунки 4, 5), пневмоуправления, утилизации и компрессии гелия.

Термостатирование сверхпроводящих соленоидов осуществляется при нормальном давлении и температуре 4,2 К подачей в их криостаты жидкого гелия из сосудонакопителя ( $2 \text{ м}^3$ ) по принципу сообщающихся сосудов, а также при помощи гелиевого рефрижератора (600 Вт, 4,2 К; 2,5 МПа, 120 кг/ч) с поршневым детандером (11 К - 7 К).

Термостатирование жидкого криптона в криостате калориметра при температуре 119-120 К и нормальном давлении (до 0,12 МПа) осуществляется периодическим (1 - 2 раз в сутки) включением встроенного азотно-криптонового теплообменника.

Азотная система содержит два  $66 \text{ м}^3$  танка для хранения,

газификации и выдачи азота при избыточном давлении до 0,5 МПа в жидкой и газообразной фазах. Газом обдувают торцы дрейфовой камеры детектора, жидкость подаётся в теплозащитные экраны всех гелиевых сосудов и в теплообменные блоки.

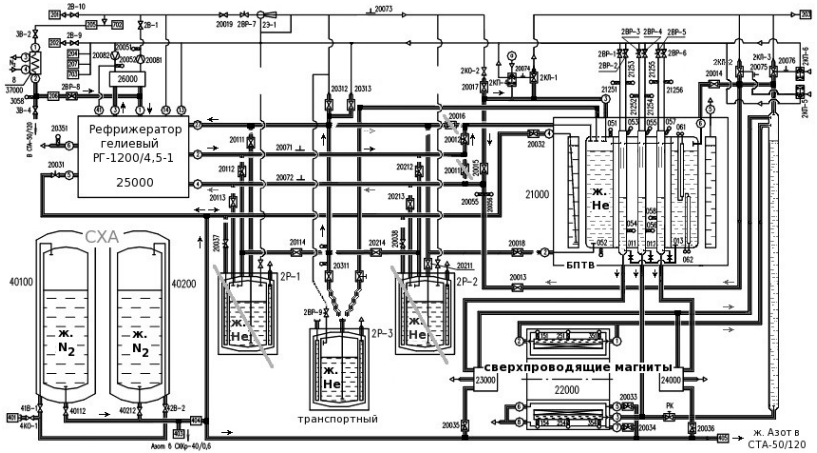


Рисунок 4. Доработанная гелиевая система (и азотная)

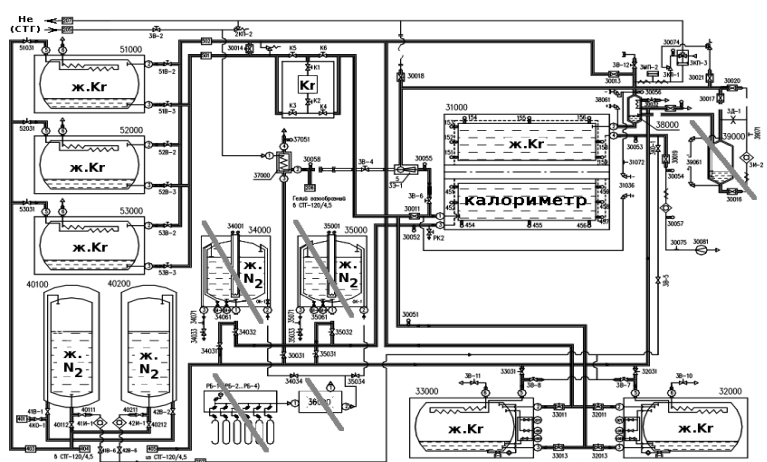


Рисунок 5. Доработанные криптоновая и азотная системы

Таблица 1. Основные проектные параметры криокомплекса

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение</b>
Холодопроизводительность на 120 К, Вт	1200
Холодопроизводительность на 4,2 К, Вт	600
Масса хранимого жидкого азота, т	до 101,6
Масса хранимого жидкого криптона, т	до 46,8
Масса жидкого гелия в оборудовании, т	0,300 ÷ 0,675
Массовый расход гелия при давлении 2,3 ÷ 2,5 МПа и температуре 300 К, кг/ч	120
Массовый расход гелия при давлении 13 ÷ 15 МПа и температуре 300 К, кг/ч	6,9

Система пневмоуправления использует гелий с давлением 4,7 МПа для запираания нормально открытых пружинных клапанов посредством дополнительных переключающих пневмоэлектрклапанов (ПЭК-ДД).

**Пятая глава** описывает разработанное аппаратное обеспечение криокомплекса. Основу составляет сопряжённая с ЭВМ (Рисунок 6) модульная аппаратура в стандарте КАМАК — вновь и ранее разработанная для управления электрофизическими установками в ИЯФ СО РАН.

Коммутация высоковольтных цепей управления приводами исполнительными устройств реализуется выходными каскадами модулей в стандарте ВИШНЯ.

Для дистанционного задания параметров управления электромагнитными клапанами и приводом маховика поршневого детандера, а также получения диагностической рv-диаграммы разработан микропроцессорный контроллер.

**Шестая глава** описывает состав разработанного программного обеспечения криокомплекса:

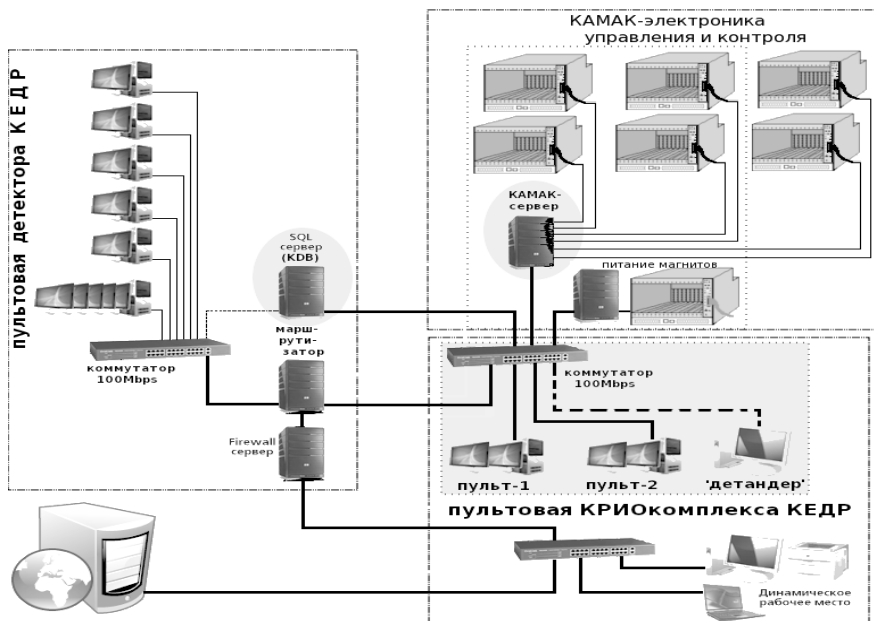


Рисунок 6. Вычислительная сеть криокомплекса

- системного драйвера генерации в реальном времени для главной программы заявленных ею системных сигналов по ожидаемым аппаратным прерываниям,
- главной программы дистанционного управления в реальном времени технологическими процессами криокомплекса и взаимодействия с оператором-технологом,
- вспомогательного программного обеспечения:
  - программы дистанционного мониторинга криптоновой системы в реальном времени,
  - веб-приложения для мониторинга контрольных параметров криогенной системы по выборкам из Базы данных,
  - программы стенда дистанционного управления поршневым детандером в реальном времени,

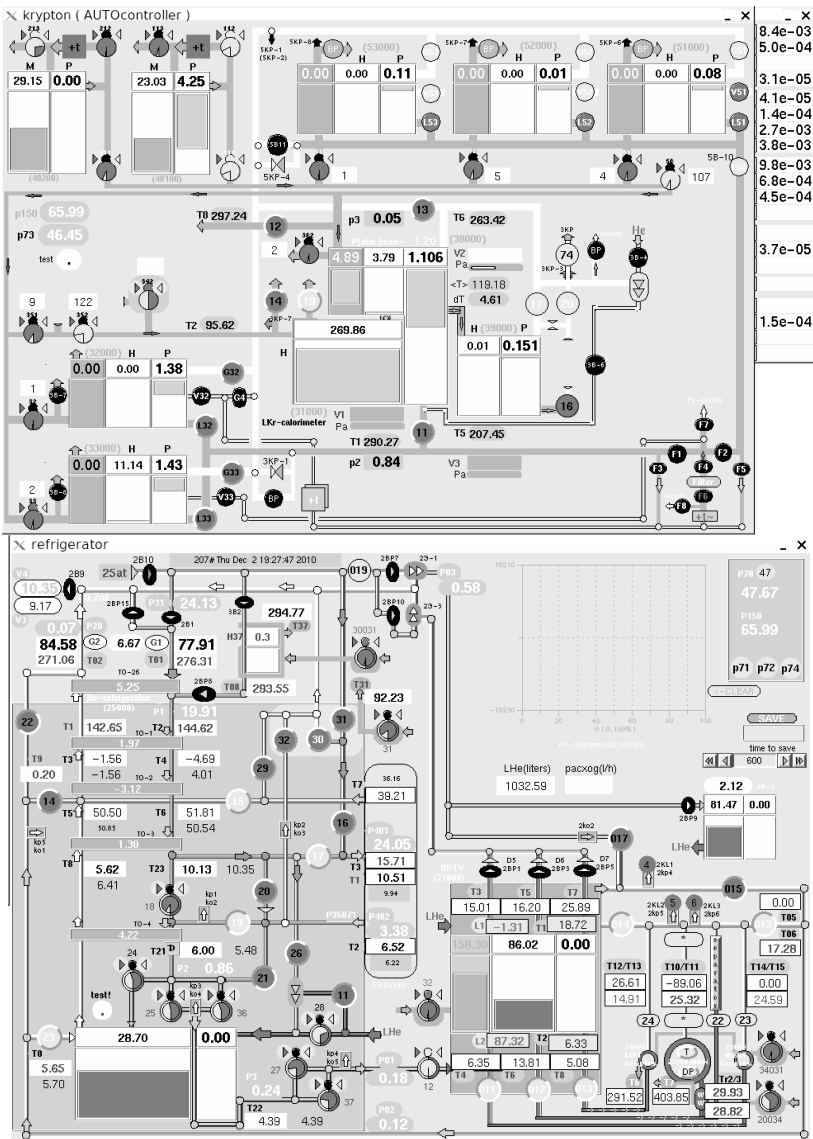


Рисунок 7. Мнемосхемы криптоновой и гелиевой систем

- приложения для графического анализа в программе goot сохраняемых в Базе данных эксперимента КЕДР параметров криогенной системы,
- вспомогательных системных утилит.

**Седьмая глава** описывает основные методики управления криогенным комплексом детектора КЕДР.

Основными режимами работы систем криогенного комплекса является обеспечение длительного хранения криопродукта и его выдача в распределительный коллектор под избыточным или минимальным давлением при заполнении или опорожнении криостатов.

Работа гелиевого рефрижератора может осуществляться в двух основных рабочих режимах: дроссельном и детандерном. Разработаны вспомогательные режимы для подготовки рефрижератора и датандера к работе, а также для отработки переходных процессов при экстренной остановке или перезапуске детандера.

**Заключение** содержит перечень результатов:

1. Создана система дистанционного управления в реальном времени криокомплексом детектора КЕДР.
2. Разработан простой программный графический интерфейс для наглядного мониторинга состояния криосистемы и управления ею в реальном времени.
3. Проведены криогенные испытания всех систем криокомплекса детектора КЕДР.
4. Смонтирована и налажена электросистема управления криокомплексом детектора КЕДР, осуществлена настройка исполнительных устройств и калибровка измерительных преобразователей.
5. Создана локальная вычислительная сеть для организации надёжной работы системы управления криокомплексом, его информационного обмена с информационными серверами детектора КЕДР и сетью Интернет.

6. Изучена специфика криокомплекса детектора КЕДР, разработаны и внедрены методики осуществления его технологических режимов.
7. Внесены различные изменения и дополнения в технологические схемы криогенного комплекса, позволившие упростить управление ним, а также снизить эксплуатационные издержки.
8. Осуществлены ряд модернизаций отдельных модулей управления, а также вычислительной платформы управляющей ЭВМ — с разработкой соответствующего программного обеспечения.
9. Созданы электронные приборы (контроллеры) и модули (в том числе в стандартах КАМАК и ВИШНЯ) для построения автоматизированных систем управления криогенными установками: контроллер микропроцессорного управления агрегатом поршневого детандера, микропроцессорный контроллер для системы пневмоуправления, модуль программируемого генератора тока в стандарте КАМАК для питания криогенных датчиков температуры во всех диапазонах рабочих температур, 8-канальный модуль в стандарте ВИШНЯ для управления силовыми цепями приводов электромеханических криогенных клапанов и другие.
10. Доработаны газовая и электрическая системы дистанционного пневмоуправления регулируемыми и запорными пневмоприводными клапанами.
11. Достигнуты основные проектные параметры функционирования криокомплекса детектора КЕДР.
12. На основе созданной системы управления введён в действие криокомплекс детектора КЕДР и в течение более 15 лет обеспечивает надёжное функционирование жидкокриптонового калориметра и сверхпроводящих магнитов в цикле ведущихся и осуществлённых — по

измерению с высокой или лучшей в мире точностью параметров целого ряда элементарных частиц:  $t$ -лептона, мезонов:  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $D^0$ ,  $D^+$ ,  $D^-$  — экспериментов.

**Основные результаты диссертации опубликованы:**

1. Анашин В.В. Детектор КЕДР / В.В.Анашин, ... , А.К.Барладян, ... // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 2013. - № 4.
2. Анашин, В.В. Детектор КЕДР / В.В.Анашин, ... , А.К.Барладян, ... // Препринт ИЯФ 2010-40. - г.Новосибирск, 2010.
3. Barladyan A., Dorohov D., Tararyshkin S. Controller of the piston-type expander machine for cryogenic system of the KEDR detector [Электронный ресурс] / A. Barladyan, D. Dorohov, S. Tararyshkin // Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia - 2006. - Режим доступа: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r06/PAPERS/MODP05.PDF>, свободный. - Яз. англ.
4. Аульченко, В.М. Пространственное разрешение калориметра на жидком криптоне детектора КЕДР / В.М. Аульченко, ... , А.К.Барладян, ... // Препринт ИЯФ 2004-29. - г.Новосибирск, 2004.
5. Anashin, V.V. Status of the KEDR superconducting magnet system / V.V.Anashin, ... , А.К.Барладян, ... // Nucl. Instr. and Meth. - 2002. - Vol. A494. - P.p.266-269.
6. Anashin, V.V. The superconducting solenoid for the KEDR detector / V.V.Anashin, ... , А.К.Барладян, ... // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. - 2002. - Vol. 12, No. 1 - P.p. 337-340.
7. Anashin, V.V. Status of the KEDR detector / V.V.Anashin, ... , А.К.Барладян, ... // Nucl. Instr. and Meth. - 2002. - Vol. A478 — P.p.420-425.



БАРЛАДЯН Александр Константинович

**Управление криогенным комплексом  
детектора КЕДР**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 31.03. 2015 г.

Сдано в набор 1.04. 2015 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*